PROSTOROVÁ DISTRIBUCE HYDROLOGICKÉHO SUCHA V ČESKÉ REPUBLICE V LETECH 1947, 1953 a 2003

Ondřej Ledvinka[1], Jitka Brzáková[1], Hana Kourková[1]

Abstrakt

Sucho, důsledek dlouhotrvajícího deficitu vody v krajině, je fenoménem, jenž v poslední době vedle povodní výrazně nabyl na významu. Sucho totiž dokáže výrazně zasáhnout do ekonomik států. Dle různých scénářů se očekává, že na světě dojde k redistribuci vody tak, že se zvětší rozpětí mezi extrémy. Na jedné straně budou některé oblasti čelit intenzivnějším povodním, zatímco jiné budou naopak sužovány delšími či silnějšími suchy. V některých místech se může dokonce jednat o časté střídání těchto extrémů. Toto vše vyzývá vědce k detailnějšímu studiu sucha a k přípravám plánů za účelem minimalizace škod jím způsobených podobně jako v případě povodní. Ovšem je třeba zdůraznit, že pojem sucho je značně relativní. Jinak sucho chápou meteorologové, jinak agronomové, jinak lesní hospodáři apod. Dokonce v samotné hydrologii není tento pojem jednoznačný. Někteří hydrologové vyvíjejí vlastní (pokud možno komplexní) metodiky k vymezování sucha, jiní se drží již známých, poměrně dlouho používaných definic. To ilustruje, jak obtížné je vůbec studium sucha. Tento příspěvek si klade za cíl zmapovat v prostředí GIS prostorové rozložení zřejmě nejvýznamnějších hydrologických such, jež v podstatě postihla území celé České republiky. Podkladem pro analýzu jsou dlouhé průtokové řady přibližně z období 1931–2007, kterými disponuje Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ), což znamená, že analýzy zahrnují jen instrumentální měření. Takto se tedy podařilo rozebrat mimořádně suché roky 1947, 1953 (1954) a 2003. Zvolen byl statistický přístup s vymezováním suchých období pomocí prahové hodnoty (kvantilu) $Q_{95\%}$. Všechny průtoky pod touto hodnotou tak byly považovány za sucho. Výpočty probíhaly v polském programu Nizowka 2003. Důležitými výstupy byla trvání (ve dnech) a deficitní objemy (v tis. m^3). Po validaci se nakonec trvání mapovala metodou inverse distance weighting (IDW), neboť (až na sucho 2003) měla chybu odhadu (RMSE) překvapivě menší než kriging. Nedostatkové objemy byly znázorňovány jako lokalizované diagramy. Avšak nebyly vynášeny přímo spočtené hodnoty, nýbrž hodnoty podělené hodnotami $Q_{95\%}$ z období 1961–2005, aby se snížil vliv rozdílné vodnosti toků. Z map je patrné, že v roce 1947 bylo území České republiky suchem postiženo téměř celoplošně. Výjimkou byl pouze severovýchod a povodí Lužnice. Ve většině stanic bylo trvání delší než 80 dní. Z pohledu závažnosti deficitního objemu převažují hodnoty větší než 1,4 (průměr 1,1). Jako nejpostiženější se jeví povodí Orlice, středního a dolního Labe, Jihlavy, Svratky a Moravy. Sucho zimního typu na přelomu let 1953 a 1954 zasáhlo celou severní část republiky s výjimkou Jizerských hor a Krkonoš. Dále byla zasažena povodí Moravy, dolní Svratky a Jihlavy. V těchto místech sucho trvalo většinou déle než 100 dní. Z hlediska závažnosti deficitních objemů je průměrná hodnota 0,9. V roce 2003 nastalo sucho v povodích horního Labe, Otavy, Lužnice, dolního Labe a Moravy. V průměru trvalo 43 dní. Pro objem vyšla průměrná hodnota 0,4.

Klíčová slova: sucho hydrologické, interpolace prostorová, GIS, Česká republika

Literatura

[1] TALLAKSEN, L. M. – VAN LANEN, H. A. J. (eds.), 2004. Hydrological Drought. Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. 1st edition, Amsterdam : Elsevier. 579 p. ISBN 978-0-444-51767-8.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav,
e-mail: ledvinka@chmi.cz,brzakova@chmi.cz,kourkova@chmi.cz

VLIV DOMINANTNÍCH METEOROLOGICKÝCH SITUACÍ NA SEZONALITU ROZVODNĚNÍ

Radek Čekal[1], Josef Hladný[1]

Abstrakt

Analýza vlivu meteorologických situací na sezonalitu výskytu povodní představuje jeden z ambiciózních metodologických přístupů ke zvýšení poznatků o režimu těchto přírodních disturbancí. K aplikaci analýzy na území České republiky bylo použito údajů ze 181 povodí (z toho 108 z povodí Labe, 21 z povodí Odry a 52 z povodí Moravy a Dyje). Vstupními veličinami byly povodňové průtoky reprezentované jejich denními průměry v jednotném referenčním období 1975-2000.

Ke klasifikaci meteorologických situací, které způsobily v referenčním období rozvodnění přesahující prahový limit 1letých průtoků bylo použito Katalogu povětrnostních situací [ČHMÚ]. Typizaci jednotlivých povětrnostních situací podle podobností prostorové polohy řídících útvarů v dynamice atmosféry (cyklonalita, anticyklonalita) upravil pro Katalog na základě předcházející méně vyhovující německé klasifikace hlavně Brádka. Prakticky šlo o rozlišování a kategorizaci cirkulačních pochodů v troposféře, které jsou ve spojitosti s projevy počasí v dané oblasti.

Vzhledem k daleko většímu rozsahu povětrnostních situací než jsou plochy studovaných povodí a s ohledem na záměr posoudit pouze dominantní roli meteorologických příčin, byly jednotlivé typy situací, identifikované vždy podle Katalogu a přisouzené každému dni v intervalu od D-10 až do D+5 (kde D je den kulminace), zkumulovány pro všechna rozvodnění v uvažovaných vodoměrných stanicích ve vymezené reprezentační oblasti. V tomto souboru byl poté brán do úvahy pro každý den ve zmíněném intervalu vždy jen jediný druh typizované situace, který se ještě neopakoval, takže vznikl podsoubor všech možných cirkulačních typů schopných vyvolat rozvodnění.

Jako reprezentační oblasti byla vybrána seskupení povodí zahrnující toky v prostoru Krkonoš a Jizerských hor, v Orlických horách, v podhůří Krkonoš, v úseku středního Labe, v prostoru Šumavy, v povodích řek Lužnice, Berounky a Sázavy, v prostoru Krušných hor, Tepelské vrchoviny, v povodích řek Odry, Opavy a Olše, dále v povodí řek Moravy, Bečvy, Svratky a Dyje.

Klíčová slova: sezonalita, povodeň, meteorologické situace, typizace povětrnostních situací.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, Praha, e-mail: cekal@chmi.cz, hladny@chmi.cz

PŘÍVALOVÉ POVODNĚ Z ČERVNA 2009 V POVODÍ ODRY

Stanislav Kaleta[1], Tomáš Řehánek[1]

Abstrakt

Na přelomu června a července roku 2009 se na území ČR vyskytlo několik lokálních přívalových povodní, které postihly také část povodí Odry. Příspěvek je zaměřen především na hydrologické vyhodnocení a analýzu průběhu těchto přívalových povodní na nejvíce zasažených tocích v oblasti Novojičínska a Jesenicka, na kterých se v rámci projektu „Vyhodnocení povodní v červnu a červenci 2009 na území ČR" podílela pobočka ČHMÚ Ostrava [1].

„V ten den byla proražena všechna zřídla ohromné vodní hlubiny a nebeské propusti byly otevřeny. A lilo na zemi čtyřicet dnů a čtyřicet nocí." (1. Mojž 7:11,12) Těmito slovy popisuje Bible mohutnou záplavu za dnů Noema v roce 2370 př. n. l. A obdobná slova o „otevřeném nebi" byla slyšet také z úst lidí na konci června roku 2009 v oblasti Novojičínska a Jesenicka. Oproti biblické apokalypse byl rozdíl v tom, že liják trval „pouze" několik hodin. Jeho následky však byly pro všechny postižené děsivé. V Moravskoslezském a Olomouckém kraji si povodeň vyžádala 12 obětí a celkové škody byly vyčísleny na více než 6,8 mld. Kč. Mnohým hydrologům, zejména služebně mladším, tato přívalová povodeň poskytla nebývalou výzvu – vyhodnodit povodeň, jejíž rychlost nástupu, extremita srážek resp. kulminačních průtoků a velikost zasažené plochy překonaly dosavadní zkušenosti.

V období od 24. června až do 5. července 2009 se na území ČR vytvářela, zejména v odpoledních a večerních hodinách, mohutná bouřková oblačnost, která měla za následek velmi intenzivní přívalové srážky, které na postižených územích způsobily extrémní bleskové povodně. Nejvýznamnější z nich se vyskytly 24. června ve večerních hodinách na Novojičínsku na pravostranných přítocích Odry (Luha, Jičínka, Sedlnice) a v noci z 26. na 27. června na Jesenicku na pravostranných přítocích Kladské Nisy (Bělá, Vidnávka, Skorošický potok, Vojtovický potok, Javornický potok). Nejvyšší jednodenní srážkové úhrny, jejichž doba opakování přesáhla 100 let, byly naměřeny v Bělotíně (123,8 mm) a Hodslavicích (120,2 mm). Tyto srážky vypadly během 2-3 hodin! Pro účely ověření průběhu a objemu povodně srážkoodtokovým modelem, byly v rastrovém formátu GIS zpracovány plošné úhrny srážek na povodí s využitím dat z meteorologického radaru v časovém kroku 15 minut. Z hlediska ukazatele nasycení vyplynulo, že zejména na Jesenicku přispělo k extrémní odtokové situaci vedle srážek i značné nasycení území, zatímco na Novojičínsku mezi významné faktory urychlující odtok vody patřily především sklonitost území a velký podíl půd s nízkou rychlostí infiltrace.

Průběh povodní na vodních tocích v územní působnosti pobočky ČHMÚ v Ostravě byl velmi rychlý. Na Novojičínsku, vlivem intenzivních přívalových srážek a sklonitého reliéfu, došlo ve večerních hodinách 24. června k rychlé koncentraci povrchového odtoku ze svahů do koryt vodních toků, jejichž hladiny velice rychle stoupaly. Nejpostiženějšími toky byla Jičínka a Luha. Na Jičínce činil nárůst povodňové vlny během 2 hodin téměř 5 metrů! Také Luha svou kulminací podstatně přesáhla úroveň teoretické stoleté povodně. Na Novojičínsku byl dále povodní velmi zasažen horní úsek toku Sedlnice v obci Ženklava, kde z plochy povodí 5,37 km^2 odtékalo asi 11 $m^3.s^{-1}.km^{-2}$ vody. Druhá přívalová povodeň se ve večerních a nočních hodinách na sobotu 27. června vyskytla na Jesenicku, kde do již velmi nasyceného území vypadly přívalové srážky. Nejhorší situace byla v povodích Vidnávky, Bělé a na okrajových pravostranných přítocích Kladské Nisy. Kulminace významně přesahující 100letý průtok byly zaznamenány na Stříbrném potoce v Žulové a na Černém potoce ve Velké Kraši. Z nepozorovaných vodních toků byla nejhorší situace na Skorošickém potoce a Vojtovickém potoce.

Vzhledem k extremitě povodně a skutečnosti, že postiženy byly především nepozorované vodní toky, bylo pro vyhodnocení kulminačních průtoků a ověření průběhu povodňových vln

využito výsledků ze srážkoodtokového modelu HEC-HMS, které byly zpracovány na pobočce ČHMÚ v Ostravě. Konečné hodnoty kulminačních průtoků pak byly stanoveny určitým kompromisem vycházejícím z porovnání výsledků srážkoodtokového modelu a hydraulického modelu HEC-RAS, které byly produktem externí spolupráce. Z uvedeného porovnání obou přístupů vyplynula poměrně dobrá shoda s výjimkou povodí Jičínky, kde hydraulický model dával podstatně větší hodnoty kulminačních průtoků. Po analýze hydrogramu ve stanici Nový Jičín byly akceptovány výsledky hydraulického výpočtu, a to z toho důvodu, že pozorovaná vlna byla značně strmější, než odhad jejího průběhu ze srážkoodtokového modelu. Hodnocení odtokových koeficientů potvrdilo fakt, že z hlediska objemů odtoků nebyla tato povodňová situace na tocích severní Moravy a Slezska nijak významná. Důsledkem extremity vyhodnocených kulminačních průtoků bylo v konečné fázi přepracování N-letých průtoků v povodích nejpostiženějších vodních toků.

Tento příspěvek prezentuje vybraná hydrologická zpracování a výsledky přívalové povodně v červnu 2009 na postižených tocích v územní působnosti pobočky ČHMÚ Ostrava. Při vyhodnocení této povodně byly poprvé využity některé přístupy, zejména modelové výpočty, jejichž výsledky poskytly cenné podklady pro stanovení a ověření především kulminačních průtoků.

Klíčová slova: přívalová povodeň, kulminační průtok, srážkoodtokový model

Literatura

[1] Vyhodnocení povodní v červnu a červenci 2009 na území České republiky, 2009. Souhrnná zpráva projektu “Vyhodnocení povodní v červnu a červenci 2009 na území České republiky.” Praha: ČHMÚ.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ostrava, e-mail: kaleta@chmi.cz

SEKCE 2

KOMPLEXNÍ MONITORING A BILANCOVÁNÍ ZÁSOB VODY V POVODÍ

VYHODNOCOVÁNÍ VODNÍCH STAVŮ A PRŮTOKŮ, UKÁZKY STANIC, PŘÍSTROJŮ A KALIBRACÍ V ČHMÚ NA POBOČCE PRAHA

Daniel Kurka[1]

Abstrakt

Příspěvek se zabývá komplexní prací hydrologa povrchových vod v ČHMÚ na pobočce Praha, to znamená měřením, zpracováním, vyhodnocováním vodních stavů a jejich následným přepočtem na průtoky. Jsou zde ukázky měření přístroji ADCP, hydrometrickou vrtulí a přehledy počtů jednotlivých typů měření za posledních 5 let. Dále jsou prezentovány možnosti softwaru Win ZPV (program na základní zpracování povrchových vod) – přepočet vodních stavů na průtoky, bilancování průtoků v měrných profilech, zpracování měrných křivek. Poslední část je věnována hydrologickým stanicím na vodních tocích, typem přístrojů používaných v současnosti, jejich kalibrace a statistický přehled na pobočce Praha.

Klíčová slova: práce hydrologa, povrchové vody, měření průtoků, měrné křivky

1. Úvod

Pobočka ČHMÚ v Praze zabezpečuje základní činnosti v oblasti monitoringu a primárního vyhodnocování povrchových a podzemních vod. Tento příspěvek popisuje práci hydrologa pobočky v oblasti pozorování a vyhodnocování kvantitativních charakteristik povrchových vod. Představeny jsou krátce základní pracovní postupy, pracovní pomůcky a software pro základní zpracování hydrologických dat ve stavu používání v roce 2010.

2. Měření vodních stavů

Jednou z nejdůležitějších činností hydrologa je získání co nejpřesnějších vodních stavů, které jsou zaznamenávány v hydrologických stanicích. Základem hydrologické stanice je i v 21. století vodočet, proto zatím všechny využívané stanice jsou vodočetnou latí osazeny. Podle vodočtu jsou nastavovány všechny ostatní přístroje ve stanici, proto také dochází k pravidelné kontrole vodočetné latě (geodetickým zaměřením v celém jejím rozsahu) a to v pravidelných intervalech s cílem zabezpečit jejich maximální přesnost. V případě odchylek jsou používány přepočítávací tabulky (zatím jsou v podobě tabulky Excel a postupně jsou převáděny do databáze Win ZPV), cílem však je podle finančních možností vodočty opravit. Hydrolog stanici navštěvuje podle potřeby minimálně 2x do roka, hlavně za účelem měření, údržby a kalibrace. O každé návštěvě je veden záznam včetně vodního stavu a je uložen v databázi Win ZPV (v deníku stanice).

K zaznamenávání stavů na pobočce Praha jsou používány tři druhy měřicích stanic. Na několika stanicích jsou ještě osazeny klasické analogové limnigrafy, které 1x za týden nastavují pozorovatelé a 1x za měsíc je limnigraf zasílán na pobočku k digitalizaci a uložení v podobě řady lomových bodů do databáze Win ZPV. Další využívané zařízení jsou nepřenosové stanice (Noel, Teranos), kde je nastaven digitální záznam 1x za 10 minut. Tyto stanice jsou cca 1x za měsíc navštíveny pracovníkem pobočky, který stáhne data a následně je naimportuje do databáze Win ZPV. Nejrozšířenější stanicí na pobočce Praha je stanice s digitálním záznamem a s přenosem dat přes GPRS (stanice Fiedler), na této stanici je nastaven záznam 1x za 10 minut a přenos ve většině stanic 1x za 20 minut při dosažení II. povodňového stupně se stanice automaticky přepíná na přenos 1x za 10 minut. Data z přenosových stanic se automaticky ve stejných intervalech posílají do databáze HPPS a odtud se jednou denně replikují do databáze primárního zpracování Win ZPV.

Všechna takto získaná data se pak v Win ZPV kontrolují, konfrontují se záznamem stavů v deníku stanice a pomocí nástrojů v programu se mohou upravovat (lineární, skokové posunutí za daný interval, vynásobení hodnot v časovém intervalu atd.).

3. Měření průtoků

Další neméně důležitou činností hydrologa je měření průtoků. Měření se provádí převážně pro ověření stávajících měrných křivek nebo pro sestrojení nových vždy s unikátní číselnou identifikací (v roce 2009 bylo uděláno cca 400 měření). V omezené míře provádíme rovněž měření na zakázku.

Měření na naší pobočce provádíme dvěma způsoby - hydrometrickou vrtulí a přístrojem ADCP (Acoustics Doppler Current Profiler), který funguje na principu Dopplerova jevu (průchod akustického signálu vodním prostředím a jeho odraz od nesených pevných částic a dna koryta).

První způsob hydrometrickou vrtuli je používán převážně na menších tocích (při malých hloubkách přibližně do 20 cm nelze použít přístroj ADCP). Klasická hydrometrická vrtule je rovněž užívána při tradičních společných měření s německou stranou v profilu Hřensko na toku Labe. Pro měření jsou používány jen pravidelně kalibrované vrtule (platnost kalibrace 2 roky). Měření se na místě zapisuje na papír a pak se naměřené údaje přepíšou do programu Hydros a z toho se následně exportují do programu Win ZPV. Vypočítané hodnoty se ještě zapisují do knihy měření. Za rok 2009 bylo uděláno cca 150 měření hydrometrickou vrtulí.

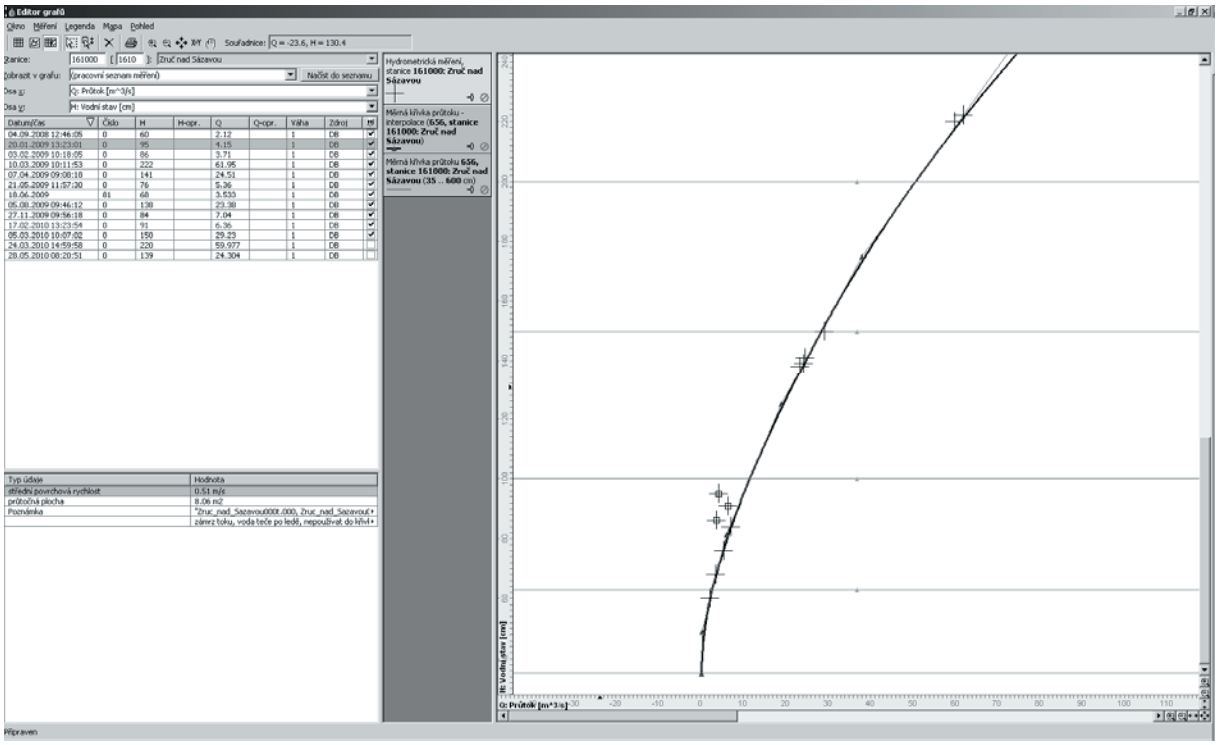
Druhý způsob, který je na naší pobočce více rozšířen a také preferován, je měření pomocí přístroje ADCP. Používáme dva přístroje na velké toky ADCP Rio Grande a na malé toky ADCP StreamPro. Pro podrobnější informace odkazuji na příspěvek Fryče v tomto sborníku nebo na příspěvek ČHMÚ (2007). Dále je jen velmi krátce zmíněn základní postup měření. Plovák s přístrojem se umístí na hladinu toku, naváže se spojení přes modemy s počítačem na břehu, nastaví se parametry (vzdálenost od břehu, pravý či levý břeh druh dna, druh břehu atd.) a jakýmkoliv způsobem se plovák přetáhne na druhý břeh. Postup se několikrát opakuje. Na počítači je okamžitě vidět jak se průběžně načítá změřený průtok, jaké jsou rychlosti, hloubka atd. Takto získané (většinou jen málo se lišící) průtoky jsou dále zpracovány v programu Agila, jež vyhodnotí rozptyl provedených měření a stanoví jednu reprezentativní hodnotu, která se následně v kanceláři exportuje do programu Win ZPV. Hlavní výhodou tohoto způsobu měření je okamžitý přehled o průtocích a rychlost získaní hodnot průtoků (v roce 2006 byly při jarní povodni zaměřeny všechny kulminace a i největší průtok změřený v ČR 2711 $m^3.s^{-1}$). Zkušenosti prokazují rovněž vysokou přesnost výsledků, hlavně při větších průtocích. Za rok 2009 bylo touto metodou provedeno cca 250 měření.

4. Sestrojení měrné křivky průtoku

K základní práci hydrologa patří sestrojování a opravy měrných křivek. V přírodě se stále něco mění, proto v přirozeném korytě stále dochází ke změně a tím i ke změně měrných křivek, většinou se průběhu roku koryto zanáší a když projde povodeň tak se pročistí, ale může dojít naopak k jeho zanešení. Také na pobočce Praha se v ojedinělých (naštěstí) případech stává, že koryto v průběhu vegetačního období postupně zarůstá a tím se mění průtočný profil. Z toho vyplývá, že je potřeba v průběhu roku stále profily zaměřovat, někde častěji (tam kde zarůstá a zanáší se) a někde jen pro kontrolu, kde je stabilní dno. V průměru za rok 2009 se ve stanicích měřilo cca 4x za rok, ale v problémových stanicích i 10x za rok a více. Hydrolog proto několikrát do roka musí porovnávat výsledky měření s měrnou křivkou, a pokud dochází k odchylkám tak musí sestrojit novou měrnou křivku, také už ví, které profily jsou problematické a těm věnuje z tohoto ohledu zvýšenou pozornost. Při plánování měření musí hydrolog kontrolovat jaké stavy jsou již proměřeny (aby se neměřilo stále při stejném stavu) a provádět měření při stavech, které ještě nebyly změřeny, proto se nejvíce měří při povodni, aby se proměřily stavy, které se nevyskytují často.

Po měření pak může hydrolog přistoupit k sestrojování měrné křivky v programu Win ZPV, kde si může načíst hydrometrické měření, starou měrnou křivku a příčný profil. Měrná křivka

se většinou (když není změřen nějaký větší průtok) upravuje v její spodní části podle aktuálních měření a pokud nemáme důvod k úpravě horní části, tak se jí snažíme zachovat v původní podobě, aby zůstaly zachovány změřené povodňové stavy a odpovídající průtoky. Pro kontrolu, nebo při sestrojování úplně nové křivky, přepočítáváme měrnou křivku přes příčný profil na profilové rychlosti a tato rychlostní křivka by měla dosahovat reálných hodnot v našich podmínkách v rozmezí 2–3,5 $m.s^{-1}$ podle druhu toku by se těmto hodnotám měla limitně blížit. Takto vytvořená měrná křivka v parametrickém tvaru se pak ve Win ZPV převede na tvar tabelární a určí se její doba platnosti, potom se křivka odešle do databáze Hydrofondu (v ČHMÚ) na hlásnou službu HPPS a příslušným státním podnikům Povodí.



Obr. 1: Ukázka editačního prostředí pro sestrojení měrné křivky v aplikaci Win ZPV na příkladě stanice Zruč nad Sázavou.

5. Výpočet průtoků ve stanicích

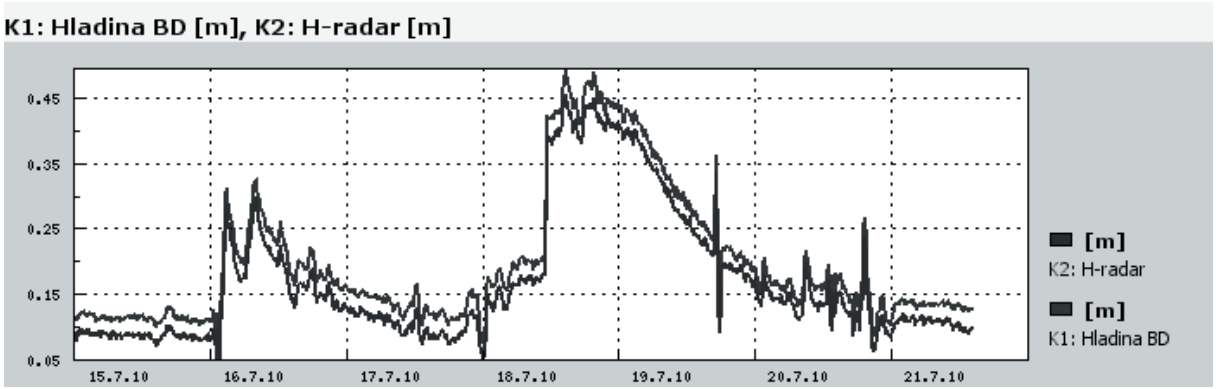
Po skončení kontroly jednotlivých stavů a kontroly měrných křivek můžeme přistoupit k vyhodnocení průtoků. Průtoky se z 90 % vypočítávají přepočtem ze zaznamenaných stavů přes měrné křivky. Standardně to probíhá v měsíčním kroku a po jednotlivých povodích, ale lze zadat i libovolný časový interval. Při tomto výpočtu v programu Win ZPV dochází k přepočtu zvolené stavové řady (lomových bodů, digitálního záznamu atd.) určité stanice přes příslušnou měrnou křivku zvolené stanice na průměrné hodinové stavy, průměrné denní stavy, průměrné měsíční stavy, měsíční stavovou okamžitou kulminaci a na průměrné hodinové průtoky, průměrné denní průtoky, průměrné měsíční průtoky, měsíční průtokovou okamžitou kulminaci.

U zbylých 10 % se průtoky vypočítávají bilančně z okolních stanic se započtením mezipovodí a doběhových dob. Takto vypočtené průtokové řady se pak kontrolují se skutečně naměřenými průtoky v jednotlivých stanicích, dále se kontrolují návaznosti jednotlivých stanic a bilanční uzly. Všechny tyto kontroly lze zobrazit jak graficky tak v tabulkové formě v programu Win ZPV. Po zkontrolování se data v pravidelných intervalech posílají do databáze Hydrofondu a jednou ročně se ukládají. Po zkontrolování dat pracovníky Hydrofondu ještě jednotliví technici a vedoucí skupiny povrchových vod průměrné denní průtoky autorizují svým podpisem.

6. Standardní hydrologická stanice

Požadavky na standardní hydrologickou stanici v roce 2010 na pobočce Praha jsou následující. Každá stanice i stanice režimová by měla být s přenosem dat s možností dálkového ovládání s komunikací přes GPRS. Stanice je možné rozdělil na dvě kategorie, na stanice využívané v hlásné a předpovědní povodňové službě a na ostatní. Hlavní rozdíl je v nastavení přenosu dat. Hlásné stanice se v roce 2010 stahují 1x za 20 minut, při dosažení II. povodňového stupně se interval přepne na stahování 1x za 10 minut. U ostatních stanic je stahování nastaveno 1x za 8 hodin a při dosažení II. povodňového stupně se interval přepne na stahování 1x za 1 hodinu.

Všechny stanice by měly mít možnost nastavování varovných SMS při dosažení určitých limitů výšky hladiny nebo při zaznamenání extrémních technologických podmínek na stanici, na pobočce Praha jsou nastaveny varovné SMS na překročení I., II. a III. povodňového stupně, dále pak na nízké napětí akumulátoru, u stanic se solárním panelem i odpojení solárního panelu (většinou se jedná o ukradení). Standardní stanice by také měla mít dvě nezávislá čidla to znamená třeba kombinace radar, plovákové čidlo, tlakové čidlo v šachtě, tlakové čidlo v chráničce. V případě kombinace dvou tlakových čidel je vhodné zvolit čidla nejlépe od dvou výrobců nebo alespoň dvě různé série. (U tlakových čidel jsou všechny hadičky pro kompenzaci atmosférického tlaku vyústěny do silicagelové patrony, která zabraňuje pronikání vlhkosti do čidla, tyto patrony jsou podle vlhkosti cca 1x za 4 měsíce vyměňovány.) Zároveň jsou na sběrném serveru nastaveny varovné maily, které upozorňují na určitý rozdíl mezi jednotlivými čidly. Pokud se tedy údaje ze dvou čidel ve stanici rozchází o více než 2 cm (podle podmínek), je vygenerován informační e-mail, na jehož základě je provedena kontrola dat a v případě potřeby návštěva a kontrola stanice. Pokud však obě čidla ukazují stejně, není důvod na stanici jezdit. Na stanici je také dobré mít teplotní čidlo umístěné v chráničce, částečně může nahradit pozorování ledových jevů při vykazované teplotě blízké 0 °C a současně srážkami neopodstatněném nárůstu hladiny svědčícím o možnosti vzdouvání ledem.



Obr. 2: Ukázka operativního porovnání měření dvou nezávislých čidel (na příkladě stanice Jablonec nad Jizerou a měření radaru a tlakového čidla), které slouží pro vzdálenou kontrolu funkčnosti a správnosti měření stanice.

Významným faktorem je problematika kalibrace měřicích zařízení. U každé nově dodávané stanice (cca poslední 2 roky) je vyžadována kalibrace s kalibračním listem na tlaková čidla. Kromě toho byla i u starších stanic provedena kalibraci jednotlivých kanálů vlastními zaměstnanci pomocí kalibrátoru Druck UPS III. Údaje o kalibraci jsou uloženy v Excel souboru (postupně je evidence převáděna do databáze Win ZPV). U nově dodávaných čidel je rovněž požadována či prováděna kalibrace a nejlépe u nezávislé organizace, tedy nikoliv u výrobce.

7. Statistický přehled

Tab. 1: Statistický přehled počtů a druhů stanic a provedených měření metodou ADCP i klasickým hydrometrováním za posledních 5 let.

Druh stanice	2005	2006	2007	2008	2009
Vodočetné	1	1	0	0	0
Limnigrafické	15	12	10	7	4
Digitální záznam bez přenosu	38	36	33	28	27
Digitální záznam s přenosem	29	33	39	47	51
Celkem stanic	83	82	82	82	82
Měření ADCP	186	150	144	249	248
Měření hydrometrickou vrtulí	275	282	195	127	149
Celkem měření ve stanicích	461	432	339	376	397

Literatura

[1] ČHMÚ, 2007. Měření průtoků systémem ADCP při povodních v roce 2006. In: *Hydrologická ročenka ČR 2006.* ČHMÚ, s. 153-156.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Praha, e-mail: kurka@chmi.cz

MĚRNÁ KŘIVKA PRŮTOKU – ZÁSADNÍ FAKTOR KVALITY HYDROLOGICKÝCH DAT

***Pavel Polcar*[1]**

Abstrakt

Příspěvek upozorňuje na důležitost procesu transformace napozorovaných dat o výšce hladiny na údaje o průtoku, úskalí soudobých a budoucích řešení tohoto procesu a dopady na kvalitu výsledných průtokových řad.

Klíčová slova: měrná křivka průtoku (MKP), kvalita hydrologických dat

1. Úvod

Motto:
Měrná křivka průtoku zdá se být jen nepříjemným a nudným zdržením na cestě od záznamu vodního stavu ke skvělým hydrologickým objevům...

Současná dostupnost technologického vybavení umožňuje relativně snadno instalovat a provozovat monitoring výšky hladin v povrchových tocích. Vzniká tak řada nových vodoměrných profilů zakládaných různými organizacemi vedle tradičních provozovatelů monitoringu, kterými jsou ČHMÚ a podniky Povodí. Kvalita těchto nově vznikajících dat je však mnohdy diskutabilní, a to zejména s ohledem na jejich transformaci z údajů o výšce hladiny na odpovídající velikost průtoku. Konstrukce a udržování aktuálnosti měrných křivek představuje časově a kapacitně velmi náročnou práci, kterou ve svých úvahách zakladatelé nových vodoměrných profilů většinou podceňují. Následující text by snad mohl pomoci některé zjednodušené představy o aplikaci měrných křivek korigovat.

2. Proložení a tvar MKP

Nástup personálních počítačů v poslední dekádě 20. století umožnil nahradit ruční grafickou práci (proložení křivky polem bodů reprezentujících hydrometrická měření) optimalizovaným výpočetním postupem. Toto řešení může svádět k domněnce, že odstranění subjektivního přístupu zpracovatele objektivní matematikou povede ke zkvalitnění výsledku. Taková představa je ovšem zcela mylná. Komputerizace proložení přináší sice podstatnou úsporu zdlouhavé ruční práce a nezanedbatelný komfort (variantní a současné zobrazení více křivek, snadná změna měřítka, apod.), do konstrukce křivky však nepřináší žádný kvalitativně nový prvek. Naopak, automatická bezmyšlenková aplikace může způsobit chybné zhlazení tvarových nuancí křivky a vnést tak do výsledku zcela zbytečnou ztrátu přesnosti. U většiny měrných profilů nelze vystačit pouze s jedinou rovnicí měrné křivky pro celý rozsah vodních stavů. Je zcela evidentní, že strmost křivky v kynetě bude jiná než v rozlehlé inundaci. Stejně zřejmé je, že v profilech stabilizovaných měrnými prahy je v mnoha případech vytvářeno vzdutí, které je nutno popsat jiným typem rovnice než režim proudění za vyšších stavů, kdy vzdutí nízkým prahem zaniká. V našich podmínkách je nutné tímto způsobem přistupovat i k většině profilů přirozených. Za velmi nízkých stavů se zde vyskytuje vzdutí, způsobené nerovnostmi dna. Kapacitu vodoměrného profilu pak určuje zpravidla nějaký omezující příčný profil, který leží v určité vzdálenosti po proudu pod stanicí a jehož působení je podobné vlivu vzdouvacího prahu (obr. 1). V zahraniční literatuře [1] [2] je tento režim proudění nazýván „section control“, čímž se rozumí, že určujícím prvkem průtočnosti je nejbližší omezující příčný profil.



Obr. 1: Kaskáda vzdutých úseků Otavy v Písku při nízkém vodním stavu

Režim proudění za vyšších stavů je nazýván „channel control“, což vyjadřuje výškové pásmo vodních stavů, ve kterém jsou určujícím faktorem průtočnosti hydraulické vlastnosti říčního koryta. Je to oblast, kde se již neprojevuje vzdutí dnovými útvary (nebo umělým prahem) a kde lze při určitém zjednodušení předpokládat proudění rovnoměrné (lépe řečeno kvazirovnoměrné) a pro odhad průtoku lze použít např. Chézyho rovnici. Mezi oběma oblastmi leží ještě přechodné pásmo („compound control“). Z toho vyplývá, že i v běžném výškovém rozsahu, kdy ještě nemusíme řešit vybřežení, máme na většině vodočetných profilů co do činění se třemi výškovými pásmy měrné křivky, které nelze vyjádřit jedinou společnou rovnicí. Hranice mezi těmito pásmy mohou být (a většinou bývají) obtížně identifikovatelné, neboť detailní tvar křivky se ukrývá v rozptylu hydrometrických měření, který je způsoben chybami měření nebo časovými změnami dnových útvarů. Při vývoji softwaru pro konstrukce měrných křivek, který je v ČHMÚ používán (WinZPV), byl proto kladen důraz na flexibilitu řešení, libovolnou volbu výškových pásem („rozpad“ jedné rovnice na více rovnic zvlášť pro každé pásmo), snadné možnosti subjektivního zásahu a propojení s dalšími podstatnými informacemi, které nelze v řešení opomíjet. Takovou informací je především velikost a tvar příčného profilu v místě vodočtu, eventuálně dalších charakteristických příčných profilů, které jsou součástí databáze a je možno s nimi pracovat. Rychle a jednoduše tak lze měrnou křivku převést na rychlostní křivku profilu ke kontrole rozmezí středních profilových rychlostí nebo naopak extrapolací středních profilových rychlostí získat extrapolovanou měrnou křivku průtoku. U složených profilů lze celé řešení provádět po částech. Program obsahuje také hydraulický modul s jednoduchými výpočty Manningovy formy Chézyho rovnice. Po zadání podélného sklonu hladiny a součinitele drsnosti tak lze provádět odhady průtoku v pásmech absence měření nebo obráceně - převádět již hotovou měrnou křivku na průběh součinitele drsnosti ve výškovém pásmu „channel control“ a ověřovat tak věrohodnost řešení. Všechny vyjmenované postupy jsou však jen pouhými nástroji v rukou zpracovatele. Kvalitu výsledného řešení určuje podstatný faktor, který se naprogramovat nedá. Tímto faktorem je vedle objektivních okolností (počet a rozsah hydrometrických měření, stabilita měrného profilu) především kvalita zpracovatele (znalosti a zkušenosti hydrologa).

3. Extrapolace

Tradičně největším problémem jsou extrapolace horního konce měrných křivek, tedy do pásma rozlivů a vysokých povodňových stavů. V tomto pásmu bývá nejméně hydrometrických měření, což má řadu snadno pochopitelných příčin – nízkou frekvenci výskytu, krátké trvání, obtížnost až neproveditelnost hydrometrických měření, nedostupnost profilů a v neposlední řadě i ohrožení zdraví či života měřičů. Extrapolace proto jsou a ještě

dlouho budou běžnou součástí práce „konstruktéra“ měrných křivek. Snaha o zkvalitnění extrapolací v širokém měřítku všech technických pracovišť ČHMÚ byla hlavním důvodem zavedení možnosti hydraulických výpočtů do programu WinZPV. Tyto výpočty jsou však zatím omezeny na jeden charakteristický příčný profil, představují spíše jakýsi dobře podložený odborný odhad, který je nutno dále zpřesňovat hydrometrickými měřeními nebo simulací matematickými modely proudění, které pracují v soustavě více příčných profilů. Tato praxe je v posledních letech běžná a uplatňuje se po výskytu všech velkých povodní (1997, 2002, 2006, 2009, 2010). ČHMÚ pak zpravidla objednává tyto práce jako externí dodávky specializovaných firem.

Není třeba zdůrazňovat, že chybná extrapolace způsobuje fatální důsledky v kvalitě napozorovaných průtokových řad a jejich dalším použití. Po výskytu srpnových povodní roku 2002 musela být v zasažených povodích přepracována návrhová data N-letých průtoků. Důvodem nebyl jen výskyt extrémní povodně, která byla na většině postižených stanic absolutně největší za dobu instrumentálního pozorování. V mnoha případech průchod povodňové vlny ozřejmil způsob protékání staničních lokalit v extrémních podmínkách. Pro řadu stanic pak byly na základě stop kulminační hladiny sestaveny matematické modely proudění umožňující zpřesnit hodnoty kulminačních průtoků. Ty byly nezávisle stanoveny i extrapolačními metodami ČHMÚ a vzájemně porovnány. Dlužno říci, že ve většině případů bylo dosaženo dobré shody, považujeme-li vzájemné odchylky v hodnotách kulminačních průtoků menší než 10 % za uspokojivé. Kromě toho se někde podařilo provést i přímá velmi cenná hydrometrická měření za extrémních stavů, jejichž výsledky byly do řešení samozřejmě zahrnuty. Celkový soulad průtokového vyhodnocení byl současně prověřován bilancováním průchodu povodňových vln soustavou stanic. Vedlejším efektem komplexu těchto prací byly nové extrapolace měrných křivek, které musely být v některých případech uplatněny i zpětně. V takových případech bylo pak nutné opravit i kulminace větších povodní v historických řadách. Na následné změně návrhových hodnot Q_N se tak podílely vedle výskytu extrému ještě opravy některých datových řad.

4. Krátkodobé časové změny MKP

Diskutabilním problémem je dynamická hystereze měrných křivek, všeobecně známý jev popsaný a teoreticky vysvětlený v odborné literatuře, nicméně praktických zkušeností dovedených do konkrétních číselných hodnot je u nás minimum. Dynamická hystereze je významná pouze při výskytu strmých povodňových vln. Bohužel jejich průchod vodoměrným profilem je většinou spojen se současně probíhající morfologickou změnou tvaru koryta a to i v případech stanic stabilizovaných dnovými prahy. I kdybychom měli kapacitu a technické možnosti provádět sérii hydrometrických měření na vzestupné i sestupné větvi vlny, výsledky budou vždy ovlivněny oběma jevy, které od sebe nelze prakticky oddělit. Pro teoretický odhad velikosti dynamické hystereze lze použít Jonesovu rovnici ve tvaru:

$$Q_{neust}/Q_{ust} = (1+1/v_{post} \,.1/i \,.\, dh/dt)^{1/2}$$

vyjadřující poměr velikosti neustáleného a ustáleného průtoku, kde v_{post} je postupová rychlost povodňové vlny, i je sklon ustálené hladiny a dh/dt je gradient časové změny vodního stavu. Kladné znaménko v závorce platí pro vzestupnou větev vlny, pro sestupnou je třeba jej změnit na záporné. Z rovnice lze odvodit dvě všeobecné zásady – čím větší strmost povodňové vlny (gradient změny stavu) a čím menší podélný sklon hladiny při ustáleném proudění, tím větší je vliv dynamické hystereze. Podle doporučení uvedených v literatuře [1] [3] má smysl zabývat se dynamickou hysterezí pouze u toků s malým podélným sklonem dna, jehož hodnota se blíží 1 promile nebo je menší. Druhým kritériem je potenciální velikost dynamické hystereze, která by měla být alespoň srovnatelná s pravděpodobnou chybou měření velkých průtoků. Doporučená spodní hranice je cca 8 – 10 procent, pokud vychází odhad menší, bude vliv hystereze promíchán s chybami měření a to i v podmínkách ideálně stabilního profilu.

Abychom citovaná doporučení převedli do praxe, byl učiněn pokus o výpočet možného vlivu hystereze na výběru stanic v povodí horní Vltavy. Jako stanice s největším potenciálním

vlivem dynamické hystereze byl vyhodnocen Písek na Otavě díky malému podélnému sklonu dna (0,0008) a výskytu poměrně strmých povodňových vln. U nejstrmější vlny (max. gradient 60 cm/hod) byla zjištěna největší odchylka od ustáleného průtoku velikosti 6 %. Avšak i v Písku, stejně jako u ostatních hodnocených stanic, se ukazuje, že velikost největších odchylek je menší než očekávaná chyba měření povodňových průtoků. Je tedy zřejmé, že kvantifikovat dynamickou hysterezi v takových podmínkách přímým měřením je více než obtížné. Výsledky výpočtů jsou podle velikosti seřazeny v tabulce 1.

Tab. 1: Příklady vlivu dynamické hystereze (odhad dle Jonesovy rovnice)

Img. stanice	tok	sklon dna	vlna z roku	max. gradient	post. rychlost	Qneust./Qust
Nový Jičín	Jičínka	0,0025	2009	114 cm / 10 min	2,50 $m.s^{-1}$	1,14
Písek	Otava	0,0008	1940	60 cm / 1 hod	1,60 $m.s^{-1}$	1,06
Č. Budějovice	Vltava	0,0013	2002	50 cm / 1 hod	1,50 $m.s^{-1}$	1,03
Pilař	Lužnice	0,0014	2002	32 cm / 1 hod	0,94 $m.s^{-1}$	1,03
Bechyně	Lužnice	0,0016	2002	50 cm / 1 hod	1,30 $m.s^{-1}$	1,03
Roudné	Malše	0,0015	2002	28 cm / 1 hod	1,38 $m.s^{-1}$	1,02
Podedvory	Blanice	0,0080	2009	20 cm / 10 min	1,70 $m.s^{-1}$	1,01

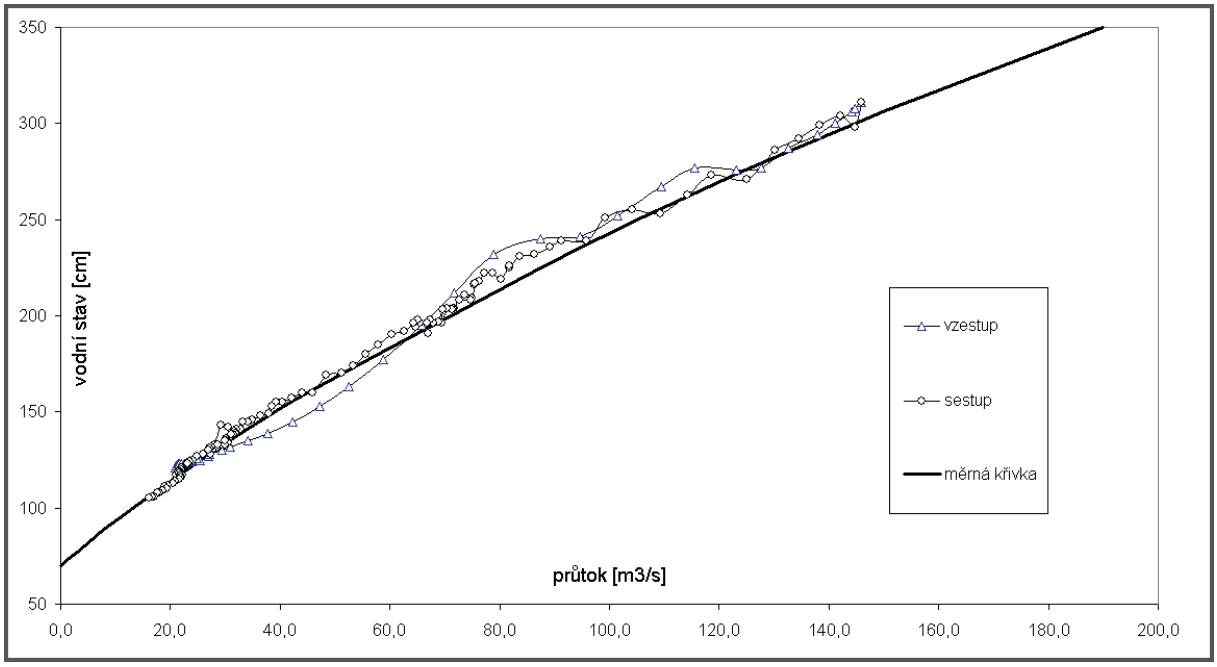
Zajímavý přístup ke kvantifikaci dynamické hystereze je popsán v [4]. Předmětem části této práce je rozbor průběhu mimořádné povodňové vlny z června 2009 na řece Jičínce ve vodoměrné stanici Nový Jičín. Průchod vlny byl simulován matematickým modelem neustáleného proudění HEC-RAS 4.0. Simulovaný časový průběh průtoku pak ve vazbě na limnigrafický záznam vodního stavu vytvořil pravděpodobný obraz hysterezní smyčky. Nezávisle byly provedeny výpočty pomocí Jonesova vzorce a výsledky porovnány. Obě metody vykázaly ve výsledcích velmi dobrou shodu. Největší odchylka neustáleného průtoku na vzestupné větvi vlny od průtoku ustáleného dosáhla až 14 %. Vzhledem k poměrně velkému sklonu dna (0,0025) je to neočekávaně velká hodnota. Vysvětlení spočívá v mimořádné extremitě gradientu vodního stavu, který zde v maximu dosáhl až neuvěřitelné velikosti cca 1 m za 10 minut (viz Tab.1 – první řádek). Z hlediska přesnosti výsledků je však nutné mít na paměti souběžně probíhající morfologické změny koryta, kterými byl zcela jistě ovlivněn záznam vodního stavu. Nicméně práce přináší potěšující zjištění, kterým je potvrzení oprávněnosti použití jednoduché Jonesovy metody pro odborné odhady velikosti dynamické hystereze.

Lze tedy jen doporučit aplikaci Jonesovy metody k prověření potenciálně náchylných vodoměrných stanic na případech reálných vln, tak jako to bylo učiněno v případě povodí horní Vltavy. Domnívám se však, že výsledky povedou k obdobnému závěru: Vliv dynamické hystereze měrné křivky v našich podmínkách je v absolutní většině případů překryt mnohem markantnějšími změnami dalších faktorů, které během průchodu povodňové vlny ovlivňují kapacitu říčního koryta, v nichž dominantní roli hraje tvarová změna průtočného průřezu.

Z hlediska kvality měrné křivky v oblasti povodňových průtoků může být na některých stanicích významným jevem i tzv. hystereze kinematická, která souvisí se vzájemnou výškovou polohou hladin nad a pod vodoměrným profilem. Na rozdíl od hystereze dynamické, kde je rozdíl podélného sklonu hladiny při neustáleném proudění způsoben pouze průchodem povodňové vlny, v případě kinematické hystereze je přídavný sklon hladiny způsoben velmi odlišným tvarem říčního koryta a přilehlého terénu nad a pod vodoměrným profilem. Typickým příkladem může být stanice Pilař na Lužnici, kde je říční koryto nad měrným profilem ohrázováno, zatímco těsně pod profilem prudce klesá úroveň obou břehů. Konfigurace koryta pod profilem tak způsobuje rozsáhlé rozlivy i za vodních stavů, kdy je proud nad profilem ještě sevřen bočními hrázemi. Při průchodu povodňové vlny

tak dochází k rozdílnému chování hladiny nad a pod vodoměrným profilem. Zatímco v ohrázovaném korytě nad stanicí hladina reaguje bezprostředně na změnu průtoku, v prostoru pod stanicí dochází k pomalejšímu vzestupu či poklesu vlivem plnění či prázdnění rozlehlých inundací. Ve vodoměrném profilu to pak vyvolává v různých fázích průchodu vlny různý sklon hladiny odlišný od sklonu při ustáleném proudění. Tento přídavný sklon může být až o řád vyšší než při běžné dynamické hysterezi. Kvantifikaci jevu je možno provést pouze přímým měřením při výskytu povodňové vlny nebo simulací modelem neustáleného proudění. Obdobné problémy související se změnou sklonu hladiny může způsobovat proměnlivé vzdutí v úseku řeky pod profilem. To může být zaviněno nejčastěji povodňovou situací na přítoku, pokud vyloučíme nevhodně situované případy stanic v dosahu vzdutí pohyblivých vzdouvacích objektů. Všechny tyto výše popsané komplikace lze označit souhrnným názvem hystereze, neboť vztah mezi vodním stavem a průtokem opisuje více nebo méně složité smyčky a po obnovení počátečních hydraulických podmínek se vrátí na původní hodnoty. V tom tkví nebezpečí těchto jevů – probíhají skrytě a pokud neprovádíme hydrometrická měření průběžně po dobu trvání vlny, nelze je zpětně měřením kvantifikovat.

Pro představu, s jakou přesností vystihuje měrná křivka průtočnou kapacitu vodoměrného profilu při průchodu extrémní povodňové vlny, byl sestrojen graf na obr. 2. Byl získán bilančním výpočtem přítoku do nádrže Husinec na Blanici během průchodu extrémní vlny na konci června 2009 (Q_{kulm} cca 50 až 100letý). Vypočítané přítoky jsou vyneseny proti záznamu vodního stavu přítokového limnigrafu v Podedvorech. Oscilace kolem pravděpodobné střední měrné křivky mohou mít více příčin: pohyb splavenin - odplavení balvanů břehového opevnění, z nichž největší měl váhu několika set kilogramů, vytváření dočasných překážek ze splávi, tvarové změny profilu. V úvahu je nutné vzít i možné chyby či nepřesnosti výpočtu. Vliv dynamické hystereze v tomto případě můžeme zcela pominout (viz Tab.1 – poslední řádek).



Obr. 2: Krátkodobé oscilace průtoku při průchodu extrémní povodňové vlny

5. Dlouhodobé časové změny MKP

Na rozdíl od hysterezních jevů lze měřením zpětně prokázat morfologické změny říčního koryta. Změna tvaru a velikosti průtočného průřezu je nejčastější příčinou změn měrných křivek. Periodické střídání erozivních a sedimentačních procesů je přirozeným projevem pohybu vody v krajině. Pokud nechceme všechny měřené úseky toků přebudovat v betonová koryta, musíme se smířit s tím, že s obdobnou periodicitou je nutné měnit i měrné křivky. Zatímco však přírodní proces tvarování koryta probíhá spontánně v závislosti na unášecí schopnosti říčního proudu, tvorba a korekce měrných křivek je činnost pohříchu antropogenní, reagující na změny s nevyhnutelným menším či větším zpožděním. Pro opravu měrné křivky je zpravidla potřeba alespoň dvou či (lépe) více hydrometrických měření za různých vodních stavů, jejichž získání trvá určitou dobu (cca několik měsíců). Pokud je změna profilu náhlá (průchod vlny), lze alespoň zhruba určit její časovou polohu a novou měrnou křivku uvést do života se zpětnou platností. Pokud však změna probíhá pozvolna nebo její časovou polohu nelze přesněji určit, nutně vznikají v určitém období na konci platnosti staré křivky diference vyčíslených průtoků od průtoků reálných. U pozvolna probíhajících změn říčních koryt se tomuto jevu ani při nejlepší vůli nelze vyhnout, neboť měrnou křivku měníme skokově. Metoda pozvolné změny měrné křivky zatím nebyla vynalezena. Určitou redukci tohoto nepříjemného problému přináší výstavba stabilizačních prahů v měrných profilech. Ale ani dobře navržený a fungující práh nemůže daný jev zcela odstranit, protože průtočnou kapacitu ovlivňuje kromě prahu ještě určitý úsek přirozeného koryta pod profilem.

6. Důsledky

Shoda mezi skutečností a časovou řadou průtoků, vyhodnocených prostřednictvím měrných křivek, je proto vždy částečně snížena vlivem souhrnu výše popsaných jevů, jejichž výčet ani není úplný. I dobře zkonstruovaná měrná křivka v tradiční podobě je určitou schematizací časově proměnného vztahu vodní stav – průtok, s hypoteticky středními hodnotami u krátkodobých hysterezních změn a skokovou reakcí na změny pozvolnější. Přílišná prodleva těchto skokových změn pak může být příčinou zkreslení výsledné průtokové řady. Při formulování závěrů statistických zpracování časových řad je proto potřeba mít tuto okolnost na paměti a porovnat citlivost či zranitelnost výsledků s velikostí možných chyb souvisejících s měrnou křivkou. V této souvislosti nelze než doporučit k přečtení práci [5].

7. Závěr

Závěrem se nabízí otázka, jak by mohl budoucí technologický pokrok zvýšit kvalitu průtokových dat. Největší slabinou tradičního přístupu jsou časové prodlevy mezi jednotlivými hydrometrickými měřeními a nedostatečné pokrytí amplitudy kolísání vodního stavu. Odpovědí by tedy mohlo být kontinuální měření rychlosti např. ultrazvukovými průtokoměry. Poslední generace těchto přístrojů, zdá se, disponuje velkou přesností i spolehlivostí. Problémem však bude sledování změn průtočného průřezu a měření za povodňových stavů (nutnost instalace více horizontálních paprsků). Technicky by se zřejmě i tyto potíže daly vyřešit, zůstává však kardinální problém složité instalace a zejména pořizovacích nákladů. Nakolik by bylo zvýšení kvality výsledných průtokových dat efektivní v porovnání s podstatně zvýšenými náklady na jejich získání?

Na úplný závěr připojím poněkud optimističtější příklad, který dokládá, že problém kvality měrných křivek není specialitou ČHMÚ, ale trápí hydrologické služby i v ostatních státech. V letech 2007 až 2009 ČHMÚ (pobočka ČB) absolvoval proti své vůli test kvality hydrologických dat v konfrontaci s Rakouskou hydrologickou službou. Jednalo se o neshodu hodnot N-letých průtoků v hraničním profilu Malše. Např. v hodnotě 100letého průtoku činil rozdíl 45 % české hodnoty (113 $m^3.s^{-1}$ ČR versus 62 $m^3.s^{-1}$ Rakousko), přičemž vyšší údaje z české strany vycházely hlavně z pozorování v Kaplici, nižší údaje rakouské strany z pozorování v Leopoldschlagu. Plocha povodí Malše v Kaplici je více než dvojnásobná proti

ploše povodí hraničního profilu, zatímco rakouská stanice Leopoldschlag leží v blízkosti hranice. Výpočet QN z české strany je proto ještě komplikován vzdáleností stanice od státní hranice. Je založen na unikátní metodě plošné extrapolace, známé spíše pod používanějším názvem „katastr vodnosti“. Velký rozdíl v hodnotách QN byl příčinou vleklých jednání v rámci Komise pro hraniční vody. Obě strany byly politicky donuceny změnit svá data tak, aby se výsledky sblížily. ČHMÚ snížil své údaje subjektivně v mezích možností plošné extrapolace až o 24 % v hodnotě Q_{100}. Rakouská strana v rámci svých možností své údaje zvýšila o 13 % v hodnotě Q_{100}. Ani poté nebylo dosaženo shody, neboť výsledný rozdíl byl 18 %. Protože ČHMÚ využil svých možností změny výsledků v rámci přijatelných limitů na maximum, odmítl již dále ustupovat. Po dalších jednáních přistoupila rakouská strana k revizi svých dat. Byla tak zjištěna chybná extrapolace měrné křivky v Leopoldschlagu, vytvořena nová křivka extrapolovaná hydraulickým modelem a výpočty všech dalších potřebných veličin byly provedeny znovu. Nová rakouská hodnota v podstatě potvrdila správnost hodnoty české, ovšem té původní! Uvedený příklad potvrzuje fatální vliv kvality měrných křivek na hodnoty návrhových průtoků. Současně poskytl ČHMÚ zadostiučinění nejen ve věci kvality pozorování a měrných křivek, ale i potvrzení správnosti používaných metod plošné extrapolace.

Literatura

[1] HERSCHY, R. W., 1995. Streamflow Measurement, Second Edition. Chapman & Hall, London, ISBN 0 419 19490 8.

[2] Manual on Stream Gauging, 1980. Volume 2, Computation of Discharge, WMO.

[3] Hydrology Project, 1999. Training module 29: How to establish stage discharge rating curve, Delft Hydraulics.

[4] BENEŠOVÁ, M., 2010. Extrapolace měrných křivek průtoku. Diplomová práce ČVUT Praha.

[5] KAŠPÁREK, L., 2009. O možnostech rekonstrukce vyčíslení řad průtoků. VTEI, mimořádné číslo, roč. 51, str. 13 – 16.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka České Budějovice, e-mail: polcar@chmi.cz

HYSTEREZE MĚRNÝCH KŘIVEK NA PRAKTICKÝCH PŘÍKLADECH

Aleš Havlík [1]

Abstrakt

Článek se zabývá problematikou hystereze měrných křivek limnigrafických stanic. Teoreticky je popsán jednak přístup vyhodnocení míry hystereze aplikací modelování neustáleného proudění, jednak zjednodušení metoda Jonesova. Oba přístupy jsou využity na praktických případech hystereze měrných křivek stanic Frahelž na Lužnici a Nový Jičín na Jičínce.

Klíčová slova: měrná křivka, hystereze

1. Úvod

Zvýšená četnost povodní v posledních dvou desetiletích ukazuje na potřebu zpřesnění stanovování zásadní hydrologické veličiny, kterou je průtok. Měřit kontinuálně průtok vody v řekách na základě aplikace fyzikální podstaty je nemožné. Proto se k jeho stanovení využívá měření jiných veličin, jako je například rychlost. Ani v případě stanovení průtoku na základě vyhodnocení rozdělení rychlostí v příčném profilu však zatím není reálné průběžné vyhodnocování. Časový průběh průtoku se stále vyjadřuje s využitím měrné křivky profilu.

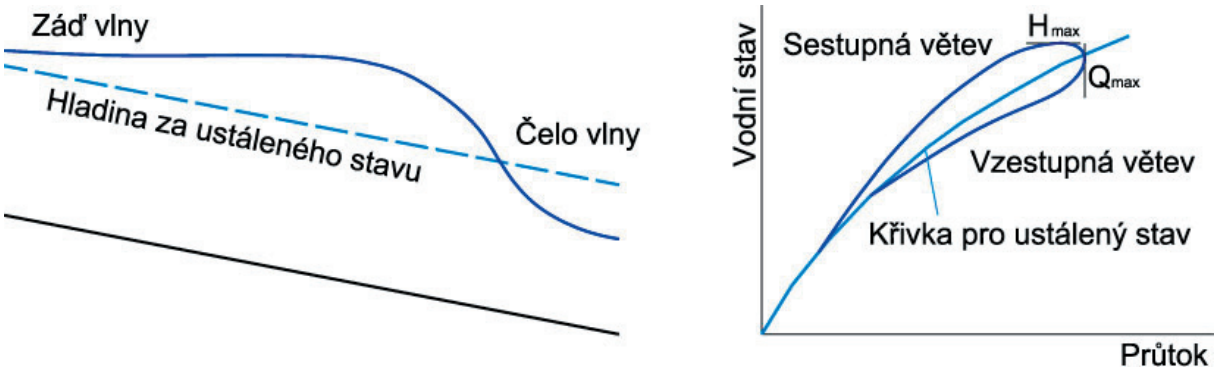
Zpřesnění měření rychlostního pole byla v poslední době věnována velká pozornost, a to zejména v souvislosti s razantním nástupem ultrazvukových čidel založených na Dopplerově principu. Oproti klasickému přístupu, který využívá hydrometrických vrtulí, se daří častěji změřit průtoky i při průtocích s extrémní pravděpodobností výskytu. Významné změny se udály i v oblasti měření vodního stavu v profilech limnigrafických stanic.

Pro přesnost časového průběhu průtoku se tak čím dál tím stává zásadní přesnost měrné křivky stanice. Největší chyby lze přitom očekávat v oblasti extrémních vodních stavů. Hlavní příčina stále tkví v nedostatku měření průtoků za těchto stavů. Je třeba konstatovat, že zpřesnění extrapolace měrných křivek byla v poslední době věnována zvýšená pozornost. K tomuto účelu se intenzivně využívají matematické modely proudění vody s volnou hladinou, a to jak jednorozměrné, tak i zvláště v poslední době dvourozměrné.

Jev zvaný hystereze, který může za extrémních vodních stavů ovlivnit nezanedbatelně přesnost přepočtu úrovně vodního stavu na průtok, je sice notoricky znám, nicméně jeho aplikace pro přesnost vyhodnocení průtoku je velmi vzácná.

2. Hystereze měrné křivky

Hydraulickou příčinou hystereze měrné křivky je proměnlivost sklonu čáry energie pro určitý vodní stav. Jako hlavní příklad se uvádí průchod povodňové vlny posuzovaným profilem. Sklon hladiny na vzestupné větvi je větší než za ustáleného stavu, na sestupné větvi naopak menší. Názorné to je na obrázku 1.



Obr. 1: Podélný profil hladiny vody za povodňové vlny a hystereze měrné křivky

Míra hystereze úzce souvisí se sklonem dna. Čím menší je sklon, tím může být hysterezní smyčka výraznější. Doposud panoval názor, že s hysterezí měrné křivky má smysl se prakticky zabývat jen na tocích s menším průměrným sklonem dna než 1 ‰. Skutečnost, že většina našich toků má průměrný sklon dna větší než toto číslo, je jednou z příčin zanedbávání tohoto jevu při vyhodnocování povodňových situací. Extrémní povodňové vlny, které byly zaznamenány v létě roku 2009, však ukázaly, že se s tímto jevem můžeme setkat i za sklonů dna větších. S hysterezí křivky se však nemusíme setkat jen za přírodních povodní. Mohou být důsledkem umělých „rázových“ vln, které vyvolává rychlá manipulace rychlá manipulace s pohyblivými uzávěry na přehradách nebo jezových objektech nebo rychlé nabíhání či vypínání vodních turbín zejména na MVE.

Proměnlivost sklonu hladiny v profilu limnigrafické stanice však může nastat i z jiného důvodu. Typickým příkladem je profil stanice Pilař na Lužnici. Limnigrafická stanice se nachází na samém konci upraveného ohrázovaného úseku řeky. Levá hráz končí jen několik desítek metrů pod stanicí, za povodní zde dochází k masivnímu rozlivu. Sklon hladiny na konci upraveného úseku je za povodní velmi ovlivněn úrovní hladiny v níže ležící široké inundaci. Ta závisí na míře plnění inundace. Hystereze křivky nebyla v tomto profilu zatím přesně vyhodnocena. Z porovnání v minulosti provedených hydrometrování za povodňových průtoků však je však patrné, že měření za situací, kdy se rozsáhlé inundace v úseku pod stanicí teprve začínaly plnit, vykazují větší průtoky, než měření za stavu zcela zaplněných inundací.

3. Možnosti vyhodnocení hystereze

K číselnému vyhodnocení hystereze měrné křivky je možné využít dvou výpočetních postupů. Vzhledem k tomu, že je hystereze křivky důsledkem neustáleného proudění vody v korytě či inundaci, nejvhodnějším nástrojem je modelování 1D neustáleného proudění v dostatečně dlouhém úseku vodního toku v okolí posuzovaného profilu. Jedním z výstupů modelování neustáleného proudění je časový průběh vývoje sklonu hladiny a čáry energie a ostatních parametrů jako jsou průtočná plocha, průřezová rychlost a to nejen v profilu stanice, ale v celém řešeném úseku. Z fyzikální podstaty je neustálené proudění popsáno diferenciálními rovnicemi vyjadřujícími zákon zachování hmoty a hybnosti. Soustava rovnic je zpravidla označována jako rovnice Saint-Venantovy (1) a (2)

$$\frac{\partial S}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=0 \qquad (1)$$

a

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\beta\cdot\frac{Q^2}{S}\right)+\frac{\partial}{\partial x}(g\cdot y\cdot S)=g\cdot S\cdot(i_0-i_E) \qquad (2)$$

kde S – průtočná plocha [m^2]
Q – průtok [$m^3.s^{-1}$]
t – čas [s]
x – vzdálenost ve směru proudění [m]
g – gravitační zrychlení [$m.s^{-2}$]
y – hloubka vody [m]
i_0 – sklon dna [–]
i_E – sklon čáry energie [–]

Simulace neustáleného proudění jsou často náročné na geodetická data. K jeho modelování nevystačíme se zaměřením profilu limnigrafické stanice či jeho blízkého okolí. Musíme mít zaměřený dostatečně dlouhý úsek nad i pod stanicí. Proto byly v minulosti hledány zjednodušené postupy k vyjádření vlivu hystereze. Jako nejvhodnější se ukázala Jonesova metoda [3]. Metoda vychází ze zjednodušení, že průchod povodňové vlny stanicí lze popsat kinematickým přístupem. Základem je stanovení výchozího průtoku pro ustálený stav s využitím například rovnice Manningovy. Po určitém zjednodušení se skutečný průtok v průběhu povodňové události stanoví z rovnice

$$Q = Q_n \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{i_0 \cdot c} \cdot \frac{\partial h}{\partial t}} \qquad (3)$$

kde Q – průtok v daný časový okamžik [$m^3.s^{-1}$]
Q_n – průtok za ustáleného stavu [$m^3.s^{-1}$]
i_0 – sklon dna koryta v okolí stanice [-]
h – úroveň hladiny [m]
t – čas [s]
c – rychlost pohybu povodňové vlny [$m.s^{-1}$]

Rychlost pohybu povodňové vlny je možné řešit pomocí rovnice

$$c = \frac{1}{B} \cdot \frac{\partial Q_n}{\partial h} \qquad (4)$$

kde B – šířka hladiny [m].

Při praktickém použití na konkrétních případech rovnice z diferenciálního přístupu přechází na konečné diference.

4. Hystereze měrné křivky stanice Frahelž na Lužnici

Jednou z limnigrafických stanic, kde se podařilo hysterezi měrné křivky přesně kvantifikovat, je stanice Frahelž na Lužnici. Ta byla v minulosti vybudována 8 km pod největším českým rybníkem Rožmberk. Díky tomuto vodnímu dílu je hydrologický režim toku významně ovlivněn manipulacemi na objektech. Jednou z epizod, kterou se podařilo velmi dobře změřit, byla situace z 25. 9. 2008. S využitím ultrazvukového snímače ADCP bylo v krátkém časovém horizontu 5 hodin provedeno celkem 5 hydrometrických měření za situace rychlé změny vodního stavu. Uvedená měření měla původně posloužit pro zpřesnění měrné křivky stanice. Výsledky měření byly ovšem využity i pro kalibraci drsností koryta pro hydraulický model. Jeho cílem byla extrapolace křivky do oblasti povodňových vodních stavů. Teprve při detailním vyhodnocení se ukázalo, že výsledky přinesly důkaz hystereze měrné křivky.

Pro daná měření vycházely hodnoty součinitele drsnosti n za předpokladu ustáleného stavu proměnlivé v rozmezí od 0,0253 do 0,0316, to je dokumentováno v tabulce 1.

Tab. 1: Výsledky hydrometrování ve stanici Frahelž na Lužnici ze dne 28. 9. 2009

Čas	***H*** [cm]	***Q*** [$m^3.s^{-1}$]	***n*** [$m^3.s^{-1}$]
25.9.2009 11:40	76,5	8,39	0,0278
25.9.2009 13:35	121,5	19,4	0,0253
25.9.2009 14:20	136	21,52	0,0286
25.9.2009 15:50	152	24,52	0,0316
25.9.2009 16:15	152	24,34	0,0302

Rozptyl hodnot se již na první pohled ukazuje jako velmi velký. Vzhledem k tomu, že se hloubka vody mezi měřeními výrazně neměnila a změna hodnoty součinitele drsnosti nebyla v souladu se změnou hloubky, nebyl shledán důvod k takové změně velikosti součinitele drsnosti. Pro další analýzu bylo proto uvažováno, že hodnota součinitele drsnosti byla v průběhu všech 5 měření konstantní jako průměr hodnot z tabulky 1. Další postup se zaměřil na hledání veličiny, která mohla rozptyl hodnot zpracovaných v tabulce 1 vyvolat. Kromě případné chyby měření průtoku se jako možná jevila i změna sklonu čáry energie.

Výsledky tohoto postupu jsou uvedeny v další tabulce 2. Při výpočtech byla použita rozšířená Chezyho rovnice, hledaný sklon čáry energie je možné získat po její úpravě.

$$i_E = \frac{Q^2}{C^2 \cdot S^2 \cdot R} = \frac{Q^2}{K^2} \qquad (5)$$

kde C – Chezyho rychlostní součinitel [$m^3.s^{-1}$]
R – hydraulický poloměr [m]
K – modul průtoku [$m^3.s^{-1}$]

Vedle stanoveného sklonu čáry energie i_{En} při uvažování neustáleného proudění v profilu stanice v průběhu jednotlivých měření jsou v tabulce uvedeny i sklony i_{Eu}, které by odpovídali ustálenému režimu při daném průtoku. Tyto hodnoty byly získány z modelování průběhu hladiny nerovnoměrného ustáleného proudění pro všech 5 průtoků s využitím tak zvané „metody po úsecích“. Existenci hystereze prokazují další hodnoty v tabulce 2. Těmi jsou nárůsty či poklesy úrovně sklonu čáry energie oproti ustálenému stavu v absolutních hodnotách i v procentech. Změnu průtoku při uvažování křivky s hysterezní smyčkou oproti ustálenému stavu je možné dopočítat dle Chezyho rovnice, kde je průtok lineárně závislý na odmocnině sklonu čáry energie

Tab. 2: Proměnlivost sklonu čáry energie v profilu stanice Frahelž při neustáleném režimu

Čas	i_{En} [-]	i_{Eu} [-]	Δi [-]	Δi [%]	ΔQ [%]
25.9.2008 11:40	0,000247	0,000246	0,000001	0,4	0,2
25.9.2008 13:35	0,000458	0,000406	0,000052	12,8	6,2
25.9.2008 14:20	0,000424	0,000422	0,000002	0,5	0,2
25.9.2008 15:50	0,000418	0,000438	-0,000020	-4,6	-2,3
25.9.2008 16:15	0,000412	0,000434	-0,000022	-5,1	-2,6

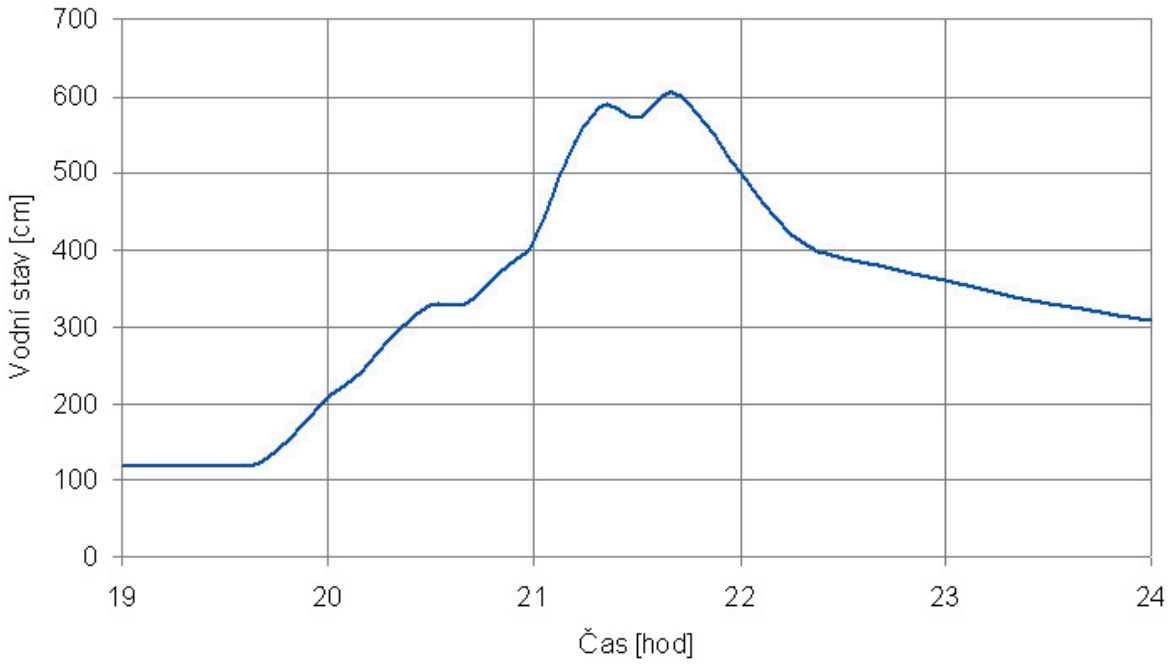
Zpracované vyhodnocení prokazují existenci hystereze měrné křivky. První měření provedené před polednem bylo v době ustáleného stavu. Pak následoval vlivem manipulace na VD Rožmberk rychlý nárůst průtoku a vznik umělé rázové vlny (přímá kladná vlna). Na

jejím čele došlo ke zvýšení sklonu hladiny a čáry energie (maximum vyhodnoceno v 13:30), skutečná hodnota průtoku vycházela dle vyhodnocení o 6,2 % větší než při odečtení z měrné křivky pro ustálený stav. V době průchodu vrcholu vlny byl sklon hladiny blízký ustálenému stavu (čas 14:20). Na sestupné větvi docházelo k postupnému snižování sklonu (časy 15:50 a 16:15).

Analýza míry hystereze byla pro čelo vlny provedena i pomocí Jonesovy metody. Při rozdílu průtoku (19,4–8,39) $m^3.s^{-1}$, rozdílu vodních stavů (1,215–0,765) m a šířce hladiny 16 m vychází dle rovnice (4) postupová doba c = 1,53 $m.s^{-1}$. Po dosazení sklonu dna v okolí stanice 0,004 a časovém intervalu (115,60) s, dostaneme hodnotu odmocniny z rovnice (3) 1,052. Po vynásobení 100 vychází nárůst průtoku na čele vlny oproti ustálenému stavu o 5,2 % větší. To je hodnota velmi blízká číslu z předchozího odstavce.

5. Hystereze měrné křivky stanice Nový Jičín na Jičínce

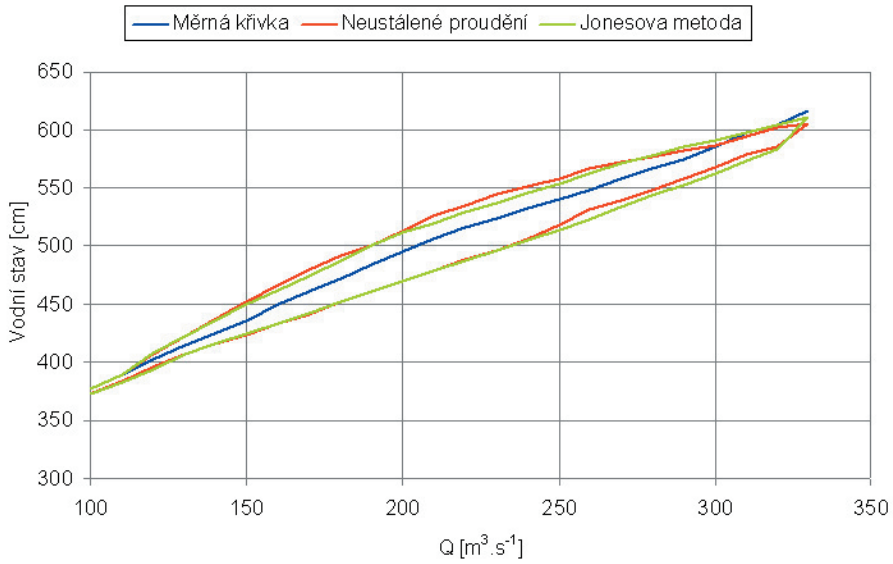
V průběhu června 2009 zasáhla povodí Jičínky povodeň s u nás naprosto výjimečným nástupem vzestupné větvě povodňové vlny. Na toku se nachází limnigrafická stanice Nový Jičín, průměrný sklon dna toku v okolí stanice se pohybuje kolem 0,25 ‰. Stanice se nachází ve vysoce kapacitním úseku řeky. Přestože kulminační průtok významně přesáhl průtok Q_{100}, voda se v okolí stanice z koryta nevylila a stanice byla schopna průběh hladiny po celou dobu trvání povodně bez problémů zaměřit. O rychlosti nástupu vlny svědčí obrázek 2.



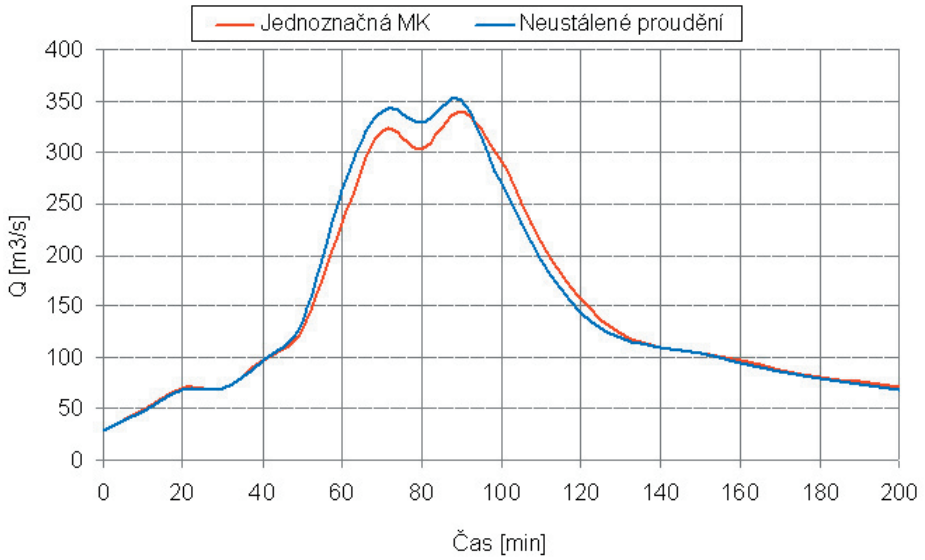
Obr. 2: Změna vodního stavu v profilu limnigrafické stanice Nový Jičín v průběhu povodně ze dne 24. června 2009.

K vyhodnocení kulminačního průtoku povodně a zpracování extrapolace měrné křivky [2] bylo pro tento úsek k dispozici geodetické zaměření dostatečně dlouhého úseku řeky Jičínky. Podrobně se hysterezí podle obou přístupů zabývala ve své diplomové práci Benešová [1] Porovnání výsledků obou přístupů s křivkou pro ustálený stav je předloženo na obrázku 3.

Aplikace měrné křivky s hysterezní smyčkou přinesla pochopitelně i odlišný hydrogram povodně oproti případu stanoveného na základě křivky pro ustálený stav. Kulminační průtok se v případě aplikace křivky s hysterezní smyčkou zvýšil o cca 10 $m^3.s^{-1}$ a mírně se změnil jeho časový průběh (Obr. 4).



Obr. 3: Hystereze měrné křivky limnigrafické stanice Nový Jičín na Jičínce v průběhu povodňové vlny z 24. 6. 2009



Obr. 4: Porovnání hydrogramů povodně zpracovaného s využitím jednoznačné měrné křivky a měrné křivky s uvažováním hystereze

Poděkování

Tento příspěvek byl zpracován za podpory Výzkumného záměru č. MSM 6840770002

Literatura

[1] BENEŠOVÁ, M., 2010. Extrapolace měrných křivek. Diplomová práce, ČVUT v Praze, fakulta stavební, leden 2010.

[2] HAVLÍK A., 2009. Vyhodnocení kulminačních průtoků povodně z roku 2009 s využitím hydraulických výpočetních postupů. Dílčí zpráva projektu, ČHMÚ, Praha.

[3] OVERLEIR, A. P., 2006. Modelling stage-discharge relationship affected by hysteresis using the Jones formula and nonlinear regression. Hydrological Sciences Journal.

Kontakty na autora

1 ČVUT v Praze, Fakulta stavební, e-mail ales.havlik@fsv.cvut.cz

VYUŽITIE INDIKÁTOROVEJ METÓDY PRE STANOVENIE PRIETOKU V OTVORENÝCH KORYTÁCH

Zuzana Danáčová[1], Michaela Danáčová[2], Katarína Kaňuková[2]

Abstrakt

Meranie prietoku je jednou z najdôležitejších činností hydrológie. Existuje viacero metód na stanovenie prietoku v otvorených korytách tokov, ale každá so sebou nesie riziko nepresnosti. Jednou z možných metód stanovenia prietoku v tokoch je indikátorová metóda s využitím injektovania roztoku. Tento spôsob merania je možné použiť bez ohľadu na tvar alebo veľkosť profilu koryta, keďže koncentráciu injektovaného roztoku môžeme merať z brehu. Využíva sa hlavne v podmienkach, kde nie je možné vykonať meranie ani hydrometrovaním ani pomocou ultrazvuku. Medzi krajiny, ktoré využívajú indikátorovú metódu, a dodnes ju aplikujú na tokoch, patrí hlavne Švajčiarsko, Nemecko a Kanada.

Na slovenských tokoch sme vykonali niekoľko experimentálnych meraní pomocou indikátorovej metódy. Bol zvolený jednorazový spôsob injektáže, pri ktorom nie sú potrebné špeciálne zariadenia a veľkosť prietoku nie je natoľko obmedzujúca, ako pri kontinuálnej injektáži. Skúsenosti získane z meraní nám vo viacerých prípadoch potvrdili poznatky viacerých autorov zo zahraničia, kde sa plnohodnotne využíva indikátorová metóda.

Kľúčové slová: prietok, vodivosť, jednorazová injektáž

1. Úvod

Spôsobov merania prietoku v otvorených korytách tokov je viacero pričom platí, že v praxi neexistujú prístroje ani metódy merania, ktoré by boli absolútne presné. Každá metóda je vhodná pre iné podmienky prúdenia a morfológie toku, a teda hydrológ sa musí rozhodnúť na základe vedomostí, skúseností a aj možností pre použitie jednej z nich.

Najpoužívanejšou metódou merania prietoku je hydrometrovanie (pomocou hydrometrickej vrtule), ktoré v dnešnej dobe čoraz viac nahrádza ultrazvukové meranie (pomocou prístroja ADCP). Jednou z metód stanovenia prietoku v tokoch je meranie indikátorovou metódou. Výhodou merania je, že injektovaný roztok môže byť meraný bez prebrodenia cez tok, a to hlavne v podmienkach, kde nie je možné vykonať meranie hydrometrovaním ani pomocou ultrazvuku.

V tomto príspevku sme chceli poukázať na možné využitie indikátorovej metódy na slovenských tokoch. Na základe výsledkov a skúseností z experimentálnych meraní sme upriamili pozornosť na možné chyby, ktorým by sme sa mali vyhnúť resp. opatrenia ako im predísť.

2. Indikátorová metóda

Využitie indikátorovej metódy má širší záber, je použiteľná nielen na stanovenie prietoku v otvorených korytách, ale aj postupovej doby. Ďalšie využitie tejto metódy merania je pri šírení znečistenia resp. rýchlosti nielen v povrchových vodách, ale predovšetkým pre podzemné vody. Takéto informácie nám napomáhajú pri riešení úloh súvisiacich s meraním kvality vody, pri riešení havarijných znečistení tokov, ako aj úloh súvisiacich s právnymi a technickými aspektmi ochrany vôd pred znečistením.

Čo sa týka otvorených korýt, vhodné sú hlavne v oblastiach, kde pri bystrinnom prúdení dochádza vplyvom vysokej turbulencie k rýchlemu zmiešaniu indikátora [7]. Taktiež v povodiach s rozlohou do 100 km^2, kde sú nízke hodnoty prietokov (nízke vodné stavy) a v obdobiach malej vodnosti (kde meranie je problematické) .

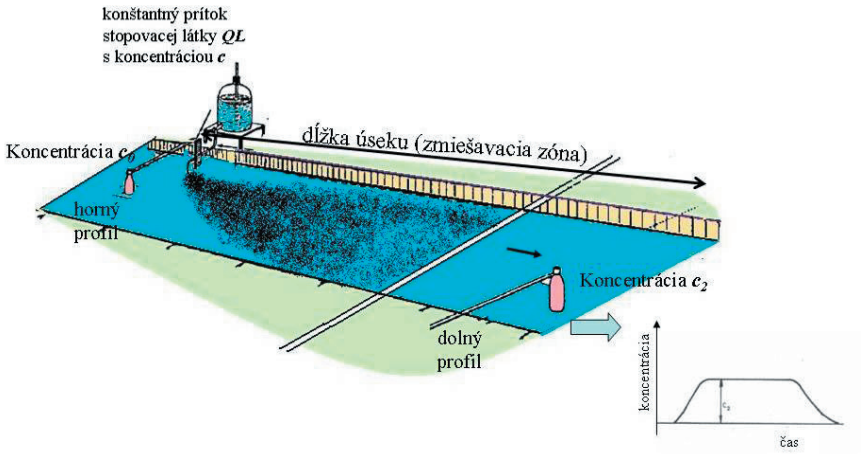
Spencer (citované v [6]) uvádza, že prvé meranie prietoku indikátorovou metódou v otvorených korytách tokov bolo úspešne vykonané v roku 1893 pod vedením Schlösinga. Na území Slovenska resp. Československa boli vykonané merania tohto druhu pracovníkmi ostravskej pobočky ČHMÚ (Sochorec a kol.) v rokoch 1968 – 1976, kedy prebiehal prvotný výskum v tejto oblasti.

Meranie prietoku indikátorom je možné uskutočňovať dvoma spôsobmi injektáže:

kontinuálne (Obr. 1), jednorazovo (Obr. 2).

Pri kontinuálnej injektáži sa pridáva do profilu 1 (horný profil) konštantný prítok stopovacej látky (indikátor) Q_L s koncentráciou c. Po dokonalom premiešaní a ustálení koncentrácie sa určí hodnota c_2 v meranom profile 2 (dolný profil). Ak obsahuje prúdiaca voda daný roztok v koncentrácii c_0 už nad profilom 1 (horný profil), bude platiť rovnica kontinuity prietoku stopovacej látky v profiloch 1 a 2:

$$Q.c_0 + Q_L.c = (Q + Q_L).c_2 \qquad \Rightarrow \qquad Q = Q_L \frac{c - c_2}{c_2 - c_0} \tag{1}$$

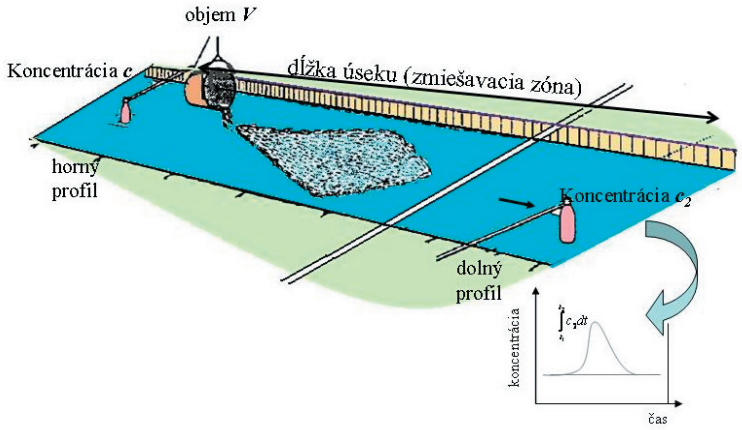


Obr. 1: Konštantná injektáž roztoku [5]

Pri jednorazovej injektáži roztoku s objemom V a koncentráciou c v profile 1 (horný profil) vzniká v úseku tzv. mrak, ktorého prechod v profile 2 (dolný profil) sa zisťuje meraním časovej zmeny koncentrácie $c_2=f(t)$. Vychádzajúc z množstva roztoku, ktorý bol injektovaný v profile 1 (horný profil) a toho, ktorý vytiekol z profilu 2 (dolného profilu) platí:

$$V.c = Q\int_{t_1}^{t_2} c_2 dt \qquad \Rightarrow \qquad Q = \frac{V.c}{\int_{t_1}^{t_2} c_2 dt} \tag{2}$$

Plocha rozdelenia koncentrácií v dolnom profile je hodnota integrálu v menovateli (Obr. 2)



Obr. 2: Jednorazová injektáž roztoku [5]

V oboch prípadoch je indikátor aplikovaný na začiatku stanoveného úseku v smere prúdenia. Na konci sledovaného úseku sa zisťuje jeho koncentrácia v prúdiacej vode (miera zriedenia), ktorá je podstatným údajom pre výpočet prietoku *Q*.

3. Experimentálne merania na slovenských tokoch

Na vybraných tokoch (Belá, Štiavnica, Ľanovianka, Vydrica) sme vykonali niekoľko experimentálnych meraní pomocou indikátorovej metódy. Bol zvolený jednorazový spôsob injektáže, pri ktorom nie sú potrebné špeciálne zariadenia a veľkosť prietoku nie je natoľko obmedzujúca ako pri kontinuálnej injektáži.

Pri týchto meraniach je potrebná spolupráca viacerých ľudí a zvyčajne sa postupuje v nasledujúcich bodoch:

A. výber indikátora, príprava použitých prístrojov a ich nastavenia

B. stanovenie dĺžky zmiešavacieho úseku

C. zostrojenie kalibračnej krivky

D. príprava injektážneho roztoku

E. meranie priechodu mraku

F. stanovenie prietoku

Podrobný popis jednotlivých bodov merania indikátorovej metódy boli uvedené v [1].

3.1 Výsledky stanovenia prietoku indikátorovou metódou

Indikátorová metóda je založená na učení, poznatku procesu zmiešania roztoku v prúde toku. Ako indikátor sme vo všetkých prípadoch aplikovali roztok chloridu sodného (NaCl), ktorý sme jednorázovo injektovali do toku. K jeho aplikácii sme pristúpili z viacerých dôvodov. Je hygienicky nezávadný, ľahko identifikovateľný aj v malých koncentráciách pomocou elektronického konduktomera, nereaguje s vodou ako aj v nej existujúcimi látkami a je cenovo prijateľný.

Treba poznamenať, že pri prvých meraniach sme sa nevyhli chybám, ktoré sme robili z neskúsenosti ako i momentálnych podmienok (Belá – vysoké prietoky spôsobené topením

snehu, Iľanovianka – skrytý bočný prítok). Išlo skôr o experiment vzhľadom na určenie koncentrácie injektážneho roztoku a dĺžky zmiešavacieho úseku.

Tab. 1: Ukážka výsledkov stanovenia prietoku indikátorovou metódou [1].

Názov toku	Prietok [l/s]						
	Hydrometrovanie - hydrometrickou vrtuľou	Indikátorová metóda (indikátor – NaCl)					
		1. meranie		2. meranie		3. meranie	
		sonda č.1	sonda č.2	sonda č.1	sonda č.2	sonda č.1	sonda č.2
Iľanovianka (16.4.2009)	236	328,4 (-39,1%)	372,1 (-57,6%)	282,1 (-19,5%)	306,9 (-30,1%)	305 (-29,2%)	330,4 (-40%)
Štiavnica (16.4.2009)	3300	2761,2 (-16,3%)	2557 (-22,5%)	Nezameraný -	3188,5 (-3,4%)	2767,4 (-16,1%)	2340,33 (-29,1%)
Vydrica (16.9.2009)	32	33,42 (-4,4%)	35,11 (-9,7%)	43,38 (-35,6%)	43,71 (-35,6%)	34,79 (-8,7%)	35,98 (-12,4%)
Vydrica (30.9.2009)	20	18,99 (-5,5%)	18,95 (-5,2%)	18,71 (-6,50%)	17,84 (-10,8%)	18,95 (-5,3%)	18,44 (-7,8%)

Pozn. V zátvorke je uvedený percentuálny rozdiel medzi hodnotami prietoku stanovenými indikátorovou metódou vzhľadom k prietoku stanovenom hydrometrovaním

Za zmienku stojí, že po správnosť stanovaní všetkých krokov merania sa naša chyba pri posledných meraniach (napr. tok Vydrica, z dňa 30.9.2009) pohybovala vzhľadom k hodnote prietoku stanovenom hydrometrovaním maximálne do 11 % (Tab. 1).

V nasledujúcej časti uvedieme niekoľko dôležitých poznatkov a skúsenosti, ktoré sme získali pri meraní pomocou indikátorov.

3.2 Poznatky a skúsenosti získané z meraní

Pri prvých experimentálnych meraniach sme sa snažili získať najmä skúsenosti s odhadom koncentrácie injektážneho roztoku, ktorá musí byť dostatočne vysoká. Ide o zabezpečenie zvýšenia elektrickej vodivosti v meranom profile, ktoré však nesmie prekročiť stanovené hygienické normy. Moore uvádza, že ideálna koncentráciu roztoku dosiahneme pri pomere 1 $m^3.s^{-1}$ k 1 kg soli, ďalšie štúdie vychádzajú zo zabezpečenia 20 % roztoku [7].

Veľmi dôležité pri príprave roztoku je dokonalé premiešanie, aby došlo k úplnému rozpusteniu soli. Práve tu dochádza k potenciálnej chybe v prípade ak nám zostane v nádobe nerozpustená soľ. Preto je potrebné kontrolné meranie vodivosti pripravovaného roztoku. Vplyv na rozpustnosť soli má teplota vody, s čím sme sa stretli na jar na horských tokoch (Belá, Štiavnica, Iľanovianka), kde ich teplota sa pohybovala okolo 3 °C a nedochádzalo tam k dokonalému rozpusteniu soli, čo spôsobilo ovplyvnenie hodnoty stanovenia prietoku.

Pri jednorazovej injektáži je dôležité vyliať pripravený roztok do toku v počiatočnom profile (ideálne v zúženom mieste, ak to podmienky dovoľujú) naraz celý objem do prúdnice, nesmie dôjsť ku prerušenie prípadne zbytočnému oplachovaniu nádoby. V opačnom prípade dostaneme viacvrcholovú „soľnú vlnu“.

Meranie prechodu soľného mraku je nutné vykonávať nepretržite (ideálne v 1 sekundovom intervale), kým sa vodivosť neustály resp. nevráti do pôvodných (pozaďových hodnôt). Typická zaznamenaná „soľná vlna“ má asymetrický tvar s prudkým nárastom, miernym poklesom a s pozvoľným prechodom do počiatočných hodnôt. Na tvar tejto vlny má vplyv dĺžka zmiešavacieho úseku, ale taktiež aj umiestnenie vodivostných sond, koncentrácia injektážneho roztoku. Ideálne je dosiahnutie kulminácie soľnej vlny v hodnote o 50 % až 100 % vyššie od pozaďovej hodnoty elektrickej vodivosti [7].

Pri voľbe zmiešavacieho úseku musíme taktiež overiť či nedochádza k zmene vodivosti a to hlavne v intraviláne, kde je častá existencia skrytých prítokov. Taktiež je nevhodné aplikovať túto metódu na tokoch s vysokým výskytom vegetácie v koryte.

Dĺžka zmiešavacieho úseku musí byť taká, aby došlo k dokonalému premiešaniu roztoku s vodným prúdom v celom meranom profile. Prihliadať musíme na druh prúdenia v korytách tokov, na javy, s ktorými je prúdenie spojené, ako sú napríklad víry, ale aj na geometriu koryta. Z našich skúseností práve pri určovaní zmiešavacieho úseku dochádza k najčastejšej chybe merania a z tohto dôvodu je treba mu venovať dostatočnú pozornosť.

3.3 Stanovenie dĺžky zmiešavacieho úseku

Pri určovaní dĺžky zmiešavacieho úseku (L) musíme mať na zreteli, že musí prísť k premiešaniu roztoku s vodným tokom v celom meranom profile. Pri stanovení tejto vzdialenosti je možné vychádzať z niekoľkých empirických vzťahov od rôznych autorov, kde by sa mala uplatniť zmiešavacia rovnica. Vychádza sa priamo z charakteristík koryta.

Vzťahy na stanovenie dĺžky zmiešavacieho úseku by mali zohľadňovať vlastnosti koryta, jeho geometriu a premenlivosť prúdenia v uvažovanom úseku. Dĺžka tohto úseku by mala byť minimálne 25násobok šírky toku ([7], [2]) alebo:

$$L \geq 0{,}13.\frac{B^2}{\overline{H}}C.\frac{0{,}7C+6}{g} \tag{3}$$

Hull na základe svojho výskumu stanovil vzťah [3]:

$$L = 3B\sqrt{\frac{B}{\overline{H}}} \tag{4}$$

Kde: L – vzdialenosť profilov [m]

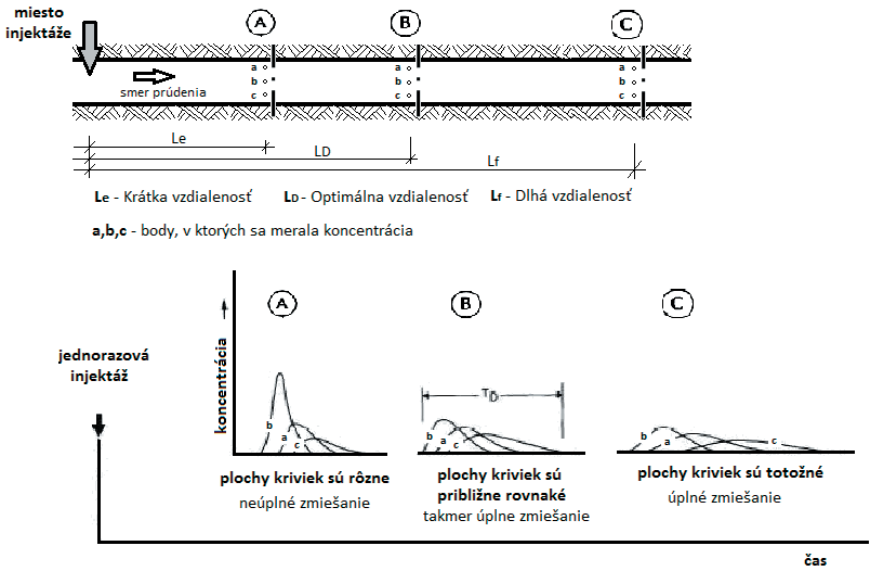
B - priemerná šírka hladiny v uvažovanom úseku [m]

$\overline{H}$ - priemerná hĺbka vody v úseku [m]

C – Chézyho rýchlostný súčiniteľ [m.s^{-1}]

g – gravitačné zrýchlenie [m.s^{-2}]

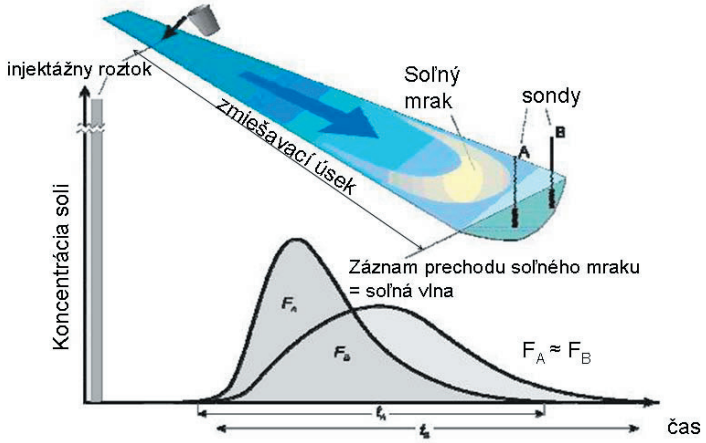
Na krátkom zmiešavacom úseku nedochádza k úplnému zmiešaniu v celom priečnom profile. V dôsledku toho je koncentrácia indikátora najvyššia v strede koryta (v prúdnici) oproti koncentrácii pri obidvoch brehoch. K tejto chybe určenia dĺžky dochádza pomerne často, je nutné mať vždy na zreteli model rýchlostného poľa. Pri optimálnej vzdialenosti dochádza k najrovnomernejšiemu zmiešaniu a aj k približnej rovnosti plôch pod krivkami koncentrácii v čase (Obr. 3). Na optimálnej dĺžke (L_D) zmiešavacieho úseku je možné dosiahnuť uspokojivé hodnoty meraného prietoku, kde dochádza približne k 95 % zmiešaniu indikátora s prúdom toku. Optimálna dĺžka (L_D) je najuspokojivejšia, pretože nie je ani príliš krátka (L_e) ani príliš dlhá (L_f). Napriek tomu, že plochy jednotlivých kriviek nie sú úplne totožné, indikátory sú dobre zmiešané a poskytujú dobré celkové hodnoty prietokov [8].



Obr. 3: Meranie koncentrácie v troch rôznych bodoch priečneho profilu pri odlišných dĺžkach úsekov [8].

Ak je dĺžka úseku pri jednorazovej injektáži dostatočná dochádza k optimálnemu premiešaniu. Nasvedčujú tomu aj skoro identické plochy kriviek koncentrácií. Takto je možné dosiahnuť presnejšie stanovenia prietokov. Zväčšením optimálnej dĺžky L_D na dĺžku L_f sa predlžuje čas merania a tvar mraku je pretiahnutejší [8].

Dĺžku zmiešavacieho úseku sme v našom prípade určovali na všetkých tokoch ako 25násobok šírky koryta toku [2], [7]. Správnosť určenia zmiešania roztoku v toku sme overovali, a to porovnaním plôch meraných koncentrácii „soľných vĺn“ (Obr. 4). Preto je nevyhnutné, aby sme pri meraní v koncovom priečnom profile umiestnili minimálne dve sondy. Ide o jeden so spôsobov ako predísť k možnej chybe pri následnom stanovení prietoku a interpretácii výsledkov.



Obr. 4: Schéma zachytenia prechodu soľného mraku pomocou sond [5].

Iný spôsob ako si overiť správnosť určenia dĺžky zmiešavacieho úseku je priamo v teréne využitie farbiva (napríklad potravinárskeho, ktoré neovplyvní vlastnosti roztoku), a ktoré vmiešame do injektážneho roztoku. Vizuálne potom kontrolujeme, či prišlo k premiešaniu po celej šírke koryta v stanovenom mernom profile.

Na základe experimentálnych meraní indikátorovej metódy pre stanovenie hodnoty prietoku možno konštatovať, že je použiteľná na slovenských tokoch. Treba však venovať pozornosť

dôležitým bodom v meraní a vyhnúť sa jednotlivým chybám v meraniach, najčastejšie dochádza k nesprávnemu určeniu zmiešavacieho úseku.

4. Záver

Na voľbu najvhodnejšieho spôsobu stanovenia prietoku má vplyv niekoľko faktorov. Prihliadať musíme na druh prúdenia v korytách tokov (víry, turbulentné prúdenie a podobne), taktiež na fyzikálne vlastnosti vody (množstvo splavenín a plavenín, plávajúce predmety) a v neposlednom rade na požiadavky na presnosť a opakovateľnosť merania, merací rozsah a miesto merania.

V príspevku sme sa zamerali na poukázanie využitia indikátorovej metódy na slovenských tokoch a chybám ktorých sa pri tomto meraní možno dopustiť. Pri experimentálnych meraniach bola použitá jednorazová injektáž za použitia soľného roztoku. Základom tejto metódy je znalosť koncentrácie soľného roztoku (NaCl), ktorý sa pridáva do prúdiacej vody. Ten sa následne zmieša s vodou v toku, takže stupeň zriedenia je aj mierou množstva rozpúšťadla čiže prietoku. Skúsenosti získané z meraní nám vo viacerých prípadoch potvrdili poznatky viacerých autorov zo zahraničia, kde sa plnohodnotne využíva táto metóda. Musí byť vhodne zvolená tak koncentrácia injektážneho roztoku ako i dĺžka zmiešavacieho úseku.

Na záver môžeme zhodnotiť, že použitie indikátorovej metódy je možné i na našich tokoch, ktoré spĺňajú požiadavky stanovené pre túto metódu. Treba však venovať pozornosť dôležitým bodom v meraní a vyhnúť sa jednotlivým chybám v meraniach. Táto metóda vyžaduje však ešte stálu pozornosť a potrebu viacerých meraní, ktoré by mali napomôcť k rozhodovaniu o adekvátnosti jej využitia na našich tokoch.

Literatúra

[1] DANÁČOVÁ, Z. – KAŇUKOVÁ, K. – DANÁČOVÁ, M., 2009. Experimentálne merania pre stanovenie prietoku v otvorených korytách tokov pomocou indikátorovej metódy, 20. konferencia mladých hydrológov, Bratislava SHMÚ, 2009, s.12.

[2] DAY, T. J., 1977. Field procedures and evaluation of a slug dilution gauging method in mountain streams. Journal of Hydrology (New Zealand), 16, pp 113–133.

[3] HULL, D. E., 1962. Dispersion and persistence of tracer in river flow measurements. Richmond, Calif., California Research Corporation, 1962. 22 pp.

[4] KILPATRICK, F. A. – COBB, E. D, 1985. Measurement of discharge using tracers. Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey.

[5] LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG, 2002. Arbeitsanleitung Pegelund Datendienst Baden-Württemberg, Durchflussermittlung mit Salzverdünnungsmethod.

[6] KÄSS, W. 1992. Lehrbuch der Hydrogeologie 9, Geohydrologische Markierungstechnik. Gebrüder Bornträger Berlin, Stuttgart. 519 s.

[7] MOORE, R. D., 2004. Introduction to Salt Dilution Gauging for Streamflow Measurement: Part 1. In: *Streamline Watershed Management Bulletin Vol.7 / No*. 4 Winter 2003/04.

[8] YOTSUKURA, N., – KILPATRICK, F. A , 1973. Tracer simulation of soluble waste concentration. American Society of Civil Engineers, Journal of Environmental Engineering Division, v. 99, No. EE4.

Kontakty na autora

1 Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava, e-mail: zuzana.danacova@shmu.sk

2 Stavebná fakulta, Katedra vodného hospodárstva krajiny, Bratislava, e-mail: michaela.danacova@stuba.sk, katarina.kanukova@gmail.com

SOUČASNÝ STAV STÁTNÍ POZOROVACÍ SÍTĚ PODZEMNÍCH VOD

Jiří David[1], Dagmar Pavlíková[2], Martin Zrzavecký[2]

Abstrakt

Zásadní rekonstrukce zastaralé sítě podzemních vod (převážně vrtů) nastala projektem ISPA/FS č. 2000/CZ/16/P/PE/003 „Monitorování a hodnocení hydrosféry v souladu se směrnicemi Evropské komise o životním prostředí v České republice“, který proběhl v letech 2005 – 2008. Na něj navazují menší, ale přesto důležité, akce jako je rekonstrukce pramenů, dovybavení pozorovacích objektů dálkovým přenosem a likvidace nepotřebných vrtů.

Klíčová slova: pozorovací síť podzemních vod, projekt ISPA/FS, rekonstrukce, likvidace, dálkový přenos dat

1. Úvod

Za počátek současné pozorovací sítě podzemních vod je možno považovat období 1956 –1963, kdy byla vyprojektována a postupně realizována. Skládala se ze tří částí:

- Pozorovací síť mělkých zvodní, která sleduje režim v poříčních zónách, byla realizována v letech 1961 – 1975.
- Pozorovací síť hlubokých zvodní je soustředěna zejména do hydrogeologických struktur s plošně rozsáhlým, hydraulicky spojitým zvodněním. Výstavba byla zahájena rovněž v šedesátých letech, ale pro koncepční nejasnosti byla dobudována až na počátku 90. let.
- Pozorovací síť pramenů vznikala postupně v období 1955 – 1980.

Plánovanou součástí záměru bylo pozorování jakosti podzemních vod, kterou se v plné míře podařilo realizovat až nyní.

Po úsporných opatřeních v roce 1997 bylo z pozorování vyřazeno celkem 301 objektů. V roce 2000 celá síť sledování podzemních vod obsahovala 2124 objektů, z toho 1478 vrtů v mělkých zvodních, 245 vrtů v hlubokých zvodních a 401 pramenů. Stáří zhruba osmdesáti procent objektů přesáhlo 30 let a velká část z nich přestala po technické stránce vyhovovat. Bylo nutno začít uvažovat o rekonstrukci.

2. Projekt ISPA/FS „Monitorování a hodnocení hydrosféry v souladu se směrnicemi Evropské komise o životním prostředí v České republice“

Protože v roce 2002 značnou část území postihly povodně, nejprve proběhla v roce 2003 obnova povodní poničených vrtů, a to v rámci projektu ISPA č. 2002/CZ/16/P/PM: „Rekonstrukce a výstavba limnigrafických stanic poničených povodněmi“. Celkem bylo vyčištěno i jinak opraveno 74 vrtů, nejvíce na pobočce České Budějovice, a to 34.

Pro technickou studii rekonstrukce pozorovací sítě (rok 2000) bylo území ČR rozděleno do sedmi pracovních celků, které bylo nutné s ohledem na rozsah úkolu. Jejich vymezení bylo provedeno na podkladě tehdy platné hydrogeologické rajonizace. Tyto celky, které byly zachovány i v pozdějším projektu ISPA/FS, tvoří z hydrogeologického hlediska poměrně homogenní jednotky. ČHMÚ jako zadavatel určil základní kriteria, která musela být dodržena. Koordinátorem akce byl J. Kessl.

Podpisem Finančního memoranda v roce 2004 bylo završeno několik let přípravy technické i administrativní. Realizace byla původně plánována v letech 2005 – 2007. Ve skutečnosti se

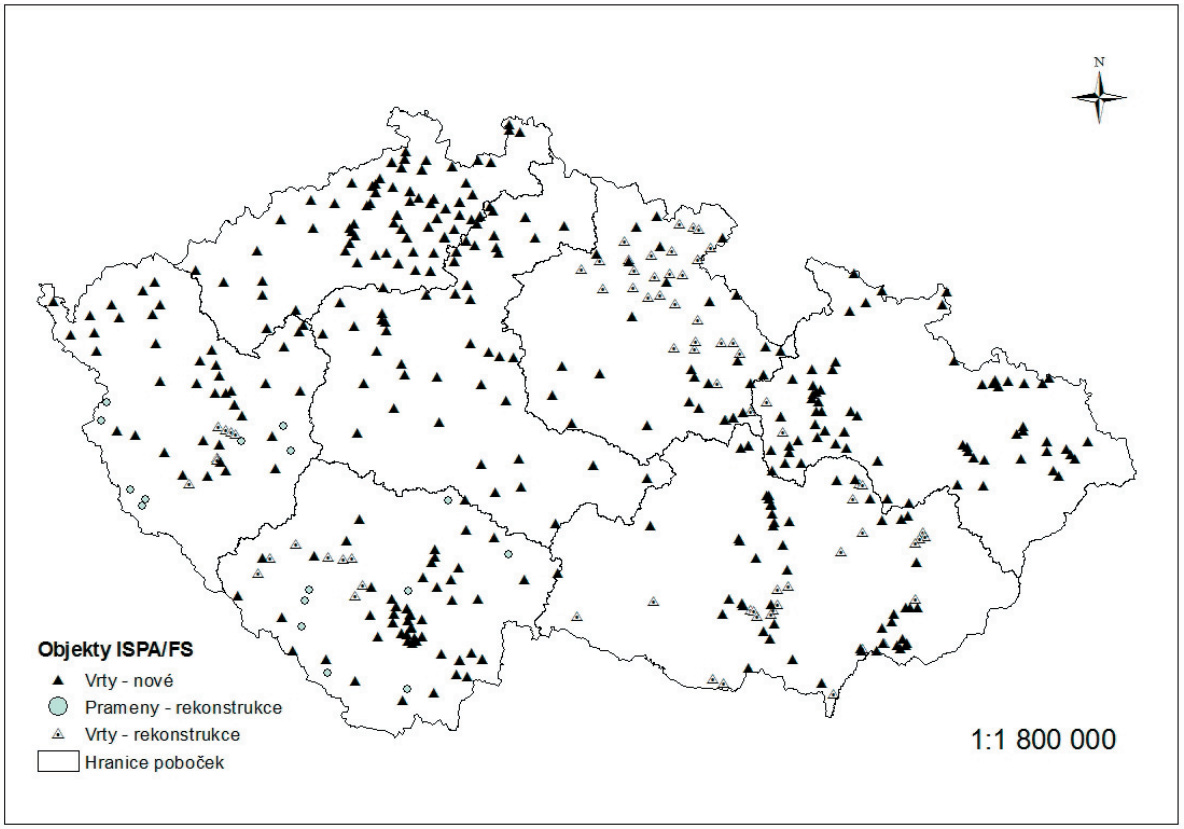
stavební práce rozběhly až počátkem roku 2006. Konečný příjemce proto požádal prostřednictvím realizačního orgánu o prodloužení projektu o 1 rok a proto bylo možno čerpat způsobilé výdaje projektu ještě v roce 2008.

Celkové náklady podle přijatých nabídek a uzavřených smluv činily 509 mil. Kč (bez DPH) a nebyly překročeny. Neuznatelné náklady včetně přípravy staveb dosáhly téměř 150 mil. Kč.

Samotný projekt byl rozdělen do 3 částí:

- Sledování podzemních vod
- Sledování jakosti povrchových vod
- Přenos a zpracování dat a distribuce informací

Sledování podzemních vod bylo objemově největší částí projektu. Bylo vybudováno 403 nových vrtů pro sledování hladiny a jakosti podzemní vody, dále bylo rekonstruováno 75 vrtů a 16 objektů pro měření vydatnosti pramenů.



Obr. 1: Mapa rozložení objektů projektu ISPA/FS vzhledem k pobočkám ČHMÚ

Zvláštním rysem projektu bylo rozdělení celkového objemu prací do velkého množství relativně malých samostatných staveb, pro které bylo třeba zajistit všechny inženýrské činnosti podle stavebního zákona. Znamenalo to poměrně velké zatížení nejen pro dodavatele, ale také pro supervizora a konečného příjemce, který prostřednictvím svých poboček jednotlivé objekty přejímal a zajišťoval jejich uvedení do provozu.

Mezitím již byla dokončena práce na nové hydrogeologické rajonizaci. I když projekt ISPA/FS vycházel ze starší rajonizace, ukázalo se, že až na malé výjimky vyhovuje i této nové verzi.

3. Rekonstrukce pramenů

V rámci projektu ISPA/FS bylo na pobočce Plzeň a České Budějovice pokusně zrekonstruováno celkem 16 pramenů, avšak tento počet byl vzhledem k velikosti (okolo 400

objektů) a stáří pozorovací sítě pramenů naprosto nedostačující a tak další akcí, která probíhá od roku 2006 (nejprve v rámci PVS, nyní ADAPTu) je rekonstrukce pramenů. V letech 2006 - 2007 bylo zrekonstruováno 78 pramenů, v roce 2008 to bylo 11 a v roce 2009 28 pramenů. V tomto roce se plánuje především technická a projektová příprava a dohromady s rokem 2011 je plánováno přestavět cca 25 objektů.





Obr. 2: Pramen PP0574 Vejprty před… a po rekonstrukci

Při rekonstrukcích pramenů je téměř vždy (pokud terénní poměry dovolí) vybudována boční šachtice, do které lze umístit přístroj pro automatické měření stavů hladin. U několika objektů již byly tyto přístroje včetně dálkového přenosu pokusně instalovány. Přesto se domníváme, že alespoň občasná kontrola dobrovolným pozorovatelem je na rozdíl od vrtů nezbytná.

Rekonstruované prameny vhodně zapadají do obnovované státní sítě sledovaní vydatnosti pramenů.

4. Automatizace objektů podzemních vod

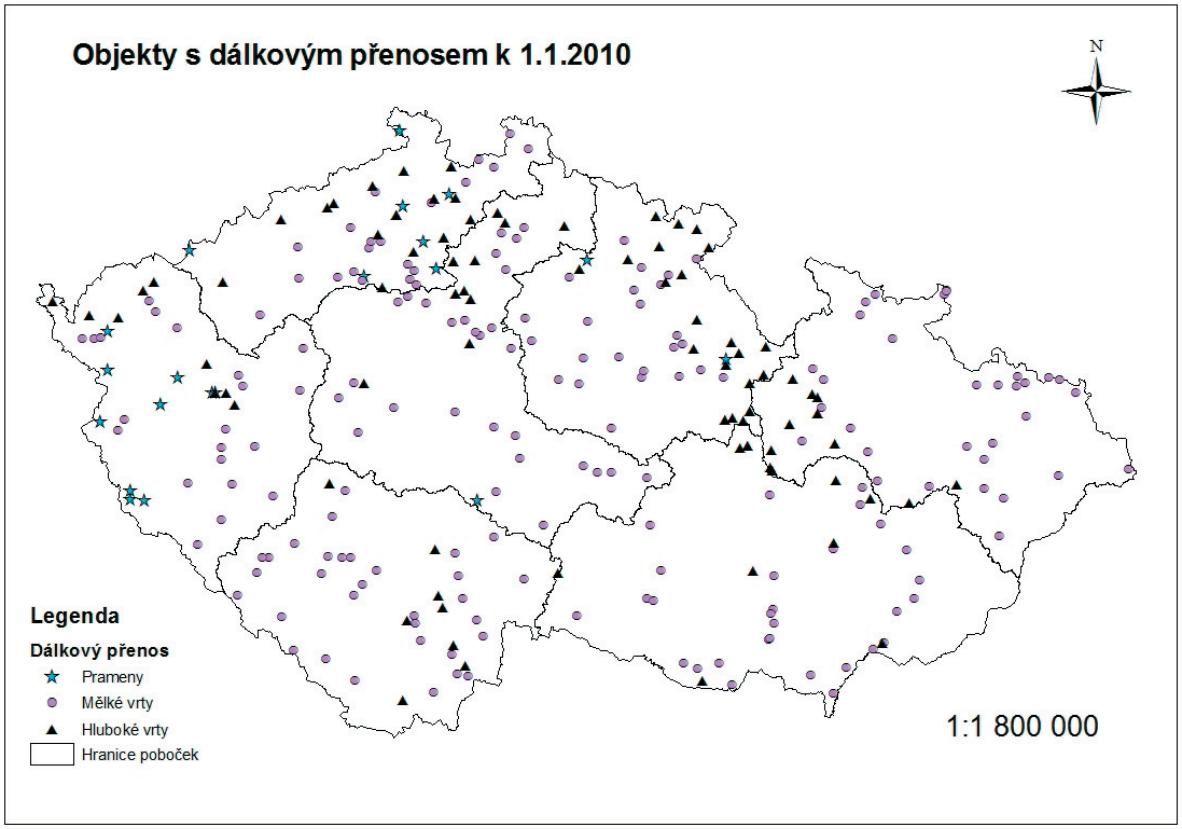
Na počátku 90. let se začalo na objekty instalovat automatické měřící zařízení, které k zjištění stavu hladiny využívalo tlakového čidla. Nejprve se zařízení využívalo především na hlubinné vrty, později i na vrty mělké. V současné době se začínají automatická měřící zařízení využívat i na pramenech.

Stav hladiny je měřen v denním/hodinovém intervalu, v případě nutnosti je možné interval ještě zkrátit (např. při čerpací zkoušce v okolí objektu).

V posledních třech letech jsou naše objekty osazovány pouze kombinací automatických měřících zařízení s dálkovým přenosem. Dálkový přenos umožňuje každodenní sledování aktuálního stavu hladiny na příslušném pracovišti i v centru a při případném selhání přístroje je možno prakticky okamžitě zasáhnout. Zařízením s dálkovým přenosem jsou přednostně vybavovány objekty hlásné sítě a objekty se špatnou dostupností.

Tab. 1: Stav automatizace vrtů k 1. 1. 2010

Pobočka	Praha	Č.Buděj.	Plzeň	Ústí n.L	Hr. Král.	Brno	Ostrava	Celkem
aut. stanice (záznam)	67	88	50	111	138	95	84	*633*
aut. stanice (záznam+přenos)	41	41	29	40	42	40	45	*278*
% automatizovaných vrtů	57,4	74,9	96,3	79,1	85,7	51,7	46,7	*66,1*



Obr. 3: Objekty s dálkovým přenosem k 1. 1. 2010

5. Likvidace nepotřebných vrtů

Na území České republiky se nachází velké množství vrtů, které byly zhotoveny různými, dnes většinou zaniklými organizacemi, o které se nikdo nestará a případný vlastník ani netuší, v jakém jsou stavu.

Geofond eviduje spoustu hydrogeologických vrtů, které byly vyvrtány před rokem 1990 a velmi pravděpodobně jsou ve velmi špatném technickém stavu (Obr. 4). Většina objektů má již zkorodovanou a zhroucenou výstroj a jednotlivé kolektory jsou vzájemně propojeny. Pokud vrty mají napjatou hladinu, voda někdy volně vytéká do terénu a vytváří mokřiny. Největší problémy způsobují vrty, které jsou v blízkosti nové pozorovací sítě ČHMÚ a způsobují různé ovlivnění hladin podzemních vod v jednotlivých horizontech.

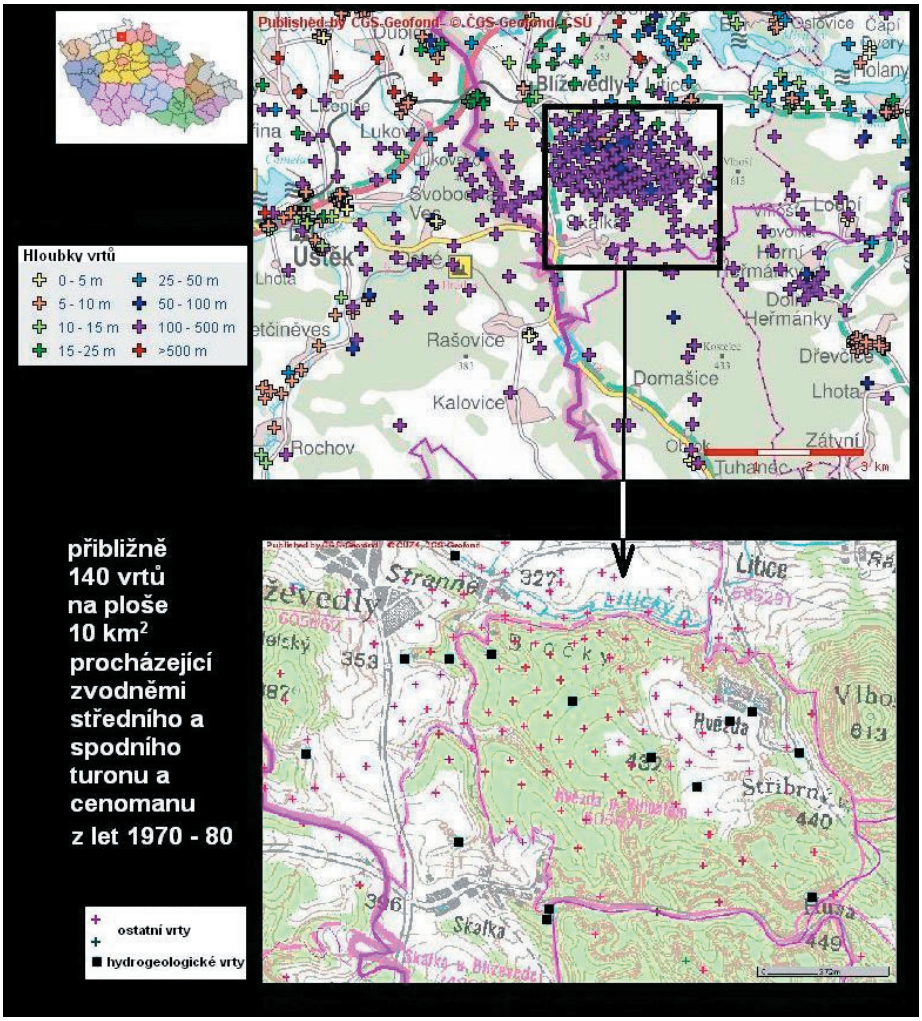
Také ČHMÚ vlastní po celé České republice téměř 1000 vrtů, které se již pro jejich havarijní stav nebo nevhodnou polohu nedají využívat pro monitorování pohybů hladiny podzemních vod. Tyto vrty nemohou v terénu trvale zůstat, protože jsou možným zdrojem ohrožení kvantity i kvality podzemních vod a je třeba tyto vrty odborně zlikvidovat.

Tab. 2: Přehled likvidace vrtů z majetku ČHMÚ.

	r. 2007	r. 2008	r. 2009	r. 2010 *
Vrty hluboké	20	35	58	39
Vrty mělké	5	40	43	84
Celkem (ks)	25	75	101	123

** likvidace vrtů pro rok 2010 jsou v realizaci, počty objektů na konci roku se mohou o něco lišit*

Nákladnost likvidace závisí na místních podmínkách a typu objetu, nejdražší jsou likvidace hlubokých vrtů. Celá realizace likvidace probíhá již od roku 2007, nejprve z peněz programu PVS, nyní z programu ADAPT. Do konce roku 2009 bylo zlikvidováno více než 200 vrtů a pokud nám nebudou peníze kráceny, v letošním roce plánujeme likvidaci dalších 125 vrtů.



Obr. 4: Příklad velmi husté sítě vrtů v oblasti Blíževedly u Ústěku, okr. Česká Lípa



Obr. 5: Likvidace přetokového a těžko přístupného vrtu.

6. Závěr

V tomto roce sleduje ČHMÚ celkem 2 156 objektů, z toho 345 pramenů, 1415 mělkých (kvartérních) vrtů a 396 vrtů pro sledování hlubších zvodní. Počet vrtů bude ještě klesat, protože na mnoha místech byly zároveň sledovány staré vrty a nové objekty ISPA/FS, aby tyto mohly být lépe začleněny do stávající sítě.

Maximální důraz je kladen na vyhodnocování dat i režimů za pomoci nových či upravených programů pro ukládání a vyhodnocování údajů podzemních vod.

Je upřesňován seznam objektů původní sítě, které již jsou a další budou převážně pro špatný technický stav nebo nadbytečnost likvidovány. Z důvodů větší vybavenosti sítě přístroji klesá počet dobrovolných pozorovatelů, ale zvyšují se nároky na pracovníky poboček.

Vybrané objekty tvoří tzv. hlásnou síť, která zatím obsahuje pouze mělké vrty a prameny. Z ní jsou každý týden centrálně shromažďována data pro týdenní i měsíční operativní režimní zpracovávání, které slouží také jako podklad pro roční zprávu. Od začátku příštího roku by měly být do hlásné sítě zařazeny vybrané objekty ISPA/FS. Dále by od 1. 1. 2011 měla být hlásná síť rozšířena i o vrty sledující hlubší zvodně.

V oddělení podzemních vod ČHMÚ se také každoročně vyčíslují režimy podzemních vod pro jednotlivé skupiny rajonů v hlavních povodích ČR, dále základní odtoky nebo přírodní zdroje v měsíčním kroku ve všech hydrogeologických rajonech základní vrstvy. Kromě toho se vyhodnocují modelem změny zásob podzemních vod ve vybraných povodích. Zároveň jsou tato data využívána jako podklady pro hydrologickou bilanci.

Literatura

[1] KESSL, J. – KNĚŽEK, M. – POSPÍŠIL, Z. – ŠEDA, S. – VRBA, J., 2000. Technická studie pro rekonstrukci pozorovací sítě podzemních vod. Praha: ČHMÚ.

[2] PAVLÍKOVÁ, D., 2009. Státní pozorovací síť podzemních vod na počátku 21. století a činnosti s ní spojené. In: *Sborník 10. Česko-slovenského mezinárodního hydrogeologického kongresu „Voda strategická surovina pro 21. století“*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, s. 27 – 30

[3] Internetové stránky: www.chmi.cz, www.geofond.cz

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ústí nad Labem, e-mail: david@chmi.cz

2 Český hydrometeorologický ústav, OPZV, e-mail: pavlikova@chmi.cz, zrzavecky@chmi.cz

PROBLEMATIKA ZAČLEŇOVÁNÍ MĚLKÝCH VRTŮ VYBUDOVANÝCH V RÁMCI PROJEKTU ISPA/FS Č. 2000/CZ/16/P/PE/003 DO STÁVAJÍCÍ STÁTNÍ POZOROVACÍ SÍTĚ PODZEMNÍCH VOD

Anna Benčoková [1]

Abstrakt

V rámci projektu ISPA/FS č. 2000/CZ/16/P/PE/003 „Monitorování a hodnocení hydrosféry v souladu se směrnicemi Evropské komise o životním prostředí v České republice“ (2005–2008) bylo vybudováno pro účely sledování podzemních vod celkem 403 nových vrtů, z toho 184 mělkých. V současné době probíhá výběr vhodných objektů pozorovací sítě, které mají shodný souběh hladin s novými vrty, tak aby bylo možné je nahradit. Bez použití dat z původních objektů, kde jsou k dispozici dlouhé řady sledování, totiž nelze nová data vztáhnout ke standardně používanému srovnávacímu období 1971–2000 a vyhodnotit.

Řada nových vrtů nacházejících se v blízkosti původních vrtů však vykázala při souběžném sledování rozdílný průběh hladin (v porovnání s původními objekty). Z celkových 184 nových mělkých vrtů bylo doposud možné navázat na původní sledování v případě 68 objektů.

Klíčová slova: státní pozorovací síť, mělké vrty, ISPA/FS č. 2000/CZ/16/P/PE/003

1. Úvod

PROJEKT ISPA/FS č. 2000/CZ/16/P/PE/003 „Monitorování a hodnocení hydrosféry v souladu se směrnicemi Evropské komise o životním prostředí v České republice“ byl realizován v letech 2005–2008. Účelem projektu bylo rekonstruovat státní monitorovací sítě podzemních vod, část monitorovací sítě povrchových vod a vybavit ústav výpočetní technikou pro zpracování dat a distribuci informací tak, aby monitorování a hodnocení splňovalo požadavky dané směrnicemi ES, zejména Směrnice 2000/600/ES ustanovující rámec pro činnosti Společenství v oblasti vodní politiky. Sledování podzemních vod bylo objemově největší část projektu. Celkem vybudováno 403 nových vrtů z toho 184 mělkých, 75 rekonstrukcí vrtů a 16 objektů pro měření vydatnosti pramenů.

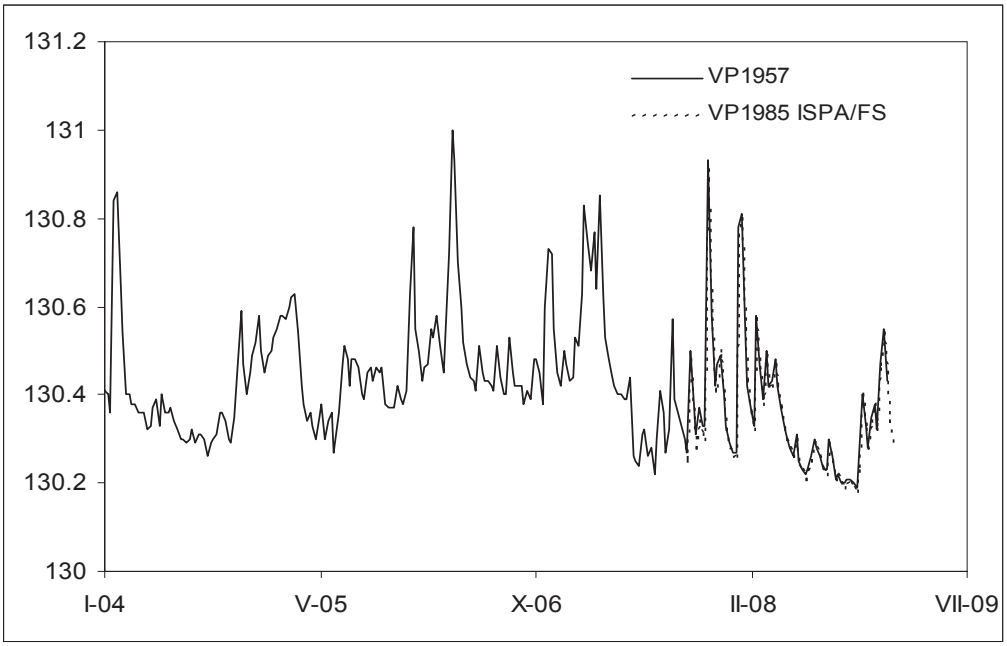
Standardní vyhodnocování objektů mělké sítě vychází z principu srovnání aktuálních hodnot s dlouhodobými statistikami za období 1971–2000. Vzhledem k tomu, že u většiny nových objektů máme k dispozici pouze dvouleté řady sledování, není možné stav podzemních vod bez použití dat z původních objektů monitorovací sítě hodnotit.

2. Metodika

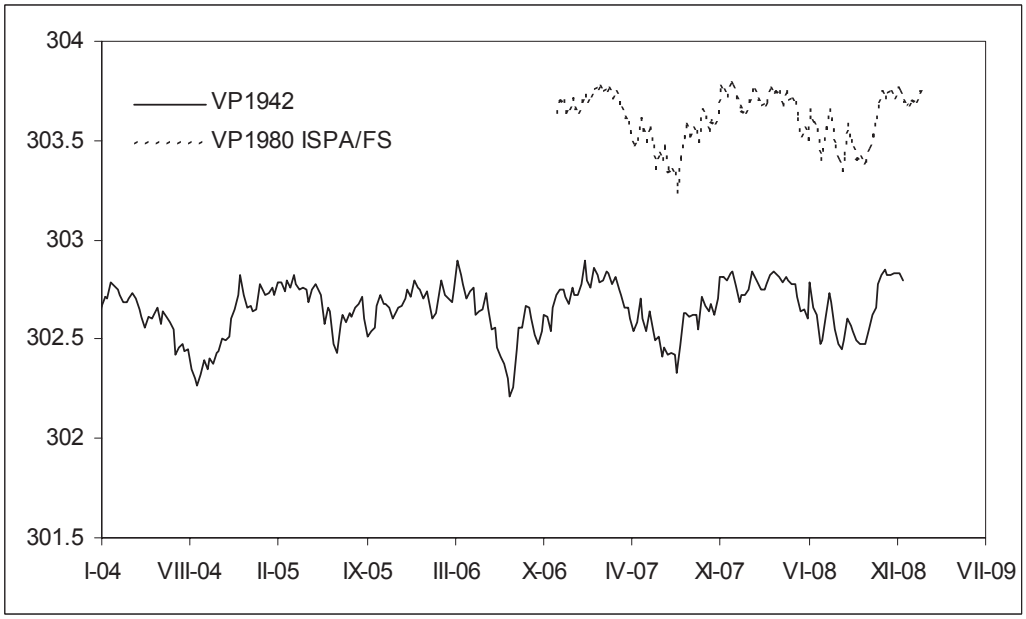
Stav podzemních vod se hodnotí standardními metodami, při kterých se aktuálně naměřené hodnoty výšek hladin srovnávají s dlouhodobými charakteristikami – zpravidla takzvanou dlouhodobou křivkou překročení. Ta umožňuje určit na základě porovnání měřené hodnoty za určité období (například měsíc, nebo rok) s jednotlivými kvantily stanovenými pro konkrétní srovnávací období (1971–2000), zda se testovaná hodnota nachází v mezích normálu, nebo se jedná o podprůměrnou, nadprůměrnou, nízkou či vysokou hodnotu. Proto je snaha vytvořit fiktivní řady pro nové objekty ISPA/FS za období 1971–2000, ze kterých by bylo možné stanovit dlouhodobé statistiky.

Za tímto účelem byla testována shoda v průběhu hladin podzemní vody u objektů ISPA/FS a vrtů z pozorovací sítě. Přibližně 90 objektů ISPA/FS bylo vybudována v bezprostřední blízkosti původních mělkých vrtů, aby bylo možné nahradit původní objekty, které byly

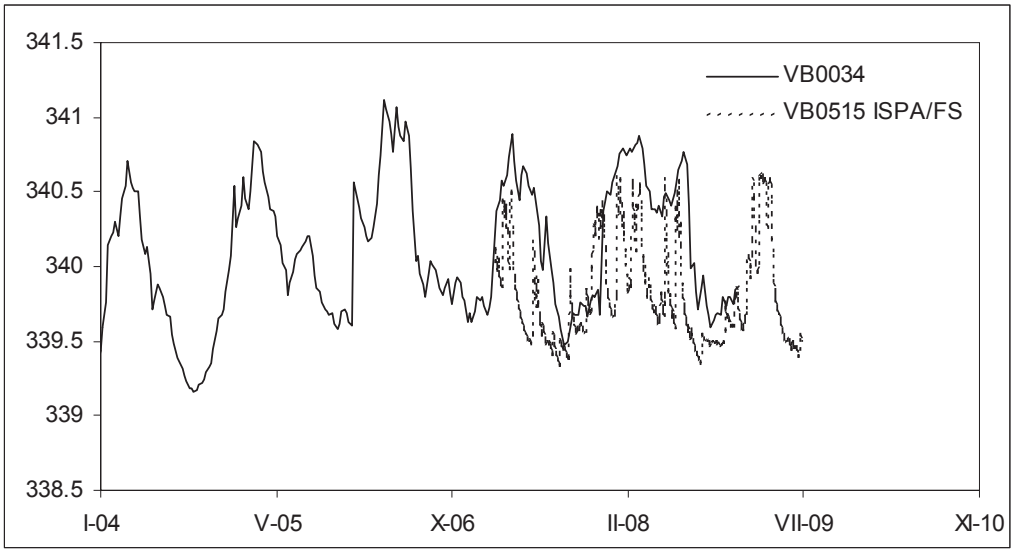
v nevyhovujícím technickém stavu. Nejprve byl proto testován souběh hladin u vrtů ISPA/FS a objektů, které byly nahrazeny. Při rozdílném chodu (testováno jako míra těsnosti – korelace) byla testována shoda s dalšími okolními objekty. Výběr vrtů vhodných pro vytvoření fiktivních řad pro nové objekty probíhal v prostředí GIS (ArcGIS 9.2), kde byly na základě prostorové analýzy (funkce *buffer*) identifikovaný objekty nacházející se v okruhu jednoho a pěti kilometrů od nového vrtu. Z nich byly dále vybrány pouze objekty mělké sítě, které doposud měří, případně se s jejich sledováním přestalo v uplynulých dvou letech. Pomocí funkce *spatial join* byly takto vybrané původní objekty spárovány s novými objekty. Celkem bylo následně testováno více než 300 párů vrtů (ISPA/FS a původních objektů).



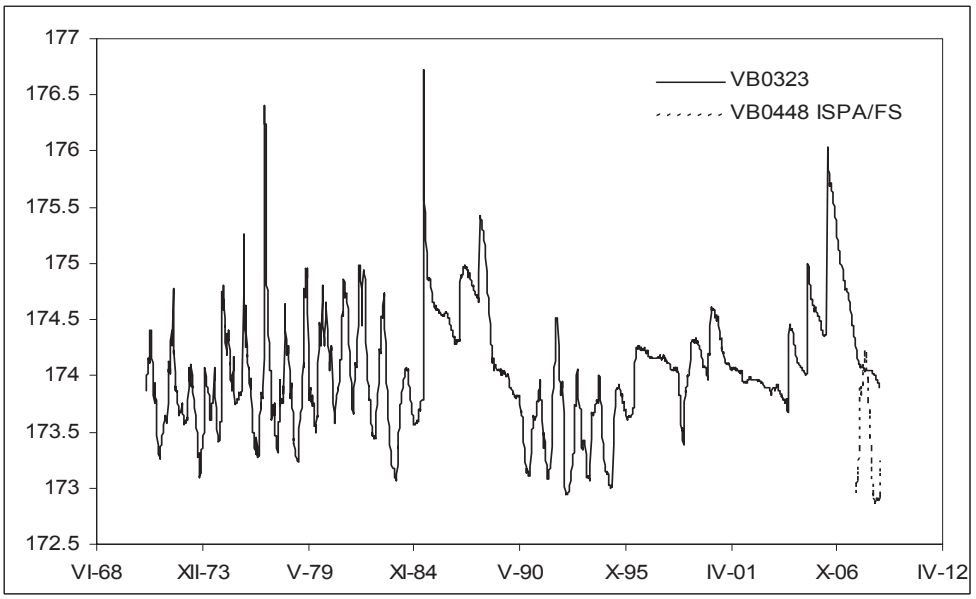
Obr. 1: Ukázka souběhu hladin nahrazovaného a nového vrtu se stejným průběhem.



Obr. 2: Ukázka souběhu hladin nahrazovaného a nového vrtu, kde je stejný průběh, ale hladiny jsou oproti sobě posunuté.



Obr. 3: Ukázka souběhu hladin nahrazovaného a nového vrtu, kde se průběhy hladin jednotlivých vrtů liší.



Obr. 4: Ukázka souběhu hladin nahrazovaného a nového vrtu, kde se průběhy hladin jednotlivých vrtů liší.

3. Výsledky

Výsledkem bylo přiřazení celkem 68 objektů k vrtům ISPA/FS, z nichž v případě 29 vrtů bylo možné použít řadu hladin podzemních vod bez korekce a u 39 s korekcí v rozmezí 0,04–6,9 m.

Shoda souběhu hladin, která umožňuje použití dat z původního objektu bez korekce, je ukázána na obrázku 1. V řadě případů však byly hladiny oproti sobě posunuty (Obr. 2) a bylo proto potřeba původní hladiny opravit o rozdíl, tak aby bylo možné je použít pro stanovení dlouhodobých statistik. Tento posun může být způsoben jednak sklonem hladiny v případě malých rozdílů a dále také například chybným zaměřením odměrného bodu starého vrtu. Vzhledem k tomu, že některé z původních vrtů už byly zlikvidovány, nelze s jistotou určit, zda je rozdíl přirozeného původu, nebo je důsledkem chyby v zaměření.

Pro účely odstranění rozdílu hladin byl vytvořen V. Sosnou z pobočky ČHMÚ v Plzni program OHP_STAT_ORA_ISPA, který umožňuje zadat příslušnou korekci k původnímu vrtu. Opravená řada je pak použita pro výpočet statistik, které se následně uloží do databáze ORACLE. Tímto způsobem je také možné přiřadit dlouhodobé statistiky původních objektů k novým vrtům, kde byl souběh bez posunu (Obr. 1).

Problém ovšem nastává v případě vrtů, kde je průběh hladin v původním a novém vrtu odlišný (Obr. 3 a 4). Zejména v případě ukázky souběhu na Obr. 4 je patrné, že chod je velmi odlišný, navíc řada původního vrtu není zcela konzistentní. Část řady vykazuje pravidelný roční chod (1969–1984), v některých obdobích se pak vliv ročního chodu projevuje jen omezeně (1984–1990). V některých případech může být nesoulad způsoben chybným měřením pozorovatele. Tyto případy bude třeba individuálně posoudit ve spolupráci s jednotlivými pobočkami. Dále bude třeba ověřit, zda by se nedalo použít pro stanovení statistiky alespoň část období (1971–2000).

4. Závěr

Část nově vybudovaných objektů je připravena pro začlenění do sítě a v některých případech již byla data z těchto objektů použita pro vyhodnocení režimů podzemních vod v roce 2009. Dále v současné době probíhá výběr vhodných nově vybudovaných objektů, které budou začleněny do stávající hlásné sítě od začátku roku 2011. Nicméně úplné začlenění všech nových vrtů do hlásné sítě, bude s největší pravděpodobností vyžadovat úpravu stávajících metodických postupů pro vyhodnocování stavu podzemních vod, neboť u části objektů se nepodaří navázat na původní sledování.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, OPZV, e-mail: bencokova@chmi.cz

STAV A VÝVOJ ZNEČIŠTĚNÍ PLAVENIN A SEDIMENTŮ V TOCÍCH ČR NA ZÁKLADĚ VÝSLEDKŮ MONITORINGU ČHMÚ

Dušan Hypr[1], Jarmila Halířová[1]

Abstrakt

Příspěvek uvádí přehled výsledků dlouhodobého monitoringu chemického stavu sedimentů a plavenin v letech 1999 až 2009 a statistického zpracování dat s důrazem na analýzu časoprostorových změn kontaminace těžkými kovy, metaloidy a organickými látkami. Dokumentována je rozdílná míra kontaminace a zatížení v jednotlivých povodích. V souvislosti se závažností výskytu některých kontaminantů jsou zmíněny úseky toků s rizikovým potenciálem a vazba na možné zdroje znečištění.

Klíčová slova: monitoring, plaveniny, sedimenty, chemický stav, kontaminace

1. Úvod

Systematický monitoring chemického stavu vod provádí ČHMÚ v rámci státní sítě sledování jakosti vody v tocích od roku 1963. Sledovanou matricí byla dlouhodobě výhradně povrchová a podzemní voda. Teprve koncem 20. století byly na základě nových vědeckých poznatků a informací o vlivu znečišťujících látek na vodní ekosytém a jejich výskytu v jednotlivých složkách formulovány požadavky na sledování nových chemických látek a nových matric (biota, říční sedimenty) pro účely hodnocení jakosti vody v tocích a pevné matrice včetně sedimentů a plavenin se stávají součástí monitorovacích programů. Řada znečišťujících chemických látek vyskytujících se v povrchových vodách je slabě rozpustná až nerozpustná nebo se přednostně váže a kumuluje v pevných matricích. Jejich analýzy ve vodní fází jsou jen zčásti signální a mnohdy jejich obsah nelze analyticky stanovit. Jedná se především o kovy a metaloidy a celou řadu organických látek (PAU, PCB, PBDE a některé pesticidy), pro které mají analýzy v pevných matricích vyšší vypovídací schopnost než analýzy ve vodě. Hodnocení zatížení vodního ekosystému pouze na základě analytických údajů ze vzorků vody tak mnohdy neposkytuje objektivní informaci o celkové kvalitě povrchových vod. Český hydrometeorologický ústav reagoval na nové požadavky EU v oblasti ochrany vod a již od roku 1999 rozšířil sledování jakosti povrchové vody o monitoring nových matric, a to nejen sedimentů, ale i plavenin a bioty. Kvalita plavenin a jejich množství má význam pro sledování transportu znečišťujících látek v rámci území České republiky i mezinárodních povodí. Původně pilotní projekt sledování jakosti plavenin a sedimentů na 20 profilech hlavních toků a jejich přítoků byl v roce 2000 rozšířen a sledování pevných matric se stalo součástí tzv. komplexního monitoringu jakosti vod na 47 profilech hlavních toků a významných přítoků (Obr.1). Profily sítě komplexního sledování byly vybrány tak, aby bylo možno získané údaje o obsazích chemických látek doplnit informacemi o průtoku vody a množství plavenin a orientačně kvantifikovat transportované množství znečišťujících látek. V současné době je sledování jakosti plavenin a sedimentů součástí programů situačního monitoringu chemického stavu povrchových vod dle směrnice 2000/60/ES. Komplexní pojetí monitoringu umožňuje solidní kontrolu vlivu vypouštění odpadních vod a také ověřování efektivity programů opatření, přijatých v rámci snižování a postupné eliminace nebezpečných látek ve vodním prostředí, jak požaduje EU (Směrnice 2000/60/ES). Problematice monitoringu pevných matric v kontextu celkového hodnocení jakosti povrchových vod je aktuálně věnována v evropské i české legislativě velká pozornost. Evropské směrnice definují látky, které mají výhradní relevanci pro pevnou matrici (Směrnice 2008/105/ES), připravují se evropské návody pro chemický monitoring sedimentů a bioty (Guidance on Chemical Monitoring of Sediment and Biota under the Water Framework Directive, zpracovaný CMA, 2010). Ve fázi schvalování jsou i národní normy environmentální kvality pro sedimenty (novelizace NV č. 61/2003 Sb.). V řadě evropských zemí je řešena problematika kvality a

množství sedimentů v povodí velkých řek také s ohledem na ochranu mořského prostředí v rámci implementace Rámcové směrnice o strategii pro mořské prostředí (2008/56/ES)



Obr. 1: Síť komplexního sledování jakosti vody

2. Metodika monitoringu

Pro účely dlouhodobého monitoringu s cílem dokumentovat aktuální znečištění a sledovat jeho další vývoj jsou v případě sedimentů odebírány 2 x ročně vzorky tzv. čerstvého sedimentu ze svrchní vrstvy uloženého sedimentu. Využívány jsou k tomu ruční odběrová zařízení, ať již krabicové hrabáky na manipulační tyči nebo prosté ruční sběračky. Metody odběru vzorků plavenin doznaly v průběhu sledování určitých změn. Původně 1x měsíčně odebírané velkoobjemové bodové vzorky vody s obsahem plavenin v mnoha případech neposkytovaly po filtraci dostatečné množství materiálu pro požadovaný rozsah analýz. V letech 1999 – 2005 byly proto v bodových vzorcích plavenin stanovovány pouze těžké kovy a metaloidy. V případě nízkých obsahů nerozpuštěných látek byl však výsledný analytický signál nekvalitní a výsledky analýz zatíženy poměrně velkou chybou. Od roku 2001 je odběr plavenin prováděn metodou odstřeďování pomocí centirfugy ALFA Laval, která za poměrně krátkou dobu umožní efektivně získat bez ovlivnění kvality vzorku (separace zrnitosti) dostatečné množství materiálu jak pro analýzy kovů tak organických látek. Od roku 2006 odstředěné vzorky plavenin definitivně nahradily původně odbírané bodové vzorky plavenin za cenu nižší frekvence vzorkování (4x ročně), ale s kvalitnějším analytickým výstupem,.

Rozsah sledovaných ukazatelů vychází z doporučení směrnic EU a zahrnuje i většinu látek Seznamu prioritních látek v oblasti vodní politiky (Příloha II Směrnice 2008/105/ES). Dlouhodobě je sledováno celkově 100 až 110 chemických ukazatelů (těžké kovy a metaloidy, polyaromatické uhlovodíky, celkový organický uhlík, těkavé organické látky, pesticidy, izomery PCB, trichorbenzeny, chlorfenoly a z fyzikálních parametrů zrnitostní složení). Veškeré analytické práce pro monitoring zajišťují subdodavatelé.

3. Výsledky monitoringu

3.1 Statistické zpracování

Použité datové soubory

Pro statistické analýzy byly zpracovány kolekce dostupných dat bodových vzorků sedimentů a odstředěných vzorků plavenin v rozsahu roků 1999/2001–2009 z 47 profilů monitorovací sítě.. Pro základní statistiku bylo počítáno celkem 117 proměnných (látek) a pro podrobnější analýzu bylo vybráno celkem 45 látek s největším množstvím naměřených údajů. Hodnoceny byly také datové soubory sedimentovatelných plavenin z programu MKOL (profily Valy, Lysá, Obříství, Zelčín a Děčín, kontinuální sledování) a data získaná na profilech situačního monitoringu analýzou filtrovaných plavenin (data 1x měsíčně, do roku 2005). Hodnoty pod

mezí stanovitelnosti byly nahrazeny přímo hodnotami mezí. Datové soubory a výpočty jsou tak zatíženy chybou, zvláště pokud meze stanovitelnosti byly v některých obdobích vyšší než jiné reálně měřené hodnoty. Dalším nedořešeným problémem je kladná šikmost (někdy až lognormální rozdělení) a častá polymodalita souborů a z toho plynoucí nereprezentativnost středních hodnot souborů.

Použité statistické metody

Pro datové soubory jednotlivých látek byly pro každý profil konstruovány časové řady a histogramy koncentrací látek. Byly vypočteny základní parametry popisné statistiky. Podrobnější statistické analýzy byly s ohledem na množství dat za dané období uskutečněny pro matrici plaveniny. Soubory dat získaných různým typem odběru byly testovány dvouvýběrovými neparametrickými testy (Kolmogorov Smirnov, Wald-Wolfowitz a Mann-Whitney). Obdobně byl z dat na profilu Děčín testován případný vliv průtoku vody a množství transportovaných plavenin na obsah vybraných látek v plaveninách. Podrobnější záznam chemického stavu plavenin souboru dat programu MKOL dovolil testy statistického významu období odběru na obsahy látek vícenásobným testem shody mediánů (Kruskal-Wallisův test). Na profilu Děčín byla provedena ještě analýza struktury dat z pohledu časových změn s cyklickou povahou (variogramy) a analýza struktury vztahu hodnot okamžité koncentrace plavenin a průměrných hodnot průtoku. Výsledky ukázaly, že lze hodnověrně zpracovat zjednodušené matice dat výběru látek a jejich průměrných obsahů na profilech situačního monitoringu pomocí clusterové analýzy, tak aby bylo možné definovat základní povahu chemického stavu profilů a skupin profilů v dílčích povodích. Vícerozměrné statistické přístupy zčásti eliminují nedostatky souborů dat plynoucí z použití průměrných hodnot a náhrad za údaje pod mezí stanovitelnosti Clusterová analýza byla aplikována i na data obsahů látek v matrici sedimenty.

Předběžné závěry vyplývající ze statistických analýz a testů

Rozsah provedených analýz a testů a diskuze k již získaným výsledkům přesahuje možný rozsah předloženého hodnocení. Následuje jen stručný přehled některých zajímavých výsledků analýz a testů.

Výsledky testů vlivu typu odběru na profilech MKOL prokazují:

- Závislost výsledků vzorkování na způsobu odběru vzorku (množství a geochemický charakter vzorku, časové parametry).
- Odlišnost charakteru plavenin na jednotlivých profilech (regionální charakter plavenin a jejich dynamika).
- Jistou shodu charakteru plavenin na profilech Obříství, Valy a Lysá nad Labem vedoucí k úvaze o možnosti definovat standardní plaveniny nejméně v úseku středního Labe.
- Různou míru výpovědní hodnoty souborů dat s různým typem odběru v testech závislosti dat na místě odběru vzorku (vliv četnosti vzorkování).

Výsledky testů statistického významu období odběru na obsah vybraných látek, s ohledem na příliš striktní časové kotvení k měsíci nebo roku poskytly jen omezenou informaci o určitém významu sezonality. Pokud se týče kovů, pak vyšší koncentrace jsou obvykle v zimních měsících a lze na nich spatřovat i trend poklesu koncentrace od roku 1999 do 2009. V případě organických látek není zřejmá priorita některé části ročního období. U některých organických látek se projevuje trend poklesu koncentrace v období 1999-2009. Netýká se to kolísavých obsahů PCB nebo naopak obvykle postupně vyšších koncentrací PAU.

Výsledky analýzy struktury dat obsahu vybraných látek v plaveninách na profilu Děčín (data MKOL) z pohledu možných časových změn s cyklickou nebo jinou povahou prokazují:

- Roční sezonalitu kolísání koncentrace většiny látek vázaných na plaveniny.
- Sezonalitu nižší úrovně kolísání koncentrací většiny látek v závislosti na srážkových epizodách a tání sněhové pokrývky.

Výsledky testů statistického významu průtoku vody a množství plavenin na obsah látek v plaveninách v profilu Děčín prokazují:

- Kolísání koncentrace látek v plaveninách má roční sezonalitu a logické kolísání nižšího řádu kombinované s náhodnými epizodami. Průtok vody ani koncentrace plavenin nejsou faktorem zásadně ovlivňujícím složení plavenin z hlediska jejich chemického stavu. Podstatná je skutečnost, že v krajině jsou kromě bodových zdrojů k dispozici kontaminované zeminy a další materiál tvořící plaveniny, a to, že několikrát ročně dojde k epizodám splachu do říčních toků. Kolísání koncentrací látek se odehrává s výjimkou některých jarních extrémních epizod prakticky bez významnější korelace k průtokům vody nebo obsahům nesených plavenin. Důležitou roli hrají geografické faktory a srážko-odtokové faktory ovlivňující transport zdrojového materiálu plavenin z krajiny do říčního toku.
- Clusterová analýza z pohledu vztahu obsahů látek k denním průtokům vody a koncentraci plavenin neposkytla informaci o významnější závislosti mezi definovatelnou sezonalit koncentrací látek a jejich koncentrační úrovní.
- Variogramy logicky podtrhují sezonalitu režimu odtoku vody a odnosu plavenin.

Výsledky clusterových analýz dat koncentrací látek plavenin a sedimentů.

V obou matricích se téměř shodně zobrazuje regionální charakter kontaminace zobrazené v chemickém stavu obou vzorkovaných matric. Ukazuje se odlišný charakter Odry, Moravy a Dyje s obvykle většími koncentracemi PAU. Další podrobnější regionální diferenciace je podle ostatních skupin nebo jen vybraných kontaminantů. Charakter většiny labských sedimentů a plavenin je víceméně vzájemně shodný. Celá řada přítoků má obvykle menší míru kontaminace a sdružují se tak k sobě např. přítoky horního a středního Labe. To naopak Ohře a Bílina jsou nositelkami největších koncentrací látek v plaveninách a sedimentech. Toto zatížení se částečně zobrazuje i na profilu Labe pod Děčínem v Prostředním Žlebu. Odlišný charakter a značnou míru kontaminace vykazuje i dobře odlišitelný profil Hrádek nad Nisou. Vltava v hraničním profilu Zelčín příliš odlišná od Labe není. Plaveniny a sedimenty mají podobný typ kontaminace s jen částečně odlišným spektrem látek. Přítoky Vltavy mají různý regionálně podmíněný charakter.

Členění profilů na shluky s projevem regionálního třídění a anomálie způsobené odlišností chemického stavu hlavních toků od některých jejich přítoků koresponduje s výsledky vícenásobných a dvouvýběrových neparametrických testů počítanými pro profily dílčích povodí a pro důležité soutoky (Labe s Vltavou, Morava s Bečvou). Zobrazuje se i dynamika transportu s mísením plavenin do společných směsí a případně i geochemické změny v průběhu toku, stejně tak jako regionální charakter industrializace a další parametry socioekonomické sféry ovlivňující charakter chemického stavu plavenin a kvalitu říčního ekosystému.

S ohledem na absenci profilu na Vltavě nad Prahou lze jen v hrubých obrysech posuzovat dopad pražské aglomerace na charakter plavenin a sedimentů v závěrovém profilu Vltavy v Zelčíně. Např. jistý podíl kovů nebo PAU lze totiž přičíst na vrub kontaminace plaveninové směsi Vltavy Berounkou nebo Otavou a samotná Vltava je částečně kontaminovaná již na profilu v Březí. Podobně chybí i profil pod Českými Budějovicemi.

Souhrnné výsledky clusterových analýz jsou uvedeny v tabulkách 1 a 2, včetně výčtu přítomnosti hlavních kontaminantů.

Tab. 1: Výsledky clusterové analýzy obsahů látek v plaveninách v letech 2001 – 2009

	dílčí shluk nebo skupina		profily	přítomnost nejvýraznějších kontaminantů
vyšší obsahy PAU	A/1	odlišný pár profilů	Ústí nad Labem (Bílina)	střední PAU, vysoké obsahy kovů, aldrin, HCH, HCB, DDT,trichlorbenzeny, PCB, AOX
			Hrádek nad Nisou (Lužická Nisa)	vysoké PAU, vysoké obsahy kovů, aldrinu, DDT a derivátů, PCB, AOX, TOC
	A/2	povodí Odry a podskupiny	Jakubčovice, Svinov a Bohumín (Odra), Ostrava (Ostravice), Děhylov (Opava), Věřňovice (Olše)	vysoké PAU, kovy (B, Zn), na Ostravici PCB
			Otrokovice (Olše), Topělec (Otava)	vysoké PAU, kovy (B, Se a Cu - Otrokovice, Sb, As, Cr, Be, Co a Se - Topělec)
			Němčice a Vestřev (Labe), Předměřice (Jizera)	středně vysoké PAU, kovy (B, Pb a Zn), mírně zvýšené PCB
	A/3	povodí Moravy a Svratka a odlišná dvojice	Kroměříž, Spytihněv a Blatec (Morava), Dluhonice (Bečva), Židlochovice (Svratka)	zvýšené PAU, kovy (B, Ni), delta-HCH, trichlorbenzeny
			Bílovice (Svitava), Raškov (Morava)	vysoké PAU, pesticidy, trichlorbenzeny a PCB
nižší obsahy PAU	B/1	profily povodí Labe (a Želčín)	Valy, Lysá, Obříství, Liběchov a Prostřední Žleb (Labe)	nízké PAU, zvýšené obsahy kovy (As, B, Cr), pesticidy, trichlorbenzeny, PCB, AOX, TOC
			Želčín (závěrový profil Vltavy)	nízké PAU, zvýšené obsahy kovy (Mn, Zn), pesticidy, trichlorbenzeny, PCB, AOX, TOC
		podskupina Ohře a Ploučnice	Želina a Terezín (Ohře), Březiny (Ploučnice)	velmi nízké PAU, zvýšené obsahy kovů (Sb, As, Be, B, Cd, Co, Mn, Zn), pesticidy, trichlorbenzeny, PCB
	B/2	dílčí povodí Dyje a dva profily Moravy	Jevišovka a Pohansko (Dyje), Ivančice (Jihlava)	nízké PAU / vyšší obsahy kovy (B, Mn, Ni), pentachlorbenzen, trichlorbenzeny a mírně zvýšené pesticidy
			Lanžhot (Morava), Havřice (Olšava)	mírně vyšší PAU / (nestačí na přiřazení k A/3), vyšší obsahy B, Mn, Ni, pentachlorbenzen, trichlorbenzeny a pesticidy
		podskupina přítoků horního Labe	Sány (Cidlina), Nemošice (Chrudimka), Nepasice (Orlice), Dašice (Loučná)	velmi nízká kontaminace s výjimkou pentachlorbenzenu
	B/3	Vltava a její přítoky (mimo Topělec a Želčín)	Březí a Pěkná (Vltava), Bechyně (Lužnice) a Bukovec (Berounka)	mírně vyšší PAU / vyšší obsahy kovů (Sb, Mn, Sb, Se, Ni), Stříbro, Srbsko a Bechyně i Zn), aldrin, TOC, na Pěkné pentachlorbenzen a v
			Zruč n.S. a Nespeky (Sázava), Stříbro (Mže), Srbsko (Berounka)	nízké PAU / Srbsku a v Nespekách p.p´-DDD

Tab. 2: Výsledky clusterové analýzy obsahů látek v sedimentech v letech 1999 – 2009

	dílčí shluk nebo skupina		profily	přítomnost nejvýraznějších kontaminantů
vyšší obsahy PAU	A/1	OHŘE a BÍLINA	Ústí nad Labem a Záluží (Bílina), Želina a Terezín (Ohře)	střední až nízké PAU, vysoké všechny kovy (na Ohři kromě Cr), pesticidy, 1,2,4-trichlorbenzen, PCB, AOX a TOC
	A/2-1	dvojice profilů	Otrokovice (Olše), Děhylov (Opava)	vysoké PAU, z kovů B v Děhylově, HCH a PCB v Děhylově, 1,2,3-trichlorbenzen, pentachlorbenzen, TOC a středně vysoké AOX
	A/2-2	LUŽICKÁ NISA a dvojice profilů	Hrádek nad Nisou (Lužická Nisa)	vysoké PAU, prakticky všechny kovy (v nižší úrovni než A/1), pesticidy (středně vysoké), 1,3,5-trichlorbenzen, PCB, TOC
			Topělec (Otava), Bukovec (Berounka)	vysoké PAU, prakticky všechny kovy (v nižší úrovni než A/1), trichlorbenzeny a DDT včetně derivátů (středně vysoké), PCB, AOX, TOC
	A/2-3	povodí ODRY	Jakubčovice a Bohumín (Odra), Věřňovice (Olše)	vysoké PAU, kovy (B, Cr, Cd a Zn), HCH, HCB, trichlorbenzeny, pentachlorbenzen, TOC a v Bohumíně PCB
	A/2-4	povodí MORAVY	Spytihněv, Raškov, Olomouc (Morava)	vysoké obsahy PAU, delta-HCH a ostatní pesticidy, trichlorbenzeny, PCB, ve Spytihněvi vyšší obsahy B a Cr, v Raškově Cd
		povodí DYJE	Bílovice (Svitava), Židlochovice (Svratka)	
nižší obsahy PAU	B/1-1	profily MORAVY a DYJE (nízké PAU)	Lanžhot a Kroměříž (Morava), Dluhonice (Bečva), Havřice (Olšava)	mírně vyšší PAU mimo Lanžhot
			Jevišovka a Pohansko (Dyje), Ivančice (Jihlava)	nízké PAU (Ivančice vyšší)
	B/1-2	přítoky horního LABE (podobné i Svinov a Pěkná)	Nepasice (Orlice), Nemošice (Chrudimka), Sány (Cidlina), Pěkná (Vltava) a Svinov (Odra)	profily s nejmenší mírou kontaminace
	B/2-1	profily povodí LABE a ostatních přítoků podobné jsou i Zelčín, Březí a Ostrava	Vestřev, Němčice, Valy, Lysá, Obříství, Liběchov a Prostřední Žleb (Labe), Dašice (Loučná), Předměřice (Jizera), Zelčín a Březí (Vltava), Ostrava (Ostravice)	poměrně nízké obsahy PAU až na fluoranthen a na několika profilech benzo(a)pyren, obvykle vyšší až vysoké obsahy kovů (kromě Se a Ni), mírně zvýšený až zvýšený obsah pesticidů a PCB
	B/2-2	dílčí shluk profilů přítoků VLTAVY (podobná Ploučnice)	Bechyně (Lužnice), Zruč nad Sázavou a Nespeky (Sázava), Stříbro (Mže), Srbsko (Berounka) a Ploučnice (Březiny)	nízké PAU (vyšší obsahy v Srbsku, Březinách a Zruči), vyšší obsahy kovů (mimo B a Hg), vysoké AOX

3.2 Klasifikace znečištění v jednotlivých oblastech povodí

Účelem monitoringu chemického stavu plavenin a sedimentů je mimo sledování trendu vývoje znečištění také hodnocení míry znečištění z hlediska vlivů na akvatická společenstva a zdraví člověka. Pro tyto účely je dlouhodobě využíván Metodický pokyn odboru pro ekologické škody MŽP ČR – kritéria znečištění zemin a podzemní vody z roku 1996, který obsahuje pro většinu sledovaných ukazatelů limitní hodnoty kritérií pro přirozené obsahy látek (A), zvýšené znečištění (B) a pro znečištění s rizikem pro zdraví člověka (C). Dle uvedeného normativu obsahy sledovaných látek v plaveninách a sedimentech dlouhodobě odpovídají ve většině případů úrovni přirozených hodnot nebo mírně zvýšeného znečištění. Jako zvýšené a rizikové znečištění byly hodnoceny jen nejvyšší hodnoty obsahů některých polutantů. Pouze na Bílině a Ohři je vyhodnocována např. u arsenu nebo berylia zvýšená kontaminace ve většině vzorků. Celkově lze jmenovat jako nejčastěji se vyskytující a přetrvávající kontaminanty pevných matric na našich tocích arsen, kadmium, berylium, rtuť, olovo, zinek, antimon, látky skupiny PAU a PCB, z chlorovaných pesticidů hexachlorbenzen, trifluralin, izomery řady DDT a chlorbenzeny.

Komentář stavu znečištění v jednotlivých oblastech povodí je zaměřen pouze na látky s charakteristickým výskytem pro danou oblast a látky vyskytující se v závažných koncentračních úrovních.

Oblast povodí horního a středního Labe

Obsahy sledovaných polutantů v plaveninách Labe a přítoků jsou ve většině případů dlouhodobě hodnoceny jako přirozené hodnoty (kat. A 1) nebo mírné znečištění (kat. A 2). Na Labi se vyskytuje v mírně zvýšených obsazích nejčastěji antimon, arsen, kadmium, měď a zinek a na celém středním Labi pod pardubickou průmyslovou aglomerací rtuť s nejvyššími obsahy v závěrovém profilu oblasti v Obříství. Z organických polutantů je typický pro střední úsek Labe výskyt významnějších obsahů látek skupiny chlorbenzenů (di-, tri-) obvykle s nejvyššími hodnotami v profilu Valy pod Pardubicemi. Zvýšené znečištění bylo v průběhu monitoringu sporadicky zaznamenáno na horním Labi ve Vestřevu v obsazích arsenu a benzo(a)pyrenu. Na přítocích Labe se v mírně zvýšených hodnotách vyskytují nejčastěji antimon, kadmium a zinek, na Jizeře a Loučné také měď a ojediněle rtuť. Celkově nejméně znečištěným tokem oblasti je dlouhodobě Cidlina v Sánech, kde obsahy většiny sledovaných látek s výjimkou pesticidů odpovídají přirozeným hodnotám.

Oblast povodí dolního Labe a Ohře

Chemický stav plavenin a sedimentů na Bílině, Ohři a Labi je dlouhodobě hodnocen jako nevyhovující a závažný, přesto však můžeme v průběhu monitoringu zaznamenat mírné zlepšení a doložit snížení obsahů některých problémových látek. Významným ukazatelem znečištění plavenin a sedimentů povodí je setrvale arsen a berylium na Ohři nad Nechranickou nádrží, na Bílině arsen, rtuť, izomery DDT a hexachlorbenzen, které se ve vyšší míře vyskytují také na dolním Labi pod Děčínem. V plaveninách Ohře nad Nechranickou nádrží jsou opakovaně měřeny vysoké obsahy arsenu, odpovídající rizikové kontaminaci (kat. C) a dále vysoké obsahy berylia, odpovídající mírně zvýšené až rizikové kontaminaci (kat. A2 až C). Vysoké obsahy berylia specifické pro tuto oblast souvisí pravděpodobně s atmosférickou depozicí produktů spalování hnědého uhlí. Vysoké obsahy arsenu v úrovni rizikové kontaminace jsou obvykle měřeny také v plaveninách na Bílině v Ústí n. L. Pro Bílinu a dolní Labe jsou typické i vyšší obsahy hexachlorbenzenu, rtuti a izomerů DDT (nejvyšší obsahy v rámci sledované sítě). Na Bílině byly v minulých letech tyto látky měřeny ve významných obsazích, často v úrovní zvýšené kontaminace. Po roce 2002 byl zaznamenán pokles jejich obsahů a v současné době dosahují obvykle jen mírně zvýšených hodnot, podobný efekt byl zjištěn také na dolním Labi. Znečištění Bíliny rtutí a hexachlorbenzenem souviselo zejména s provozem a vypouštěním odpadních vod ze Spolchemie a. s. Specifickým znečištěním plavenin a sedimentů Bíliny v oblasti Most - Záluží

jsou mírně zvýšené obsahy kobaltu. Vyšší kontaminaci toků oblasti prokazují také sedimenty. V sedimentech Ohře a Bíliny se ve zvýšené míře vyskytuje arsen, berylium a ojediněle rtuť. Sedimenty Labe v hraničním úseku pod Děčínem jsou mírně znečištěné kadmiem, rtutí a zinkem, dále látkami skupiny PAU, PCB, hexachlorbenzenem a izomery DDT. V případě rtuti bylo v sedimentech Labe zaznamenáno po roce 2006 mírné snížení obsahů. Vyšší znečištění je dlouhodobě monitorováno také v plaveninách a sedimentech Lužické Nisy pod průmyslovou aglomerací Liberec – Hrádek n. N., kde jsou měřeny setrvale vyšší obsahy většiny kovů a PAU. Obsahy kadmia, mědi a zinku zde patří k republikově nejvyšším zjištěným hodnotám.

Oblast povodí horní Vltavy

Kontaminace pevných matric oblasti je dlouhodobě relativně nízká. K nejzatíženějším tokům patřila dříve Otava pod Pískem s nejvyššími obsahy látek PAU, (zvýšené obsahy benzo(a)pyrenu) a ojediněle zvýšenými obsahy arsenu nebo rtuti. V současné době je v plaveninách Otavy, Vltavy i Lužnice měřeno mírné znečištění kadmiem, olovem, zinkem a na Otavě pod Pískem také rtutí. Mírně zvýšené jsou obsahy většiny látek skupiny PAU, přičemž v roce 2009 byly na všech profilech zaznamenány v plaveninách nadlimitní hodnoty benzo(a)pyrenu. Nejnižší obsahy sledovaných ukazatelů jsou dlouhodobě měřeny na profilu horní Vltavy v Pěkné. V roce 2009 zde byly sedimenty vyhodnoceny všech sledovaných ukazatelích jako neznečištěné.

Oblast povodí Berounky

Plaveniny a sedimenty Mže a Berounky vykazují dlouhodobě mírné znečištění antimonem, kadmiem, olovem, zinkem, a na Berounce pod Plzní a v Srbsku jsou v plaveninách občasně měřeny také mírně zvýšené obsahy rtuti. Pro plaveniny a sedimenty dolního toku Berounky v Srbsku jsou typické vyšší obsahy kadmia, které pravděpodobně souvisí s kontaminací povrchové vody přítoku Litavky vodami z příbramské důlní oblasti. Z pesticidů se vyskytuje v mírně zvýšených obsazích nejčastěji trifluralin v plaveninách Berounky pod Plzní a v Srbsku. Mírně zvýšené jsou v oblasti rovněž obsahy většiny látek skupiny PAU a sumy PCB, celkově však nedosahují republikově významných hodnot.

Oblast povodí dolní Vltavy

Pevné matrice vykazují setrvale relativně nízké znečištění, a to jak na Sázavě, tak na Vltavě v závěrovém profilu pod Prahou. Pouze na Sázavě pod Zručí byly do roku 2006 občasně zaznamenávány v plaveninách i sedimentech zvýšené a ojediněle až rizikové obsahy olova, v současné době již jeho hodnoty odpovídají nejvýše mírnému znečištění. V závěrovém profilu Vltavy v Zelčíně je obvykle měřeno mírné znečištění všemi sledovanými kovy (antimon, kadmium, kobalt, zinek, rtuť, nikl, měď, olovo), dále látkami skupiny PAU, PCB a pouze v ojedinělých případech pesticidy (alachlor, beta HCH, endrin, trifluralin). V případě obsahů kadmia je v plaveninách Vltavy pozorován od roku 2006 mírný nárůst hodnot, obsahy rtuti dlouhodobě kolísají bez náznaku trendu. Rovněž v sedimentech Sázavy a Vltavy jsou všechny hodnocené látky obsaženy v množstvích odpovídajících nejvýše mírnému znečištění.

Oblast povodí Odry

Významnější znečištění toků v regionu ostravské průmyslové aglomerace dokládají dřívější i současné nálezy zvýšených obsahů nebezpečných látek v pevných matricích na Odře a Ostravici. Na Odře v Bohumíně a na Ostravici v Ostravě byly v letech 1999 – 2002 měřeny relativně vysoké obsahy rtuti a kadmia, signalizující až zvýšené znečištění. Po roce 2002 byl zaznamenán významnější pokles zejména v obsazích kadmia, pravděpodobně v souvislosti s omezením některých průmyslových aktivit v regionu a v současné době jejich obsahy indikují nejvýše mírné znečištění. Podobný trend naznačují také časové řady obsahů kadmia v sedimentech. Obsahy kadmia na Ostravici v Ostravě patří dlouhodobě k nejvyšším měřeným hodnotám v rámci monitorovací sítě. V obsazích rtuti byl zjištěn pokles na hodnoty

indikující nejvýše zvýšené znečištění zejména na Ostravici v Ostravě po roce 2001. V profilu Odry v Bohumíně pod ostravskou aglomerací obsahy rtuti spíše dlouhodobě kolísají při limitu mírného znečištění s občasným výskytem vysokých hodnot v kategorii až rizikového znečištění. Výskyt těchto extrémů byl četněji zaznamenán po roce 2006 a rovněž výsledky za rok 2009 potvrzují mírné zhoršení imisní situace. Z dalších kovů je charakteristický výskyt vyšších obsahů zinku na Odře v Bohumíně a na Olši ve Věřňovicích. Z organických látek se ve významnějších obsazích vyskytují v oblasti především látky skupiny PAU se zvýšeným až rizikovým benzo(a)perenu na Odře v Bohumíně, na horní Odře v Jakubčovicích a ojediněle na Ostravici v Ostravě. Rozbory sedimentů na všech sledovaných profilech oblasti povodí Odry, včetně závěrového profilu Odry v Bohumíně, dokumentují mírné znečištění kadmiem, rtutí zinkem, olovem a látkami skupiny PAU. Nejvyšší obsahy znečišťujících látek zejména rtuti a PAU jsou dlouhodobě měřeny v hraničním profilu Odry v Bohumíně. Zvýšená kontaminace byla zjištěna v sedimentech pouze ojediněle a to na Odře v Bohumíně v obsahu benzo(a)pyrenu.

Oblast povodí Moravy

Relativně nižší úroveň znečištění ve srovnání s oblastí povodí Odry nebo Labe dokumentují plaveniny a sedimenty povodí Moravy. Obsahy polutantů jsou většinou stabilnější bez extrémních výkyvů a celkově odráží dlouhodobě setrvalou mírnou kontaminaci povodí. Výjimkou jsou látky skupiny PAU, z nichž se zejména na horním toku Moravy v Raškově a v závěrovém profilu Bečvy často vyskytuje ve zvýšených až rizikových koncentracích zejména benzo(a)pyren, případně benzo(b)fluoranthen. Mírně zvýšené obsahy PAU jsou měřeny na celém středním toku Moravy. Těžké kovy v plaveninách jsou přítomny většinou v úrovni nízkých přirozených hodnot, v případě kadmia a zinku ve většině případů v úrovni mírného znečištění. Kadmium je dlouhodobě měřeno v nejvyšších obsazích (srovnatelných s výskytem pod ostravskou aglomerací) na horním toku Moravy v Raškově. Chrom a nikl se ojediněle vyskytuje v mírně zvýšených obsazích na Olšavě a v závěrovém profilu Moravy. Obsahy rtuti jsou mírně rozkolísané, na středním úseku Moravy byl po roce 2004 zaznamenán mírný pokles obsahů rtuti z kategorie zvýšeného znečištění na úroveň hodnot bez znečištění. Typický je pro oblast povodí četnější výskyt a vyšší obsahy pesticidů. V mírně zvýšených obsazích byl měřen p,p´DDT a p,p´DDE na Olšavě v Uherském Brodu a na Moravě ve Spytihněvi, trifluralin v nejvyšších hodnotách na Moravě v Kroměříži a Spytihněvi a na Bečvě v Troubkách. Dalším typickým kontaminantem oblasti jsou chlorfenoly, které jsou měřeny ve významnějších obsazích pouze v oblasti povodí Moravy a Dyje. Rovněž v sedimentech se obsahy většiny sledovaných látek pohybují nejčastěji v úrovni přirozeného pozadí až mírně zvýšeného zatížení a mezi jednotlivými úseky toků nebyly zjištěny významné rozdíly. Limit zvýšeného nebo rizikového znečištění byl překročen pouze v obsazích benzo(a)pyrenu a benzo(a)antracenu na horní Moravě v Raškově a na Moravě ve Spytihněvi. Z pesticidů byl v mírně zvýšených obsazích zjištěn na horní Moravě alachlor, na Olšavě isodrin, trifluralin a na Dřevnici pod Zlínem hexachlorbenzen. Jako nejméně znečištěný úsek je rámci oblasti povodí hodnocena Morava v hraničním profilu Lanžhot, kde nebyly zjištěny žádné sledované látky v nadlimitních obsazích.

Oblast povodí Dyje

Podobně jako v oblasti povodí Moravy je i kontaminace plavenin a sedimentů na Dyji a jejich přítocích převážně mírná. Na přítocích Dyje se vyskytuje v plaveninách mírné znečištění antimonem, kadmiem, zinkem, niklem a mědi, na Svitavě a zejména na Svratce pod Brnem také mírné znečištění rtutí a na Jihlavě mírné znečištění chromem. Zvýšené až rizikové zatížení je vyhodnoceno pouze na Svitavě v profilu Bílovice u látek skupiny PAU v obsazích benzo(a)pyrenu, případně benzo(a)antracenu. Mírné až zvýšené znečištění se v průběhu monitoringu vyskytovalo na všech tocích také v obsazích di- a monochlorfenolů. Z pesticidů byl v plaveninách měřen v mírně zvýšeném množství (kat. A2) p,p´DDT s maximem na Svratce pod Brnem, trifluralin a ojediněle i hexachlorbenzen na Svratce pod Brnem a na

Svitavě v Bílovicích. Také v sedimentech je úroveň kontaminace kovy a organickými látkami převážně nízká v úrovni mírného znečištění , pouze v sedimentech Svitavy v profilu Bílovice jsou měřeny celkově nejvyšší obsahy látek PAU a ojediněle se vyskytuje i zvýšená kontaminace benzo(a)pyrenem.. V hraničním profilu Dyje v Pohansku se mírné znečištění sedimentů v posledních pěti letech snížilo a dnes jsou obsahy sledovaných látek, s výjimkou několika látek skupiny PAU, hodnoceny většinou jako přirozené hodnoty bez znečištění.

4. Závěr

Obsahy sledovaných látek v plaveninách a sedimentech z dlouhodobého pohledu celkově více či méně kolísají, přičemž se jako rozhodující jeví přítomnost a aktivita zdrojů znečištění ve vazbě na bývalé i stávající průmyslové emitenty a rovněž výskyt srážkoodtokových situací, během nichž jsou do toků prostřednictvím splachů z krajiny přinášeny potenciálně kontaminované nerozpuštěné látky. Celkově nižší a zdá se stabilnější obsahy polutantů jsou monitorovány v sedimentech (dlouhodobější záznam znečištění), v plaveninách (aktuální znečištění transportované tokem) jsou obsahy rozkolísanější s častějšími výskyty extrémních a odlehlých hodnot. Hodnocení vývoje znečištění je vzhledem k rozkolísanosti dat a relativně malé četnosti vzorkování obtížné. Na některých profilech lze pozorovat diskrétní trend snižování kontaminace některými látkami, ale ve většině případů měřené hodnoty obsahů kolísají kolem jisté „střední“ hodnoty s ojedinělými signály zhoršení zejména v dlouhodobě problémových lokalitách. Vliv povodňových průtoků v letech 2002 a 2006 nelze v datovém souboru časových řad jednoznačně identifikovat a doložit.

Z hlediska negativních účinků na vodní organismy a zdraví člověka lze jako nevyhovující chemický stav pevných matric hodnotit dle použitého normativu setrvalý výskyt vysokých obsahů arsenu, berylia a rtuti na Ohři a Bílině v průmyslovém regionu severních Čech a vyšších obsahů hexachlorbenzenu na Bílině a dolním Labi. Přetrvávající dlouhodobou kontaminaci životního prostředí signalizuje na většině toků mírně zvýšené znečištění plavenin kadmiem a lokálně znečištění látkami skupiny PAU (Lužická Nisa, Otava, horní Labe, Odra, horní Morava). Antropogenní vlivy jsou doložitelné znečištěním pevných matric rovněž na středním Labi, v povodí Odry na Ostravsku, na Lužické Nise, na středním toku Moravy a na Svratce pod Brnem. Pozitivním zjištěním je trend snižování obsahů arsenu a hexachorbenzenu na Bílině a dolním Labi a pokles obsahů kadmia na tocích pod ostravskou aglomerací. Monitoring v roce 2009 neprokázal v kontaminaci plavenin a sedimentů zásadní změny. Zaznamenán byl nárůst počtu lokalit s nadlimitními obsahy látek skupiny PAU, zejména benzo(a)pyrenu a benzo(a)antracenu v plaveninách. Vedle tradičně zatížených lokalit jako je Odra pod ostravsko-karvinskou aglomerací, Svitava v Bílovicích a horní Morava v Raškově, jde o horní úseky Labe a Vltavy a menší přítoky.

Monitorovací programy sledování chemického stavu vod realizované v rámci implementace Rámcové směrnice o vodách přináší základní důležité informace nezbytné k hodnocení stavu povrchových vod. Nadstavbové zpracování získaných dat zahrnující kvalitativně normativní hodnocení a statistické analýzy, odhalující funkční mechanismy říčního ekosystému (i v širších vazbách než jsou průtok vody, transport plavenin a kontaminace vod, plavenin nebo sedimentů), mohou vést k dalšímu podrobnějšímu poznání procesů řídících a ovlivňujících kvalitu říčního ekosystému a rovněž ke zkvalitnění opatření a legislativní regulace s cílem eliminace nebezpečných látek ve vodním prostředí. Současně je však zapotřebí optimalizovat počty vzorků s přiměřeným rozsahem měřitelných látek tak, aby byla vyvážena informační kvalita výstupu, naplnění sledovaných cílů a odpovídající finanční náročnost monitorovacích programů.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno,
e-mail: dusan.hypr@chmi.cz, jarmila.halirova@chmi.cz

PROGRAMY PRO VYHODNOCENÍ OPERATIVNÍCH DAT PODZEMNÍCH VOD OBJEKTŮ ČHMÚ

Vladimír Sosna[1]

Abstrakt

Český hydrometeorologický ústav provozuje jedinou státní celoplošnou pozorovací síť podzemních vod na území ČR. Její součástí je tzv. hlásná síť, ze které jsou získávána operativní data výšek hladin vody ve vrtech a vydatností pramenů. Data jsou částečně týdně a ve větším rozsahu měsíčně vyhodnocována porovnáváním s dlouhodobými normály. Na základě toho jsou programově generovány mapy, přehledové tabulky, slovní hodnocení a časové grafy.

Klíčová slova: operativní data podzemních vod, normálové statistiky, měsíční vyhodnocování operativních dat

1. Úvod

Součástí celoplošné pozorovací sítě podzemních vod Českého hydrometeorologického ústavu je tzv. hlásná síť, která je využívána ke sběru aktuálních dat výšek hladin vody ve vrtech (v m n.m.) a vydatností pramenů (v l/s). Měření většiny objektů vrtů hlásné sítě je automatizováno (čidly pro měření hydrostatického tlaku) a přenos dat na pobočky ČHMÚ je realizován pomocí GSM. Část vrtů a všechny objekty pramenů jsou stále měřeny manuálně s týdenní periodou předávání dat od dobrovolných pozorovatelů. Hlásná síť je v ČHMÚ v různých podobách provozována od sedmdesátých let. V minulosti byla operativní data vyhodnocována měsíčně centrálně i regionálně na pobočkách ČHMÚ, pokaždé poněkud odlišným způsobem. Od začátku roku 2008 bylo vyhodnocování operativních dat centralizováno a sjednoceno. Provádí ho nyní Oddělení podzemních vod (OPZV) ČHMÚ v Praze. K tomuto účelu byly vyvinuty tři programy. První pro sběr operativních dat, druhý pro výpočet normálových statistik a třetí pro jejich pravidelné týdenní a měsíční vyhodnocování.

2. Sběr operativních dat na pobočkách ČHMÚ

Pracovníci poboček ČHMÚ ručně pořizují operativní data předávaná týdně od dobrovolných pozorovatelů (část vrtů a všechny prameny) nebo získaná pomocí GSM přenosu z automatizovaných stanic. K jejich pořízení, kontrolám a případným opravám slouží program interně v ČHMÚ nazývaný PodzWin. Zkontrolovaná operativní data jsou z prostředí programu PodzWin zapisována prostřednictvím interní datové sítě do databáze ORACLE provozované centrálně na serveru v Praze-Komořanech.

3. Výpočet normálových statistik

Normálové statistiky potřebné pro měsíční vyhodnocování operativních dat podzemních vod jsou uloženy centrálně v ORACLE databázi. Pro jejich výpočet byl vyvinut program, který je provozován jako plně databázová aplikace. Znamená to, že vstupní i výstupní data jsou uložena v prostředí databáze ORACLE. Výpočet se provádí nad časovými řadami, které pracovníci poboček ČHMÚ upravili pro výpočty statistik. Především, pokud to bylo možné, doplnili případně chybějící data pomocí regrese s blízkým podobným objektem a očistili data od rušivých vlivů (např. čerpací zkoušky). K této přípravě dat byl využit výše zmíněný program PodzWin. Vlastní výpočty normálových statistik pak byly provedeny centrálně na

OPZV v Praze. Základem pro výpočet jsou časové řady měsíčních dat. Použity byly výhradně měsíční mediány, nikoliv průměry. Mediány mají oproti průměrům výhodu větší robustnosti před vychýlenými hodnotami v měření (vyplývá to z povahy dat podzemních vod, především pramenů). Tab. 1 nám dává představu o tom, které normálové statistiky byly programem vypočítány. V současné době se používají normály pro třicetiletí 1971 – 2000. Pro každý měsíc v roce je vypočítán průměr, směrodatná odchylka, šikmost, křivka překročení sestavená pro devět různých procent překročení a také přehled extrémů a příslušných roků jejich dosažení. Stejné statistiky jsou opět pro měsíční data vypočítány bez rozlišení jednotlivých měsíců v roce. V tabulce je najdeme ve sloupci „Celkem“. Nejdůležitější je celkový průměr a směrodatná odchylka. Používají se pro normalizaci dat při výpočtu tzv. „směrodatné proměnné“.

Tab. 1: Ukázka tabulky v databázi ORACLE s vypočítanými normálovými statistikami

Měsíc:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Celkem:
Počet hodnot:	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	360
Průměr:	421.221	421.269	421.302	421.312	421.242	421.237	421.174	421.179	421.144	421.166	421.194	421.212	421.221
Směrodatná odchylka:	0.23	0.22	0.224	0.233	0.213	0.222	0.213	0.232	0.22	0.222	0.237	0.227	0.227
Šikmost:	0.393	0.128	0.136	0.028	0.058	-0.041	0.583	0.173	-0.061	0.284	0.446	0.216	0.183
90% p. překročení:	420.91	421	421.05	421.08	420.92	420.895	420.9	420.855	420.8	420.88	420.91	420.91	420.91
85% p. překročení:	420.93	421.02	421.075	421.1	420.99	420.97	420.9	420.89	420.86	420.92	420.95	420.945	420.98
75% p. překročení:	421.07	421.115	421.1	421.125	421.08	421.085	421.03	421.025	421.015	421	420.995	421.04	421.05
66% p. překročení:	421.095	421.125	421.17	421.145	421.115	421.14	421.06	421.04	421.025	421.04	421.05	421.11	421.095
medián=50% p. př.:	421.175	421.28	421.313	421.327	421.25	421.232	421.118	421.17	421.105	421.115	421.183	421.21	421.21
33% p. překročení:	421.325	421.345	421.39	421.41	421.38	421.335	421.29	421.27	421.3	421.3	421.305	421.295	421.325
25% p. překročení:	421.38	421.435	421.5	421.51	421.395	421.39	421.32	421.38	421.34	421.32	421.34	421.365	421.39
15% p. překročení:	421.515	421.505	421.54	421.58	421.47	421.52	421.35	421.45	421.405	421.43	421.495	421.44	421.5
10% p. překročení:	421.56	421.605	421.605	421.71	421.555	421.55	421.57	421.54	421.465	421.525	421.555	421.57	421.54
Maximum:	421.695	421.71	421.8	421.72	421.635	421.645	421.63	421.6	421.49	421.575	421.745	421.665	421.8
Rok maxima:	1982	1999	1997	1997	1980	1986	1980	1981	1996	1996	1996	1988	1997
Minimum:	420.9	420.87	420.875	420.815	420.9	420.855	420.88	420.82	420.74	420.78	420.78	420.78	420.74
Rok minima:	1974	1972	1974	1974	1974	1974	1985	1973	1992	1973	1973	1973	1992
Indikativ objektu:	VP1593	Klášter u Nepomuka											
Počátek ref. období:	1971												
Konec ref. období:	2000												

4. Měsíční vyhodnocování operativních dat

Vlastní vyhodnocování operativních dat provádí pracovnice OPZV v Praze v menším rozsahu týdenně (jen slovní hodnocení) a kompletně měsíčně. Souhrnné tabulky, časové grafy, mapy i texty slovního hodnocení jsou generovány pomocí programu na základě porovnání aktuálních dat a normálů v tabulkách databáze ORACLE. Program umožňuje slučovat více objektů do skupin, nejčastěji podle povodí nebo hydrogeologických rajonů a provádět vyhodnocení za celou skupinu. Tab. 2 představuje ukázku takového skupinového vyhodnocení pro povodí „Horní Berounka“ (Radbuza, Úhlava, Úslava, Mže). Jednotlivé objekty vrtů jsou zařazeny do intervalů podle pravděpodobnosti překročení nadmořských výšek hladin vody (jednička v příslušném sloupci intervalu). Za celou skupinu je vyčíslena absolutní a relativní četnost zařazení do jednotlivých intervalů. Podobné tabulky jsou počítány i pro vyhodnocování nárůstu nebo poklesu hladin ve srovnání s předchozím měsícem nebo se stejným měsícem předchozího roku. Při vyhodnocování diferencí (změn hladin) se rozdíly měsíčních hodnot normalizují pomocí poloviny dlouhodobého mezikvartilového rozpětí počítaného pro příslušný měsíc v roce. Zavádí se tak index poklesu nebo nárůstu.

Tab. 2: Tabulka zařazení objektů do intervalů pravděpodobnosti překročení hladin vody ve vrtech

SKUPINA: HORNÍ BEROUNKA							
MĚSÍC: 06							
ROK: 2010							
		Intervaly pravděpodobností překročení v %:					
INDIKATIV	OBEC	<85,100>	<75,85)	(50,75)	(25,50>	(15,25>)	(0,15>
VP1567	Vochov	0	0	0	0	1	0
VP1573	Staňkov	0	0	0	1	0	0
VP1576	Vstiš	0	0	0	1	0	0
VP1580	Nýrsko	0	0	0	0	0	1
VP1586	Lužany	0	0	0	1	0	0
VP1593	Klášter	0	0	0	1	0	0
VP1600	Líně	0	0	0	1	0	0
ABSOLUTNÍ ČETNOSTI:		0	0	0	5	1	1
RELATIVNÍ ČETNOSTI V PROCENTECH:		0	0	0	71.4	14.3	14.3

Tabulkám zařazení do intervalů pravděpodobnosti překročení a indexů meziměsíčního a meziročního poklesu nebo nárůstu odpovídá slovní hodnocení dané skupiny objektů, které najdeme na následujícím Obr. 1.

SLOVNÍ HODNOCENÍ OBJEKTŮ SKUPINY: HORNI_BEROUNKA

Hodnocení je provedeno vzhledem k normálu platnému pro daný měsíc.

MĚSÍC: 06

ROK: 2010

SEZNAM OBJEKTŮ VE SKUPINĚ: VP1567=Vochov, VP1573=Staňkov, VP1576=Vstiš, VP1580=Nýrsko, VP1586=Lužany, VP1593=Klášter, VP1600=Líně,

HODNOCENÍ VÝŠEK HLADIN VE VRTECH PODLE PRAVDĚPODOBNOSTI PŘEKROČENÍ:

71.4% objektů má hladiny okolo normálu nebo mírně zvýšené.

14.3% objektů má zvýšené hladiny.

14.3% objektů má velmi vysoké hladiny.

HODNOCENÍ NÁRŮSTU NEBO POKLESU HLADIN VE VRTECH VE SROVNÁNÍ S PŘEDCHOZÍM MĚSÍCEM:

U 42.9% objektů hladiny stagnují nebo pomalu klesají.

U 57.1% objektů hladiny stagnují nebo pomalu rostou.

HODNOCENÍ NÁRŮSTU NEBO POKLESU HLADIN VE VRTECH VE SROVNÁNÍ SE STEJNÝM MĚSÍCEM PŘEDCHOZÍHO ROKU:

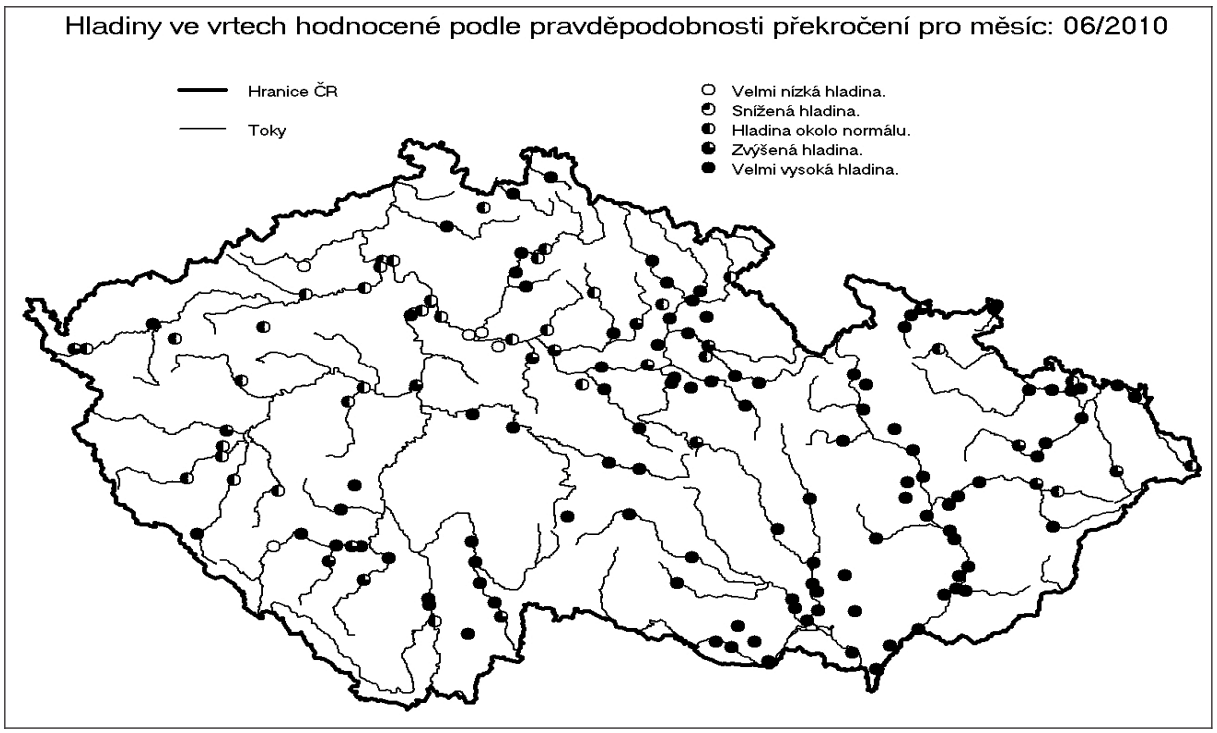
U 14.3% objektů došlo k mírnému nebo žádnému meziročnímu poklesu hladin.

U 57.1% objektů došlo k mírnému nebo žádnému meziročnímu nárůstu hladin.

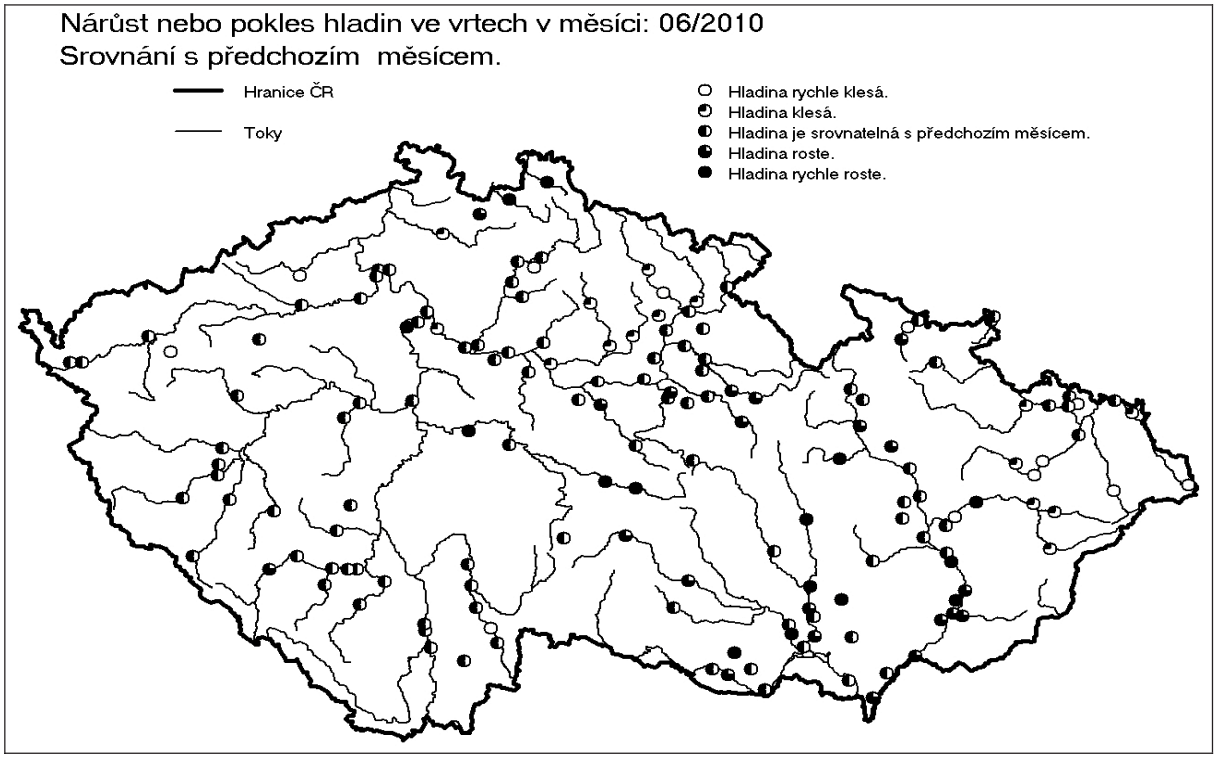
U 28.6% objektů hladiny významně meziročně narostly.

Obr. 1: Slovní hodnocení skupiny objektů vrtů generované programem

Pomocí stejného typu tabulky jako je Tab. 2 je programem pro celou Českou republiku vygenerována mapa hodnocení vrtů podle pravděpodobnosti překročení na Obr 2. Podobně mapa na obrázku Obr. 3 je generována podle tabulky indexů nárůstu nebo poklesu.

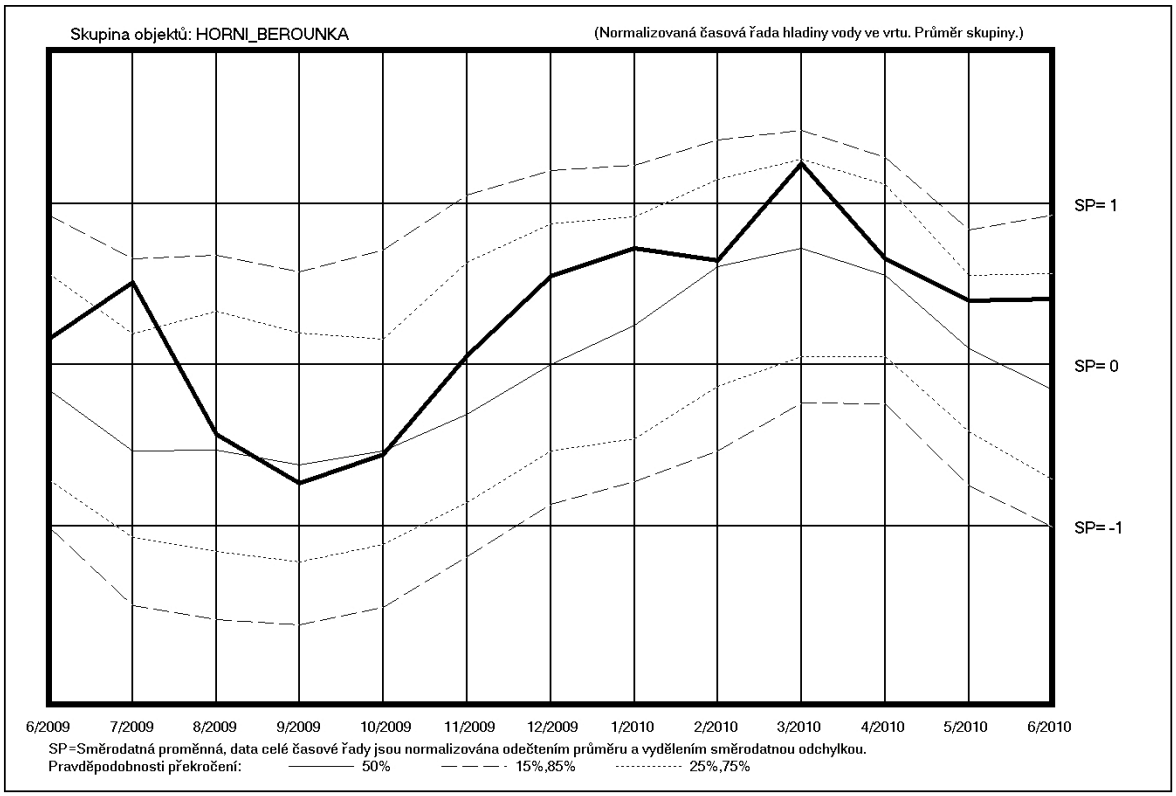


Obr. 2: Mapa hodnocení vrtů podle pravděpodobnosti překročení nadmořských výšek hladin vod



Obr. 3: Mapa nárůstů/poklesů hladin vrtů

Na obrázku Obr. 4 vidíme Graf normalizované časové řady (směrodatné proměnné, tj. od dat je odečten průměr a rozdíl je vydělen směrodatnou odchylkou). Jedná se o průměrnou hodnotu za celou skupinu „Horní Berounka“. Do grafu je v měřítku směrodatné proměnné zakreslen i dlouhodobý roční chod v podobě 15, 25, 50, 75, 85 procentních kvantilů (v opačném pořadí jsou to pravděpodobnosti překročení).



Obr. 4: Graf normalizované časové řady zprůměrované za skupinu vrtů

5. Doporučení

Aktuální mapy hodnocení operativních dat vrtů a pramenů najde zájemce na internetových stránkách OPZV ČHMÚ na adrese: http://www.chmi.cz/hydro/opzv/index.htm (nutno psát úvodní http://) nebo také na nově vznikajících stránkách http://portal.chmi.cz na titulní straně pod záložkou mapy „VODA“ a odkazem „Stav podzemních vod“. Mapy umístěné na internetu jsou v barevném provedení a jsou proto mnohem lépe čitelné, než černobílé ukázky v tomto sborníku. Další bližší informace lze získat na adrese: cerna@chmi.cz nebo sosna@chmi.cz

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, OPZV, e-mail: sosna@chmi.cz

SCREENING PESTICIDŮ V HYDROSFÉŘE ČR

Vít Kodeš [1], Jitka Vejvodová [1], Markéta Kollerová [1]

Abstrakt

V roce 2009 proběhl v rámci projektu MŠMT 2B06095 „Výskyt a pohyb pesticidů v hydrosféře ČR a nové metody optimalizace monitoringu pesticidů v hydrosféře ČR“ plánovaný screening pesticidů v povrchových vodách tekoucích, vodárenských nádržích, plaveninách, sedimentech a podzemních vodách. Doplňkově byly polární pesticidy sledovány také v pasivních vzorkovačích POCIS (Polar Organic Chemical Integrative Sampler). Poprvé byly stanovovány i látky, které se dosud v ČR nesledovaly, přestože se v ČR běžně a dlouhodobě používají v zemědělské praxi. Celkově bylo sledováno 100 lokalit povrchových vod tekoucích, 46 vodárenských nádrží a 653 lokalit sledování podzemních vod. Celkem bylo odebráno 584 vzorků povrchové vody, 165 vzorků plavenin a sedimentů, 1263 vzorků podzemních vod a 164 vzorků povrchových a podzemních vod v pasivních vzorkovačích POCIS. V povrchových vodách bylo stanoveno 110 látek a jejich metabolitů, v sedimentech a plaveninách 47 látek a jejich metabolitů, v podzemních vodách 138 látek a jejich metabolitů a v pasivních vzorkovačích 77 látek a jejich metabolitů. Výsledky prokázaly výskyt širokého spektra pesticidů v hydrosféře ČR, a to včetně vodárenských nádrží. Na základě těchto výsledků je zpracováván návrh optimalizace sledování pesticidů v hydrosféře, který bude k dispozici subjektům zajišťujícím monitoring vod v ČR.

Klíčová slova: pesticidy, metabolity pesticidů, monitoring

1. Úvod

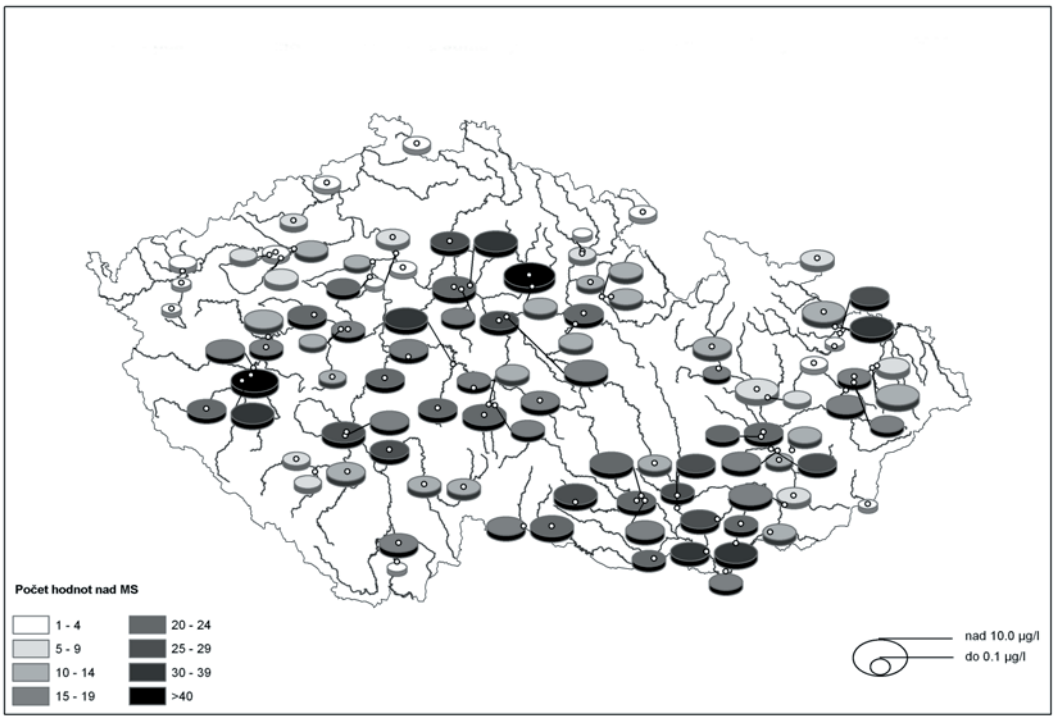
V roce 2009 proběhl v rámci projektu MŠMT 2B06095 „Výskyt a pohyb pesticidů v hydrosféře ČR a nové metody optimalizace monitoringu pesticidů v hydrosféře ČR“ plánovaný screening pesticidů v povrchových vodách tekoucích, vodárenských nádržích, plaveninách, sedimentech a podzemních vodách. Doplňkově byly polární pesticidy sledovány také v pasivních vzorkovačích POCIS. Poprvé byly stanovovány i látky, které se dosud v ČR nesledovaly, přestože se v ČR běžně a dlouhodobě používají v zemědělské praxi. Výběr látek pro screening byl založen na vyhodnocení relevance pro jednotlivé sledované matrice na základě vlastností látek určujících chování v prostředí (adsorpční charakteristiky, rozpustnost a persistence) a zohlednění povolení aplikace dané účinné látky v ČR (vyjímku tvoří perzistentní organochlorované pesticidy a látky nedávno zakázané pro použití v ČR jako např. některé triazinové pesticidy, které byly přesto do monitoringu zařazeny). Pro hodnocení potenciálu účinných látek kontaminovat podzemní vodu byl použit index GUS - Groundwater Ubiquity Score [1]. Index GUS je standardně používán pro vyjádření potenciálu látky kontaminovat podzemní vody na základě poločasu rozpadu DT50 a adsorpčních vlastností (vyjádřených pomocí rozdělovacího koeficientu K_{oc}) dle vztahu: $GUS = \log_{10}DT50 \times (4 - \log_{10}K_{oc})$. Látky dosahující hodnot GUS < 1,8 se vyznačují velmi nízkou mobilitou a mají minimální potenciál kontaminovat podzemní vody, látky s hodnotami GUS 1,8 – 2,8 jsou středně mobilní a střední potenciál kontaminovat podzemní vody, látky s hodnotami GUS > 2,8 se vyznačují vysokou mobilitou a představují významné riziko kontaminace podzemních vod. Při výběru látek se také přihlíželo k dostupnosti analytických metod používaných pro stanovení v jednotlivých matricích. Celkově bylo sledováno 100 lokalit povrchových vod tekoucích v období květen – září s frekvencí vzorkování 4x ročně, 46 vodárenských nádrží v období červenec – listopad s frekvencí vzorkování 4x ročně, a 647 lokalit sledování podzemních vod (437 vrtů a 173 pramenů státní sítě sledování jakosti podzemních vod provozované ČHMÚ s frekvecí vzorkování 2x ročně a dále bylo ovzorkováno 39 zdrojů podzemních vod pro zásobování pitnou vodou s frekvecí vzorkování 1x ročně. Odběr vzorků pro analýzu sedimentů proběhl na 93 profilech v období od srpna do

října a odběr vzorků pro analýzu plavenin proběhl odstředěním in situ na vybraných 72 z 93 profilů v období od května do října. Na každém profilu byl proveden jeden odběr.

Celkem bylo odebráno 584 vzorků povrchové vody (400 vzorků z toků a 184 vzorků z nádrží), 165 vzorků plavenin a sedimentů, 1263 vzorků podzemních vod a 164 vzorků povrchových a podzemních vod v pasivních vzorkovačích POCIS tj. celkem 2176 vzorků ve všech matricích. V povrchových vodách tekoucích bylo stanoveno 110 látek a jejich metabolitů, ve vodárenských nádržích bylo stanoveno 99 látek a jejich metabolitů, v sedimentech a plaveninách 47 látek a jejich metabolitů, v podzemních vodách 138 látek a jejich metabolitů a v pasivních vzorkovačích 78 látek a jejich metabolitů. Celkem bylo v kombinaci všech matric sledováno 167 látek a metabolitů.

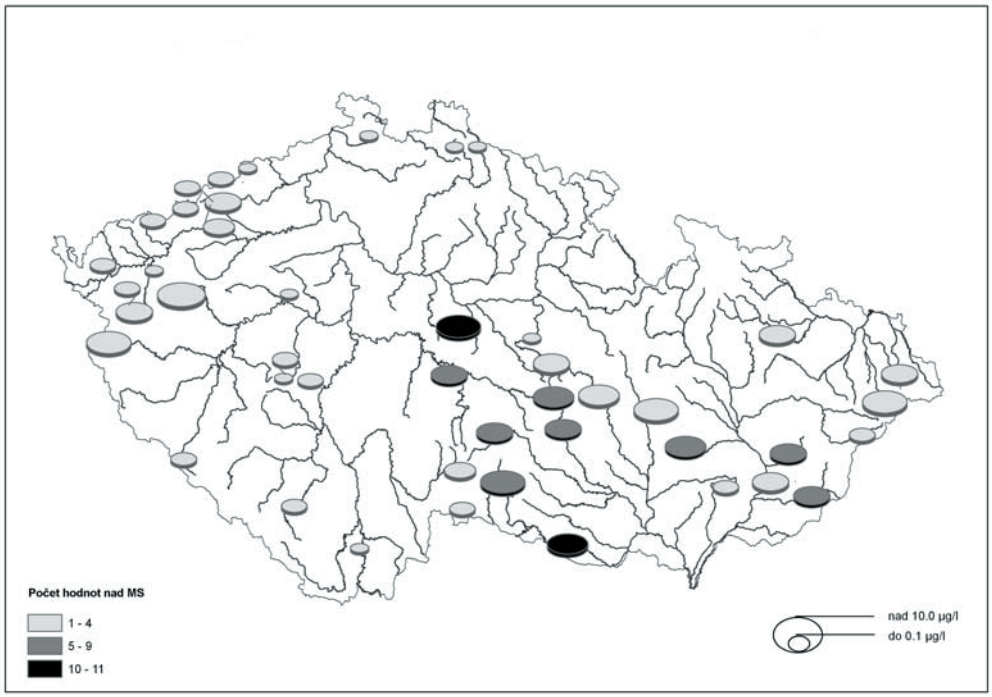
2. Výsledky

Ze 110 monitorovaných látek v povrchových vodách tekoucích bylo alespoň jedenkrát nad mezí stanovitelnosti (dále MS) detekováno 47 pesticidů. Nejčastěji ve 238 vzorcích, byl stanoven nad MS terbuthylazin a jeho metabolit desethylterbuthylazin (204 hodnot nad MS). Druhým nejčastěji naměřeným pesticidem byl atrazin, zjištěn byl ve 191 vzorku, jeho metabolit desethylatrazin byl naměřen ve 114 vzorcích. Následovaly metolachlor s výskytem v 99 a metabolit acetochlor OA, který byl nad MS v 98 vzorcích. V nejvyšších koncentracích byla naměřen MCPA (7,8 $\mu g.l^{-1}$) na Kralickém potoce u Nového Bydžova, druhou nejvyšší koncentraci dosáhl metabolit acetochlor OA (4,2 $\mu g.l^{-1}$), na témže profilu, vysoké koncentrace byly zjištěny i u terbuthylazinu (2,6 $\mu g.l^{-1}$) a jeho metabolitu desethylterbuthylazinu (1,8 $\mu g.l^{-1}$), metazachloru (1,2 $\mu g.l^{-1}$) a metabolitu metolachloru OA (1,1 $\mu g.l^{-1}$). Z hlediska zastoupení počtu pozitivně detekovaných pesticidů na jednotlivých profilech byl v průběhu celého sledování na každém profilu nalezen alespoň jeden pesticid nad MS. Nejširší spektrum látek bylo zjištěno na již uvedeném Kralickém potoku, kde bylo stanoveno 48 hodnot nad MS. Druhým nejzatíženějším tokem byla Radbuza, kde bylo stanoveno 44 hodnot nad MS. Nejméně pesticidy zatíženými toky byly Teplá a Pšovka, kde byl nad MS zjištěn pouze jediný pesticid, na Pšovce monolinuron v koncentraci 0,03 $\mu g.l^{-1}$ a v Teplé MCPP v koncentraci 0,048 $\mu g.l^{-1}$. Přehledná mapa zatížení vodních toků pesticidy, zobrazující počet hodnot nad MS a celkovou sumu pesticidů zjištěných v jednotlivých profilech, je uvedena na Obr.1.



Obr. 1: Zatížení profilů na tocích pesticidy v roce 2009

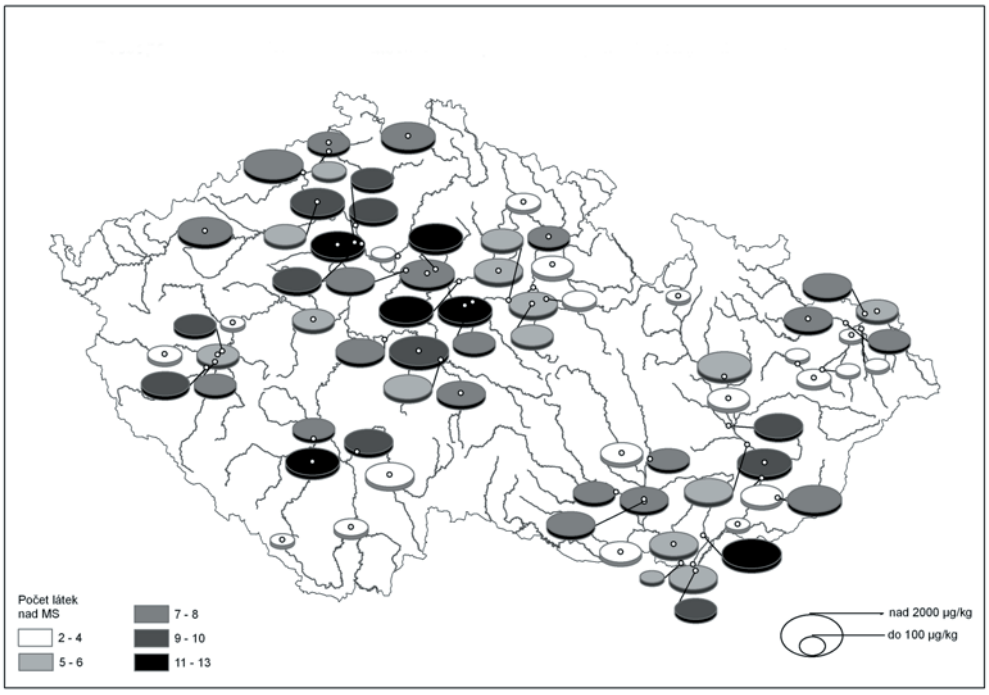
Z 99 sledovaných pesticidů ve vodárenských nádržích bylo alespoň jedenkrát nad MS zjištěno 19 pesticidů. Nejčetnější výskyt byl zaznamenán u trifluralinu, ale jeho koncentrace byly velice nízké vzhledem k nízké mezi stanovitelnosti (0,2 ng.l^{-1}). Dalšími často se vyskytujícími pesticidy a jejich metabolity) byly metabolit AMPA (44 vzorků), terbuthylazin (43 vzorků), glyfosát (36 vzorků) a metabolit metolachlor ESA (35 vzorků) nad mezí stanovitelnosti. Při porovnání jednotlivých koncentrací s hodnotou 0,1 µg.l^{-1} překročilo tuto hodnotu pouze 8 pesticidů, nejčastěji AMPA (40 vzorků), glyfosát (35 vzorků) a metabolit metolachlor ESA (31 vzorků). Mez stanovitelnosti pro všechny tři látky byla 0,05 µg.l^{-1}. Nejvyšší koncentrace byly naměřeny pro glyfosát v nádržích Boskovice (6,33 µg.l^{-1}), Žlutice (6,10 µg.l^{-1}) a Lučina (5,34 µg.l^{-1}). Druhou látkou dosahující vysokých koncentrací byl metabolit AMPA, kde nejvyšší hodnota byla naměřena v nádrži Šance (4,41 µg.l^{-1}) a v nádržích Znojmo a Hamry, kde byly naměřeny hodnoty 1,50 µg.l^{-1}. V nádrži Vrchlice bylo stanoveno nejvíce látek nad MS 11, o jeden méně bylo stanoveno v nádrži Znojmo. Nejvíce látek překročilo hodnotu 0,1 µg.l^{-1}v nádrži Nová Říše (5 látek) a Mostiště (4 látky). Odběry s nejvyššími sumárními koncentracemi pesticidů byly provedeny v srpnu na nádrži Boskovice a v září na nádrži Žlutice, celková suma koncentrací dosáhla 6,8 resp. 6,1 µg.l^{-1}. Jednotlivé odběry kde celková suma koncentrací všech pesticidů přesáhla 3 µg.l^{-1} byly i na nádržích Lučina (5,3 µg.l^{-1}), Šance (4,4 µg.l^{-1}) a Žlutice (4,1 µg.l^{-1}). Přehledná mapa zatížení jednotlivých vodárenských nádrží pesticidy, zobrazující počet hodnot nad MS a celkovou sumu pesticidů zjištěných v jednotlivých nádržích, je uvedena na Obr.2.



Obr. 2: Zatížení vodárenských nádrží pesticidy v roce 2009

Ze 47 sledovaných pesticidů bylo v sedimentech alespoň jedenkrát nad MS stanoveno 20 pesticidů. Nejčetnější výskyt byl u metabolitu p,p‘-DDE a metabolitu AMPA v 75 profilech, p,p‘-DDT bylo nad MS analyzováno na 43 profilech, glyfosát na 36 profilech a metabolit p,p‘-DDD na 33 profilech. Ostatní pesticidy měly výskyt podstatně nižší, většinou byly zjištěny na 1 – 10 profilech. Nejvyšší koncentrace byly naměřeny pro HCB v Bílině (2290 µg.kg^{-1}), druhá nejvyšší koncentrace byla zjištěna pro metabolit AMPA v Ohři (1700 µg.kg^{-1}), vysokých koncentrací dosáhlo i p,p‘-DDT v Bílině (887 µg.kg^{-1}) a glyfosát v Ostravici (630 µg.kg^{-1}). Nejvíce (8) pesticidů v jednom vzorku bylo nalezeno v tocích Prušánka, Labe u Prostředního Žlebu a Bílina. V Bílině byly naměřeny i nejvyšší koncentrace pro 5 látek - o,p‘-DDT, p,p‘-DDT, o,p‘-DDD, p,p‘-DDD a HCB. Na 9 profilech nebyl nalezen žádný pesticid s koncentrací

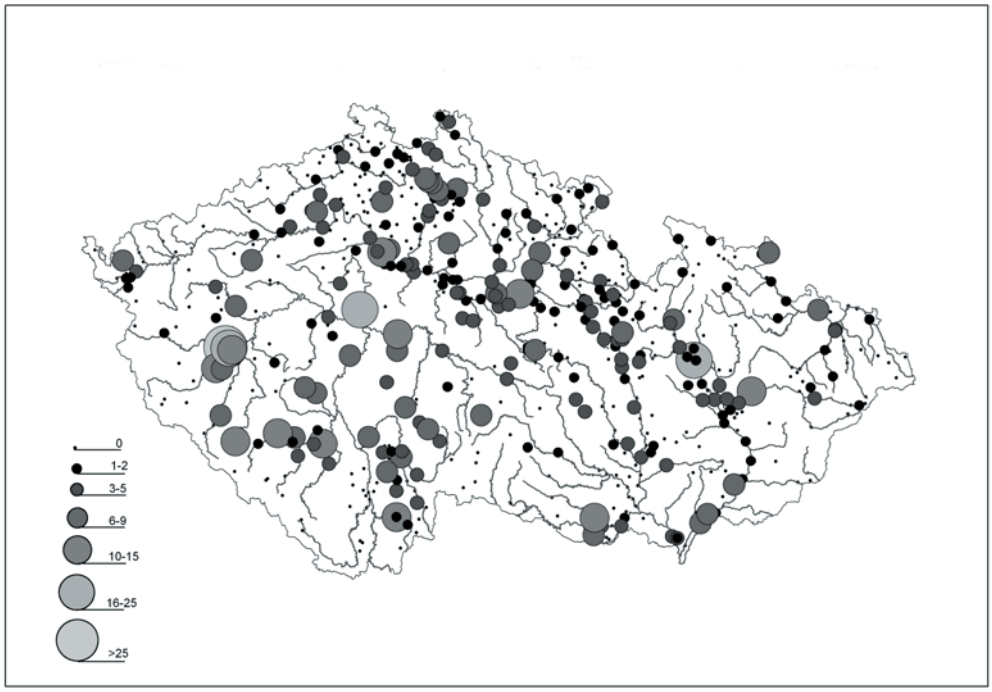
nad MS. V plaveninách bylo stanoveno nad MS více pesticidů než v sedimentech, ze 47 pesticidů bylo alespoň jedenkrát nalezeno 28 pesticidů, také hodnot nad MS bylo v plaveninách více a to 470 oproti 323 stanoveným nad MS v sedimentech. V plaveninách se nejčetněji vyskytovaly obdobné látky jako v sedimentech, na prvním místě se jednalo o metabolit p,p‘-DDE, který byl pozitivně analyzován téměř na všech profilech, ze 72 vzorků byl nalezen v 70. Druhou nejčetnější látkou bylo p,p‘-DDT (61 vzorků), třetí metabolit AMPA (56 vzorků) a dále pak glyfosát (49 vzorků). Nejvyšší koncentrace byly naměřeny pro glyfosát v toku Prušánka (3100 $\mu g.l^{-1}$), druhá nejvyšší koncentrace byla zaznamenána pro metabolit AMPA ve Výrovce (1060 $\mu g.kg^{-1}$), vysokých koncentrací dosáhl i Alachlor v Blanici - přítoku Sázavy (1050 $\mu g.kg^{-1}$) a p,p‘-DDT v Bílině (1020 $\mu g.kg^{-1}$). Na každém profilu byly v odebraném vzorku stanoveny minimálně 2 pesticidy nad MS, nejvíce, 13 pesticidů v jednom vzorku, bylo nalezeno v toku Prušánka obdobně jako u sedimentů. V tomto toku byly naměřeny i nejvyšší koncentrace pro 6 látek, gama HCH, o,p‘-DDD, p,p‘- DDE, p,p‘-DDD, terbutryn a glyfosát. Dalšími vysoce zatíženými toky byly Blanice (přítok Otavy), Cidlina, Mrlina, Bakovský potok a Klejnárka, v každém byl potvrzen výskyt 11 pesticidů. Přehledná mapa zatížení plavenin pesticidy, zobrazující počet hodnot nad MS (počet nalezených pesticidů) a celkovou sumu pesticidů zjištěných v jednotlivých profilech, je uvedena na Obr.3.



Obr. 3: Zatížení plavenin pesticidy v profilech sledovaných v roce 2009

Ze 138 pesticidů sledovaných v podzemních vodách bylo 64 látek detekováno, u 41 látek hodnota přesahovala koncentraci 0,1 $\mu g.l^{-1}$, představující limitní hodnotu pro pesticidy v podzemních vodách. Nejčastěji se ve zvýšených koncentracích vyskytovaly metabolity chloracetanilidových herbicidů alachloru a metolachloru a triazinového herbicidu atrazinu a jeho metabolitu desethylatrazinu, přestože atrazin byl ve větším množství (> 20 000 kg/rok) naposledy legálně aplikován v ČR v roce 2005. Přehledná mapa zatížení podzemních vod pesticidy, zobrazující počet hodnot nad MS zjištěných v jednotlivých objektech je uvedena na Obr. 4. Vzorkovače POCIS byly exponovány po dobu 3 týdnů ve stejných profilech, kde byly odebírány bodové vzorky povrchových vod. Jako nejzatíženější se jeví tok Velká, kde byla zjištěna nejvyšší suma koncentrací pesticidů ve vzorkovači (30,5 µg/POCIS) a zároveň byl detekován nejvyšší počet pesticidů (36 z 58 stanovovaných). Dalšími velmi zatíženými toky byly Hvozdnice a dále Sedlický potok a Martinický potok, dva přítoky do vodárenské nádrže Švihov-Želivka. Vzorkovače POCIS byly také exponovány ve vybraných 64 vrtech sítě

sledování jakosti podzemních vod ČHMÚ až po odčerpání vzorků vody v podzimním vzorkovacím kole, aby byla zajištěna jejich expozice v reprezentativním objemu „čerstvé“ podzemní vody ve vrtu na dobu 3 týdnů. Zjištěné sumy koncentrací pesticidů v pasivních vzorkovačích se pohybovaly v rozmezí 3,66–1338,4 µg/POCIS. Nejvyšší suma pesticidů byla zjištěna obdobně jako v bodových vzorcích v lokalitě Plzeň – Křimice (1338,4 µg/POCIS). Počty detekovaných pesticidů v jednotlivých lokalitách se pohybovaly v rozmezí 1–23 látek ze 78 stanovovaných. Nejvyšší počet látek (23) byl stanoven opět v lokalitě Plzeň – Křimice. Pouze v jediném ze 64 vzorkovaných objektů (lokalita Mratín) nebyl nalezen žádný ze 78 stanovených pesticidů.



Obr. 4: Zatížení podzemních vod pesticidy v jednotlivých lokalitách v roce 2009

3. Závěr

Porovnáním výskytu v nádržích a povrchových vodách je zřejmé, že jak četnost, tak maximální koncentrace dosahovaly ve vodárenských nádržích podle předpokladu podstatně nižších hodnot než ve vodách tekoucích. Ve všech sledovaných lokalitách na povrchových tocích byla zjištěna přítomnost pesticidů a pouze na 1 ze 46 vodárenských nádrží nebyla zjištěna přítomost sledovaných pesticidů (VN Slušovice). Výsledky hodnocení výskytu pesticidů v tocích a ve vodárenských nádržích byly ovlivněny různými použitými analytickými postupy, jelikož stanovení pesticidů ve vzorcích z toků a nádrží prováděly různé laboratoře. Nejvýrazněji se různé metodiky analýzy projevily u glyfosátu a jeho metabolitu AMPA, které i přes stejné požadované meze stanovitelnosti u obou laboratoří nebyly v povrchových vodách tyto látky nalezeny ani v jediném ze 400 vzorků, zatímco ve vodárenských nádržích patřily k nejčastěji se vyskytujícím látkám, které dosahovaly i nejvyšších koncentrací. Na 261 lokalitách podzemních vod z 649 sledovaných (40 % sledovaných objektů) byla zjištěna přítomnost pesticidních látek v podzemních vodách, z toho u 15 z 39 sledovaných zdrojů podzemních vod využívaných pro zásobování obyvatelstva pitnou vodou (38 % sledovaných vodárenských zdrojů) byla zjištěna přítomnost pesticidů. Celkem ve 121 sledovaných objektech (18 % sledovaných objektů) byla alespoň pro jeden pesticid překročena limitní hodnota pro podzemní vody (0,1 µg.l^{-1}). Povrchové a podzemní vody v ČR jsou nejvíce kontaminovány látkami a jejich metabolity ze skupin triazinových a chloracetinilidových herbicidů, nejvýznamnějšími kontaminanty sedimentů a plavenin jsou organochlorované

pesticidy (staré zátěže) a glyfosát s metabolitem AMPA. Screenning prokázal, že široké spektrum účinných látek a jejich metabolitů kontaminuje povrchové vody (55 látek), podzemních vody (64 látek) i plaveniny a sedimenty (20 látek). Zaměření monitoringu na primární účinné látky bez sledování jejich metabolitů může vést ke špatné interpretaci výsledků jakéhokoliv monitoringu pesticidů. Metabolity účinných látek tvoří velmi významnou část polutantů zatěžující hydrosféru ČR, tento fakt musí být zohledněn při návrzích monitorovacích programů zahrnujících sledování pesticidů ve vodních ekosystémech. Zpracovávaný návrh optimalizace monitoringu pesticidů tento fakt přirozeně zohledňuje. Ve specializované WWW aplikaci s pasportizací jednotlivých účinných látek a metabolitů (http://hydro.chmi.cz/pasporty), provozované ČHMÚ, jsou veřejnosti dostupné mimo jiné i výsledky monitoringu pesticidů v ČR včetně pitných vod (zdroj dat pro pitné vody je databáze PiVo provozovaná Státním zdravotním ústavem).

Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory projektu MŠMT 2B06095 „Výskyt a pohyb pesticidů v hydrosféře a nové metody optimalizace monitoringu pesticidů v hydrosféře ČR“.

Literatura

[1] GUSTAFSON, D. I., 1989. Groundwater Ubiquity Score. A simple method for assessing pesticide leachability. Environ. Toxicol. Chem., 8, pp 339-537.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, oddělení jakosti vody, e-mail: kodes@chmi.cz

ANALÝZA ČASOVÝCH RADOV DUSIČNANOV POMOCOU NELINEÁRNYCH MODELOV

Peter Valent[1], Ján Szolgay[1], Magda Komorniková[2]

Abstrakt

V príspevku sme analyzovali časové rady priemerných mesačných koncentrácií dusičnanov v riekach Hron a Váh. Dané časové rady sme najskôr rozložili na trendovú, sezónnu, cyklickú a reziduálnu zložku, ktorú sme potom použili na modelovanie lineárnymi modelmi triedy ARMA. V druhej časti sme pôvodné časové rady modelovali nelineárnymi viacrežimovými modelmi SETAR (z angl. self-exciting threshold autoregressive) a MSW (z angl. Markov-switching). Porovnaním oboch tried modelov sme zistili, že modelmi MSW dokážeme výrazne vylepšiť tradične používané modely ARMA, keď v niektorých prípadoch bolo zlepšenie až o 70 %.

Kľúčové slová: dusičnany, ARMA modely, MSW modely, SETAR modely

1. Úvod

Dusičnany, ako jedny z najdôležitejších látok spôsobujúcich znečistenie a eutrofizáciu povrchových a podzemných vôd sa v posledných desaťročiach stali predmetom záujmu v mnohých rozvinutých štátoch. Zvýšený obsah dusičnanov vo vodách má za následok vážne problémy s kvalitou vody ako napríklad premnoženie fytoplanktónu, úbytok rozpusteného kyslíka alebo zníženú transparentnosť čo obyčajne vedie k strate mnohých rastlinných a živočíšnych druhov, a teda aj k degradácii biologickej diverzity. Jednoduchým nástrojom na zhodnotenie úspešnosti a vplyvu týchto opatrení na dynamiku dusičnanov v povrchových a podzemných vodách je analýza časových radov nameraných koncentrácií, ktorá nám taktiež umožňuje lepšie pochopiť základný mechanizmus, pomocou ktorého sú pozorované veličiny tvorené.

Tradičným postupom pri analýze časových radov dusičnanov je dekompozícia časového radu na systematické zložky tvorené trendovou, sezónnou, cyklickou a reziduálnou zložkou, kde reziduálna zložka je ďalej modelovaná lineárnymi modelmi triedy ARMA (z angl. autoregressive moving average). Najväčším nedostatkom týchto modelov je ich neschopnosť zohľadniť rozdielne podmienky vplývajúce na tvoriaci mechanizmus pozorovanej veličiny, ako napríklad v tomto prípade veľkosť prietoku, množstvo zrážok alebo časť roku. Tento problém bol už čiastočne prekonaný viacrežimovými nelineárnymi modelmi používanými hlavne v ekonometrii. Cieľom tejto práce bolo porovnať lineárne a nelineárne modely a ich schopnosť opísať modelované časové rady.

2. Analýza časových radov

Keďže lineárnymi modelmi typu ARMA je možné modelovať iba stacionárne časové rady (s konštantným priemerom a rozptylom), je potrebné zaistiť ich stacionaritu. Na jej zabezpečenie sme použili rozklad časového radu na jednotlivé systematické zložky pozostávajúce z trendovej, sezónnej, cyklickej a zostatkovej reziduálnej zložky, ktorú sme ďalej použili ako základ pre lineárne modelovanie. Jednotlivé systematické zložky sú k sebe pripočítané a tvoria tzv. aditívny model, ktorý možno zapísať ako:

$$Y_t = T_t + S_t + C_t + R_t$$

kde Y predstavuje koncentráciu dusičnanov v čase t, T je trendová, S sezónna, C cyklická a R reziduálna zložka.

2.1 Trend

Trend je charakterizovaný ako dlhodobá zmena priemernej hodnoty časového radu [8]. Pri určovaní trendu treba byť obzvlášť opatrný najmä pri kratších časových radoch, kedy zdanlivý nárast (pokles) hodnôt môže byť iba prejavom periodicity pozorovanej pri väčšom množstve údajov. Na odstránenie trendovej zložky sme použili regresiu nasledovných funkcií: lineárnej, kvadratickej, exponenciálnej, logistickej a Gompertzovej, kde posledné dve funkcie majú tvar písmena S a sú dané vzťahmi:

$$T_{log} = \frac{a}{1 + be^{-ct}}$$

$$T_{Gomp} = a + be^{-ce^{-dt}}$$

kde *a*, *b*, *c*, *d* sú parametre funkcií. Funkciu reprezentujúcu trendovú zložku sme potom vybrali na základe minimálnej hodnoty sumy štvorcov reziduí (SSR).

2.2 Sezónna zložka

Sezónna zložka opisuje určité periodické zmeny v časovom rade, pričom perióda je rovná nejakej štandardnej dĺžke časového radu [3]. Sezónna zložka je tiež charakterizovaná ako korelačná závislosť medzi *i*-tym a (*i*+*k*)-tym prvkom časového radu, kde *k* je posunutie. Periódu sezónnej zložky sme stanovili pomocou výberovej autokorelačnej funkcie z korelogramu (pozri [8] a [1]). Na odstránenie sezónnej zložky z detrendovaného časového radu sme použili harmonickú funkciu s 12mesačnou periódou zapísanu v tvare

$$S_t = a + b\cos\left(\frac{2\pi}{12}t\right) + c\sin\left(\frac{2\pi}{12}t\right)$$

kde *a*, *b*, *c* sú parametre funkcie.

2.3 Cyklická zložka

Niektoré časové rady môžu okrem už odhadnutej periódy sezónnej zložky obsahovať aj inú, skrytú periodicitu nekorešpondujúcu s kalendárnymi jednotkami. Periódy cyklickej zložky sme odhadli metódami spektrálnej analýzy (pozri [8], [9], [1] a [7]), pričom tie štatisticky významné sme vybrali na základe Fisherovho testu periodicity [4]. Cyklickú zložku sme potom odstránili z časového radu po odstránení trendovej a sezónnej zložky pomocou nasledovnej harmonickej funkcie:

$$C_t = \alpha_1 + \alpha_2\cos\left(\frac{2\pi}{P_1}t\right) + \alpha_3\sin\left(\frac{2\pi}{P_1}t\right) + \cdots \alpha_{i+1}\cos\left(\frac{2\pi}{P_i}t\right) + \alpha_{i+2}\sin\left(\frac{2\pi}{P_i}t\right)$$

kde $\alpha_{\{1,\,2,\,\ldots,\,i+2\}}$ sú parametre funkcie a $P_{\{1,\,2,\,\ldots,\,i\}}$ sú štatisticky významné periódy.

Po odstránení všetkých systematických zložiek z pôvodného časového radu sme takto vzniknutý časový rad reziduí testovali na stacionaritu Kwiatkowski-Philips-Schmidt-Shinovým testom (KPSS) opísaným v [10]. Časový rad reziduí sme ďalej modelovali lineárnymi modelmi.

2.4 Lineárne modely triedy ARMA

Lineárne modely triedy ARMA sú v tejto práci zastúpené modelmi AR, MA a ich kombináciou modelmi ARMA opísanými v práci Boxa a Jenkinsa [1], ktorí vypracovali metodológiu na odhad ich parametrov. Jednotlivé modely sme odhadli Hannan-Rissanenovou procedúrou, kde najlepší model je vybraný na základe najmenšej hodnoty AIC (Akaikovo informačné kritérium) a BIC (Bayesovo informačné kritérium). Jednotlivé modely AR, MA a ARMA možno napísať v tvaroch:

$$x_t = \varphi_1 x_{t-1} + \cdots + \varphi_p x_{t-p} + z_t$$

$$x_t = z_t + \theta_1 z_{t-1} + \cdots + \theta_q z_{t-q}$$

$$x_t = \varphi_1 x_{t-1} + \cdots + \varphi_p x_{t-p} + z_t + \theta_1 z_{t-1} + \cdots + \theta_q z_{t-q}$$

kde p a q sú rády modelov, $\varphi_{\{1, 2, ..., p\}}$ a $\theta_{\{1, 2, ..., q\}}$ sú ich parametre a z_t je rad nekorelovaných rovnako rozdelených náhodných premenných s nulovou strednou hodnotou a rozptylom σ^2.

2.5 Nelineárne modely SETAR a MSW

Modely SETAR a MSW patria do skupiny tzv. viacrežimových modelov, kde každý model obsahuje niekoľko režimov opísaných vlastným autoregresným modelom. Modely SETAR sú špeciálnym prípadom modelov TAR (z angl. threshold autoregressive), kde režim podľa ktorého sa hodnota v čase t počíta určuje predchádzajúca hodnota pozorovaného časového radu y_{t-d} (d>0 je celé číslo predstavujúce oneskorenie) a prahová hodnota c. V prípade dvojrežimového modelu prvý režim nastane, ak $y_{t-d} \leq c$ a druhý ak $y_{t-d} > c$. Trojrežimový SETAR model môžeme zapísať ako

$$x_t = \begin{cases} \varphi_0^{(1)} + \varphi_1^{(1)} x_{t-1} + \cdots + \varphi_p^{(1)} x_{t-p} + z_t^{(1)} & ak \;\; x_{t-d} \leq c_1 \\ \varphi_0^{(2)} + \varphi_1^{(2)} x_{t-1} + \cdots + \varphi_p^{(2)} x_{t-p} + z_t^{(2)} & ak \;\; c_1 < x_{t-d} \leq c_2 \\ \varphi_0^{(3)} + \varphi_1^{(3)} x_{t-1} + \cdots + \varphi_p^{(3)} x_{t-p} + z_t^{(3)} & ak \;\; c_2 < x_{t-d} \end{cases}$$

kde $\varphi_{\{1, 2, ..., p\}}$ sú parametre AR modelov v jednotlivých režimoch (pre každý režim rozdielne), $c_{\{1, 2, ..., k-1\}}$ sú hraničné hodnoty, d je spomínané oneskorenie a z_t je proces bieleho šumu pre ktorý platí $z_t \sim N(0,\sigma^2)$. Viac informácií o modeloch SETAR v prácach [12], [2], [6] a [11].

Štruktúra MSW modelov je totožná s modelmi SETAR. Jediným rozdielom je spôsob prepínania medzi režimami, keď v prípade MSW modelov je režim určený na základe nepozorovanej veličiny s, nadobúdajúcej iba kladné celočíselné hodnoty {1, 2, ..., k}, kde k je počet režimov. Veličina s je pritom opísaná pomocou Markovovho reťazca prvého rádu, čo znamená, že pravdepodobnosť s akou stav s_t nadobudne hodnotu j je daná len hodnotou v predchádzajúcom stave:

$$P\left(s_t = j \mid s_{t-1} = i\right) = p_{ij}$$

kde i a j sú celé čísla z intervalu <1, k> a p_{ij} je pravdepodobnosť s akou režim i bude nasledovať režim j. Trojrežimový MSW model môžeme zapísať ako

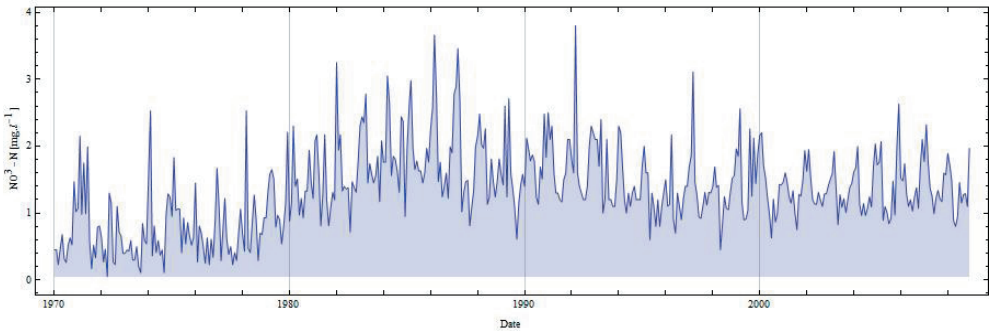
$$x_t = \begin{cases} \varphi_0^{(1)} + \varphi_1^{(1)} x_{t-1} + \cdots + \varphi_p^{(1)} x_{t-p} + z_t^{(1)} & ak \;\; s_t = 1 \\ \varphi_0^{(2)} + \varphi_1^{(2)} x_{t-1} + \cdots + \varphi_p^{(2)} x_{t-p} + z_t^{(2)} & ak \;\; s_t = 2 \\ \varphi_0^{(3)} + \varphi_1^{(3)} x_{t-1} + \cdots + \varphi_p^{(3)} x_{t-p} + z_t^{(3)} & ak \;\; s_t = 3 \end{cases}$$

kde $\varphi_{\{1, 2, ..., p\}}$ sú parametre AR modelov v jednotlivých režimoch a z_t je proces bieleho šumu pre ktorý platí $z_t \sim N(0,\sigma^2)$. Podrobnejšie o MSW modeloch v prácach [13], [5] a [6].

V práci uvažujeme len s dvoj a trojrežimovými modelmi SETAR a MSW.

3. Výsledky

Prvým analyzovaným časovým radom bol časový rad priemerných mesačných koncentrácií dusičnanového dusíka (NO_3-N) z rieky Hron pri Šalkovej z rokov 1970 až 2008 (Obr. 1). Odstránením systematických zložiek z pôvodného časového radu sme dostali stacionárny časový rad reziduí, keď ako najlepšia krivka opisujúca trendovú zložku bola Gompertzova krivka a spektrálnou analýzou sme určili dve štatisticky významné periódy: 468 a 11,7 mesiacov. Ďalším krokom bolo modelovanie lineárnymi a nelineárnymi modelmi. Keďže nelineárne modely je možno použiť aj na modelovanie nestacionárnych časových radov, modelmi SETAR a MSW sme modelovali pôvodný časový rad. Výsledky modelovania sú uvedené v Tab. 1, ktorá uvádza aj relatívne zlepšenie jednotlivých modelov k najjednoduchšiemu AR(1) modelu.

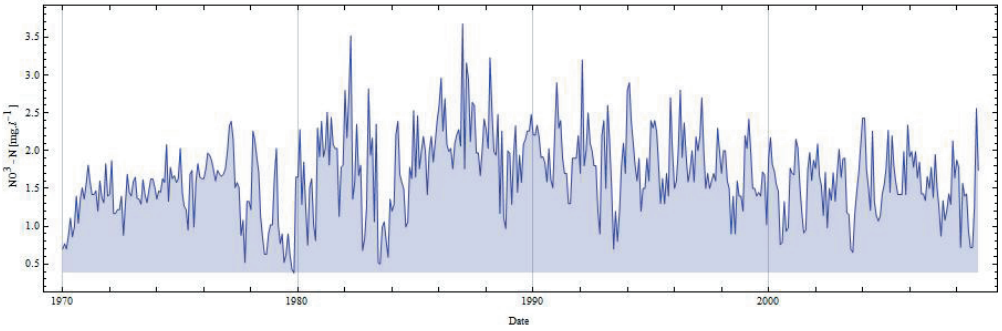


Obr. 1: Priemerná mesačné koncentrácie dusičnanov v rieke Hron pri Šalkovej z obdobia od 1970 do 2008.

Tab. 1: Čiastkové výsledky analýzy časového radu koncentrácie dusičnanov v rieke Hron. Relatívne zlepšenie k AR(1) je vypočítané podľa $(SSR_{AR(1)}-SSR)/SSR_{AR(1)}$. p predstavuje rád AR modelu v režimoch.

Komponent	SSR	Relatívne zlepšenie k AR(1) [%]
Systematické zložky		
Trend	125,3	
Sezónna	93,8	
Cyklická	80,3	
ARMA trieda		
AR (1)	79,1	0,0%
MA(1)	80,7	-2,0%
AR(2)	78,9	0,3%
ARMA(1,1)	114,6	-44,9%
AR(3)	78,3	1,0%
ARMA(1,2)	117,9	-49,1%
ARMA(2,1)	111,2	-40,6%
SETAR		
2 režimy	107,2	-35,5%
3 režimy	102,6	-29,7%
MSW		
2 režimy		
p=1	54,4	31,2%
p=2	50,7	35,9%
p=3	46,8	40,8%
p=4	48,8	38,3%
p=5	47,8	39,6%
3 režimy		
p=1	35,8	54,7%
p=2	28,8	63,6%
p=3	28,7	63,7%
p=4	29,2	63,1%
p=5	38,4	51,5%

Druhým analyzovaným časovým radom bol časový rad priemerných mesačných koncentrácií dusičnanového dusíka (NO_3-N) z rieky Váh pri Hlohovci z rokov 1970 až 2008 (Obr. 2). Odstránením systematických zložiek sme opäť dostali stacionárny časový rad s kvadratickou krivkou najlepšie vystihujúcou trendovú zložku a významnými periódami cyklickej zložky rovnými: 58,5; 234; 66,8 a 11,7 mesiacov. Výsledky modelovania lineárnymi a nelineárnymi modelmi sú uvedené v Tab. 2.



Obr. 2: Pôvodný časový rad priemerných mesačných koncentrácií dusičnanov na rieke Váh pri Hlohovci.

Tab. 2: Čiastkové výsledky analýz y časového radu koncentrácie dusičnanov v rieke Váh. Relatívne zlepšenie k AR(1) je vypočítané podľa $(SSR_{AR(1)}-SSR)/SSR_{AR(1)}$. p predstavuje rád AR modelu v režimoch.

Komponent	SSR	Relatívne zlepšenie k AR(1) [%]
Systematické zložky		
Trend	114,3	
Sezónna	91,8	
Cyklická	72,8	
ARMA trieda		
ARMA(1,1)	91,4	-36,8%
AR(2)	67,5	-1,0%
AR(1)	66,8	0,0%
ARMA(2,1)	81,6	-22,2%
ARMA(1,2)	88,9	-33,1%
MA(3)	71,0	-6,3%
SETAR		
2 režimy	85,6	-28,1%
3 režimy	83,5	-25,0%
MSW		
2 režimy		
p=1	41,9	37,3%
p=2	38,8	41,9%
p=3	38,1	43,0%
p=4	38,6	42,2%
p=5	96,1	-43,9%
3 režimy		
p=1	28,3	57,6%
p=2	20,2	69,8%
p=3	26,3	60,6%
p=4	26,7	60,0%
p=5	99,7	-49,3%

4. Záver

Odstránením systematických zložiek sa nám v obidvoch prípadoch podarilo zabezpečiť stacionaritu daného časového radu. V obidvoch časových radoch sa na základe minimálnej

hodnoty SSR javia ako najlepšie jednoduché AR modely nízkych rádov (pozri Tab. 1 a 2). Vizuálne posúdenie týchto modelov však ukazuje, že tieto modely nedokážu dobre opísať extrémne hodnoty, a teda vhodnejšími sa aj napriek vyšším hodnotám SSR javia modely ARMA. V prípade nelineárnych viacrežimových modelov sa nám iba modelmi MSW podarilo výrazne vylepšiť najjednoduchší AR(1), keď najmä trojrežimovými modelmi sme dosiahli až 70% zlepšenie. Neschopnosť modelov SETAR zlepšiť jednoduchý AR(1) model môže byť čiastočne vysvetlená ich aplikáciou na pôvodné časové rady, čím boli výrazne znevýhodnené v porovnaní s lineárnymi modelmi triedy ARMA.

Dosiahnuté výsledky ukázali, že nelineárne modely MSW dokázali významne vylepšiť modely triedy ARMA aj napriek tomu, že boli použité priamo na modelovanie originálnych časových radov. Práve táto ich vlastnosť, keď z analyzovaného časového radu nemusia byť odstránené systematické zložky mu dáva výhodu oproti lineárnym modelom triedy ARMA. Nevýhodou oboch nelineárnych modelov je ich zložitosť, ktorou kladú zvýšené požiadavky na užívateľove znalosti zo štatistiky. Množstvo parametrov, ktoré treba v oboch modeloch odhadnúť je taktiež náročné na výpočtovú techniku a je teda časovo náročné.

Literatúra

[1] BOX, G. E. P. – JENKINS, G. M., 1976. Time series analysis: forecasting and control. Oakland: Holden-Day.

[2] BROOKS, C., 2009. RATS Handbook to Accompany Introductory Econometrics for Finance. Cambridge: Cambridge University Press.

[3] CIPRA, T., 1986. Analýza časových řad s aplikacemi v ekonomii. Bratislava: SNTL – Nakladatelství technické literatury.

[4] FISHER, R. A., 1929. Tests of significance in harmonic analysis. In: *Proceedings of the Royal Society of London*. Series A, vol. 125, no. 796, pp 54-59.

[5] FRANSES, P. H. – VAN DIJK, D., 2003. Time Series Models in Empirical Finance. Cambridge: Cambridge University Press.

[6] HAMILTON, J. D., 1989. A New Approach to the Economic Analysis of Nonstationary Time-series and the Business Cycle. In: *Econometrica*, vol. 57, no. 2, pp 357-384.

[7] HAMILTON, J. D., 1994. Time Series Analysis. Princeton: Princeton University Press.

[8] CHAFIELD, C., 1989. The Analysis of Time Series: An Introduction (4th ed), Chapman and Hall, London.

[9] JENKINS, G. M., 1968. Spectral analysis and its applications. Oakland: Holden-Day.

[10] KWIATKOWSKI, D. – PHILLIPS, P. C. B. – SCHMIDT, P. – SHIN, Y., 1992. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root. In: *Journal of* Econometrics, vol. 54, pp 159-178.

[11] LENČUCHOVÁ, J., 2009. MSW modely časových radov. Diplomová práca. Bratislava: STU.

[12] TONG, H., 1990. Non-Linear Time Series: A Dynamical System Approach. Oxford: Oxford Univ. Press.

[13] TSAY, R. S., 2005. Analysis of Financial Time Series (2nd ed.). Hoboken (New Jersey): Wiley.

Kontakty na autora

1 Stavebná fakulta STU v Bratislave, katedra vodného hospodárstva krajiny, e-mail: pevalent@gmail.com, jan.szolgay@stuba.sk

2 Stavebná fakulta STU v Bratislave, katedra matematiky a deskriptívnej geometrie, e-mail: komornikova@math.sk

BIOAKUMULAČNÍ MONITORING NA ČESKÝCH ŘEKÁCH

Jindřich Freisleben[1], Drahomíra Leontovyčová[1]

Abstrakt

Práce hodnotí akumulaci vybraných polutantů v biotické složce říčního ekosystému. Sledování probíhá od roku 2000 ve vybraných bentických organizmech, v mlžích (Dreissena polymorpha), v rybách (Jelec tloušť), rybím plůdku a v biofilmu. Sledované polutanty, jsou látky, které jsou ve vodě málo rozpustné , ve vzorcích vody se vyskytují většinou pod mezí stanovitelnosti a dobře se akumulují hlavně v tucích a v pevných matricích Sledují se koncentrace těžkých kovů. ze specifických organických látek suma indikátorových kongenerů polychlorovaných bifenylů (PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180), polychlorovaných pesticidů (o,p a p,p izomery DDT a izomery HCH), hexachlorbenzen (HCB). Nově se sledují polybromované difenylethery (PBDE 28, 47, 99, 100, 153, 154), indikátorové kongenery polyaromatických uhlovodíků (PAU) a biochemické parametry (biochemické markery) ve svalovině tlouště jako ukazatelé negativního působení znečištěného vodního ekosystému na organizmus ryb.

Klíčová slova: akumulace, polutanty, pevné matrice

1. Úvod

Od roku 2000 probíhá v ČHMÚ bioakumulační monitoring na vybraných profilech hlavních českých a moravských řek. Patří sem odběrová místa Labe – Debrné, Labe – Valy, Labe – Lysá nad Labem, Labe – Obříství, Labe – Hřensko, Berounka – Srbsko, Vltava – Zelčín, Sázava – Nespeky, Otava – Topělec, Lužnice – Bechyně, Morava – Lanžhot, Dyje – Pohansko, Svratka – Židlochovice, Jihlava – Ivančice, Odra – Bohumín, Opava – Děhylov, Ohře – Terezín, Bečva – Troubky, Jizera – Předměřice.

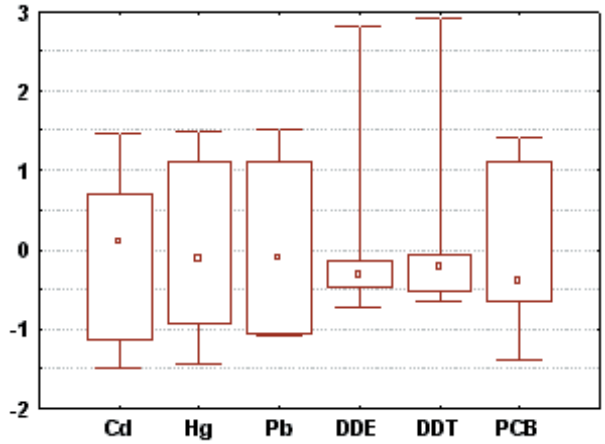
V této práci jsme se soustředili na nalezení podobností mezi sledovanými ukazateli, jednotlivými matricemi a monitorovanými lokalitami. Pro odhalení vzájemných vztahů v datech byly použity metody vícerozměrné analýzy: metoda hlavních komponent (PCA), faktorová analýza (FA), shluková analýza (CLU) a vícerozměrné škálování (MDS). K hodnocení byly vybrány tyto sledované matrice: makrozoobentos, Dreissena polymorpha, biofilm, Jelec tloušť, plaveniny a sedimenty

2. Matrice makrozoobentos – Hydropsyche

Tab. 1: Data pro matrici Hydropsyche (hodnoty mediánu za 6 let sledování)

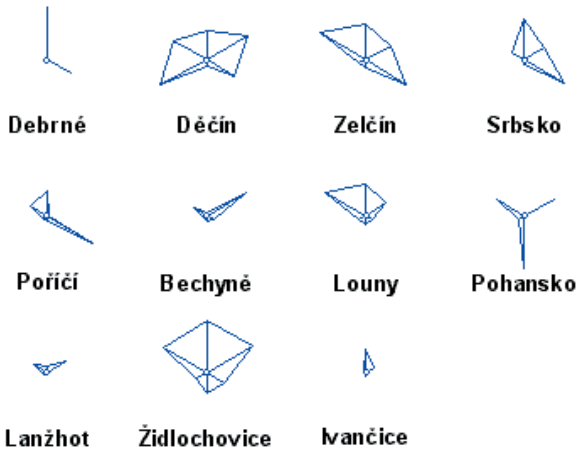
lokalita	říční tok	Cd [mg/kg]	Hg [mg/kg]	Pb [mg/kg]	DDE [µg/kg]	DDT [µg/kg]	PCB [µg/kg]
Debrné	Labe	0,585	0,118	6,633	24,50	5,142	103,5
Děčín	Labe	0,398	0,278	7,516	47,48	53,70	261,2
Zelčín	Vltava	0,449	0,210	9,671	52,40	11,88	320,0
Srbsko	Berounka	0,480	0,193	9,200	44,10	6,717	161,8
Poříčí	Sázava	0,368	0,123	10,37	45,98	10,93	180,7
Bechyně	Lužnice	0,204	0,274	4,220	42,38	8,860	163,7
Louny	Ohře	0,416	0,198	3,900	55,58	13,06	295,6
Pohansko	Dyje	0,173	0,231	2,902	214,2	11,76	237,0
Lanžhot	Morava	0,223	0,192	2,890	32,56	8,040	169,4
Židlochovice	Svratka	0,567	0,296	5,740	99,94	15,54	311,2
Ivančice	Jihlava	0,348	0,149	2,940	38,28	6,410	117,3

2.1 Exploratorní analýza (EDA)



Obr. 1: Krabicový graf (Hydropsyche)

V krabicovém grafu (standardizovaná data) je patrné, že proměnné DDE a DDT se značně odlišují od ostatních. Vyskytují se zde výrazné maximální hodnoty. Tento fakt vede k předpokladu, že rozdělení dat DDE a DDT bude rozdílné od normálního a bude nutné provést transformaci jako předúpravu dat.



Obr. 2: Hvězdicový graf (Hydropsyche)

Symbolové (ikonové) grafy mám umožňují porovnávat podobnost jednotlivých objektů na základě podobnosti jejich grafických obrazců. Sledované objekty (lokality) se na hvězdicovém grafu jeví odlišně, tedy všechny sledované říční profily vykazují zřejmé odlišnosti v koncentracích monitorovaných látek v rámci matrice Hydropsyche. Jedinou dvojicí říčních profilů, u nichž lze spatřit alespoň mírnou podobnost obrazců, jsou Bechyně a Lanžhot.

Tab. 2: Základní charakteristiky znaků (po Box-Coxově transformaci a standardizaci)

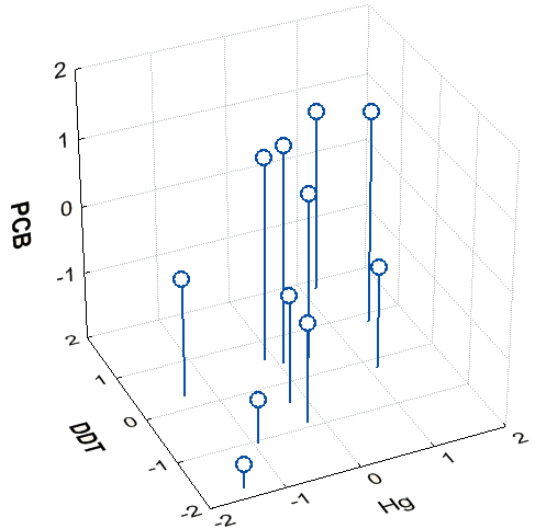
Hydropsyche		Počet objektů	Aritmet. průměr	Medián	Minimum	Maximum	Spodní kvartil	Horní kvartil	Rozptyl	Šikmost	Špičatost
původní data	Cd	11	0,4	0,4	0,2	0,6	0,2	0,5	0,0	-0,2	-0,9
	Hg	11	0,2	0,2	0,1	0,3	0,1	0,3	0,0	0,0	-1,0
	Pb	11	6,0	5,7	2,9	10,4	2,9	9,2	8,2	0,3	-1,5
	DDE	11	63,4	46,0	24,5	214,2	38,3	55,6	2872,4	2,7	7,5
	DDT	11	13,8	10,9	5,1	53,7	6,7	13,1	184,9	3,0	9,5
	PCB	11	211,0	180,7	103,5	320,0	161,8	295,6	5990,9	0,2	-1,5
Box-Coxova transformace a standardizace	Cd	11	0	0,1	-1,5	1,5	-1,1	0,7	1	0,0	-0,9
	Hg	11	0	-0,1	-1,5	1,5	-0,9	1,1	1	0,0	-1,0
	Pb	11	0	0,1	-1,2	1,3	-1,2	1,1	1	0,0	-1,7
	DDE	11	0	-0,2	-1,3	2,4	-0,5	0,1	1	1,5	3,0
	DDT	11	0	0,3	-1,8	1,8	-0,9	0,6	1	-0,1	0,2
	PCB	11	0	-0,2	-1,7	1,2	-0,5	1,0	1	-0,3	-1,1

Porovnáním základních charakteristik znaků bez předúpravy a po předúpravě dat je patrný posun k normálnímu rozdělení. Hodnoty mediánu a aritmetického průměru se téměř rovnají, hodnoty šikmosti se více přiblížily 0, absolutní hodnoty rozdílů aritmetického průměru od horního a dolního kvartilu jsou si blízké, došlo ke snížení rozdílů mezi extrémy (maxima a minima) a středními hodnotami. To že je aritmetický průměr roven 0 a rozptyl roven 1 je důsledkem standardizace dat.

Tab. 3: Korelační matice znaků

Hydropsyche	Cd	Hg	Pb	DDE	DDT	PCB
Cd	1	-0,15	0,59	-0,26	-0,14	0,04
Hg	-0,15	1	-0,12	0,50	**0,68**	**0,64**
Pb	0,59	-0,12	1	-0,23	0,14	0,16
DDE	-0,26	0,50	-0,23	1	0,51	0,60
DDT	-0,14	**0,68**	0,14	0,51	1	**0,86**
PCB	0,04	**0,64**	0,16	0,60	**0,86**	1

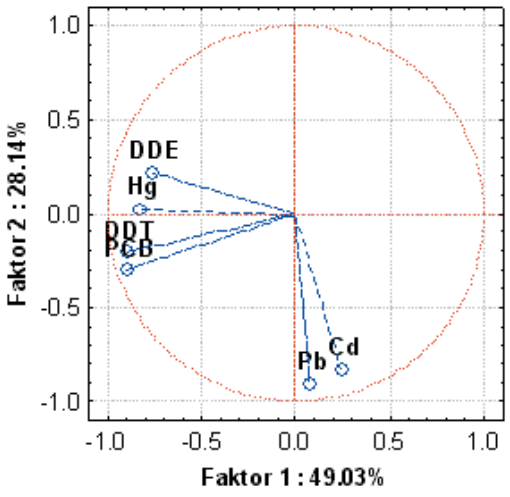
Hodnoty korelačních koeficientů jsou první informací o vzájemných vazbách mezi znaky. Nejsilnější korelace jsou mezi organickými ukazateli DDT, PCB a Hg (rtuť).



Rozptylový 3D-diagram názorně zobrazuje korelaci mezi znaky. Lze odhadnout směr přímky, která by co nejlépe proložila skupinu vyobrazených bodů, tedy novou osu jež by probíhala ve směru nejvyšší variability skupiny zobrazených proměnných

Obr. 3: Rozptylový 3D–diagram (Hydropsyche)

2.2 Metoda hlavních komponent (PCA)

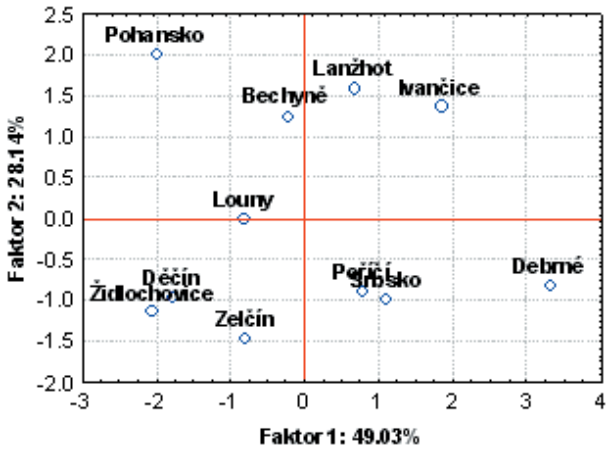


Původní znaky v prvních dvou hlavních komponentách:

1. Hg, DDE, DDT a PCB – silně pozitivně korelované, přispívají téměř výhradně do 1 hlavní komponenty, velmi silná pozitivní korelace mezi znaky Hg a DDE a mezi znaky DDT a PCB

2. Pb a Cd – silně pozitivně korelované, přispívají zejména do 2 hlavní komponenty, se znaky v 1 skupině jsou nekorelované

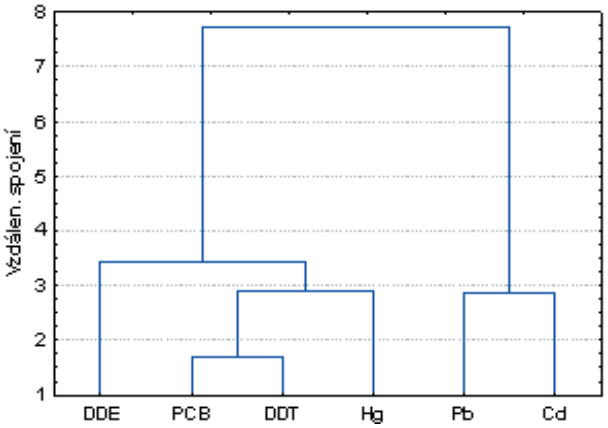
Obr. 4: Komponentní váhy (1 a 2 hlavní komponenta) (Hydropsyche)



U Srbska a Poříčí mají vyšší koncentraci olova a nižší koncentraci organických látek. Debrné se vyznačuje nízkou koncentrací organických látek a zvýšenou koncentrací olova. Pro Děčín, Zelčín a Židlochovice platí vyšší koncentrace olova nebo kadmia, rtuti a organických látek. Pro Pohansko platí vyšší koncentrace organických látek (zejména DDE) a nižší koncentrace olova a kadmia. Bechyně, Lanžhot a Ivančice mají všechny ukazatele poměrně nízké v porovnání s ostatními lokalitami. Louny - vyšší koncentrace organických látek (zejména PCB)

Obr. 5: Komponentní skóre (1 a 2 hlavní komponenta) (Hydropsyche)

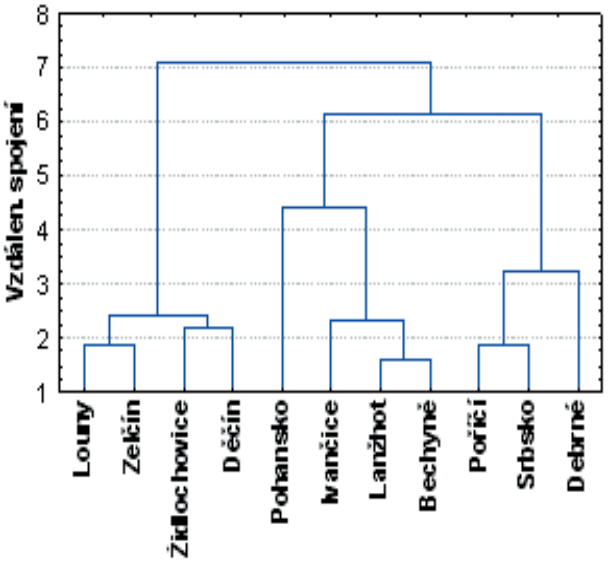
2.3 Shluková analýza (CLU)



Shlukovou analýzou jsme dospěli k obdobným závěrům jako v metodě hlavních komponent (Obr. 4: Komponentní váhy).

1. shluk – znaky PCB, DDT, DDE a Hg
2. shluk – znaky Pb a Cd

Obr. 6: Dendrogram (ukazatele) (Hydropsyche)



Shluky objektů vytvořené shlukovou analýzou nejsou sice zcela totožné, ale přece jen velmi podobné se skupinami blízkých si objektů v metodě hlavních komponent .

1. shluk – Bechyně, Lanžhot a Ivančice
2. shluk – Louny a Zelčín, Děčín a Židlochovice
3. shluk – Poříčí a Srbsko

Debrné je pak nejblíže 3 shluku. Pohansko je nejblíže 1 shluku. 2 a 3 shluk mají k sobě blíže než k 1 shluku.

Obr. 7: Dendrogram (objekty) (Hydropsyche)

2.4 Závěr k matrici Hydropsyche

Původních 6 sledovaných proměnných (ukazatele znečištění) lze zredukovat na 2 nové faktory. Do prvního nejvýznamnějšího faktoru se promítají pesticidní látky DDT a DDE, suma PCB a rtuť. Druhý faktor souvisí s koncentrací olova a kadmia. Vysvětlený rozptyl (u FA) v datech v prostoru 2 nových faktorů je necelých 68 %, to znamená, že téměř 32 % variability v datech byly vyhodnoceny jako šum. Za důvod poměrně vysoké hodnoty šumu, lze považovat jednak charakter dat (sledujeme bioakumulované chemické látky v živých organismech) a jednak malý počet monitorovaných říčních profilů ku počtu chemických ukazatelů (optimum je 20 objektů na 1 proměnnou a minimální poměr by měl být 5 ku 1). V matrici Hydropsyche se ze sledovaných toxických kovů, co do výše stanovených koncentrací, nejvýrazněji projevuje olovo a z organických látek pak suma polychlorovaných bifenylů. To potvrzuje i skutečnost, že právě PCB a olovo mají nejvyšší hodnoty vah pro 1 resp. 2 latentní proměnnou.

Stejným způsobem byly zhodnoceny ostatní matrice.

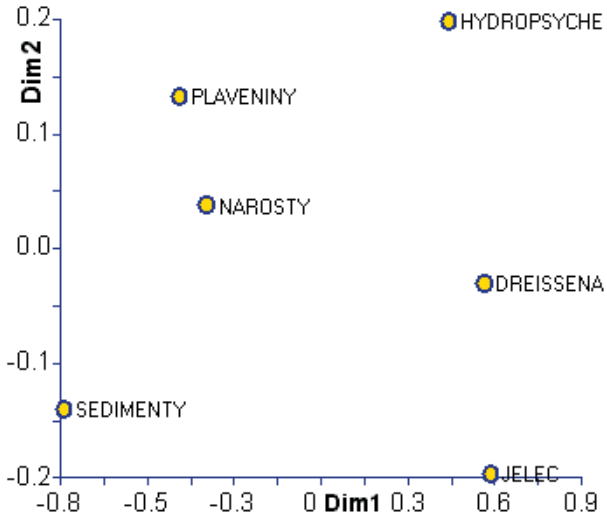
3. Porovnání matric na základě obsahu sledovaných látek

Tab. 4: Data [µg/kg] (Pivotové polosumy dle Hornova postupu [2])

	Hydropsyche	Dreissena polymorpha	nárosty	Jelec tloušť	sedimenty	plaveniny
Cd	352	948	1555	52	2168	1756
Hg	212	141	332	623	645	1171
Pb	6070	1033	53980	410	80820	68910
DDE	46,93	55,85	22,96	126,0	11,05	17,80
DDT	9,888	15,14	16,73	6,220	12,13	24,27
PCB	228,7	111,9	59,21	191,3	37,95	71,37

Aplikací metody vícerozměrného škálování (MDS) se pokusíme nalézt podobnost mezi matricemi s ohledem na obsah sledovaných ukazatelů znečištění. Jako vstupní data použijeme střední hodnoty monitorovaných ukazatelů pro jednotlivé typy matric vzorků. Jako střední hodnoty byly zvoleny pivotové polosumy vycházející z Hornova postupu [2] (vhodný pro odhad střední hodnoty středně velkých výběrů dat, n = 4 až 20).

3.1 Klasické metrické vícerozměrné škálování (CMDS)



Vzhledem k pozici bodu sedimenty (vyšší Cd, Hg a Pb, nižší DDE, DDT a PCB) mající nízké hodnoty pro obě dimenze, a pozici bodu Jelec tloušť (vyšší PCB a DDE, nižší Cd a Pb), která má s matricí sedimenty různou hodnotu pro dimenzi 1, ale stejnou pro dimenzi 2, lze učinit závěr, že znaky, které jsou pro obě zmíněné matrice vyhodnoceny různě přispívají do dimenze 1 a naopak neměnící se ukazatele přispívají více do dimenze 2. Tedy platí, že dimenze 1 roste: s růstem DDE a PCB a s poklesem Cd a Pb a dimenze 2 souvisí: s ukazatelem Hg a DDT.

Obr. 8: Grafická podoba mapy objektů

Z mapy objektů dále plyne, že matrice lze rozdělit na dvě skupiny: 1. skupina: Hydropsyche, Dreissena a Jelec tloušť – vyšší koncentrace DDE a PCB a 2. skupina: nárosty, sedimenty a

plaveniny – vyšší koncentrace Pb a Cd. Matrice Plaveniny a nárosty jsou si nejpodobnější (jejich body jsou nejblíže v mapě objektů). Další dvojicí podobných si objektů jsou matrice Dreissena polymorpha a Jelec tloušť. Naopak nejvíce nepodobné si navzájem (mající největší vzdálenost bodů v mapě znaků) jsou matrice sedimenty a Hydropsyche, dále pak dvojice matric Jelec tloušť a plaveniny.

4. Závěr

PCB (suma polychlorovaných bifenylů) je ukazatel, který se vyskytuje v nezanedbatelných koncentracích ve všech matricích. Pro jeho sledování jsou však nejvýznamnější matrice vyšších organismů (Hydropsyche, Dreissena a Jelec), ve kterých je i velmi významným znakem pro rozlišení říčních profilů z hlediska míry znečištění životního prostředí. Nejčastěji koreluje s koncentrací DDT.

DDE (p,p‘-dichlordifenyldichlorethen) je podobně jako PCB zejména v matricích (Hydropsyche, Dreissena a Jelec) a to opět ve vyšších koncentracích. Jako znak je sice o trochu méně proměnlivý než DDT, přesto však významný. Je považován za meziprodukt rozkladné řady DDT a výrazně bioakumulován v rybách.

DDT (p,p‘-dichlordifenyltrichlorethan) v porovnání s PCB a DDE se obvykle nachází v nižších stále však významných koncentracích. Koreluje nejčastěji s PCB, DDE, ale také s kovy a to zejména se rtutí. Nejvhodnější matrice pro jeho monitorování jsou plaveniny a to jak z hlediska vyšších koncentrací tak z hlediska, co by znaku významně přispívajícího do 1. latentní proměnné.

Pb (olovo) je z hlediska koncentračního výskytu ve sledovaných matricích nejvýznamnějším kovovým ukazatelem. U PCA se nejčastěji projevuje jako nejvýznamnější znak 2. latentní proměnné. Nejčastěji koreluje s kadmiem. Nejvhodnější pro jeho sledování jsou matrice: nárosty, sedimenty a plaveniny. Naopak nejnižší koncentrace jsou v matrici Jelec.

Cd (kadmium) se společně s olovem vyskytuje nejvíce v matricích: nárosty, sedimenty a plaveniny. Koreluje s olovem, ale někdy také se rtutí. V matrici Jelec je nejčastěji pod mezí stanovitelnosti.

Hg (rtuť) koreluje jak s kovy, tak s organickými látkami. Jednoznačně nejvhodnější pro její monitoring jsou plaveniny. V ostatních matricích je její koncentrace nepoměrně nižší a její stanovení bezpochyby zatíženo větší chybou. Přestože ze sledovaných kovů jsou její koncentrace obvykle nejnižší, je naopak nejvíce obsaženým toxickým kovem ve svalovině Jelce tlouště, což potvrzuje její vyšší bioakumulační schopnost v rybách.

Z hlediska monitorování vybraných toxických látek má největší význam matrice plaveniny a to pro monitoring kovů (včetně rtuti) a DDT a dále pak Dreissena polymorpha zejména pro monitoring organických látek. Pro monitoring kadmia jsou také vhodné sedimenty. Velmi vhodná matrice pro sledování DDE je rovněž Jelec tloušť. Některé matrice jsou si podobné (nárosty a plaveniny, Dreissena polymorpha a Jelec tloušť), nicméně žádné nedávají tak vzájemně blízký výsledek sledování vybraných látek, aby bylo možno některou matrici z monitoringu zcela vyloučit bez ztráty podstatných informací.

Literatura

[1] Český hydrometeorologický ústav. Hydrologie – oddělení jakosti vod. ON-LINE databáze jakosti vody. Dostupné na <http://hydro.chmi.cz/ojv/>

[2] MELOUN, M. – MILITKÝ, J., 2004. Statistická analýza experimentálních dat. 2. vyd. Praha: Academia. 953 s. ISBN 80-200-1254-0.

[3] MELOUN, M. – MILITKÝ, J. – HILL, M., 2005. Počítačová analýza vícerozměrných dat v příkladech. 1. vyd. Praha: Academia. 449 s. ISBN 80-200-1335-0.

[4] PYTELA, O., 2003. Chemometrie pro organické chemiky. 4. vyd. Pardubice. Univerzita Pardubice. 211 s. ISBN 80-7194-539-0.

[5] Statsoft CR. Software Statistica 7.0. Dostupné na: <http://www.statsoft.cz>

[6] TriloByte Statistical Software, s.r.o. Software QC Expert 2.5. Dostupné na: <http://www.trilobyte.cz/>

[7] OPgm STATISTIKA, CHEMOMETRIE, CHEMIE. Software OPstat 5.34. Dostupný na: <http://webak.upce.cz/~koch/cz/veda/OPgm.htm>.

[8] NCSS. Software NCSS 2000. Dostupné na: < http://www.ncss.com/ >

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, oddělení jakosti vody,
e-mail: freisleben@chmi.cz, leontovycova@chmi.cz

KVANTITATÍVNA VODOHOSPODÁRSKA BILANCIA A NOVÉ PRÍSTUPY V JEJ SPRACOVANÍ

Zuzana Danáčová [1], Pavol Čaučík [1], Jana Poórová [1]

Abstract

Kvantitatívna vodohospodárska bilancia SR uplynulého roka (VHB) je každoročne podľa platnej legislatívy spracovávaná od roku 1993 na Slovenskom hydrometeorologickom ústave. Samostatne je spracovávaná pre povrchové vody a podzemné vody. Cieľom VHB povrchovej vody za obdobie uplynulého roka je hodnotenie množstva povrchovej vody, jej využiteľnosť, uskutočnené používanie v uplynulom roku a ich zmien v porovnaní s predchádzajúcimi hodnoteniami. Súčasná metodika spracovania VHB podzemnej vody za obdobie uplynulého roka hodnotí objektívne a vecné hodnotenie skutočne realizovaných požiadaviek na vodu vo vzťahu k stanoveným potenciálnym využiteľným množstvám vody v hydrogeologických rajónoch v príslušnom roku, ale bez vzťahu k hydrogeologickej bilancii.

Výsledky VHB sú podkladom k vodnému plánovaniu a tvorbe plánov manažmentu povodí. VHB hodnotí dopady užívaní vody na množstvo povrchových a podzemných vôd v uvažovanom mieste a čase. Súhrnne sa jedná o činnosť, ktorej cieľom je stanovenie určitých ukazovateľov, resp. indikátorov pre hodnotenie rovnováhy medzi nárokmi na vodu a zdrojmi vody. Systematické vyhodnocovanie VHB tvz. bilančný stav je nevyhnutným podkladom pre stanovenie odhadu budúcich požiadaviek v oblasti vodných zdrojov, ich možného využívania.

Uplatnením hodnotenia pomocou indexu nedostatku vody v VHB povrchových vôd sa získa doplňujúce hodnotenie kvantitatívneho stavu disponibilných povrchových vodných zdrojov v povodí, a to aj v časovom kroku jeden rok a zároveň pomocou tohto indexu sa dajú. vytvárať rôzne modelové riešenia. Určením indexu nedostatku vody v konkrétnych hydrologických podmienkach hodnoteného roka s uplatnením konkrétnych zrealizovaných odberov získame v jednotlivých povodiach výsledky, ktoré kritickejšie zhodnotia disponibilnosť vodných zdrojov v konkrétnom roku, nakoľko toto hodnotenie eliminuje nejednoznačnosť zaradenia vplyvu vypúšťania vody v rámci VHB.

Bilancovanie podzemných vôd v súčasnosti prebieha súbežne dvomi spôsobmi. VHB podzemných vôd sa spracúva podľa pôvodnej metodiky so základnou bilančnou jednotkou – hydrogeologickým rajónom. V jej spracovaní sa pristúpilo k detailizácii hodnotenia využiteľných množstiev a využívania podzemných vôd až na úroveň jednotlivých lokalít, príp. zdrojov podzemných vôd, a tiež bola doplnená aj detailná vizualizácia bilančného hodnotenia v jednotlivých hodnotených jednotkách mapovým spracovaním v prostredí GIS. Zároveň sa začalo v súlade s Rámcovou smernicou o vodách spracovávať bilancovanie podzemných vôd pre posudzovanie kvantitatívneho stavu útvarov podzemných vôd. Preto je potrebné zosúladiť a zjednotiť tieto dve hodnotenia s účelom vytvoriť čo najúčinnejší pomocný nástroj pre efektívne riadenie vodného hospodárstva a trvalo udržateľný rozvoj zdrojov podzemnej vody na Slovensku.

1. Vodohospodárska bilancia

V súčasnosti rastúci záujem o svetové vodné zdroje je výsledkom nielen neustáleho zvyšovania požiadaviek na vodu, ale zároveň je podmienený aj výsledkami mnohých štúdií zaoberajúcimi sa klimatickými zmenami a ich dôsledkami na vodné zdroje. Otázka možných klimatických zmien a ich dôsledkov na ľudskú populáciu v súčasnosti rezonuje nielen medzi vedcami, ktorí ako prví indikovali možný negatívny účinok klimatických zmien, ale v súčasnosti sa nimi zaoberajú aj politici, ktorí rozhodujú o opatreniach na ich elimináciu.

Schopnosť súčasnej aj budúcej populácie zabezpečiť primeranú životnú úroveň je obmedzená nielen environmentálnymi a ekologickými možnosťami prostredia, ale je daná aj

ekonomickými a sociálnymi možnosťami. Naopak, ekonomický a sociálny rozvoj ľudskej spoločnosti bez ohľadu na environmentálne možnosti prírodného prostredia nie je dlhodobo možný bez nenávratných zmien, čo nemusí byť pre ľudskú spoločnosť udržateľné.

Jedným z prvých krokov, ktoré bolo nutné vykonať, aby sme mohli riešiť problémy spojené s vodou, je jasne definovať tieto problémy. V oblasti globálnej vodnej politiky to znamená čo najpresnejšie vyhodnotiť súčasný stav vodných zdrojov vo vzťahu k ich využívaniu, predvídať ďalší vývoj vodných zdrojov a vývoj možných požiadaviek na vodu. Kľúčovým míľnikom v oblasti vodnej politiky bolo schválenie v roku 2000 európskej smernice pre oblasť vodnej politiky, tzv. Rámcovej smernice o vodách, ktorá vytvorila rámec na ochranu vôd v rámci celého európskeho spoločenstva s cieľom dosiahnuť „dobrý“ stav vôd cez program opatrení tak, aby sa zabezpečila rovnováha medzi požiadavkami na vodu a obnovou vodných zdrojov.

Vzhľadom na odlišnosť prírodných daností, tradície a ekonomické možnosti vodohospodárskych prístupov vykazovali jednotlivé, často i susediace štáty späté spoločnou minulosťou, značné rozdiely v hodnotení zásob vôd, určovaní vodohospodárskych potrieb a vyčísľovaní bilančného napätia.

Silný nástroj pre hodnotenie vodných zdrojov, ktorý sa vo svete permanentne využíva, je vodohospodárska bilancia. Všetky súčasné nástroje integrovaného manažmentu vodných zdrojov využívajú pre model VHB základný vzťah, a to potreba verzus zdroje. Kľúčovým problémom uplatňovania vodohospodárskej bilancie sú vstupné údaje, hierarchizácia jej zložiek a zväčšovanie mierky, a to časovej aj územnej. Inak povedané, znamená to uplatňovanie vodohospodárskej bilancie na regionálnej úrovni. Teda jednotlivé krajiny si pomocou vlastnej vodohospodárskej bilancie môžu identifikovať rôzne regionálne problémy v oblasti vodných zdrojov, ich využívania, napr. úroveň pokrytia, resp. nepokrytia požiadaviek na vodu v krajine.

Základným princípom v politike vodného hospodárstva v SR je princíp trvalej udržateľnosti využívania vodných zdrojov. Jedným z nástrojov tejto politiky je aj vyhodnocovanie vodohospodárskej bilancie.

Hodnotenie vodných zdrojov a ich využívanie na Slovensku sa spracováva ročne od roku 1975 vo vodohospodárskej bilancii. VHB je definovaná ako porovnanie požiadaviek na vodu so zdrojmi vody v uvažovanom mieste a čase, a to čo do množstva a do kvality vodných zdrojov. Pomocou VHB sa priebežne hodnotí rovnováha medzi nárokmi a zdrojmi – množstvom vody (1) dostupným pre užívateľov v uplynulom roku v jednotlivých bilančných celkoch.

$$\text{ZDROJE} \begin{matrix} < \\ = \\ > \end{matrix} \text{POTREBA} \qquad (1)$$

Účelom vodohospodárskej bilancie je stanoviť kritické hodnoty jej jednotlivých komponentov. To znamená, povedať kedy a kde nie sú alebo nebudú pokryté požiadavky na vodu.

2. Vodohospodárska bilancia množstva povrchových vôd

Cieľom vodohospodárskej bilancie množstva povrchových vôd uplynulého roka (VHB povrchových vôd) je hodnotenie povrchových vôd, uskutočneného používania povrchových vôd a využiteľnosti množstva povrchových vôd v uplynulom roku a ich zmien v porovnaní s predchádzajúcim hodnotením [1].

Vykonáva sa v čiastkovom povodí v sieti stálych bilančných profilov vybratých so zreteľom na dosahované stupne bilančnej napätosti v minulosti, rozhodujúce znečistenie a dostupnosť hydrologických podkladov.

Uskutočnené užívanie v uplynulom roku predstavujú nahlásené užívané množstvá povrchových vôd, podzemných vôd, vypúšťaní odpadových vôd a osobitných vôd v zmysle

§ 5, ods. 4) a 5) zákona o vodách. Limitné hodnoty pre nahlasovanie odobraného množstva sú: 15 000 m^3 ročne alebo 1 250 m^3 mesačne a pre nahlasovanie vypúšťania sú 10 000 m^3 ročne alebo 1 000 m^3 mesačne.

Výsledkom vodohospodárskej bilancie množstva povrchových vôd je:

a) zhodnotenie množstva povrchových vôd bez zohľadnenia vykonaných úprav odtokových pomerov v povodí, napríklad vplyv nádrží, prevodov vody, ako aj s ich zohľadnením,

b) zhodnotenie množstiev odobratých povrchových vôd

c) zhodnotenie vypúšťania odpadových vôd,

d) overenie, či sa dosiahli predpokladané ciele hospodárenia s vodou, napríklad nadlepšenie minimálnych prietokov nádržami alebo prevodmi.

Zmenu, ktorú je potrebné akceptovať aj vo VHB povrchových vôd je, že dnes už nie je možné uvažovať výlučne len o využívaní vôd, ale je nevyhnutné zohľadňovať environmentálne potreby na pozadí klimatických zmien, pri rastúcom dopyte po vode a zmenšovaní sa jej potenciálnych zdrojov, prípadne ich znehodnocovaní znečistením. Pri poskytovaní podkladov pre následné určenie stavu vodných útvarov a posúdenie možnosti dosiahnutia environmentálnych cieľov musí byť zostavená tak, aby svojimi výsledkami mohla spresňovať, dopĺňať alebo vysvetľovať stav povrchových vôd, ich režim, resp. ich budúci vývoj. Potom naďalej môžme VHB považovať za nástroj vodného plánovania, ktorého účelom je vyhodnotenie vplyvov užívania vody na vodné útvary a chránené územia z hľadiska množstva a kvality.

Vo VHB povrchových vôd sa hodnotí zrealizované užívanie v hodnotenom uplynulom roku. Tieto údaje sa v súčasnosti získavajú na základe zákonnej povinnosti užívateľov nahlasovať tieto údaje raz ročne. Keďže zákon o vodách v súčasnej podobe neukladá explicitne povinnosť priebežnej kontroly užívaných množstiev povrchových vôd, spracovanie VHB povrchových vôd je založené na údajoch meraných a kontrolovaných samotným užívateľom. Súčasná metodika VHB povrchových vôd považuje vypúšťanie vody ako potrebu, t.j. zaraďuje ho k požiadavkám na vodu, ale s opačným vplyvom ako má odber vody. Takéto uvažovanie spôsobuje v konečnom dôsledku to, že výsledná potreba vody je znížená o množstvo vypúšťanej odpadovej vody, čo je správne iba v prípade, ak kvalita vody pod miestom vypúšťania je v recipiente vyhovujúca. V konečnom dôsledku takéto hodnotenie bilančného stavu v ročnom kroku zjavne nestačí na indikovanie konkrétnych problémov v povodí. Na druhej strane, je potrebné si uvedomiť, že ak by vyhodnotený bilančný stav v ročnom kroku podľa súčasnej metodiky bol vyhodnotený ako pasívny, a to opakovane aj niekoľko rokov, vodohospodár by mal veľký problém ako vyriešiť nepriaznivú situáciu v povodí prerozdelením vodných zdrojov v čase a priestore. Z uvedeného dôvodu sme hľadali iné hodnotenie, ktoré by zohľadňovalo princípy VHB povrchových vôd (hodnotenie zdroje versus potreba). Takýmto hodnotením sa ukázalo hodnotenie povodí pomocou tzv. indexu nedostatku vody (2). Hodnotenie pomocou indexu nedostatku vody (2) poskytuje možnosť zachytiť nielen nepriaznivú situáciu v povodí z hľadiska nedostatku vody a zároveň môže poukazovať aj na citlivosť povodia na iné vplyvy, tlak a na jeho zraniteľnosť.

Index nedostatku vody je vyjadrený vzťahom:

$$R_{ws} = W/Q \qquad (2)$$

kde W – suma ročných odberov, resp. nárokov na vodu,

Q – ročné využiteľné množstvo vodných zdrojov.

		R_{ws}	<	0,1	index = 1, t.j. žiadny nedostatok
0,1	<	R_{ws}	<	0,2	index = 2, t.j. nízky nedostatok
0,2	<	R_{ws}	<	0,4	index = 3, t.j. mierny nedostatok
0,4	<	R_{ws}			index = 4, t.j. výrazný nedostatok

Uvedený vzťah sme sa pokúsili aplikovať do VHB povrchových vôd nasledovne: v našom prípade W reprezentovali požiadavky na vodu s ohľadom na maximálne povolené množstvá – suma povolených odberov povrchových vôd (PoO) a MQ :

$$W = PoO + MQ \tag{3}$$

Ročné využiteľné množstvo reprezentovali očistené prirodzené vodné zdroje (C)

Potom vzťah (2) má tvar:

$$Rws = (PoV + MQ)/C \tag{4}$$

Pričom Rws sa testovalo v troch scenároch MQ: MQ používané vo VHB a Q_{355} za dve referenčné obdobia.

Použitie hodnotenia podľa indexu nedostatku vody vo vybraných povodiach ukázalo (Obr. 1), že je veľmi jednoduchým a zároveň veľmi čitateľným hodnotením kvantitatívneho stavu disponibilných povrchových vodných zdrojov v povodí, a to aj v časovom kroku jeden rok, čo uplatnenie súčasnej metodiky kvantitatívnej vodohospodárskej bilancie neumožňuje.

Hodnotenie pomocou indexu nedostatku vody bude priamo uplatnené do spracovania Kvantitatívnej vodohospodárskej bilancie za rok 2011, kde disponibilné vodné zdroje bude reprezentovať hydrologická situácia hodnoteného roka a ako požiadavka na vodné zdroje sa uplatní požiadavka na vodu reprezentovaná zrealizovanými množstvami v hodnotenom roku zväčšenými o minimálny bilančný prietok (ekologický prietok) vo všetkých povodiach. Určením indexu v konkrétnych hydrologických podmienkach hodnoteného roka s uplatnením konkrétnych zrealizovaných odberov sa získajú v jednotlivých povodiach výsledky, ktoré kritickejšie zhodnotia disponibilnosť vodných zdrojov v konkrétnom roku, nakoľko toto hodnotenie eliminuje nejednoznačnosť zaradenia vplyvu vypúšťania vody v rámci VHB povrchových vôd hodnotenia [2].



Obr. 1: Ukážka hodnotenia bilančného stavu v dvoch alternatívach

3. Vodohospodárska bilancia množstva podzemných vôd

Kvantitatívna vodohospodárska bilancia, časť Podzemné vody (VHB podzemných vôd), sa spracúva na základe platnej legislatívy každoročne pracovníkmi Odboru Podzemné vody (OPzV) na SHMÚ od roku 1978 a obsahuje kvantifikáciu využiteľných množstiev podzemných vôd Slovenska, údaje o ich plošnom výskyte a preskúmanosti, hodnotenie realizovaných požiadaviek odberateľov na vodu zo zdrojov podzemných vôd a bilančné hodnotenie využiteľných množstiev podzemných vôd a odberov. Bilancia podzemných vôd sa spracúva v zmysle platnej metodiky [3] a je vyjadrená zjednodušeným vzorcom:

$$Vm / O = Bs \qquad (5)$$

kde Vm – využiteľné množstvá podzemných vôd
O – odbery podzemných vôd
Bs – bilančný stav

Bilančný stav má päť stupňov:

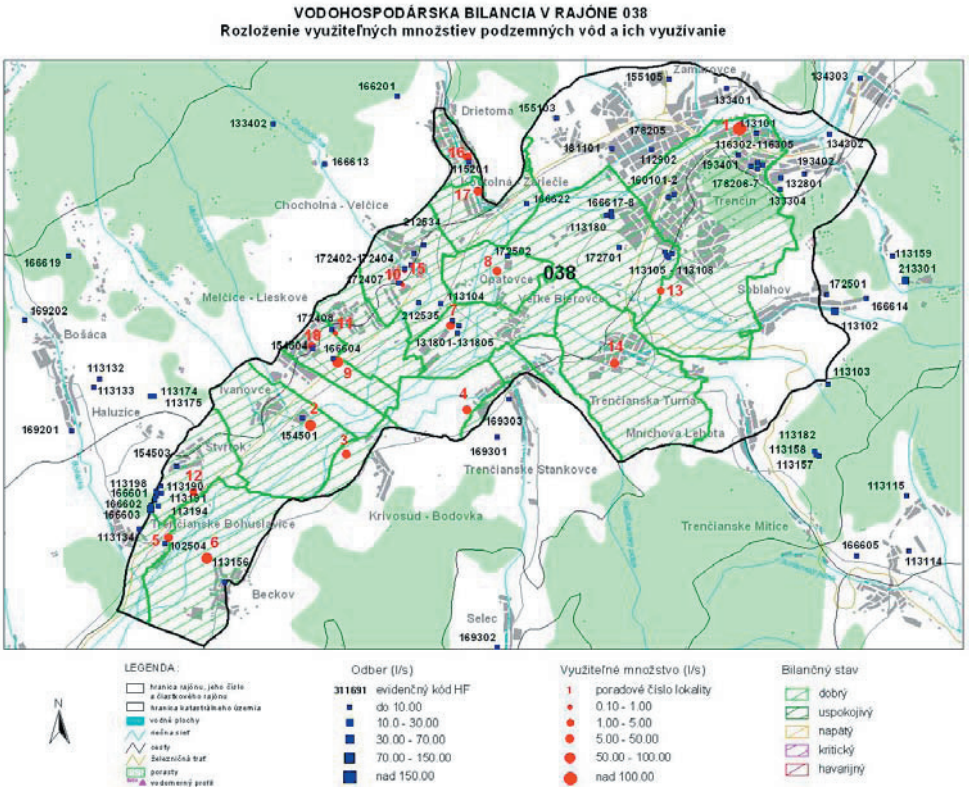
Bs - dobrý	3,33 < Bs
Bs – uspokojivý	1,43 < Bs < = 3,33
Bs - napätý	1,18 < Bs < = 1,43
Bs - kritický	1,00 < Bs < = 1,18
Bs - havarijný	Bs < = 1,00.

Základnou hodnotiacou jednotkou VHB podzemných vôd Slovenska je hydrogeologický rajón s jeho následným detailným členením na subrajóny a čiastkové rajóny. Podľa poslednej hydrogeologickej rajonizácie [5] bolo územie Slovenska rozdelené na 141 hydrogeologických rajónov.

Vzhľadom na to, že VHB podzemných vôd predstavuje jeden z primárnych materiálov zachytávajúcich vzťah medzi potenciálnymi možnosťami exploatácie podzemných vôd a jej súčasným využívaním a pomáha vodohospodárskym orgánom pri rozhodovacích procesoch o efektívnom využívaní podzemnej vody a pri tvorbe koncepcie rozvoja vodného hospodárstva, rozpracováva sa detailnejšie v tabuľkových výstupoch až na jednotlivé lokality, príp. konkrétne významnejšie zdroje. Súčasťou výstupov je aj stručná informácia o kvalite a využiteľnosti jednotlivých zdrojov podzemných vôd.

Od roku 2006 je pre väčšiu prehľadnosť bilančné hodnotenie doplnené aj grafickým spracovaním dokumentovania využiteľných množstiev podzemných vôd a odberov v jednotlivých hydrogeologických rajónoch prepojením databázových údajov s priestorovými informáciami spracovanými geoinformačným systémom GIS, ktorý umožňuje popri klasickom textovom resp. tabuľkovom vyjadrení poskytnúť aj vizualizáciu priestorového rozloženia hodnotených prvkov a bilančného stavu v rámci hodnotených území. V súčasnej dobe je takto spracovaných vyše 60 % hydrogeologických rajónov (obr. 2).

Začlenením Slovenska do európskych štruktúr nastala potreba implementácie smernice 2000/60/ES (Rámcovej smernice o vodách) do všetkých oblastí vodného hospodárstva, teda aj bilancovania podzemných vôd. Základnou jednotkou bilancovania podľa uvedenej smernice je útvar podzemných vôd. V rámci Slovenska bolo vyčlenených 101 útvarov podzemných vôd. Bilancovanie množstiev podzemných vôd je základným kritériom pre posudzovanie kvantitatívneho stavu útvarov podzemných vôd podľa horeuvedenej smernice. Bilančné hodnotenie vychádza zo stanovených využiteľných množstiev pre hydrogeologické rajóny alebo ich časti, ktoré sú priradené k zodpovedajúcim útvarom podzemných vôd.



Obr. 2: Ukážka detailného grafického spracovania kvantitatívnej vodohospodárskej bilancie podzemných vôd

Pre uvedené hodnotenie je stanovená transformovaná hodnota využiteľných množstiev podzemných vôd, ktorá sa vypočíta prenásobením využiteľných množstiev príslušným koeficientom, zohľadňujúcim mieru spoľahlivosti vyčlenených kategórií podľa nasledujúceho kľúča: Transformovaná hodnota využiteľných množstiev = Vm(A).1,0 + Vm(B).1,0 + Vm(C).0,80 + Vm(C1).0,75 + Vm(C2).0,70 + Vm(I).0,70 + Vm(II).0,50 + Vm(III).0,30 + Vm(odhad).0

kde Vm(X) = využiteľné množstvá príslušnej kategórie

Výsledné bilancovanie množstiev podzemných vôd pre potreby hodnotenia kvantitatívneho stavu útvarov podzemných vôd predstavuje porovnanie transformovaných využiteľných množstiev podzemných vôd a odberov podzemných vôd za hodnotený rok. Medzná hodnota dobrého kvantitatívneho stavu v hodnotenom útvare bola stanovená na úrovni 0,80 (podiel využívania podzemných vôd < 80 % stanovených transformovaných využiteľných množstiev podzemných vôd [4]).

Uvedené bilancovanie množstiev podzemných vôd v rámci hodnotenia kvantitatívneho stavu útvarov podzemných vôd sa vypracúva od roku 2004 pre jednotlivé útvary podzemných vôd ako celky. V najbližšom období je potrebné zosúladiť uvedené bilančné hodnotenie so spracovaním Kvantitatívnej vodohospodárskej bilancie, ktorá je stále vydávaná na základe členenia podľa hydrogeologických rajónov. Nespornou výhodou doterajšieho hodnotenia je detailizácia na jednotlivé lokality a zdroje podzemných vôd v maximálne možnej miere, ktorú je žiadúce premietnuť do nového bilančného hodnotenia. Nová metodika by mala byť vypracovaná do konca roku 2010, samotná aplikácia s detailným rozpracovaním na jednotlivé lokality môže vyžadovať vzhľadom na súčasné kapacitné a finančné možnosti dlhšie časové obdobie.

4. Záver

Slovenská republika sa vstupom do Európskej únie (EÚ) zaviazala k uplatneniu požiadaviek vyplývajúcich z legislatívnych predpisov Európskej komisie (EK) aj vo svojej vodnej politike. Najvýznamnejším dokumentom v tejto oblasti je smernica Európskej únie 2000/60/ES, tzv. Rámcová smernica o vode (RSV). Okrem iného zavádza do vodného hospodárstva princíp trvalej udržateľnosti využívania vodných zdrojov. Z tohto dôvodu je dôležité zapracovať tieto požiadavky do úloh riešených na národnej úrovni ku ktorým patrí aj pravidelné vyhodnocovanie vodohospodárskej bilancie (povrchových a podzemných vôd).

Literatúra

[1] FEKETE, V., 1993. Spracovanie návrhu nových metodík ŠVHB - kvantitatívna vodohospodárska bilancia povrchových vôd. Bratislava, VÚVH.

[2] POÓROVÁ, J., 2007. Metódy vodohospodárskej bilancie. Bratislava. [Dizertačná práca].

[3] KULLMAN, E. – MIHÁLIK, F. – PATSCHOVÁ, A., 1995. ŠVHB – podzemné vody. Metodika spracovania štátnej vodohospodárskej bilancie uplynulého roku. Bratislava, SHMÚ.

[4] KULLMAN, E. a kol., 2007. Metodika hodnotenia kvantitatívneho stavu útvarov podzemných vôd Slovenska a hodnotenie kvantitatívneho stavu útvarov podzemných vôd v kvartérnych sedimentoch a predkvartérnych horninách. Bratislava, Slovenská asociácia hydrogeológov.

[5] ŠUBA A KOL., 1984. Hydrogeologická rajonizácia Slovenska, 2. vydanie. Bratislava, SHMÚ.

Kontakty na autora

1 Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava, Slovenská Republika, e-mail: zuzana.danacova@shmu.sk, pavol.caucik@ shmu.sk, jana.poorova@ shmu.sk

HYDROLOGICKÁ BILANCE MNOŽSTVÍ VODY PROVÁDĚNÁ V ČHMÚ

Radek Vlnas[1]

Abstrakt

Vedení vodní bilance jednou ze základních činností v oblasti zjišťování a hodnocení stavu povrchových a podzemních vod. Hydrologická bilance množství vody prováděná v ČHMÚ od roku 2002 poskytuje pro sestavení vodní bilance část podkladů. Bilance množství vody je vyhodnocována pro 74 povodí a 10 bilančních oblastí v měsíčním kroku. Obsahuje údaje o atmosférických srážkách, celkovém odtoku, základním odtoku, zásobách vody ve sněhové pokrývce, změnách zásob podzemní vody a přirozených průtocích vody ve vodních tocích.

Klíčová slova: hydrologická bilance, srážko-odtokové modelování

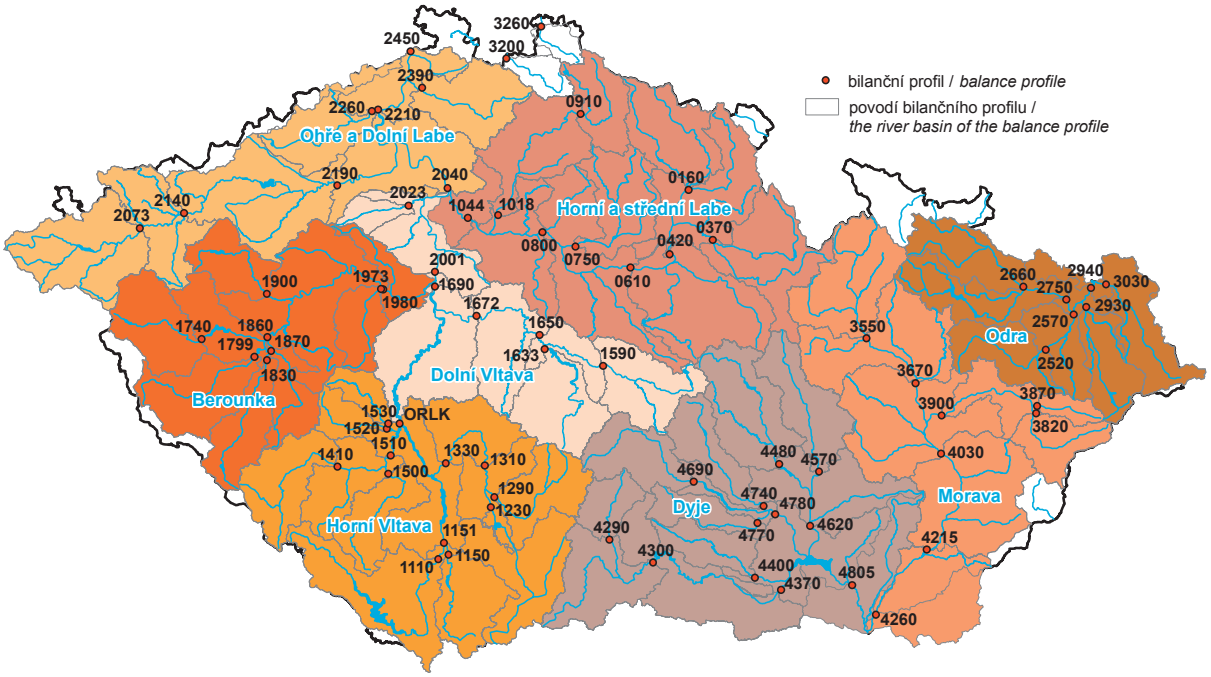
1. Úvod

Podle zákona č. 254/2001 Sb. o vodách (vodní zákon) je vedení vodní bilance jednou ze základních činností v oblasti zjišťování a hodnocení stavu povrchových a podzemních vod. Vodní bilance podle vodního zákona sestává z hydrologické bilance a vodohospodářské bilance. Hydrologická bilance porovnává přírůstky a úbytky vody a změny vodních zásob v území za daný časový interval. Vodohospodářská bilance porovnává požadavky na odběry povrchové a podzemní vody a vypouštění odpadních vod s využitelnou kapacitou vodních zdrojů z hledisek množství a jakosti vody a jejich ekologického stavu. Obsah vodní bilance a způsob jejího sestavení následně upravila vyhláška Ministerstva zemědělství č. 431/2001 Sb. Hydrologickou bilanci sestavuje v souladu s uvedenou vyhláškou a na základě pověření Ministerstva životního prostředí Český hydrometeorologický ústav. Vodohospodářskou bilanci za oblasti povodí sestavují správci povodí. Hydrologická bilance se skládá z bilance množství vody a bilance jakosti vody.

2. Hydrologická bilance množství vody

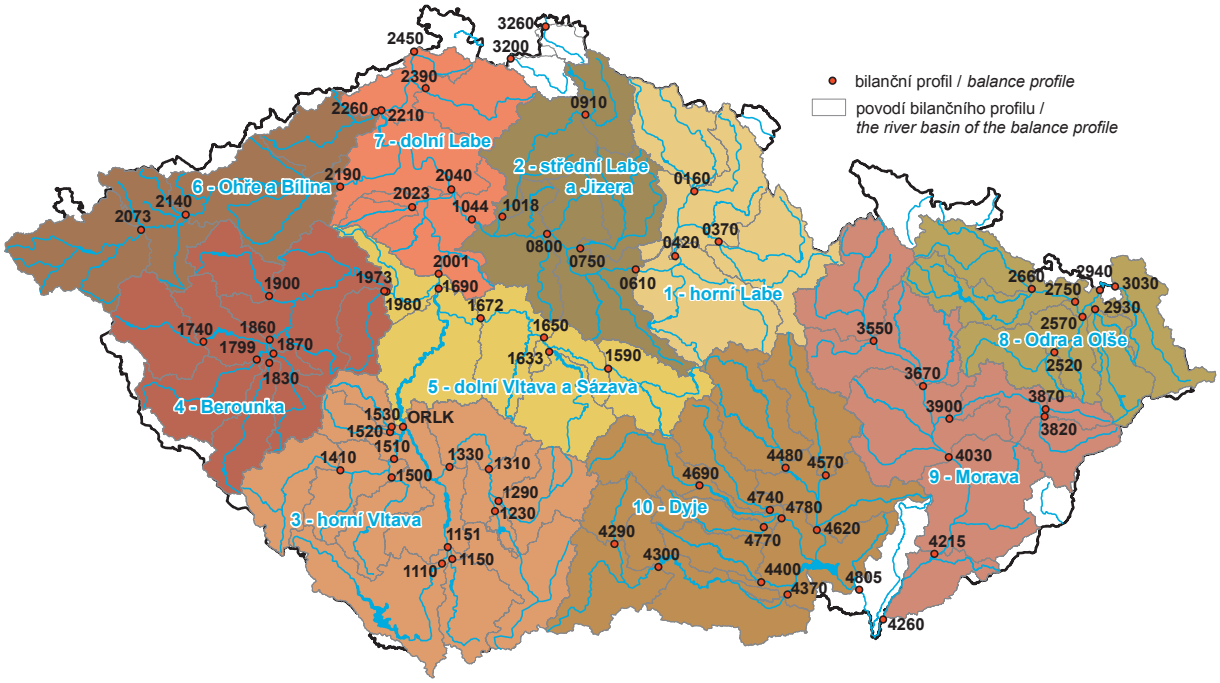
ČHMÚ vyhodnocuje Hydrologickou bilanci množství vody v ČR od roku 2002. K tomu účelu byla provedena rozsáhlá kalibrace modelů hydrologické bilance na základě dat od roku 1980. Hydrologická bilance zahrnuje porovnání srážek, přítoků a odtoků vody a změn vodních zásob v povodí, území nebo vodním útvaru za daný časový interval. Hydrologická bilance hodnotí změny zásob povrchové a podzemní vody způsobené časovou a prostorovou proměnlivostí přirozených vlivů, zejména klimatických činitelů a vytváří podklad pro hodnocení změn zásob vody, které jsou způsobeny užíváním vody nebo jinými antropogenními zásahy.

Zpráva Hydrologické bilance množství vody se skládá z textové části a tabulkové části. Slovní vyhodnocení je provedeno pro 8 oblastí povodí podle vodního zákona (Obr. 1) - povodí Horního a středního Labe, Horní Vltavy, Berounky, Dolní Vltavy, Ohře a Dolního Labe, Odry, Moravy a povodí Dyje.



Obr. 1: Rozdělení České republiky do 8 oblastí povodí

Takto stanovené oblasti povodí však není vždy možné bilančně uzavřít, protože v některých případech nejsou v závěrovém profilu k dispozici příslušná data průtoků. Pro výpočtovou část bilance množství vody je tedy území České republiky rozčleněno do 10 bilančních oblastí, se snahou o co největší přiblížení oblastem povodí podle vodního zákona. Oblast povodí Horního a středního Labe byla ještě rozdělena na dvě bilanční oblasti, rovněž oblast povodí Ohře a Dolního Labe byla rozdělena na dvě oblasti (Obr. 2).



Obr. 2: Rozdělení České republiky do 10 bilančních oblastí

V těchto bilančních oblastech je bilance počítána pro 74 povodí (Tab. 1). Výpočet je prováděn v měsíčním kroku. Výstupy bilance množství v těchto povodích obsahují údaje o:

– atmosférických srážkách,

– celkovém odtoku,

– základním odtoku,

– zásobách vody ve sněhové pokrývce,

– změnách zásob podzemní vody,

– přirozených průtocích vody ve vodních tocích.

Příklad výstupu Hydrologické bilance množství vody v roce 2008 pro stanici 0420 Němčice na Labi uvádí Tab. a Obr. 3.

Tab. 1: Seznam bilančních profilů množství vody podle příslušnosti k bilančním oblastem

Bilanční oblast	Kód oblasti	Bilanční profily
horní Labe	1	0160, 0370, 0420, 0610
střední Labe a Jizera	2	0750, 0800, 0910, 1018, 1044
horní Vltava	3	1110, 1150, 1151, 1230, 1290, 1310, 1330,1410, 1500, 1510, 1520, 1530, ORLK
Berounka	4	1740, 1799, 1830, 1860, 1870, 1900, 1973, 1980
dolní Vltava a Sázava	5	1590, 1633, 1650, 1672, 1690, 2001
Ohře a Bílina	6	2073, 2140, 2190, 2260, 2210
dolní Labe	7	2023, 2040, 2390, 2450
Odra a Olše	8	2520, 2660, 2570, 2750, 2930, 2940, 3030, (3200, 3260)
Morava	9	3550, 3670, 3820, 3870, 3900, 4030, 4215, 4260
Dyje	10	4290, 4300, 4370, 4400, 4480, 4570, 4620, 4690, 4740, 4770, 4780, 4805

2.1 Vývoj bilance množství vody v ČHMÚ

Od roku 2002 byla hydrologická bilance množství vody počítána pro 54 vodoměrných stanic. V roce 2005 došlo k zavedení fiktivní stanice Orlík vtok. Stanice slouží k úpravě vymezení bilančních oblastí povodí horní Vltavy a povodí dolní Vltavy tak, aby lépe odpovídaly plošnému rozsahu oblastí povodí podle působnosti správců povodí. V textové části došlo k rozšíření o popis vývoje zásob vody ve sněhové pokrývce a teplot vzduchu, tedy veličin sledovaných sítí klimatologických stanic ČHMÚ. Rovněž byl změněn způsob vyhodnocení zásob vody ve sněhové pokrývce, kdy bylo modelování sněhové vodní hodnoty hydrologickým modelem nahrazeno výpočtem podle metody navržené L. Němcem.

V roce 2006 došlo k rozšíření počtu povodí na 74. Jednalo se jednak o stanice sloužící k doplnění tam, kde původně vymezená bilanční povodí byla plošně rozsáhlá (povodí Jizery, Berounky, Vltava, Dyje), dále o stanice v okrajových částech republiky, jejichž povodí pokrývají dříve nebilancované oblasti státu (severní Čechy a jižní Morava). V roce 2007 byl

změněn způsob výpočtu základního odtoku a hodnocení stavu podzemních vod. Úrovně hladin ve vrtech a vydatnosti pramenů jsou zařazovány na dlouhodobou měsíční křivku překročení (DMKP). Ta je spočítána z období 1971-2000. Hodnota menší než 50 % značí stav nadnormální (hladina ve vrtu či vydatnost pramene byla ve srovnávacím období překročena v méně než 50 % případů), větší než 50 % značí stav podnormální.

Od roku 2008 obsahují tabulky pro srážky, celkový měřený odtok, základní odtok a zásobu vody ve sněhové pokrývce procentuální vyjádření jejich vztahu k dlouhodobému normálu. Normálová období odpovídají praxi v jednotlivých odděleních ČHMÚ: průměrný měsíční odtok je vyhodnocen pro období 1961–2005, normály srážek a zásoby ve sněhu pro období 1961–2000 a základní odtok je vzhledem ke kratším řadám pozorování porovnáván s obdobím 1971–2000.

Průtok celkový měřený, základní i přirozený je v tabulkách vzhledem k přesnosti jejich vyhodnocení uváděn na tři platné číslice.

3. Metodika hydrologického bilancování množství vody

Sestavení hydrologické bilance množství vody probíhá ve třech fázích.

3.1 Příprava vstupních dat

Předpokladem pro to, aby mohla být zpracována hydrologická bilance je příprava dat a zpracování víceletých pozorovaných řad bilančních veličin z povodí, pro která se bilance zpracovává.

Jak udává Tab. 2, jedná se konkrétně o:

– Výběr datových řad o průtocích, teplotě vzduchu, relativní vlhkosti vzduchu v měsíčním kroku (pro bilanční model) a srážkových úhrnech, výšce sněhové pokrývky, výšce nového sněhu a tlaku vodních par v denním kroku (pro stanovení vodní hodnoty sněhu) za referenční období od roku 1980.

– Očištění průtokových dat od vlivu odběrů povrchové i podzemní vody, vypouštění, manipulací nádrží, a převodů vody i očištění pozorování hladin podzemních vod a vydatností pramenů od vlivu významných odběrů podzemní vody. Tato část byla zpracována ve Výzkumném ústavu vodohospodářském (VÚV T. G. Masarika v.v.i.) na základě údajů o odběrech a vypouštění významných uživatelů, údajů o významných akumulacích a na podkladě dat měřených v ČHMÚ.

Ne všechny bilanční veličiny lze vyčíslit z měření. Některé bilanční veličiny je možné odhadovat podle jejich vztahu k jiným, měřeným, veličinám a některé bilanční veličiny lze odhadnout jen modelováním hydrologického procesu. K tomu účelu je využíván srážko-odtokový model SimBa rozvíjený ve VÚV T. G. Masarika v.v.i [1]

U značně ovlivněných odtokových režimů je však obtížné správně posoudit všechny umělé zásahy a eliminovat jejich vliv, což může nepříznivě ovlivnit následné sestavení hydrologické bilance ve sledovaném profilu.

3.2 Výpočet časových řad prvků hydrologické bilance

Pro povodí probíhá následovně:

– Úhrn srážek je vyčíslován podle měření ve srážkoměrných stanicích. Pro výpočet srážkových výšek na povodí je využívána metoda Orografické interpolace srážek [2, 3], která využívá předpoklad lineární regresní závislosti úhrnu srážek na nadmořské výšce.

– Teplota a relativní vlhkost vzduchu – se hodnotí obdobně jako u výpočtu úhrnu srážek.

Tab. 2: Přehled veličin hydrologické bilance

Veličina	Jednotky	Použitý způsob stanovení	Zdroj dat
Srážky	mm	Orografickou interpolací z bodových pozorování ve srážkoměrných stanicích	databáze ČHMÚ
Celkový odtok	$m^3.s^{-1}$ mm	Pozorování vodních stavů a hydrometrická měření v závěrovém profilu povodí	databáze ČHMÚ
Základní odtok	$m^3.s^{-1}$ mm	Vyčlenění z průběhu celkového odtoku	databáze ČHMÚ
Zásoba vody ve sněhové pokrývce	mm	Výpočtem podle Němce	databáze ČHMÚ
Změny zásob podzemní vody	mm	Modelovým výpočtem	model SimBa
Přirozený průtok	mm $m^3.s^{-1}$	Pozorování vodní stavů, korekce podle údajů o umělých regulacích	ČHMÚ, VÚV, podniky Povodí
Přímý odtok 1	mm	Modelovým výpočtem	model SimBa
Přímý odtok 2	mm	Modelovým výpočtem	model SimBa
Zásoba vody v půdě	mm	Modelovým výpočtem	model SimBa
Potenciální evapotranspirace	mm	Modelovým výpočtem	model SimBa
Územní výpar	mm	Modelovým výpočtem	model SimBa
Relativní vlhkost vzduchu	%	Orografickou interpolací z bodových pozorování klimatologických stanic	databáze ČHMÚ
Teplota vzduchu	°C	Orografickou interpolací z bodových pozorování klimatologických stanic	databáze ČHMÚ
Dotace zásob podzemní vody	mm	Modelovým výpočtem	model SimBa
Perkolace	mm	Modelovým výpočtem	model SimBa

– Celkový odtok z povodí je vyhodnocen na základě pozorování vodních stavů a měrných křivek průtoků v závěrovém vodoměrném profilu.

– Základní odtok je získáván z celkového odtoku automatickou separací podle Eckhardta. Metodě je věnován samostatný příspěvek v tomto sborníku, viz Vlnas sekce 3.

– Zásoba vody ve sněhové pokrývce je stanovována výpočtem metodikou navrženou podle L. Němce. Z modelových simulací je patrné, že model SimBa vzhledem k měsíčnímu kroku výpočtu neumožňuje odhadnout zásoby vody ve sněhové pokrývce s dostatečnou přesností a zásoby soustavně podhodnocuje. Dalším důvodem je snaha co nejvíce využít veličiny měřené v síti stanic ČHMÚ a modelovat pouze veličiny, které není možné měřit přímo nebo je z přímo měřených hodnot odvodit. Vodní hodnota sněhu je sice rovněž měřenou veličinou, ale týdenní četnost měření není pro naše potřeby dostatečná (měsíční průměr je počítán pouze ze 4 hodnot). Do výpočtu metodou podle Němce vstupují denní srážkové úhrny, výška nového sněhu, celková výška sněhu, tlak par. Výpočet je založen na těchto základních předpokladech:

- Přírůstek vodní hodnoty díky novému sněhu je roven srážkám, pokud tyto nejsou příliš vysoké. V tom případě je přírůstek takový, aby hustota nového sněhu byla 0,2 $g.cm^{-3}$.
- Přírůstek vodní hodnoty sněhu je omezen schopností sněhu pojmout vodu. Tato schopnost je přímo úměrná výšce sněhu a nepřímo úměrná jeho hustotě.
- Sníh je schopen přijímat vzdušnou vlhkost.
- Časové řady vodní hodnoty sněhu v denním kroku ve stanicích monitorovací sítě ČHMÚ jsou přepočítávány do rastrů průměrných měsíčních vodních hodnot rovněž metodou orografické interpolace srážek.
- Srážkový úhrn, teplota vzduchu, relativní vlhkost vzduchu a vodní hodnota sněhu na konkrétní povodí je řešena pomocí skriptů v prostředí ArcGIS, kdy je určována průměrná hodnota veličiny z rastru odpovídajícímu příslušnému povodí.

3.3 Bilanční výpočty

Pro analýzu hydrologické bilance byl využit model SimBa [1], který schematizuje základní bilanční vztahy na povrchu povodí, v zóně aerace (do níž je zahrnut i vegetační kryt povodí) a v zóně podzemní vody. Model hydrologické bilance se skládá z několika dílčích algoritmů, kterými se modelují základní bilanční procesy v dílčích zónách povodí (jde o dělení ve vertikálním členění).

Parametry modelu jsou buď volné, fyzikálně dané nebo je považujeme za konstantní. Volné parametry se odhadují tak, aby se průběh zvolené modelované veličiny podle vybraného kritéria co nejvíce shodoval s pozorováním. Pro odhad parametrů byl použit proces dvou-stupňové optimalizace podle celkového odtoku a výsledky dlouhodobých pozorování.

Územní výpar nelze měřit přímo. Časové řady hodnot územního výparu jsou proto stanoveny výpočtem pomocí modelu SimBa. Podstatou modelování je popis akumulace vody ve formě zásoby vody v půdě a její využití pro výpar. Při výpočtu se vychází z předpokladu, že když je v daném měsíci srážka větší, než potenciální evapotranspirace, je výpar roven potenciální evapotranspiraci. Pokud je srážka menší než potenciální evapotranspirace, využívá se pro výpar i část vody v půdě. V závislosti na stupni nasycení půdy se velikost výparu oproti potenciální evapotranspiraci zmenšuje. Potenciální evapotranspirace je v modelu řešena pomocí empirických grafů udávajících její velikost v závislosti na hodnotě sytostního doplňku [4]. Sytostní doplněk je počítán podle průměrných teplot a průměrných relativních vlhkostí vzduchu v konkrétním měsíci.

Změny zásob podzemní vody jsou určovány bilančně z rozdílu srážek, aktuální evapotranspirace, změny zásob půdní vody a zásob ve sněhové pokrývce a odtoku.

4. Závěr

Výpočet hydrologické bilance množství vody v ČR se stal standardní průběžně rozvíjenou úlohou, při níž je využíván rozsáhlý soubor dat z monitorovací sítě ČHMÚ a prostředky GIS. Simulace srážkoodtokového procesu modelem SimBa umožňuje vyhodnocovat bilanční veličiny, které není možné přímo měřit.

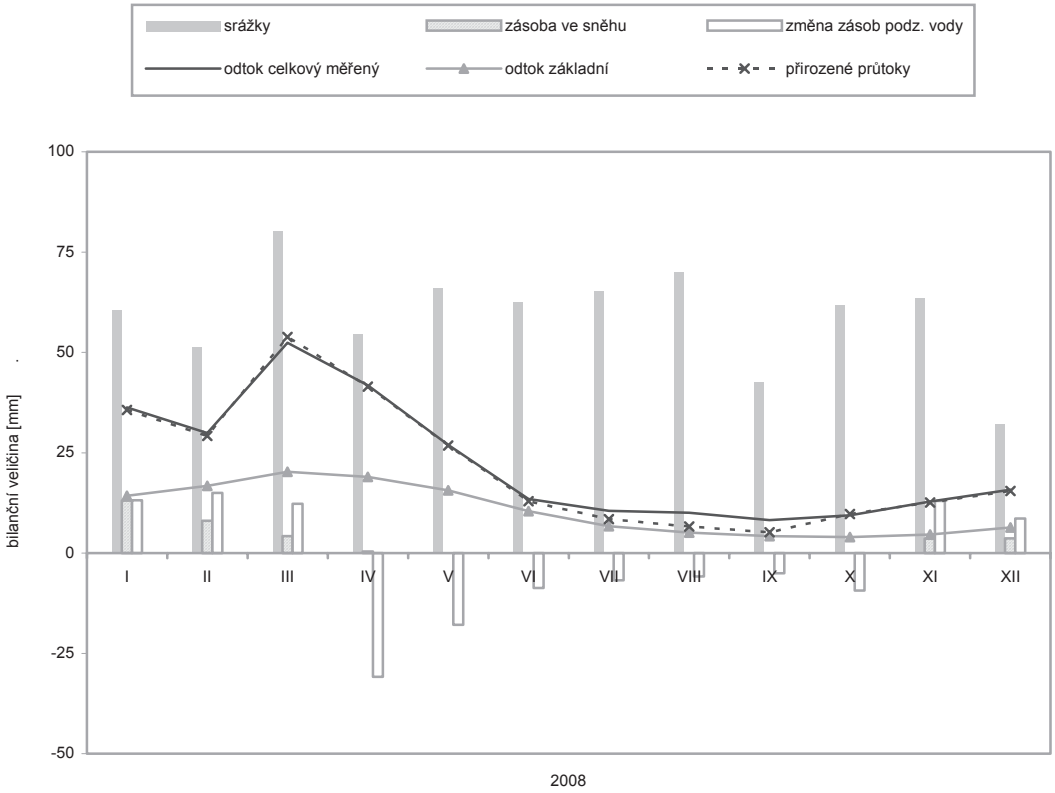
Další vývoj lze spatřovat v řešení bilance také pro mezipovodí. To se týká především odtoku, klimatické veličiny lze uvedenou metodou vyhodnocovat pro libovolně zvolenou plochu. Tím by přirozeně také došlo k přiblížení výpočtů a textového hodnocení bilance.

Rovněž by bylo vhodné uvádět průtoky ve vodoměrných stanicích s m-denními nebo N-letými hodnotami odtoku.

Tab. a Obr. 3: Příklad výstupu Hydrologické bilance množství vody pro stanici 0420 Němčice na Labi v roce 2008

tok	vodoměrná stanice	dtb stanice	plocha povodí [km^2]
Labe	Němčice	0420	4301

měsíc	srážky		odtok celkový měřený			odtok základní			zásoba ve sněhu		změna zásob podz. vody	přirozené průtoky	
	[mm]	*% norm.*	[mm]	[m^3.s^{-1}]	*% norm.*	[mm]	[m^3.s^{-1}]	*% norm.*	[mm]	*% norm.*	[mm]	[mm]	[m^3.s^{-1}]
I	60.5	*103%*	36.3	58.3	*111%*	14.3	23.0	*95%*	13.1	*33%*	13.2	35.7	57.3
II	51.3	*105%*	29.9	51.4	*89%*	16.7	28.7	*116%*	8.1	*15%*	15.0	29.2	50.1
III	80.3	*145%*	52.4	84.1	*106%*	20.2	32.5	*112%*	4.3	*11%*	12.3	53.8	86.5
IV	54.5	*118%*	41.8	69.3	*90%*	19.0	31.5	*92%*	0.4	*6%*	-30.9	41.5	68.8
V	65.9	*89%*	27.0	43.3	*80%*	15.6	25.1	*86%*	0		-17.9	26.8	43.1
VI	62.5	*71%*	13.5	22.4	*62%*	10.5	17.4	*87%*	0		-8.7	12.9	21.4
VII	65.3	*70%*	10.5	16.9	*47%*	6.7	10.8	*62%*	0		-6.8	8.4	13.6
VIII	69.9	*85%*	10.0	16.1	*52%*	5.1	8.24	*54%*	0		-5.8	6.6	10.6
IX	42.5	*67%*	8.2	13.6	*45%*	4.3	7.06	*53%*	0		-5.0	5.2	8.63
X	61.8	*113%*	9.4	15.1	*52%*	4.0	6.35	*50%*	0		-9.4	9.7	15.6
XI	63.4	*102%*	12.8	21.3	*59%*	4.6	7.71	*53%*	3.6	*118%*	13.0	12.6	20.9
XII	32.0	*45%*	15.8	25.4	*53%*	6.4	10.2	*57%*	3.7	*21%*	8.6	15.5	24.8
2008	709.8	*89%*	267.6	36.4	*77%*	127.4	17.4	*83%*	33.1	*21%*	-22.3	257.9	35.1



Literatura

[1] KAŠPÁREK, L. et al., 2006. Dopad klimatické změny na Českou republiku podle regionálních klimatických scénářů (Climate change impact in the Czech Republic by using regional climate scenarios) Research and protection of hydrosphere, Part A. Hydrology. Research report, VÚV T.G.M. Praha, pp 90–105.

[2] ŠERCL, P. – LETT, P., 2002. Výpočet rastru srážek v prostředí GIS. (GIS based computing of precipitation). User's manual for CHMI. CHMI Praha.

[3] ŠERCL, P., 2008. AGHydroInterpolace (Interpolating Procedures for ArcGIS). User's manual. CHMI Praha.

[4] Rekomendacii po rasčotu isparenija s poverchnosti suši. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav Praha, e-mail: vlnas@chmi.cz

EXPERIMENTÁLNÍ POVODÍ JIZERSKÝCH HOR – HISTORIE POZOROVÁNÍ, SOUČASNOST

Libor Ducháček[1], Jan Jirák[1]

Abstrakt

Experimentální povodí v Jizerských horách byla založena na počátku 80. let, kdy se předpokládalo, že vlivem rozsáhlého odlesnění dojde k výrazným změnám v hydrologické bilanci horských toků. Takto započatý výzkum se později propojil s prognózními účely pro řeky pramenící v Jizerských horách (Jizera, Lužická Nisa, Smědá). Pracoviště ČHMÚ v Jablonci nad Nisou spravuje 7 menších povodí do 10 km^2 (Černá Nisa, Blatný potok, Kamenice, Černá Smědá, Černá Desná, Jizerka). Každé z těchto povodí je uzavřeno limnigrafickou stanicí s digitálním záznamem, z nichž dvě jsou vybaveny přímým přenosem měřených dat na internet. Hydrologický monitoring je úzce propojen s třemi klimatickými stanicemi (Prameny Černé Nisy, Kůrovec, Jizerka) a poměrně hustou sítí srážkoměrů (16). Značnou část pracovní náplně během zimy tvoří měření výšky a vodní hodnoty sněhové pokrývky v rámci pravidelných měření na sněhoměrných profilech. Síť sněhoměrných profilů se přizpůsobuje změnám vegetačního pokryvu a ve vybraných profilech se pro porovnání měří jak v lese, tak na otevřených plochách. Mezi další činnosti patří metodické vedení při měření sněhu, instalace a servis automatických sněhoměrných stanic v rámci celé republiky.

Klíčová slova: experimentální povodí, výzkum, srážkoměrná síť, měření sněhu

1. Úvod

V Jizerských horách bylo počátkem 80. let založeno sedm experimentálních povodí, která měla dokázat předpoklad, že po rozsáhlém odlesnění vrcholových oblastí postižených kůrovcem a škodlivými emisemi dojde k výrazným změnám v hydrologické bilanci horských toků. Z těchto důvodů je již od roku 1981 vytvářena srážkoměrná síť doplněná o měření stavu, průtoku a kvality vody a v zimním období je pravidelně měřena výška a vodní hodnota sněhové pokrývky. ČHMÚ, konkrétně Oddělení hydrologického výzkumu, spravuje tato povodí z odloučeného pracoviště v Jablonci nad Nisou, které zajišťuje provoz zařízení, měření a prvotní zpracování dat. Vedle vlastního výzkumu poskytuje data i do projektů evropského významu (ERB, FRIEND) a spolupracuje s institucemi jako VÚV T. G. Masaryka v.v.i. nebo ČGS.

Jednotlivá povodí leží na rozvodnici evropských řek Labe a Odry ve výškách od 700 do 1100 m n. m. a jsou zdrojovými oblastmi Lužické Nisy, Jizery a Smědé.

Největším povodím o ploše přes 10 km^2 je povodí Jizerky se závěrovým profilem ve stejnojmenné osadě. Nedaleko od limnigrafické stanice se nachází od loňska již plně automatizovaná klimatická stanice a na střeše budovy HS (horská služba) je umístěna webkamera s online přenosem pro sledování počasí.

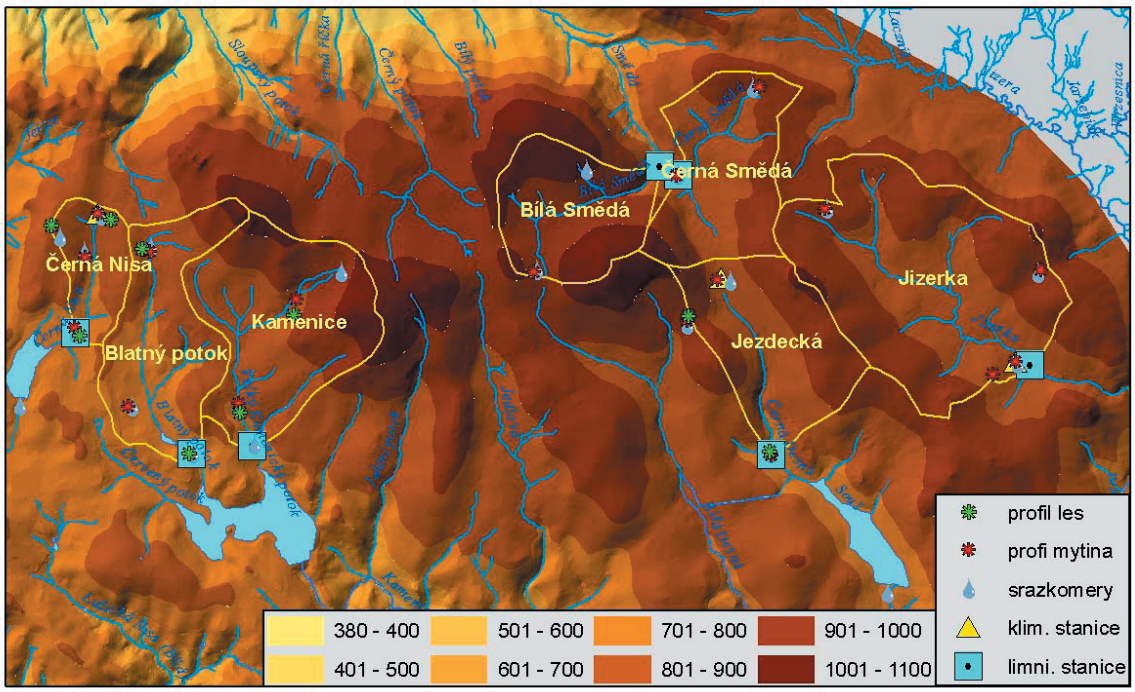
Jihozápadně v paralelním údolí Černé Desné leží povodí Jezdecká s limnigrafem nad vodní nádrží Souš. Zde je měření hladiny „zdvojeno“ čidlem Povodí Labe, s. p., pro které jsou pravidelně odebírány také vzorky vody.

Vzhledem k velmi rychlé odezvě na spadlé srážky má značný význam monitoring zdrojnic Smědé. Především Bílá Smědá, lemovaná strmými svahy, vykazuje rychlou reakci na srážkové úhrny zaznamenané na nejvýše položených srážkoměrech na Knajpě a Smědavské hoře.

V západní části Jizerských hor leží dvě povodí nad nádrží Josefův Důl. Větší z nich je na Kamenici, a menší na Blatném potoce. Pro obě povodí jsou platné klimatické údaje z

nedaleké stanice Nová louka a v povodí Kamenice se testuje prototyp sněhoměrného polštáře, tzv. Snowflow meter.

Nejmenší sledované povodí Uhlířská na Černé Nise je zároveň pokryto i nejhustší sítí srážkoměrů a podrobný výzkum ve spolupráci s ČHMÚ zde provádí ČVÚT.



Obr. 1: Mapa experimentálních povodí v Jizerských horách.

2. Historie

Měřící síť byla do roku 1989 obsluhována dobrovolnými pozorovateli, od roku 1990 je obsluha profesionální.

Ombrografická síť byla postupně instalována od roku 1981. V letech 1981 – 1988 síť zahrnovala 20 – 22 ombrografů a pokrývala celou oblast Jizerských hor. V roce 1995 se měřilo na 17 místech převážně ve vrcholových partiích Jizerských hor. Ze záznamů byly stanoveny denní a měsíční srážkové úhrny a pro vybrané hydrologické situace byl vyhodnocen chod srážek v hodinovém či kratším kroku. V letech 1996 až 1998 bylo postupně uvedeno do provozu vybavení pořízené z prostředků PHARE a dotací MŽP, které zahrnuje srážkoměry s digitálním záznamem a minutovým časovým rozlišením. Od roku 2008 je část tohoto vybavení nahrazována moderními automatickými srážkoměry, z nichž lze data sledovat online na internetu.

Limnigrafické stanice byly budovány v letech 1981 – 1987. První data jsou z 1.11.1981. Nejdelší řady pozorování jsou ve stanici Uhlířská a Jezdecká, které byly vybudovány jako první. Výsledkem zpracování byly řady průměrných denních průtoků, pro vybrané hydrologické situace, pak i řady okamžitých průtoků. Na stanicích Uhlířská, Kristiánov a Jezdecká jsou zároveň instalovány čidla Povodí Labe, s.p., jejichž konsumpční křivka je zpřesňována ČHMÚ. Od roku 2009 lze stav hladiny a teplotu vody na profilech Bílá Smědá a Jizerka sledovat online prostřednictvím přenosové jednotky Fiedler-Mágr.

Síť profilů pro sledování jakosti povrchových vod byla založena v roce 1982, k 1. 1. 1996 čítala sedm profilů s 14letou řadou pozorování. Od roku 1994 se v měsíčním kroku prováděly odběry vzorků vody na všech monitorovaných tocích, později byly rozbory jakosti vody zredukovány na toky Černá Nisa, Blatný potok, Kamenice a Černá Desná. Jedná se o přítoky do nádrží, proto byla uzavřena dohoda s podnikem Povodí Labe s. p. o společném

využívání výsledků. Pracoviště OHV provádí odběry vody a rozbory jakosti zajišťuje laboratoř Povodí Labe s. p. v Hradci Králové. Ve spolupráci s ČGS je od roku 1993 prováděn odběr podkorunových srážek v povodí Uhlířská, který je dále kvantitativně i kvalitativně posuzován se srážkami na otevřené ploše.

Sněhoměrná měření se uskutečňují od zimy 1980/81. Měří se na mýtinách a v lese v přibližně 20 - 30 m dlouhých úsecích. V roce 1991 byla síť přebudována a změněn režim měření. Byla vytvořena síť sedmi základních profilů, na kterou je napojena síť dvanácti doplňkových profilů. Základní profily se v době souvislé sněhové pokrývky měří jednou týdně, vždy v pondělí. Doplňkové jsou měřeny v půlce týdne. Od roku 2003 se pro prognózní účely měří vedle základních profilů v Jizerských horách i 12 profilů v západních Krkonoších, které doplňuje vyhřívaný srážkoměr na Dvoračkách. V roce 2007 byly poblíž klimatické stanice na Souši instalovány dva sněhoměrné polštáře, které automaticky měří výšku a vodní hodnotu (resp. hmotnost) sněhové pokrývky. Před zimní sezonou 2009/10 byl jeden z polštářů přemístěn do Krkonoš (Hanapetrova paseka) a je využíván při hydrologických předpovědích.

3. Současnost

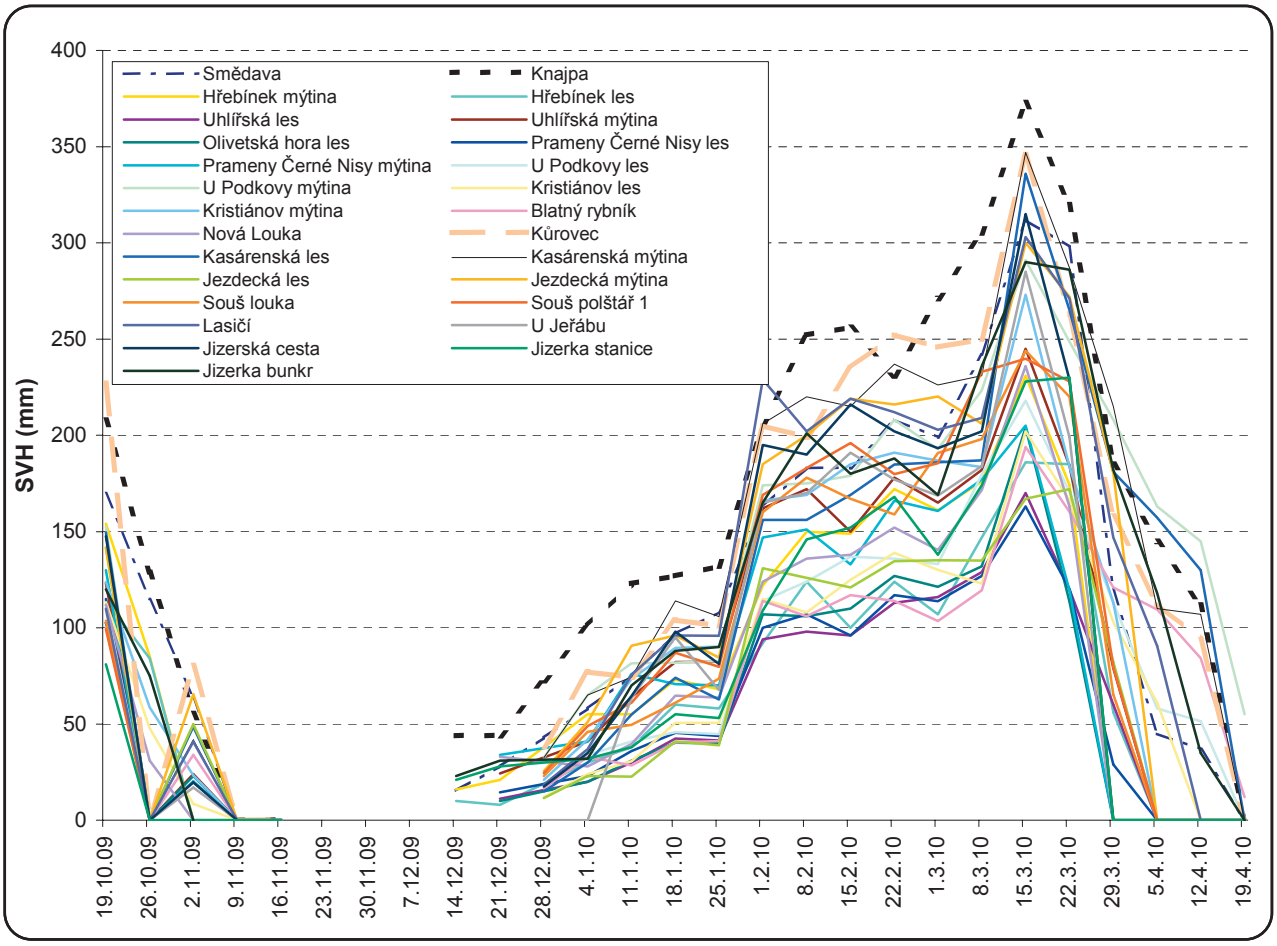
Ruku v ruce s vývojem nových technologií se postupně modernizuje výbava na experimentálních povodích. V současné době se ČHMÚ snaží dodržovat trend okamžité informovanosti a vybrané měřené hodnoty je tak možné sledovat online na internetu. Takovýto přehled o aktuálním stavu je praktický nejen pro meteorologické a prognózní účely, ale umožňuje i včas reagovat na případné poruchy.

Z hlediska srážek jsou Jizerské hory pokryty poměrně hustou sítí ombrografů. ČHMÚ disponuje v oblasti třemi automatickými základními klimatologickými stanicemi na přehradách Bedřichov, Souš a v osadě Jizerka. Ta byla modernizována v roce 2009 a funkci pozorovatele sněhové pokrývky plní místní Horská služba. Společně s vyhřívaným srážkoměrem na Nové louce tvoří celoročně provozovanou srážkoměrnou síť. Sezónní sestava srážkoměrů se skládá z šesti srážkoměrů o záchytné ploše 500 cm^2 (Knajpa, U Jeřábu, Lasičí, Jizerská cesta, Kasárenská, Olivetská hora) a devíti starších srážkoměrů SEBA o záchytné ploše 200 cm^2 (Černá Smědá, Jezdecká, Kůrovec, Smědavská hora, Tomšovka, Uhlířská, Prameny Černé Nisy, Blatný rybník, Kristiánov). Data ze stanic U Jeřábu a Knajpa jsou automaticky posílány do databáze pomocí GPRS a jejich přehled je graficky dostupný na stránkách ČHMÚ. Vedle srážkoměrů Povodí Labe, s.p. (Hřebínek, Černá hora, Nová louka), jejichž data jsou ČHMÚ poskytována, jsou na významných lokalitách, např. Nová louka, instalovány srážkoměry dalších institucí (AV ČR, PřF UK, Lesy ČR). Před zimní sezonou 2009/2010 byla v povodí Kristiánov sestrojena speciální soustava srážkoměrů (klasický typ SEBA) společně s ohraničeným čtvercem o ploše 10 m^2, z něhož je voda svedena do překlápěcího člunku. Tato sestava slouží především v jarních měsících pro ověření odtoku z tající sněhové pokrývky a ručně změřené vodní hodnoty během zimy.

Monitoring hladiny a teploty vody je na limnigrafických stanicích Jizerka, Bílá Smědá a Kristiánov zprostředkován automatickou řídící jednotkou M4016 od firmy Fiedler-Mágr, která zajišťuje přenos dat v hodinových intervalech a možnost připojení dalších sond či srážkoměru. Na limnigrafech Uhlířská, Jezdecká a klimatické stanici Prameny Černé Nisy jsou data ukládána na paměťovou kartu a pro stahování dat ze stanic Blatný rybník, Černá Smědá a Kůrovec je používán přenosný palmtop, který zároveň umožňuje nastavení řídící jednotky LEC.

Specialitou pracoviště v Jablonci nad Nisou je měření a výzkum sněhových charakteristik. Zásoby vody akumulované ve sněhu jsou v horských povodích důležitou složkou celkové hydrologické bilance. Měří se výška sněhu a jeho vodní hodnota – množství vody obsažené ve sněhové vrstvě. K odběru a vážení sněhového vzorku se používají laminátové sněhoměry. V Jizerských horách je každý týden proměřeno 25 profilů. V každém profilu je v deseti bodech měřena výška sněhu a ve třech bodech vodní hodnota. Pravidelná pondělní

měření slouží k výpočtu zásob vody v povodí horní Jizery a v období tání k předpovědi povodní. Z tohoto důvodu jsou také měřeny profily v západních Krkonoších – na Lysé hoře a v povodí Mumlavy. V posledních dvou letech byly na klimatické stanici Souš testovány automatické sněhoměrné stanice. Polštář naplněný vodným roztokem ethylenglykolu váží pomocí tlakového čidla vrstvu sněhu a z této hodnoty se určí vodní hodnota sněhu. Z kontinuálního měření lze velice přesně odhadnout začátek tání a měřit denní úbytky vodní hodnoty. Jelikož je ovšem sněhová pokrývka prvek prostorově velmi variabilní, budou stále hrát manuální sněhoměrná měření hlavní roli.



Obr. 2: Vývoj vodní hodnoty sněhové pokrývky v Jizerských horách v zimním období 2009-2010.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, Želivského 5, 466 05 Jablonec nad Nisou,
e-mail: duchacek@chmi.cz, jirak@chmi.cz

POROVNÁNÍ VÝSTUPŮ METODY ODTOKOVÝCH KŘIVEK (SCS-CN) S POZOROVANÝMI DATY Z MALÝCH POVODÍ

Antonín Malý [1]

Abstrakt

Příspěvek je věnován metodě SCS-CN. Jedná se o celosvětově aplikovaný a bez větších námitek respektovaný způsob výpočtu přímého odtoku při známé výšce srážky na povodí. Kvůli teoretické a výpočetní jednoduchosti je metoda zakomponována do mnoha srážko-odtokových a erozních modelů. V průběhu let získala značnou popularitu a byly navrženy četné modifikace vedoucí k jejímu zpřesnění. V příspěvku budou konfrontovány teoretické hodnoty s daty z experimentálních ploch v podmínkách České republiky i jinde ve světě. Významnou součást pojednání tvoří diskuze nad příčinami nalezených nesrovnalostí. Výsledky poukazují na fakt, že některé současné aplikace dostatečně nezohledňují podmínky a způsob odvození původní metody.

Klíčová slova: metoda odtokových křivek, malé povodí, hydrologické modelování, přímý odtok

1. Úvod

Jedním z nejdůležitějších problémů hydrologie je nalezení vztahu mezi srážkami a odtokem za různých podmínek. Mezery v našich znalostech jsou nejvíce patrné na malých povodích, kde nejsou k dispozici pozorované údaje. Jeden z přístupů k řešení nabízí metoda Soil Conservation Service - Curve Number (SCS-CN), viz. např. Mockus [1]. Metoda si velice rychle našla oblibu v celém světě, zejména pro svoji jednoduchost.

K realizaci výpočtu nám stačí běžně dostupné mapy půdního pokryvu a funkčního využití krajiny, znalost srážkového úhrnu za časový interval a hrubá představa o stavu nasycenosti povodí předchozími srážkami. Metoda svazuje půdní a vegetační vlastnosti krajiny se střední hodnotou tzv. odtokové křivky. Ta může být korigována v případě výrazně malé či naopak vysoké nasycenosti povodí. Výsledkem je hodnota výšky přímého odtoku za odpovídající časový interval.

2. Metoda

Dále uvedené rovnice vychází z [1]. Výpočet přímého odtoku se realizuje podle vztahu:

$$Q = \frac{(P - \lambda \cdot S)^2}{P - (1 - \lambda) \cdot S} \tag{1}$$

kde: Q je přímý odtok v mm, P je výška srážky v mm, S je potenciální maximální retence v mm, λ je součinitel počáteční ztráty roven 0,2. Pokud je P < (λ . S), pak Q je nulový.

Hodnotu potenciální maximální retence určíme podle:

$$S = 25{,}4 \cdot \left[\left(\frac{1000}{CN} \right) - 10 \right] \tag{2}$$

kde: CN je aktuální hodnota odtokové křivky, je získána tabelárně, např. [2] a podle (3) a (4).

Pro zohlednění nasycenosti povodí se vychází ze vztahů:

$$CNI = f(CNII) \tag{3}$$

$$CNIII = f(CNII) \tag{4}$$

kde: CN II je tabelárně určena, např. v práci Janečka et. al. [2]. CN I platí při pětidenní výšce srážky na povodí, předcházející modelované epizodě, menší než 35,6 mm a CN III platí obdobně při pětidenní srážce vyšší než 53,3 mm.

3. Nevýhody a použití

Nejčastěji je SCS-CN vytýkáno, že nezohledňuje vliv časového (intenzita srážky) a prostorového měřítka na výpočet. Byla odvozena v USA na plochách do 0,04 km^2 avšak aplikuje se celosvětově na povodí až do 50 km^2. Počáteční ztráta je podle mnohých autorů silně nadhodnocena. Nasycenost povodí je řešena velmi schematicky, což nepříznivě ovlivňuje kvalitu i stabilitu výsledků. V průběhu deště se rychlost aktuální infiltrace blíží nule, nikoliv konstantní nenulové hodnotě. Základním předpokladem použití je časová a prostorová uniformita srážky. Některé nedostatky shrnuli např. Ponce et. Hawkins [3].

SCS-CN je dnes patrně nejpoužívanější metodou na výpočet přímého odtoku. Je součástí mnoha hydrologických a erozních modelů např. HEC-HMS, DesQ-MaxQ, AnnAGNPS, SWAT atd.. Výsledků se využívá např. k optimalizaci protipovodňových a protierozních opatření [4], nebo ke stanovení návrhových hydrologických veličin (Šercl, [5]), především při posuzování bezpečnosti vodních děl (Kulasová et al., [6]). Zvláště velký význam má v povodí Labe, kde v profilech nad přehradami chybí dostatek měřených dat. Testuje se využití metody k predikci přívalových povodní (Šercl, [7]) a sucha (Šercl, [8]). Zdaleka nekompletní výčet dokládá vysokou národohospodářskou důležitost SCS-CN z pohledu České republiky. Citelným problémem však je, že postup odvozený před více než padesáti lety v odlišných přírodních podmínkách středozápadu USA, neprošel v ČR významnější kontrolou. O implementaci metody do českých podmínek se zasloužil kolektiv autorů z VÚMOP (Janeček et. al., [2]), žádná obsáhlejší česká hydrologická studie na toto téma není autorovi článku známa. Z tohoto důvodu se rozhodl konfrontovat teorii s empirickými daty získaných na experimentálních povodích Zbytiny v podmínkách šumavského podhůří.

4. Území a data

Experimentální lokalita Zbytiny, založená na Katedře fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze (KFGG PřF UK) na jaře roku 2006, leží mezi městy Volary a Prachatice na horním povodí šumavské Blanice. Jedná se o dvojici výzkumných povodí na přítocích Zbytinského a Tetřívčího potoka (toky VI. řádu). Plocha povodí je vždy přibližně 1,6 km^2, Herbstův sklon dosahuje přibližně 8 %. Detailní popis území a první výsledky z analýz naměřených dat z let 2006-2008 uvádí Malý [9].

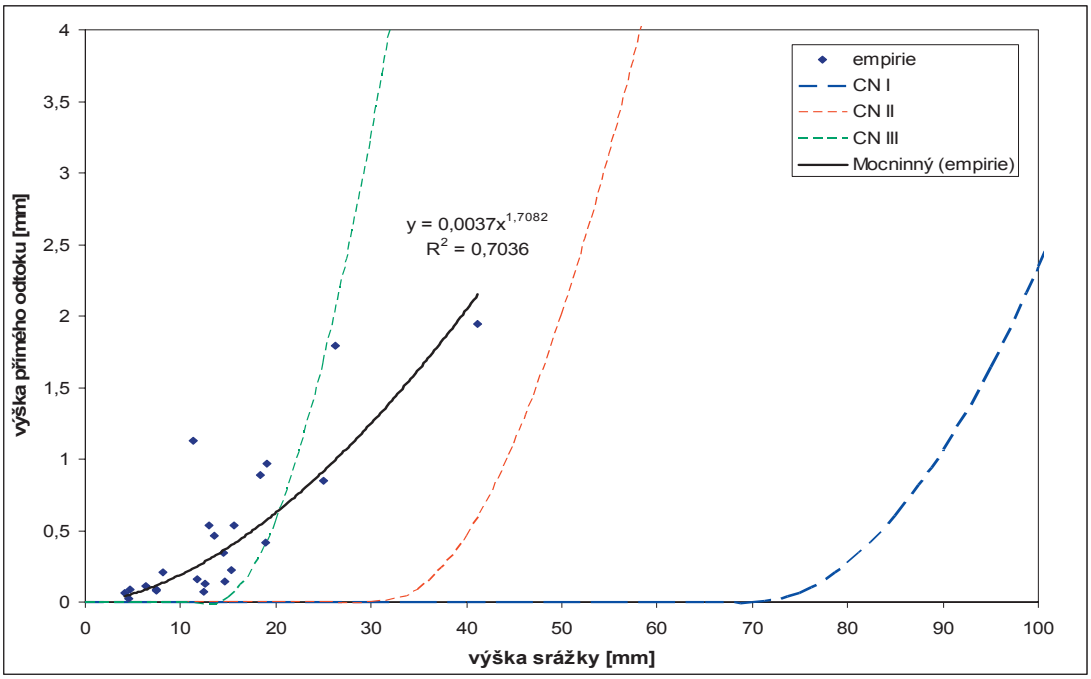
Empirická data z období květen 2006 - říjen 2008 byla získána z databáze projektu VaV SM/2/57/05 (Kliment et. al., [10]). Odvození hodnot CN a parametry vybraných srážko-odtokových epizod publikoval Malý [9]. Pro výpočet přímého odtoku byla využita metoda separace hydrogramu v inflexním bodě na sestupné větvi hydrogramu (Dub et. Němec, [11]), protože poskytla výsledky bližší teoretickým hodnotám podle SCS-CN než jiné uvažované techniky.

5. Výsledky

Porovnání výstupů metody SCS-CN a empiricky zjištěných hodnot z experimentálního povodí Tetřívčí potok je zachyceno na obrázku 1. Obdobné výsledky vykazuje také povodí Zbytinského potoka. Na první pohled je zřejmý výrazný nesoulad teorie a měření v rámci

vyšetřovaného rozpětí hodnot. Metoda odtokových křivek především dramaticky nadhodnocuje počáteční ztrátu (v obou případech o vice než 65 mm). Empirická odtoková křivka dále vykazuje odlišnou strmost, než konstrukce teoretická.

Tento závažný rozpor není ničím novým. K obdobným výsledkům jako autor článku v odlišných přírodních podmínkách došli např. Soulis et. al. [12], Baltas et. al. [13] a mnoho dalších. V podmínkách plošně většího povodí Blšanky upozorňuje Kadlec [14] na to, že: *„ ... metoda podhodnocuje objem přímého odtoku, zvláště pro méně výrazné srážkové události. Možným důvodem je relativně vysoký odhad počáteční retence v bezodtoké fázi, tj. úhrnu srážek, do jehož překročení nenastává přímý odtok"*. Samotní autoři z nástupnické organizace SCS doporučují snížit koeficient λ ze vztahu (1) na 0,05 a dále upravit i hodnoty CN (Woodward et. al., [15]). Tento názor se zdá být mnohem střízlivější než originální přístup, přesto zcela nepostihuje dále uvedené charakteristické rysy chování povodí.

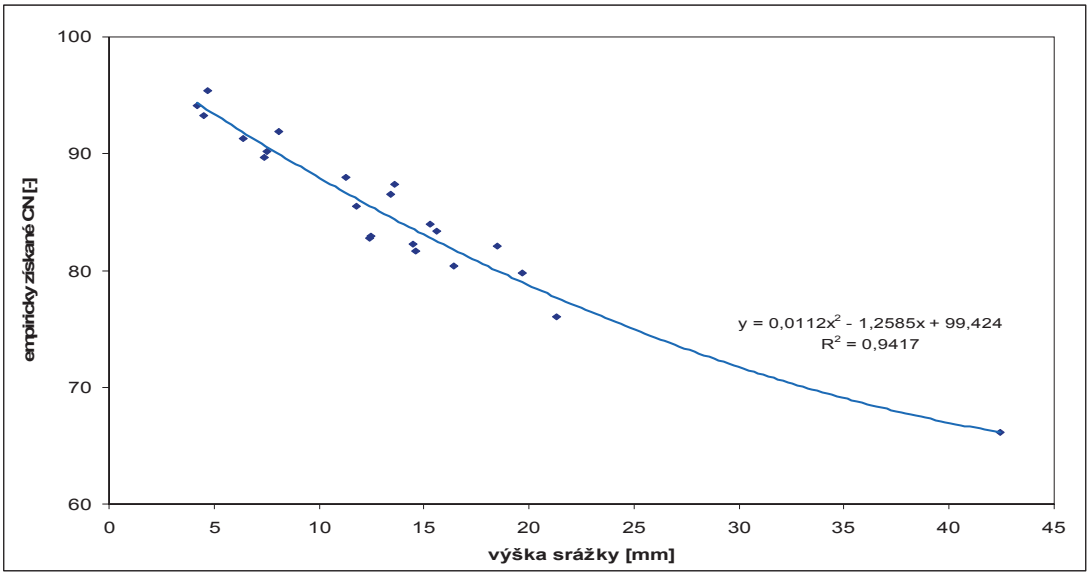


Obr. 1: Empirický vztah mezi výškou srážky a výškou přímého odtoku, Tetřívčí potok (CN II = 61,9)
Pozn.: Všechny srážko-odtokové epizody odpovídají aktuální hodnotě CN I (tj. 41,0).

6. Diskuze

Správné určení přímého odtoku podle SCS-CN závisí, kromě nejistoty odhadu srážkových vstupů, na trojici činitelů, popsaných výše uvedenými rovnicemi (1) až (4). Jsou jimi: 1) vztah definující strmost odtokové křivky, 2) vztah definující výchozí bod odt. křivky (parametr λ) a 3) souvislost mezi aktuální hodnotou CN a pětidenní výškou srážky na povodí ze vztahů (3) a (4). Ke každému ze tří jmenovaných bodů byly nalezeny rozpory teorie a naměřených údajů. Velmi omezený datový vzorek z lokality Zbytiny, je přitom silně podporován výsledky aktuálních světových prací. Autor článku se domnívá, že v kontextu zjištěných nesrovnalostí nemůže SCS-CN zaručit systematicky správné výsledky.

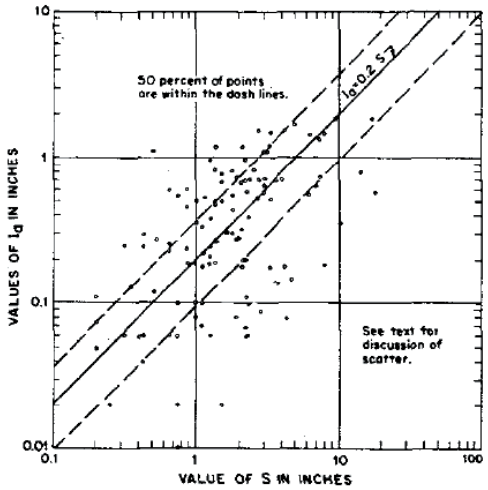
Na obrázku 2 je zachycen vývoj empiricky stanovené hodnoty odtokové křivky v závislosti na velikosti příčinné srážky pro experimentální povodí Zbytinský potok. Empirická CN vychází z naměřených srážek, odpovídajícího přímého odtoku získaného použitou technikou separace základního odtoku a platnosti podmínek uvedených ve vztazích (1) a (2). Obrázek naznačuje, že chování povodí nelze vyjádřit jedinou konstantní hodnotou CN, ale spíše funkcí jejího poklesu. Stejný závěr publikovali Hawkins [16], nebo také Soulis et. al. [12]. Do tohoto schématu dále promlouvá intenzita srážky a nasycenost povodí.



Obr. 2: Vývoj empirických hodnot CN, Zbytinský potok (CN II = 62,8)
Pozn.: Teoretická hodnota aktuální CN = 42,0 (CN I).

Významným parametrem ovlivňujícím výsledný objem přímého odtoku je hodnota počáteční ztráty vyjádřená pomocí λ ze vztahu (1). Zatímco teorie klade tento součinitel konstantní (roven 0,2), naměřené údaje svědčí o tom, že tomu tak není. Se vzrůstající srážkou λ klesá, protože počáteční ztráta (λ . S) se prakticky nemění (dáno teoreticky, empiricky ověřeno), zatímco empiricky určená potenciální maximální retence narůstá (vyplývá z Obr. 2). Tento postřeh potvrzují data a dílčí formulace v článku Baltase et. al. [13], byť to tak není autory v článku interpretováno.

Obecným rysem SCS-CN je, že počáteční ztrátu systematicky nadhodnocuje. Kvalitu původně odvozené hodnoty koeficientu λ dobře dokládají originální metodické materiály. Podle experimentálních dat dodaných SCS (Mockus, [1]) kolísá parametr λ v rozmezí dvou řádů (λ_{min} = 0,013, λ_{max} = 2,1) viz. obrázek 3. Navržená střední hodnota λ je tedy dosti hrubá aproximace, což má nepříjemné důsledky.



Obr. 3: Odvození součinitele počáteční ztráty v originální metodice SCS
Zdroj: Mockus (1972), Pozn.: Ia je rovno (λ . S).

Posledním důležitým článkem SCS-CN je zohlednění nasycenosti povodí. Pro deterministické modelování návrhových povodňových vln se nejčastěji využívá hodnota CN

II, často pak ještě CN III ze vztahu (4). Hodnota CN I, reprezentující podmínky předchozího pětidenního srážkového úhrnu nižšího než 35,6 mm, se zpravidla ve výpočtech neuvažuje. Autor článku považuje tuto skutečnost za metodický omyl. Podle Atlasu podnebí Česka [17] odpovídají reálné průměrné vlhkostní podmínky pro převážnou většinu našeho území definici CN I. Pro srážkové vstupy blízké 60 mm však CN II vede, dle empirických zkušeností, paradoxně k věrohodným výsledkům (viz. Obr. 1).

Pokud se průměrné hodnoty CN II v České republice nejčastěji pohybují v rozmezí 60 – 80, odpovídá to počáteční ztrátě pro reálné průměrné vlhkostní podmínky v rozmezí 70 – 30 mm. Když uvážíme, že doba trvání přívalových srážek je výrazně kratší než 1 den a bodová jednodenní srážka o velikosti 70 mm má v ČR dobu opakování zpravidla cca 20 až 50 let, uvědomíme si, že SCS-CN nepopisuje správně realitu. Jinými slovy - pro nejpravděpodobnější scénář výskytu extrémů na malých povodích nedává věrohodné výsledky. Velmi často totiž při extrémní srážce krátké doby trvání nedetekuje výskyt hypodermického odtoku.

Teoretický přímý odtok bude tím více podceňovat (v relativním měřítku) skutečnost, čím bude:
– výška srážky na povodí nižší,
– intenzita srážky vyšší,
– nasycenost povodí nižší,
– retenční schopnost povodí vyšší (tj. hodnota CN nižší).

Podle zkušeností autora článku není SCS-CN zcela vyhovující ani v situaci, kdy celkový objem teoretického přímého odtoku odpovídá pozorování. V takovém případě je, v souladu s výše uvedeným rozborem, teorií podhodnocena odezva povodí na počátku srážky a naopak silně nadhodnocena váha koncových pořadnic hyetogramu (vliv počátku a strmosti odtokové křivky).

7. Závěr

Článek upozorňuje na nedostatky renomované metody odtokových křivek (SCS-CN), které vyplynuly ze srovnání se skutečně napozorovanými údaji na malých povodích. Studium problému naznačilo, že současné aplikace příliš důvěřují originální metodice a není brán zřetel na novější poznatky. Autor článku nedoporučuje nekritické používání metody SCS-CN. Platí to zvláště v podmínkách nízkých a středních srážkových vstupů, z důvodu silného podhodnocení skutečné odezvy povodí. V podmínkách extrémních srážkových vstupů má metoda tendenci naopak přímý odtok nadhodnocovat. Kvůli posuzování bezpečnosti vodních děl, predikci přívalových povodní, sucha či optimalizaci pozemkových úprav bude třeba metodu zásadně přepracovat. Do té doby je použití alternativních způsobů výpočtu přímého odtoku více než vhodné.

Literatura

[1] MOCKUS, V., 1972. Estimation of direct runoff from storm rainfall. SCS National Engineering Handbook, Sect. 4, Chapt. 10. 24 pp.

[2] JANEČEK, M. et. al., 1992. Ochrana zemědělské půdy před erozí. Metodiky FMZVž, ÚVTIZ. 110 s.

[3] PONCE, V., M. – HAWKINS, R., H., 1996. Runoff curve number: Has it reached maturity? Journal of hydrologic engineering. Vol. 1, No. 1, pp.11-19.

[4] MŽP, 1960. Metodika ministerstva životního prostředí k navrhování protipovodňových opatření v ploše povodí, které současně řeší obnovu vodního režimu a snižování vodní eroze, pro účely plánování v oblasti vod dle směrnice 2000/60/ES. 131 s. Dostupné na : <http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/ cz/prirodni_protipovodnova_opatreni/$FILE/OOV-metodika-20080101.pdf>

[5] ŠERCL, P., 2008. Aplikace AGPosudek pro ArcGIS 9.2. verze 1.3. Praha: ČHMÚ. 28 s.

[6] KULASOVÁ, B. – ŠERCL, P. – BOHÁČ, M., 2004. Metodická příručka pro výběr a aplikaci vhodné metody odvození hydrologických podkladů za účelem posouzení bezpečnosti vodních děl. Projekt QD1368 "Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní". Dílčí výstup V07. Praha: ČHMÚ. 128 s.

[7] ŠERCL, P. – ČEKAL, R. – VLASÁK, T. – TYL, R., 2009. Vývoj robustní metody odhadu odtoku z přívalových srážek. DÚ 4. In: SP/1c4/16/07 "Výzkum a implementace nových nástrojů pro předpovědi povodní a odtoku v rámci zabezpečení hlásné a předpovědní povodňové služby v ČR". Zpráva za rok 2009. MŽP. 29 s.

[8] ŠERCL, P., 2007. Metoda CN-křivek. Kapitola 3.2. In: DÚ 3 Rozvoj a testování modelovacího systému pro predikci povodňových odtoků v malých povodích. In*: VaV 1D/1/5/05 Vývoj metod predikce stavů sucha a povodňových situací na základě infiltračních a retenčních vlastností půdního pokryvu ČR*.ČHMÚ, Praha. s. 49 -80.

[9] MALÝ, A., 2009. Vliv rozdílného využití krajiny na srážko-odtokový process v experimentálních povodích Zbytiny. [Diplomová práce], Brno. KFGG PřF UK v Praze. 151 s.

[10] KLIMENT, Z. – MATOUŠKOVÁ, M. – MALÝ, A., 2008. Monitoring srážko-odtokového režimu v experimentálních párových povodích Zbytinského a Tetřívčího potoka. In: *Změny v krajině a povodňové riziko. Eds.: Langhammer et. al., Projekt VaV SM/2/57/05. Dlouhodobé změny poříčních ekosystémů v nivách toků postižených extrémními záplavami*. Praha: KFGG PřF UK v Praze. s. 86-99.

[11] DUB, O. – NĚMEC, J., 1969. Hydrologie. Praha: SNTL. 378 s.

[12] SOULIS, K. X. – VALIANTZAS, J. D. – DERCAS, N. – LONDRA, P. A., 2009. Investigation of the direct runoff generation mechanism for the analysis of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed. Hydrol. Earth Syst. Sci., 13, pp 605–615.

[13] BALTAS, E. A. – DERVOS, N. A. – MIMIKOU, M. A., 2007. Technical Note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, pp 1825–1829.

[14] KADLEC, J., 2004. Modelování erozních procesů během srážkových situací v povodí Blšanky. [Ročníková práce], Praha: KFGG PřF UK v Praze. 45 s.

[15] WOODWARD, D., E. et. al., 2003. Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio. Conference Proceeding Paper. World Water & Environmental Resources Congress 2003 and Related Symposia, pp 1-10.

[16] HAWKINS, R. H., 1979. Runoff Curve Numbers for partial Area Watersheds. Journal of the Irrigation and Drainage Division. Vol. 105. No. 4, pp 375-389.

[17] TOLASZ, R. et. al., 2007. Atlas podnebí Česka. Olomouc: UPOL v Olomouci. 255 s.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, e-mail: antonin.maly@chmi.cz

MONITORING HYDROMETEOROLOGICKÝCH PROCESŮ NA MALÝCH POVODÍCH VE VYSOKOHORSKÉM PROSTŘEDÍ, PŘÍPADOVÁ STUDIE JEZERO ADYGINE, ŤAN ŠAN, KYRGYZSTÁN

Miroslav Šobr[1], Hana Beitlerová[1], Bohumír Janský[1]

Abstrakt

Příspěvek se zabývá detailním rozborem ledovcového hydrologického režimu a jednotlivých faktorů, které jej ovlivňují v oblasti glaciálního jezera Adygine (Ťan Šan, Kyrgyzstán). Jezero patří do soustavy mladých jezer lokalizovaných v oblasti pod čelem ustupujícího ledovce a řadí se mezi potenciálně nebezpečná jezera z hlediska stability jejich hráze a případného průvalu. Sledován je pohyb hladiny v závislosti na klimatických podmínkách oblasti, přítok tavných vod do jezera a kapacita podzemních odtokových kanálů.

Klíčová slova: monitoring glaciálních jezer, ledovcový hydrologický režim, ledovec Adygine

1. Úvod

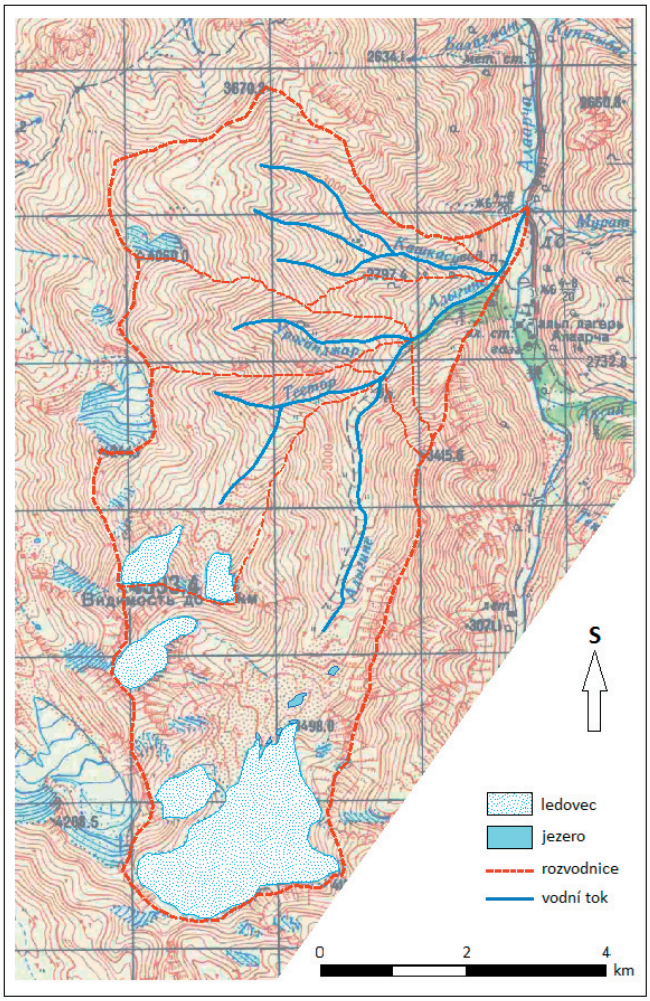
Monitoring hydrometeorologických procesů je součástí projektu zahraniční rozvojové spolupráce RP/9/2007 Analýza rizik a omezení důsledků protržení hrází vysokohorských jezer, který se zabývá sledováním hydrologických poměrů ledovcových jezer, u kterých hrozí protržení hráze a následný vznik povodní a bahnotoků ohrožujících zalidněná údolí a infrastrukturu v níže položených oblastech. Velký důraz je kladen na jezera lokalizovaná v Kyrgyzském hřbetu pohoří Ťan Šan, v údolích ústících do nejhustěji osídlené Čujské doliny včetně hlavního města Biškek.

Zkoumaná oblast jezera a ledovce Adygine se nachází v oblasti NP Ala-Arča, na severní straně Kyrgyzského hřbetu pohoří Ťan Šan, cca 30 km jižně od hlavního města Biškek. Národní park je nejstarším v Kyrgyzstánu a je situován v nejvyšší části Kyrgyzského hřbetu. Hydrologický systém sestává z nevelkého ledovce Adygine (4,07 km^2), ze kterého voda odtéká do dynamicky se vyvíjející kaskády ledovcových jezer a dále do říčky Adygine, která asi po 6 km ústí z levé strany do řeky Ala-Arča (Obr. 1), základní morfometrické charakteristiky povodí řeky a jezera Adygine jsou v tabulce 1.

Tab 1: Základní charakteristika povodí řeky Adygine a dílčího povodí jezera Adygine.

Povodí řeky Adygine	
plocha povodí	39,57 km^2
délka rozvodnice	31,2 km
nejvyšší bod	4 393,4 m n. m.
nejnižší bod	2 020 m n. m.
prům. sklon pov.	37,7 %

Povodí jezera Adygine	
plocha povodí	6,51 km^2
délka rozvodnice	10,1 km
nejvyšší bod	4 110,7 m n. m.
výtok jezera	3 542 m n. m.
prům. sklon pov.	22,2 %



Obr. 1: Povodí řeky Adygine

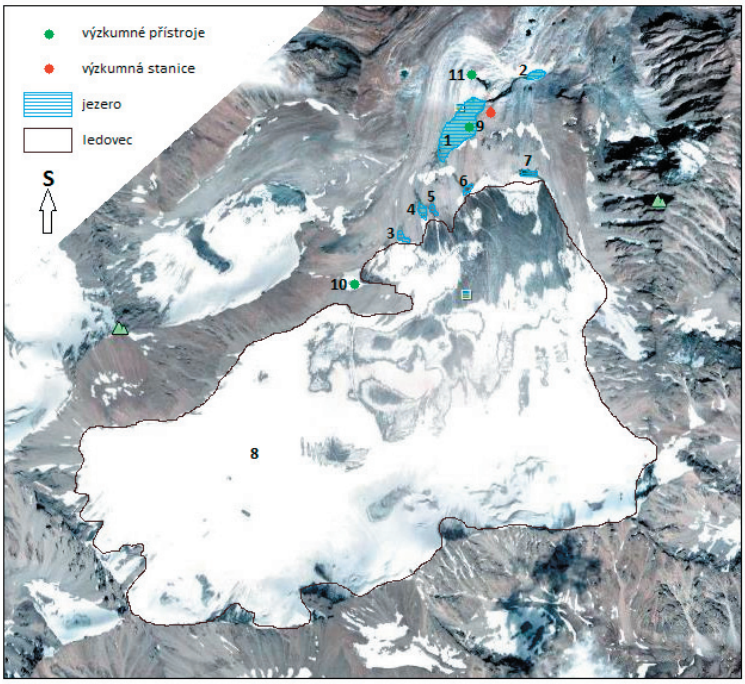
Jezero Adygine je moréno-riegelového typu (hrazené skalním prahem, který je překryt morénovým materiálem), vzniklo po ústupu ledovce Adygine v rozsáhlé depresi morénového materiálu v nadmořské výšce 3 543 m n. m. Jedná se o největší z celé kaskády jezer, jeho plocha činí cca 3,17 ha a objem 206 000 m^3, maximální hloubka dosahuje kolem 22 m. Podle batymetrického mapování z let 2005 a 2008 jezero nevykazuje žádné významnější změny ve stavbě pánve. V oblasti přítoku tavných vod, které s sebou nesou velké množství suspendovaného ledovcového materiálu, který se u přítoku ukládá a jezero je zde poměrně mělké, lze předpokládat změny vzniklé zanášením jezera. Při porovnání batymetrických map z let 2005 a 2008 však nejsou tyto změny nijak výrazné.



Obr. 2: Pohled z ledovce Adygine na rozšířené údolní dno s jezerem uprostřed

Odtok z jezera je povrchový i podpovrchový. Povrchový odtok se nachází v místě, kde je obnažen skalní práh, který částečně tvoří hráz jezera. Vyskytuje se pouze v letním období, přibližně od poloviny května do konce srpna, kdy do jezera přitékají tavné vody a jezero je maximálně naplněno. Odtok podpovrchovou cestou je uskutečněn kanály nacházejícími se v morénovém materiálu, který překrývá skalní práh. Voda zde odtéká po celý rok, přičemž v zimním období tvoří tyto kanály jedinou možnost, kudy může voda odtékat.

Přibližně 150 m pod skalním prahem, který hradí jezero Adygine, se nachází termokrasové jezero Adygine Dolní (viz obr. 3). To je napájeno přímo z horního jezera jeho povrchovým odtokem a částečně odtokem z nově vznikajících jezer u čela ledovce. Odtok z jezera je zprostředkován pouze podzemní cestou. To je příčinou velkého rozkolísání hladiny, jelikož podzemní kanály nedokáží přitékající vodu stejnou rychlostí z jezera odvádět. Objem jezera tak v průběhu dne kolísá až o jednu třetinu. Pokud by došlo k ucpání odtokových kanálů či výraznějšímu zvýšení přítoku do jezera, může voda odtékat i povrchovou cestou.



Obr. 3: Výzkumná oblast Adygine a rozmístění měřících přístrojů

Vývoj celé jezerní oblasti začal teprve před padesáti lety. V roce 1962 končil ledovcový splaz nedaleko současného výtoku z jezera Adygine. Od té doby prošel velkým ústupem a to i přes příznivou severní orientaci. Ústup ledovce se postupně zrychluje. V roce 1988 bylo čelo ledovce o 200 m dále, na opačném konci jezera v oblasti jeho přítoku. Za dalších 18 let ustoupil o 250 m do výšky 3 605 m n. m. Během posledních let se vyvíjí nová preglaciální jezera u čela ledovce. Vznikají v nehlubokých depresích po ústupu ledovce a s jeho dalším ústupem se postupně zvětšují a vyvíjejí. V roce 2006 byla vyvinuta pouze 3 jezera, do dnešní doby vznikla další dvě. Odtok z těchto jezer napájí jak hlavní jezero Adygine, tak i přímo termokrasové jezero pod skalním prahem [4].

2. Data a metodika práce

Vědecké zázemí oblasti zprostředkovává malá obytná výzkumná stanice, která byla zbudována v roce 2008 na pravém břehu jezera Adygine nedaleko jeho výtoku. Na Riegelu nedaleko stanice se nachází jedna ze dvou meteorologických stanic „Dolní stanice“ a manuální srážkoměr. Druhá meteostanice, nazývaná „Horní meteostanice“, byla 29. 7.2008 nainstalována na vyvýšeném morénovém valu v levé části ledovcové kotliny ve výšce

necelých 3 800 m n. m. Měřené parametry jsou: teplota, tlak, vlhkost, dopadající a odražená radiace, teplota půdy v různých hloubkách, rychlost a směr větru a srážky. Dále je v jezeře od srpna 2007 instalován tlakový hladinoměr na sledování kolísání hladiny. Vzhledem k extrémním klimatickým podmínkám oblasti vyžadují přístroje zvýšenou údržbu, která se kvůli špatné dostupnosti zvláště v zimním období nemůže vždy uskutečnit. Proto došlo v datových řadách k několika výpadkům. Na horní meteostanici a hladinoměru spíše drobnějšího rozsahu, věrohodnost a použitelnost dat tím nebyla nijak zvlášť narušena. Data z meteostanice na břehu jezera slouží z důvodu velkých výpadků spíše ke srovnání s horní meteostanicí.

V programu MS Excel jsou hodnoceny závislosti jednotlivých činitelů hydrologického režimu a jejich časové rozložení:

- průběh hydrogramu během 2 let a srovnání obou let
- závislost výšky hladiny na teplotě vzduchu
- zpoždění odtoku vody z ledovce vzhledem k maximálním denním teplotám vzduchu a vývoj zpoždění v čase
- vývoj rozkolísanosti hladiny v čase.

3. Výsledky

Základní předpoklad, který se snažíme potvrdit, je přímá reakce jezera na hydrologický režim ledovce. Jezero je dotováno tavnými vodami z ledovce, a proto by mělo podléhat stejným zákonitostem jako ledovcové toky.

Hydrologický režim jezera Adygine vykazuje charakteristiky ledovcového režimu:

- několikanásobné zvětšení přítoku do jezera na počátku ablační sezóny
- vyvinutý denní rytmus v letním období
- pomalý pokles hladiny v chladné části roku
- zpožděný přítok tavných vod do jezera oproti dennímu teplotnímu režimu
- vývoj amplitudy rozkolísanosti hladiny [6].

Roční cyklus hydrologického režimu je silně závislý na teplotách vzduchu (Obr. 4). Na grafu na obrázku 5, znázorňujícím počátek ablační sezóny, nastaly kladné teploty dříve, než začala stoupat hladina. Je to způsobeno retenční kapacitou sněhu, který zpočátku tavnou vodu zadržuje. Klané teploty alespoň po část dne nastaly o 4 týdny dříve, než začal vzestup hladiny.

Ve zpoždění denního rytmu vůči maximálním denním teplotám vzduchu byla vysledována zkracující se tendence s postupujícím létem. Zkoumané období začíná 30.5.2008, ačkoliv jezero se naplnilo již o 2 týdny dříve. Po tuto dobu se denní rytmus vyskytoval nepravidelně a střídaly se dny, kdy hladina pouze klesala a dny, kdy naopak jen stoupala. To lze opět vysvětlit velkým množstvím sněhu v povodí, který tavnou vodu zadržuje a kolísáním teplot pod bod mrazu. Díky tomu může být celkový příspěvek tavných vod menší a přítok do jezera za celý den nepřevýší odtok.

V dalším období byl denní rytmus pravidelný (Obr. 6) a zpoždění se postupně zkracovalo. V celém období ovšem nastávaly dny, kdy se doba zpoždění prodloužila a byla o několik hodin větší než v okolních dnech. Tento jev ve většině případů koresponduje s výskytem dešťových srážek v odpoledních hodinách. Vysvětlením může být například sněžení ve vyšší části povodí a zpomalení odtoku ze sněhu.

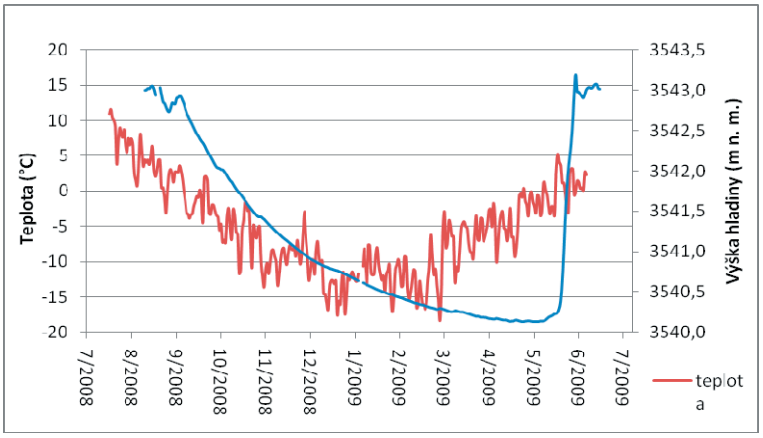
Na konci ablační sezóny, v září, denní rytmus po několik dní zaniká, poté se obnoví a doba zpoždění plynule klesá z 12 na 7 hodin. Přerušení souhlasí s obdobím záporných teplot a zdvojnásobením hodnoty odraženého záření. Tento jev jasně dokládá vypadávání sněhových srážek. Čerstvý sníh snížil intenzitu tání a prodloužil zpoždění odtoku.

Dále byla sledována kapacita podzemních odtokových kanálů. Výsledek ukázal nezanedbatelné zpomalení odtoku ve druhém sledovatelném roce, v zimní sezóně

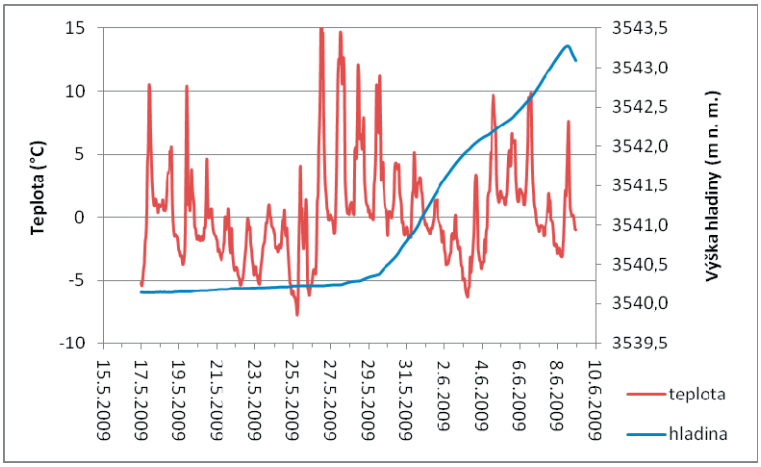
2008/2009. Tento fakt ukazuje na možnost, že se kanály dynamicky vyvíjejí. Konkrétně se jedná o zmenšení kapacity průměrně o 25 %. Na základě srovnání pouhých dvou sezón je ovšem předčasné hodnotit dlouhodobý vývojový trend. Ve výpočtech nebyl separován podzemní přítok od odtoku, není tedy vyloučena i změna přítoku. Dále mohl výsledek ovlivnit možný přítok vody povrchovou cestou. Přítok tavných vod je téměř vyloučen vzhledem k záporným teplotám a přítomnosti nově akumulované sněhové pokrývky. Možné je uvolnění určitého množství vody z rezervoárů uvnitř ledovce. Voda zde může vzhledem k působení velikého tlaku přetrvávat v kapalném stavu i v zimním období.

Pro další výzkum je třeba pokračovat v měření stávajících klimatických a hydrologických dat a měření některých komponentů zlepšit. Jde převážně o data ze srážkoměru. Bylo by vhodné získat informace o formě srážek, zda jde o sníh či déšť a jak dlouho trvaly. U sněhu by bylo třeba měřit výšku pokrývky, a pokud se jedná o sněžení v letním období, jak dlouho sněhová pokrývka trvala. Zlepšení těchto dat je možné vzhledem k přítomnosti manuálního srážkoměru u výzkumné stanice na břehu jezera, která je v letním období permanentně obývaná.

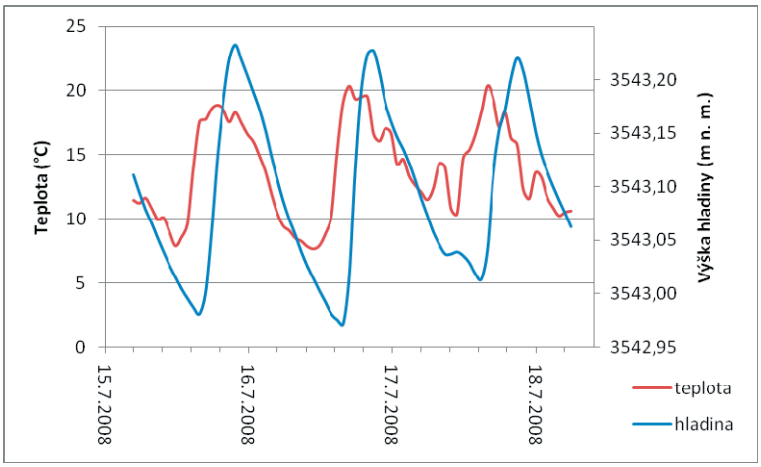
Další z připravovaných prací v oblasti je měření množství vody přitékající do jezera, ke kterému jsou nutné další terénní práce. Přímé měření je složité vzhledem k tomu, že přitékající voda není soustředěna do jednoho stálého koryta. Možným řešením je měřit průtoky na odtoku, vytvořit konsumpční křivku a podle batymetrické mapy a změny hladiny a průtoku na odtoku za čas by bylo možné kdykoliv určit průtok na přítoku (pomineme-li výpar a podzemní odtok a přítok).



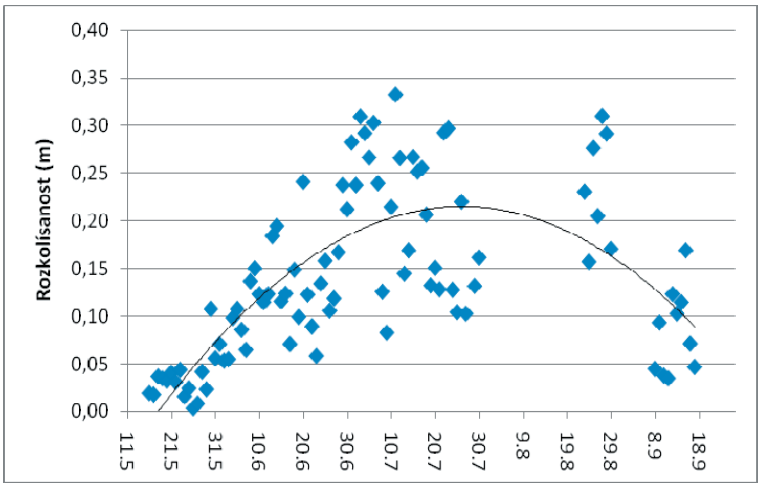
Obr. 4: Kolísání hladiny jezera Adygine a teploty vzduchu během roku



Obr. 5: Průběh hladiny a teplot vzduchu při jarním přechodu z 1. na 3. část ročního cyklu



Obr. 6: Ukázka zpoždění maximální výšky hladiny oproti maximální teplotě vzduchu během dne



Obr. 7: Vývoj amplitudy rozkolísanosti vodní hladiny během dne v průběhu období tání roku 2008

4. Závěr

Typickým rysem ledovcového hydrologického režimu jsou minimální průtoky v zimním období, jejich prudký nárůst na počátku ablační sezóny a vyvinutost denního režimu v průběhu ablační sezóny. Maximální průtoky nastávají v červenci až září. Hlavní zdrojnicí v zimním období je bazální odtok. Na počátku ablační sezóny dominuje tavná voda ze sněhové pokrývky, která je postupně v průběhu léta nahrazována tavnou vodou z ledovcového ledu [1].

Tání ledovce je odrazem složité energetické výměny mezi atmosférou a jeho povrchem. Energetickou situaci atmosféry nejlépe odráží teplota vzduchu. Ta je většinou využívána při výzkumech ledovců, jelikož získání teplotních dat je mnohem jednodušší než získání energetických dat [2, 3]. Nejdůležitější složkou energetické bilance je krátkovlnné sluneční záření. Proto jsou v zaledněných oblastech severní polokoule obecně největší průtoky v letních měsících, kdy je Slunce nejvýše nad obzorem, dopadající záření má největší intenzitu a doba slunečního svitu je nejdelší. Míra tání je výrazně ovlivněna albedem ledovce. Maximální průtoky nastávají v srpnu, kdy už se intenzita slunečního záření snižuje. Je ale kompenzována nižším albedem špinavého povrchu starého špinavého ledu, který je ablací postupně odhalován [6].

Doba maximálních denních průtoků je o několik hodin zpožděna za maximální denní teplotou. Toto zpoždění představuje čas, který voda potřebuje k transportu od místa vzniku

k místu měření průtoků. Doba zpoždění je závislá na množství sněhu na ledovci, délce transportu, vyvinutosti drenážního systému a akumulační schopnosti ledovce.

Vliv dešťových srážek na odtok může být jak pozitivní, tak negativní v závislosti na jejich množství, redukci teplot vzduchu vlivem zvýšené oblačnosti, poloze izotermy 0 °C a podílu obnažené a sněhem pokryté plochy povodí [5]. Může dojít jak k redukci průtoků, tak i k jejich extrémům a následným povodním. Ty vznikají nejčastěji právě v kombinaci vysokých teplot vzduchu a intenzivního deště.

Roční cyklus hydrologického režimu jezera Adygine můžeme rozdělit na 3 části:

- pokles hladiny, kdy v chladné části roku nepřitékají tavné vody. Tato část začíná v polovině září.
- plnění jezera, které trvá pouze několik dní v dubnu až květnu, za které se hladina zvedne o 3 m.
- ablační sezóna, trvá od května až června do poloviny září. Hladina je ustálena díky povrchovému odtoku a kolísá v denním rytmu v rozmezí 35 cm.

Roční hydrologický cyklus vykazoval po oba sledované roky stejné charakteristiky, jednotlivé fáze se lišily minimálně. Plnění jezera nastalo 27.4.2008 a trvalo 18 dní a 27. 5.2009 s trváním 13 dní. Hladina začala v obou letech klesat shodně 17. září.

Zpoždění denního cyklu prochází v průběhu ablační sezóny vývojem. Zpočátku je zpoždění nejdelší, 10-12 hodin. V červnu klesá na 1-4 hodiny a koncem sezóny se opět prodlužuje díky nové sněhové pokrývce (viz Obr. 7). Zpoždění se prodlužuje i při výskytu dešťových srážek v odpoledních hodinách. Amplituda denního kolísání hladiny se rovněž během léta vyvíjí. V první části není denní rytmus zcela vyvinut. Je nepravidelný a pouze do 5 cm. Postupně se rozkolísanost zvyšuje až na 35 cm. V září se amplituda opět zmenšuje.

Poděkování

Příspěvek byl vypracován s finanční podporou výzkumných projektů: výzkumný záměr MŠM 0021620831 „Geografické systémy a rizikové procesy v kontextu globálních změn a evropské integrace“, projekt rozvojové spolupráce mezi Českou a Kyrgyzskou republikou RP/9/2007 Analýza rizik a omezení důsledků protržení hrází vysokohorských jezer.

Literatura

[1] AIZEN, V. B. et al., 1995. Climate, snow cover, glaciers and runoff in the Tien Shan, central Asia. *Water Resources Bulletin*, vol. 31, no. 6, str. 1113-1129. ISSN 0043-1370.

[2] AIZEN, V. B. - AIZEN, E. 1997. Hydrological cycles on the north and south peripheries of mountain-glacial basins of cental Asia. *Hydrological Processes*, vol. 11, str. 451 – 469.

[3] COLLINS, D. N. 1987. Climatic fluctuations and runoff from glacierized Alpine basins. IASH Publ., no. 168, str. 77 – 89.

[4] ČERNÝ, M. - JANSKÝ, B. - ŠOBR, M., et.al. 2006. Monitoring vysokohorských ledovcových jezer a ochrana obyvatelstva před katastrofálními následky povodní vzniklých průtržemi morénových hrází. Závěrečná zpráva projektu rozvojové spolupráce mezi Českou a Kyrgyzskou republikou RP/27/2004, GEOMIN družstvo, Jihlava, 2 části + přílohy. 206 str.

[5] GOLUBEV, G. N. 1973. Analysis of the run-off and flow routing for a mountain glacier basin. In: *International Association of Scientific Hydrology Publication 95* (Symposium at Cambridge 1969 - Hydrology of Glaciers), str. 41-50.

[6] SINGH, P. - SINGH, V.P. 2001. Snow and Glacier Hydrology. Dordrecht (The Netherlands): Kluwer Academic Publishers. 742 pp. Water Science and Technology Library. ISBN 0-7923-6767-7.

Kontakty na autora

1 PřFUK v Praze, katedra fyzické geografie a geoekologie,
e-mail: sobr@natur.cuni.cz, hanca.bajt@seznam.cz, jansky.b@seznam.cz

ZÁVISLOST HYDROLOGICKÉ BILANCE NA HOSPODÁŘSKÉM VYUŽITÍ POVODÍ

Pavel Kovář [1], František Křovák[1]

Abstrakt

Příspěvek poskytuje řešení hydrologické bilance vegetačního období (duben-říjen) roku 2009 dvou malých moravských povodích Všeminky a Dřevnice, s různou plochou zalesnění (Všeminka 48 %, Dřevnice 81 %). Uvádí výsledky rekonstrukce tohoto období modelem WBCM, pokud jde o hlavní složky hydrologické bilance a přináší informace o objemech vody v nenasycené a nasycené zóně povodí a o interakcích mezi těmito zónami. Dokazuje schopnost model rekonstruovat srážko-odtokové režimy. Dále pak příspěvek poskytuje výsledky simulace změn těchto režimů způsobených změnami po 30 % odlesnění povodí. Tento zásah byl simulován scénářem, reflektujícím změny parametrů modelu a přinášejícím zajímavé výsledky v odchylkách celkových i přímých odtoků obou experimentálních povodí.

Klíčová slova: hydrologická bilance, vodní režimy, scénářové simulace

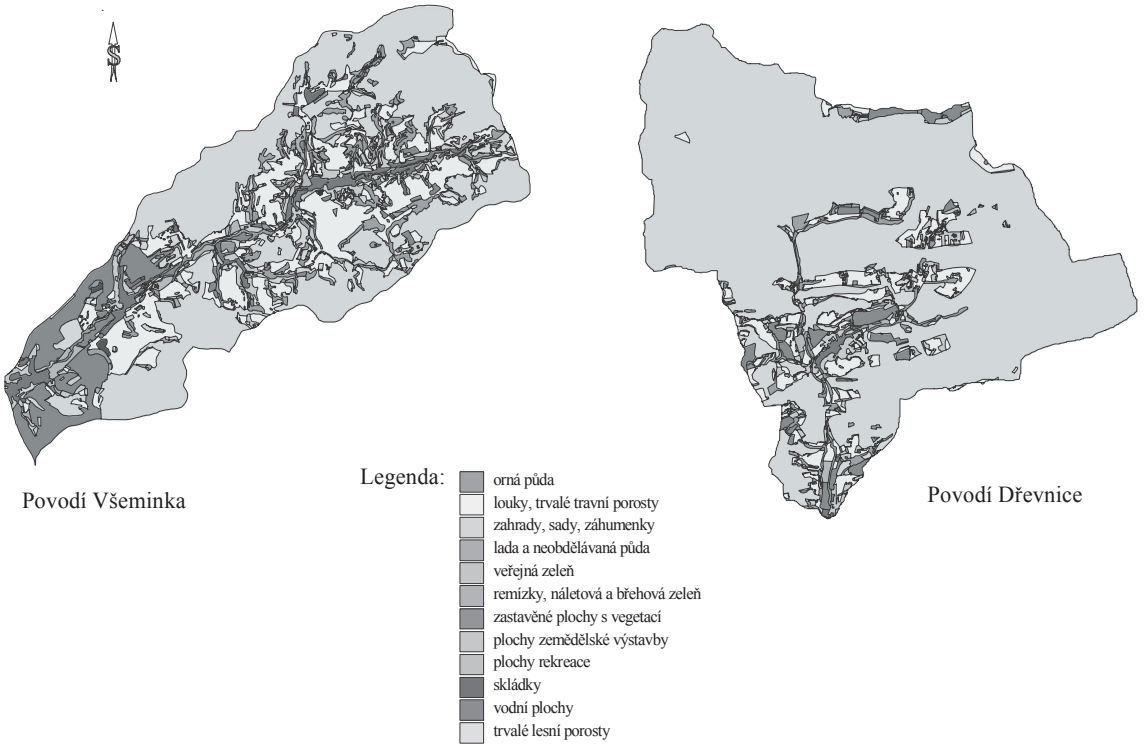
1. Úvod

Problematika hydrologické bilance je důležitou oblastí hydrologie, vytvářející základ návazné bilance vodohospodářské [3]. Současné bilanční matematické modely slouží jako osvědčený nástroj k simulaci přirozených i scénářových procesů, které mohou ukázat i míru antropogenního ovlivnění vodního režimu povodí zastoupením kultur a způsobem hospodaření [1]. Příspěvek je zaměřen na výzkum hydrologické bilance malých zalesněných povodí Všeminky a horní části povodí Dřevnice (okr. Zlín), dále tvořící levostranný přítok řeky Moravy. Obě povodí jsou IV. řádu a zatímco povodí Dřevnice je z více než 80 % zalesněno, povodí Všeminky je typickým příkladem zemědělsko-lesního povodí se stupněm zalesnění pod 50 %. Cílem studie je vliv změn zemědělských a lesních kultur, způsobu využívání území a jeho následný vliv na retenční a akumulační schopnosti povodí. Použitým nástrojem této analýzy je model hydrologické bilance WBCM, zohledňující plošnou proměnlivost parametrů tohoto modelu v prostředí geografického informačního systému.
Dílčím cílem bylo:

– určení fyzickogeografických a vegetačních faktorů povodí a identifikace parametrů bilančního modelu,
– charakteristika základních hydrologických poměrů a rekonstrukce stávajícího srážko-odtokového stavu „modelového“ roku 2009,
– simulace „scénářové situace“, vytvořené za účelem stanovení srážko-odtokového režimu včetně změn akumulačních a retenčních schopností povodí v závislosti na změně ve využití povodí (land use),
– porovnání hydrologických režimů (v bilančním smyslu) obou povodí.

2. Materiál a metoda

Obě testovaná povodí mají téměř shodnou plochu. Tvar zemědělsko-lesního povodí Všeminky je podlouhlý, les je po obou stranách údolí směrem od rozvodnice, zastoupení kultur vykazuje značnou diverzitu. Povodí Dřevnice je vějířového tvaru, má vysokou lesnatost a pouze ve své dolní části je zastoupení dalších kultur pestřejší. Obr. 1 toto zastoupení kultur a využití území (land use) přehledně poskytuje. Vybrané základní charakteristiky povodí jsou uvedeny v tabulce 1.



Obr. 1: Využití území povodí Všeminky a Dřevnice

Tab. 1: Základní charakteristiky povodí Všeminky a Dřevnice

Charakteristiky povodí	Jednotky	Všeminka	Dřevnice
Plocha povodí	[km^2]	21,51	22,58
Délka toku	[km]	9,2	9,1
Průměrný sklon toku	[%]	3,6	3,5
Střední sklon povodí	[%]	19,4	23
Minimální nadm. výška	[m]	270	335
Maximální nadm. výška	[m]	620	750
Střední nadm. výška	[m]	400	495
Zalesnění povodí	[%]	48,2	81
Obvod povodí	[km]	23,64	24,45
Délka liniových společenstev	[km]	13,81	7,47

Využití území	Všeminka		Dřevnice	
	výměra ha	výměra %	výměra ha	výměra %
1. Orná půda, skládky	201	9,3	62	2,7
2. Louky, trvalé travní porosty, lada	521	24,2	203	9,0
3. Veřejná zeleň, zahrady, sady, záhumenky	117	5,5	65	2,9
4. zastavěné plochy, intravilány	91	4,3	18	0,8
5. Remízky, náletová zeleň, břehová zeleň	182	8,5	82	3,6
6. Lesy	1036	48,2	1829	81,0

Tabulka 2 uvádí druhové složení lesa, jeho věkovou strukturu a hydrologické skupiny půd dle metodiky [9], [4], [5].

Tab. 2: Druhová a věková skladba lesa, hydrologické skupiny půd povodí Všeminky a Dřevnice

Druhové a věkové složení lesa [ha]						
Věk [roky]	VŠEMINKA			DŘEVNICE		
	0 - 10	10 - 40	40 a více	0 - 10	10 - 40	40 a více
Jehličnatý les	77	75	565	137	220	838
Listnatý les	7	27	295	52	107	496
Hydrologické půdní skupiny a sklonitost terénu v lese [ha]						
Třída sklonitosti	Sklonitost terénu		Hydrologická půdní skupina			
	VŠEMINKA					
	[%]	[°]	A	B	C	D
I.	0 - 1	0 - 1	-	-	-	-
II.	1 - 5	1 - 3	-	-	-	-
III.	5 - 10	3 - 6	2	22	-	-
IV.	10 - 20	6 - 11	1	127	50	-
V.	> 20	>11	-	884	5	-
	DŘEVNICE					
	[%]	[°]	A	B	C	D
I.	0 - 1	0 - 1	-	-	-	-
II.	1 - 5	1 - 3	-	-	-	-
III.	5 - 10	3 - 6	1	7	-	-
IV.	10 - 20	6 - 11	3	363	-	-
V.	> 20	>11	60	1388	28	-

Hydrologické skupiny půd a zastoupení kultur [ha]								
Třída kultur	VŠEMINKA				DŘEVNICE			
	A	B	C	D	A	B	C	D
I. orná půda, skládky	-	53	47	92	5	22	12	21
II. louky, TTP, lada	-	46	241	192	4	53	79	45
III. veř. zeleň, zahr.	-	4	66	42	2	14	30	14
IV. intravilány	-	1	30	58	4	5	4	4
V.remízky, nálet. zeleň	-	5	81	50	4	20	21	11

3. Model WBCM

Model WBCM je deterministický, patřící do kategorie modelů nelineárních s pravděpodobnostně rozdělenými proměnnými i parametry po ploše modelovaného povodí tak, aby byla zachována jejich plošná variabilita [6]. Každý kapacitní prvek modelu představuje přirozenou zásobu vody v jednotlivých vertikálních subsystémech hydrologického profilu. Byl koncipován pro simulaci denních bilančních hodnot ve vegetačním období, což je kritická doba pro vznik deficitů. Model uvažuje všechny podstatné interakce mezi jednotlivými zónami (tj. vegetační zónu, aktivní i celkovou nenasycenou zónu, a nasycenou zónu). Kapacity všech zón respektují různorodost přirozených hydrologických podmínek povodí. Model ve většině zón uvažuje lineární rozdělení těchto kapacit kolem jejich průměrných hodnot. Struktura modelu uvažuje fyzikální principy, podle nichž dochází k evapotranspiraci, intercepci, infiltraci a k tvorbě přímého i základního odtoku. Nedílnou součástí modelů WBCM je automatická optimalizace parametrů v jeho identifikační fázi. Jeho verze WBCM-5 v této fázi optimalizuje 3 parametry (SMAX, GWM, BK). Používá denních hydrometeorologických dat.

Ve vzájemné vazbě řeší následující dílčí hydrologické procesy :

- potenciální evapotranspirace,
- intercese,
- tvorba povrchového odtoku a jeho transformace,
- vláhová dynamika aktivní zóny a povrchová retence,
- dynamika nenasycené zóny a skutečná evapotranspirace,
- dynamika nasycené zóny a celkový odtok.

Objemovou shodu složek bilance zabezpečuje sledování kontinuity dle bilanční rovnice :

$$SRAIN = AE + STF \pm (\Delta WP + \Delta WZ) \quad (1)$$

$$SRAIN = AE + STF \pm \Delta W \quad (2)$$

kde SRAIN je výška srážek [mm], STF je výška celkového odtoku [mm], AE je skutečný (aktuální) výpar [mm], ΔWP je změna vlhkosti nenasycené zóny [mm], ΔWZ je změna objemu nasycené zóny [mm], ΔW je výsledná změna objemu podpovrchových vod [mm].
Proces je popsán rekurzivními vztahy, respektujícími plošnou proměnlivost lokálních hodnot parametrů pórovitosti (POR) a polní vodní kapacity (FC) nenasycené zóny. Model je podrobně popsán v literatuře [6], [8].

4. Výsledky

4.1 Rekonstrukční bilance vegetačního období 2009

Pro řešení bilance testovaných období byly využity fyziografické charakteristiky obou povodí. Kromě toho byla použita hydrometeorologická data s časovým krokem 1 den zahrnující průtoky v povodí v uzávěrových profilech Slušovice (Všeminka) a Kašava (Dřevnice) za rok 2009, získaná z Českého hydrometeorologického ústavu a z podniku Povodí Moravy. Údaje o srážkách Δt = 1 den byly získány ze srážkoměrných stanic Velíková (Dřevnice) a Slušovice (Všeminka). Denní hodnoty výparu z volné vodní hladiny byly využity z údajů stanice Vizovice. Pokud se týká kategorií využití území, bylo využito map současného stavu krajiny 1:10 000 a leteckých ortofotosnímků v měřítku 1:10 000, poskytnutých referátem ŽP OÚ ve Zlíně. Příprava výše zmíněných dat a jejich zpracování proběhlo v prostředí GIS (ARC/INFO). Takto byla v minulosti zpracována data pro obě povodí z extrémních let 1997 (povodně) a 2003 (sucha). Data pro rok 2009 byla uspořádána jinak. Z důvodů častých absencí měření výparu z vodní hladiny bylo využito denních dat teplot, délky slunečního svitu, relativní vlhkosti a rychlosti větru a potenciální evapotranspirace byla řešena modelem WBCM.

Dále byly zpracovány údaje o půdách (hydrologické skupiny, pórovitosti, retenční vodní kapacity a hodnoty nasycené hydraulické vodivosti). Pro implementaci modelu WBCM byla použita zmíněná data, pro vegetační období roku 2009 (1. 4. – 31. 10. 2009).

Modelové zpracování bylo zahájeno řešením optimalizace parametrů, tj. nalezením optimálních hodnot parametrů:

SMAX . . . parametr charakterizující maximální kapacitu nenasycené zóny [mm],

GWM . . . . parametr reprezentující maximální pohyblivou kapacitu nasycené zóny [mm],

BK . . . . . .parametr „doby vyčerpávání“ základního odtoku (tj. sestupná větev hydrogramu základního odtoku) [dny].

Identifikace optimálních hodnot parametrů byla kriteriálně provedena tak, že součet čtverců odchylek pozorovaných a vypočtených dekádních hodnot odtoků byl minimální. Model v simulační fázi dále poskytl denní hodnoty nejdůležitějších položek hydrologické bilance [v mm . den^{-1}], zejména: srážky (RAIN), intercepci (AIR), potenciální evapotranspiraci (PE), skutečný územní výpar (AE), infiltraci (RECH), vlhkosti nenasycené zóny (WUL), dotaci nasycené zóny (GWR), přímý odtok (OF), základní odtok (BF) a jejich součet – celkový odtok (STF). Hodnoty STF pro testované povodí byly vypočteny s přesností do 0,5 mm za celé vegetační období pro obě povodí.

Hodnota ΔW představuje změny dotace podpovrchových vod (tj. změny objemu vod nenasycené a nasycené zóny).

Pro zkoumaná povodí byly optimalizovány následující hodnoty parametrů:

Povodí	Parametry		
	SMAX	GWM	BK
Všeminka	582 mm	1100 mm	8,5 dne
Dřevnice	600 mm	1000 mm	10,0 dne

Pozn.: Hodnoty BK poměrně dobře souhlasí s hodnotami dosaženými analýzou výtokových čar hydrogramů.

Pro přehlednost jsou dále uvedeny tabelárně celkové hodnoty bilance ve zkrácené formě v tabulce 3.

Tab. 3: Sezónní bilanční hodnoty – povodí Všeminky a Dřevnice v roce 2009

Bilanční hodnoty 1. 4. - 31. 10.	2009 [mm]	
	Všeminka	Dřevnice
Déšť SRAIN	417,3	401,1
Celkový odtok STF	54,8	106,5
Přímý odtok (z toho) SOF	20,9	40,6
Potenciální evapotranspirace PE	352,5	357,2
Aktuální územní výpar AE	294,1	316,1
Změna zásob půdní vlhkosti ASM	-31,5	-89,6
Změna zásob podzemních vod SNGWR	104,0	71,3
Změna zásob podpovrchových vod W	72,5	-18,3
Diference bilanční rovnice DIF [mm]	-4,14	-3,17
Diference bilanční rovnice DIF [%]	-0,99	-0,79

Bilanční správnost výpočtu je založena na rovnici:

$$SRAIN = AE + STF + ASM \pm SNGWR \quad (3)$$

kde:

SNGWR = GWR – BF, tj. dotace podzemních vod po odečtení základního odtoku (BF).

Shoda měřených a sezónních odtoků je solidní. Sezónní měřený celkový odtok z povodí Dřevnice STF = 106,1 mm (vypočtený 106,5 mm), z povodí Všeminky STF = 54,2 mm (vypočtený 54,8 mm). Bilanční chyby nepřevyšující 3,2 mm , tj. 0,8 % (Dřevnice) a 4,1 mm, tj.1,0 % (Všeminka) jsou přijatelné.

4.2 Scénářové bilance 2009

Po rekonstrukčních simulacích skutečných hydrologických bilancí na povodích Všeminky a Dřevnice bylo přistoupeno k simulacím různých (hypotetických) stavů povodí změněných případnou antropogenní činností [3], [8]. Ze spektra různých scénářů prezentuje předložený příspěvek jednoduchý scénář A, simulující stav obou povodí po 30 % odlesnění, kdy byl smýcen lesní porost ve třídě od 40 let výše, zejména na svazích se sklonem vyšším než 20 %. Tyto změny jsou zahrnuty ve změnách parametrů DROT (hloubka kořenové zóny), CN (čísla odtokových křivek), WIC (limitní hodnoty intercepce) a BK (parametr výtokové čáry povodí). Ostatní (optimalizované parametry SMAX a GWM) zůstávají beze změn. Scénář O představuje současný stav. Tabulka 4 přehledně uvádí hodnoty těchto parametrů.

Tab. 4: Změny hodnot parametrů modelu WBCM

Hodnoty parametrů modelu	Povodí			
	Všeminka		Dřevnice	
	Scénář O	Scénář A	Scénář O	Scénář A
SMAX	580 mm	580 mm	600 mm	600 mm
GWM	1100 mm	1100 mm	1000 mm	1000 mm
BK	8,5 dne	7,0 dne	10,0 dne	8,0 dne
DROT	600 mm	500 mm	600 mm	500 mm
CN (průměr.)	72 (-)	74 (-)	71 (-)	73 (-)
WIC	1,5 mm	1,2 mm	2,0 mm	1,5 mm

Alternované hodnoty parametrů scénáře A jsou zdůvodnitelné následovně:

– DROT jako hloubka aktivní, nebo též kořenové zóny, měnící se ze 600 mm na 500 mm, koresponduje dle naších dřívějších výzkumů s 30 % smýcením pozemků, kdy se tato hloubka dočasně zmenšuje o 15 – 20 %.

– Obdobně mezní hodnota parametru WIC se mění dle výzkumů intercepce [2] z hodnoty 2,0 mm na 1,2 mm na ploše povodí.

– Změny hodnot průměrných odtokových parametrů CN a BK rovněž odpovídají změnám tohoto scénáře, viz [9] a [2].

Srovnání scénářových hodnot nejdůležitějších bilančních položek povodí Všeminky a Dřevnice poskytuje Tab. 5.

Tab. 5: Scénářové simulace hydrologických bilancí na povodí Všeminky a Dřevnice ve vegetačním období 2009

Bilanční položka [mm]	Povodí, scénář			
	Všeminka		Dřevnice	
	0 (stávající) [mm]	A (odlesň. 30 %) [mm]	0 (stávající) [mm]	A (odlesň. 30 %) [mm]
Déšť SRAIN	417,3	417,3	401,1	401,1
Celkový odtok STF	54,8	63,8	106,5	113,0
z toho přímý odtok SOF	20,9	30,3	40,6	53,3
Aktuální územní výpar AE	294,1	287,8	316,1	297,8
Změna zásob půdní vlhkosti ASM	-31,5	-33,3	-89,6	-70,1
Změna zásob podzemních vod SNGWR	104,0	103,2	71,3	63,5
Celková změna zásob podpovrchových vod ΔW	72,5	69,9	-18,3	-6,6
Diference hydrologické bilance DIF [mm]	-4,1	-4,1	-3,1	-3,1
Diference hydrologické bilance DIF [%]	-1,0	-1,0	-0,8	-0,8

5. Diskuse k výsledkům scénáře, závěry

Hydrologická data roku 2009 včetně dat o zastoupení kultur a stavu lesních porostů jsou poměrně spolehlivá a byla též zpracována plošně pomocí GISu (ARC/INFO) na povodí Všeminky a Dřevnice. Při zpracování předložené studie jsme mohli srovnávat dosažené výsledky s dřívější obdobnou studií povodí Všeminky, kde však byly scénáře voleny poněkud odlišně. Dosažené výsledky budou dále zpracovávány v kontextu s výsledky dalších experimentálních povodí (Šumava, Jizerské hory aj.). Nicméně, aniž bychom přeceňovali dosažené výsledky jednoho vybraného roku a zevšeobecňovali je, je možno odvodit následující dílčí závěry:

– Celkový odtok za stávajícího stavu vegetačního roku 2009 je z obou povodí normální až nízký (Všeminka STF = 54,8 mm, Dřevnice STF = 106,5 mm), z čehož podíl přímého odtoku (Všeminka SOF = 20,9 mm, Dřevnice SOF = 40,6 mm) je běžný. Je však velmi zajímavé zjištění , že ze značně zalesněného povodí Dřevnice (81 %) činí celkový odtok 26,6 % srážek, zatímco ze Všeminky pouze 13,1 % srážek. U přímého odtoku je to na Všemince 5,0 %, na Dřevnici 10,1 %. Tomu naprosto odpovídají fyzickogeografické faktory povodí, zejména sklony svahů a mělká vrchní vrstva půdy na povodí Dřevnice.
– Hodnoty aktuálního územního výparu se vzhledem k charakteru povodí mění jen málo (do 6 %) a jejich scénářové změny nejsou podstatné.
– Změny zásob podpovrchových vod ΔW (v součtu nenasycené – ASM i nasycené zóny SNGWR) jsou rozdílné na obou povodích. Zatímco na povodí Všeminky jsou vysoce kladné, že i v letních období roku 2009 jsou dostatečně dotovány srážkami (ΔW = 72,5 mm), na povodí Dřevnice jsou deficitní (ΔW = -18,3 mm). Je zajímavé, že scénářová situace 30% těžby příliš tyto dotace neovlivní.

Závěrem je možno konstatovat, že model WBCM je osvědčeným nástrojem pro rekonstrukci srážko-odtokových řad v bilančním smyslu. Časový krok 1 den je adekvátní, zpracování po dekádách (10 dnech) praktické. Scénářové simulace implementované tímto modelem přinášejí zajímavou kvantifikaci hydrologické bilance za různě změněných podmínek ve využívání pozemků [7]. Domníváme se, že jsme na dobré cestě směřující k vyhodnocení řady povodí za různých scénářů tak, aby bylo možno v budoucnu usuzovat na hydrologickou bilanci povodí bez limnigrafických pozorování a tak přispět k rozšíření stupně poznání vlivu využití pozemků v krajině na srážko-odtokový proces.

Poděkování

Příspěvek vychází z výsledků dílčího úkolu grantového výzkumu NAZV č. 92086 „Metodika realizace návrhů infiltračních a záchytných opatření“. Autoři velmi oceňují finanční příspěvek uvedeného grantu.

Literatura

[1] BEVEN, K. J., 2006. Rainfall - Runoff Modelling. The Primer. John Wiley & Sons. Chichester. 360 pp. ISBN 13-978-0471-98553-2.

[2] CHOW, V.T. – MAIDMENT, D. R. – MAYS, L. W., 1988. Applied Hydrology. Mc Grew Hill. USA. 572 pp. ISBN 0-07-010810-2.

[3] FALKENMARK, M. et al., 1999. Water – a reflection of land use. Publ. NFR/UNESCO-IHP. Upsala. Sweden. 128 pp. ISBN 9154603587.

[4] JANEČEK, M., 2005. Ochrana zemědělské půdy před erozí. Nakl. ISV. 195 s. ISBN 80-866642-38-0.

[5] JANEČEK, M. – KOVÁŘ, P., 2010. Aktuálnost metody čísel odtokových křivek – CN k určování přímého odtoku z malého povodí. Vodní hospodářství, roč. 2010, č.7, s. 8-11.

[6] KOVÁŘ, P., 1991. Konzept-Modell für die Wasserhaushaltsbilanz kleiner Einzugsgebiete. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung. P. Parey. Hamburg. BRD, n.22, pp 341-352.

[7] KOVÁŘ, P.,1998. Současné možnosti hydrologické bilance na malých povodích. In: *Sborník semináře Hydrologická bilance a možnosti zvyšování složek retence a akumulace vody.* Praha: KBÚK LF ČZU, únor 1998. s. 56-63.

[8] KULHAVÝ, Z. – KOVÁŘ, P., 2000: Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí. VÚMOP- ČZU publikace. UJI Praha. 123 s. ISSN 1211-3972.

[9] U. S. SCS, 1985. National Engineering Handbook. Section 4. Hydrology. Soil Conservation Service. USDA. Washington, D.C.

Kontakty na autora

1 Fakulta životního prostředí ČZU v Praze, e-mail: kovar@fzp.czu.cz, krovak@fzp.czu.cz

PŘIROZENÉ STABILNÍ IZOTOPY KYSLÍKU A VODÍKU V HYDROLOGII EXPERIMENTÁLNÍHO POVODÍ

Martin Šanda[1]

Abstrakt

Hydrologie se potýká s handicapem v definování prostředí, kterým voda proudí, tj. neznámých vlastnostech prostředí a okrajových podmínek. Je omezena na sledování vnějškových projevů systému (především srážky a odtoku), výběrově na informace např. z hydrogeologických vrtů nebo vlhkostních čidel. Úkolem experimentální hydrologie je přispět k vysvětlení mechanismů zdržování vody v povodí a tvorby odtoku. Moderní hydrologie přináší důkazy, že např. koncept povrchového odtoku není jediným, mnohdy ani hlavním mechanismem transformace srážky na povodňový odtok. Informaci objasňující hydrologické koncepty poskytuje vnitřní složení vody. Stabilní izotopy kyslíku a vodíku jsou jedinou přirozenou fyzikálně definovatelnou stopující látkou přítomnou v celé hydrosféře. Jsou bilancovatelné, jelikož v tomto prostředí nevznikají ani nezanikají, na rozdíl od hydrochemických indikátorů. Výzkum tvorby odtoku na experimentálním povodí Uhlířská v Jizerských horách je od roku 2006 doplněn o sběr vzorků vody pro stanovení stabilních izotopů kyslíku a vodíku ve srážkách, povrchovém odtoku, podpovrchovém odtoku, půdní a podzemní vodě. Levné a uživatelsky nenáročné analýzy moderní laserovou spektrometrií jsou inženýrským nástrojem umožňujícím popsat mísení infiltrující srážkové a půdní vody, detekovat preferenční proudění v půdním profilu, stanovit průměrné doby zdržení vody v povodí, nebo v povodňovém odtoku separovat vodu z tání, či z letních bouřek od vody přítomné v povodí před odtokovou událostí.

Klíčová slova: stabilní izotopy vodíku a kyslíku, experimentální hydrologie, tvorba odtoku

1. Úvod

K zodpovězení jak vzniká odtok v krajině je nutné popsat základní elementy mechanismu odtoku a to včetně procesů, které se odehrávají pod povrchem. V historii průkopníci hydrologie [2] přijali teorii o přebytečné tzv. efektivní srážce, která nemá možnost infiltrovat do půdního prostředí a vytváří tak povrchový odtok. Během posledních dekád byly provedeny mnohé experimenty, sestaveny modely a koncepty tvorby odtoku z povodí v pramenných oblastech a znovu vysloveny klíčové přesto stále neuspokojivě zodpovězené elementární otázky “kam voda teče, když prší”, především jakými cestami se voda ubírá a jak dlouho se v povodí zdržuje [8]. Navzdory úsilí odhalit a popsat hydrologické procesy v povodí, není skutečný mechanismus pohybu vody pod povrchem stále dostatečně pochopen. Hydrologická odezva odtoku na příčinnou srážku může být zdánlivě velmi dobře popsána jak jednoduchými, tak i komplikovanějšími vtokově-výtokovými vztahy. Z důvodu nedostatku detailních měření jsou často tyto úvahy založené na řadě zjednodušujících předpokladů. Význam pórovitého prostředí, kde k pohybu převážně dochází je tak až na výjimky potlačen. Přestože existuje celá řada stejně dobrých modelových řešení založených na kvantitativních (intenzita srážky nebo odtoku) nebo stavových proměnných (např. půdní sací tlak, objemová vlhkost, hladina podzemní vody, teplota), která vyhovují jednoduše či komplikovaněji zadaným kritériím, výsledky těchto řešení často neodhalují příčinné vztahy tvorby odtoku. Dodatečné informace jsou proto nutné ke snížení stupně volnosti při objasňování srážko-odtokové transformace. Požadavek tohoto omezení vyústil v hledání ideálního přírodního stopovače. To se zaměřilo na fyzikální vlastnosti vody jako takové nebo na látky ve vodě rozpuštěné a v přírodě dostupné ve významných množstvích. Kombinace izotopových a geochemických přístupů může pak poskytnout dodatečnou informaci. Zavedení geochemických a izotopových stopovačů od 60. let 20. století ukázalo, že relativně

jednoduché představy o tvorbě odtoku neodpovídají uspokojivě na příčinné vztahy ve tvorbě odtoku [8].

Hydrologie a hydrogeochemie v malých povodích v současnosti prezentuje dva spojené paradoxy. Na základě stanovení obsahu stabilních izotopů vodíku nebo kyslíku se často voda nacházející se v povodí (nazývána jako "stará" či "předsrážková") uvolňuje do odtoku na základě vytlačování z pórovitého prostředí vodou srážkovou. Při známé koncentraci izotopů v půdní a podzemní vodě a v příčinné srážce, je pak možné stanovit poměr těchto vod v povodňovém odtoku na základě koncentrace izotopů v odtékající vodě. Procesy způsobující tuto výměnu nejsou však zcela známy. Pokud použijeme tento přístup pro základní prvky horninové stavby, např. křemík nebo vápník, jsou takto zjištěné poměry odlišné. Kirchner [6] navrhuje, že povodí lze symbolicky rozdělit na několik zásobáren vody nebo kontinuum zásob předsrážkové vody, které se mobilizují za odlišných podmínek. Tento komplexní proces v elementárním měřítku je téměř zcela neznám. Na jedné straně je známo, že voda zdržující se v povodí před srážkou je nahrazena vodou srážkovou v pórovitém prostředí, kdy odtok z povodí je tvořen z části touto "starou" vodou, na straně druhé není dostatečně popsán a pochopen mechanismus této výměny. Voda se často může pohybovat nezávisle izotopově a geochemicky označenými prostory, cestami, nebo se v nich zdržovat. Tyto prostory nejsou prostorově homogenní a jejich časový průběh podílu na odtoku není konstantní.

2. Stabilní izotopy vodíku a kyslíku v hydrologickém cyklu

Detekce přirozených stopovačů je jednou z metod jak doplnit chybějící informaci v hydrologických pozorováních tvorby odtoku v povodí. Tyto metody využívají odlišného chování malého množství molekul vody. Studium dynamiky vody pomocí přírodních stopovačů se typicky zaměřuje na využití izotopů kyslíku ^{18}O a vodíku ^{2}H [5]. Stabilní izotopy vodíku a kyslíku jsou jedněmi z prvků, nacházející se v přírodním hydrologickém cyklu v proměnlivých koncentracích. To poskytuje unikátní informaci o vodě, která do povodí vstupuje ve formě srážek, v povodí se zdržuje (např. v půdní a podzemní vodě, nasycených plochách, nebo řekách a jezerech) a vystupuje z něj ve formě odtoku.

Vodík může být v molekule vody nalezen ve formě stabilního (neradioaktivního) izotopu ^{2}H (tzv. D, deuterium) mezi běžnějšími atomy ^{1}H v poměru přibližně $^{2}H/^{1}H=0.00015$. Kyslík existuje v řadě stabilních izotopů, mezi než patří nejběžnější trojice ^{16}O, ^{17}O a ^{18}O. V hydrologii je především využívaný poměr pro izotopy $^{18}O/^{16}O$ blízký hodnotě 0,00204. Izotopy mohou tvořit alternativní molekuly k běžné vodě ($^{1}H_2{}^{16}O$), která tvoří přibližně 99.75 % veškerých vodních molekul. I přesto tento zanedbatelný podíl ostatních kombinací izotopů tvořících molekulu vody, lze moderními metodami detekovat zbývající 0,25 % molekul, mezi nimiž převažují dvě kombinace: $^{1}H_2{}^{18}O$; $^{2}H^{1}H_{16}O$ (tzv. HDO). Tato stopovací metoda využívá faktu, že poměr těžších a lehčích izotopů se mění na fázových rozhraních (nejčastěji kapalné a plynné fáze). Pro přestup do plynné fáze je pro molekuly s těžšími izotopy potřeba více energie. To způsobuje relativní nedostatek molekul s těžšími izotopy ve vodní páře než ve vodě, v měřítku Země se jedná především o vodní masy v oceánech a vodní páry v atmosféře [5]. Fluktuace obsahu izotopů vodíku a kyslíku ve vodách závisí na teplotě atmosféry, kde k přestupu přes fázové rozhraní dochází [1]. Při kondenzaci vodní páry dochází rychleji k přechodu těžších izotopů (^{18}O nebo ^{2}H) do srážek a zbývající vodní pára se dále o tyto těžší izotopy ochuzuje.

Proměnlivost množství ^{2}H a ^{18}O ve vodě je popsána jako relativní úbytek těžších izotopů vůči standardu pomocí tzv. delta hodnot ($\delta^{18}O$ a $\delta^{2}H$). Zvoleným standardem je Standard Mean Ocean Water (V-SMOW) určený Mezinárodní agenturou pro atomovou energii ve Vídni [4]. Přepočet koncentrace izotopu ve vodě na hodnoty $\delta^{18}O$ a $\delta^{2}H$ je prováděn podle rovnice (1a) a (1b) z důvodu velmi malé fluktuace vlastních koncentrací těžších izotopů tj. pro lepší názornost probíhajících procesů.

$$\delta^{18}O_{vzorek} = \left(\frac{\left({}^{18}O/{}^{16}O \right)_{vzorek}}{\left({}^{18}O/{}^{16}O \right)_{V-SMOW}} - 1 \right) * 1000\,[‰] \quad (1a) \qquad \delta^{2}H_{vzorek} = \left(\frac{\left({}^{2}H/{}^{1}H \right)_{vzorek}}{\left({}^{2}H/{}^{1}H \right)_{V-SMOW}} - 1 \right) * 1000\,[‰] \quad (1b)$$

kde ^{18}O, ^{16}O, ^{1}H a ^{2}H jsou jednotlivá množství izotopů v molekulách vody ve vzorku a ve standardu (V-SMOW)

Vzhledem ke stabilní povaze izotopů ^{16}O, ^{18}O a ^{1}H, ^{2}H, které se nerozpadají, je možné provádět konzervativní látkovou bilanci s vyloučením chemických reakcí nebo forem adsorpce na pevné fázi celého hydrologického cyklu povodí, vč. pórovitého prostředí pod povrchem. Časové fluktuace $\delta^{18}O$ ($\delta^{2}H$) mohou sloužit pro období, kdy je přírodní teplota srážek buď významně vyšší nebo nižší než dlouhodobá průměrná teplota prostředí. V takových obdobích lze využít odlišné koncentrace izotopů pro tzv. izotopickou separaci odlišných vodních mas. Voda infiltrující do prostředí pod povrchem prochází zpravidla několika stupni mísení s vodou, již v povodí existující. Infiltrující a odtékající voda v povodí pak při mísení těchto vstupů z různých období roku, tento přibližně sinusový průběh utlumuje v jeho amplitudě. Proto půdní a podzemní voda vykazuje užší rozsah měřených hodnot, bližší dlouhodobému průměru izotopové koncentrace vod v povodí.

Jednou z metod je využití útlumu amplitudy vstupní a výstupní funkce. Sezónní fluktuace měřených dat $\delta^{18}O$ v odebraných srážkových úhrnech a ve vzorku vody v toku jsou proloženy sinovou funkcí. Střední doba zdržení (dotoku) MRT, se určí dle rovnice (2) vyjadřující pokles amplitudy vstupu (srážek A_p) a výstupu (např. odtoku A) sinové funkce v tzv. lineární nádrži (*(1/b´) = 6 / 2π.)*).

$$MRT = \left(\frac{1}{b'} \right) \left[\left(\frac{A_p}{A} \right)^2 - 1 \right]^{0.5} \quad (2)$$

Složitější modely využívající rozdílného vstupu izotopového obsahu jsou založeny na tzv. transferových funkcích. Mezi osvědčené modely patří FLOWPC [7], který optimalizuje vstupy a výstupy inverzním řešením v odlišných scénářích uvažující formu pohybu částic v povodí jako pístový tok, exponenciální nebo disperzní (logaritmicko-normální) rozdělení koncentrace odtoku, případně jejich kombinace. V tomto konceptu lze vodu v povodí rozdělit na vodu v pohybu a vodu stagnující (podzemní) a stanovovat jejich poměry.

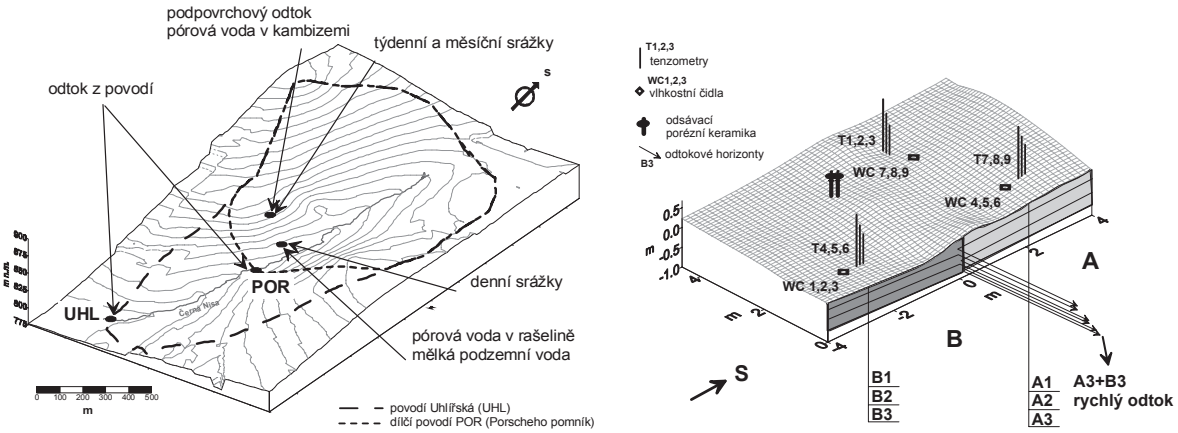
Výzkum v oblasti izotopové hydrologie na praktické úrovni je v současnosti umožněn využitím laserové spektroskopie [9], která je kvalitativně odpovídající, avšak výrazně cenově dostupnější variantou k tradiční hmotové spektrometrii s nižšími nároky na pracnost [5]. Do současnosti se hydrologický výzkum využívající přírodních izotopů v molekule vody zaměřoval převážně na studie hydrologického cyklu v měsíčním, event. časově a prostorově omezeném kroku. Jen některé studie poskytují detailní soubor dat z důvodu pracnosti a ceny analýz pomocí hmotové spektroskopie. Jelikož jsou metody laserové spektroskopie aplikovatelné velmi jednoduše, je možné je využívat pro velké množství vzorků v prostoru a čase, případně pro kontinuální vzorkování, což poskytuje výrazně jiný pohled na dříve nepostihnutelnou dynamiku hydrologických procesů. Takový robustní soubor dat lze využít k nové formulaci základů tvorby odtoku. Přístrojovou technikou izotopové laserové spektroskopie disponuje v ČR doposud pouze pracoviště ČVUT v Praze, Fakulta stavební.

3. Využití stabilních izotopy vodíku a kyslíku na experimentálním povodí

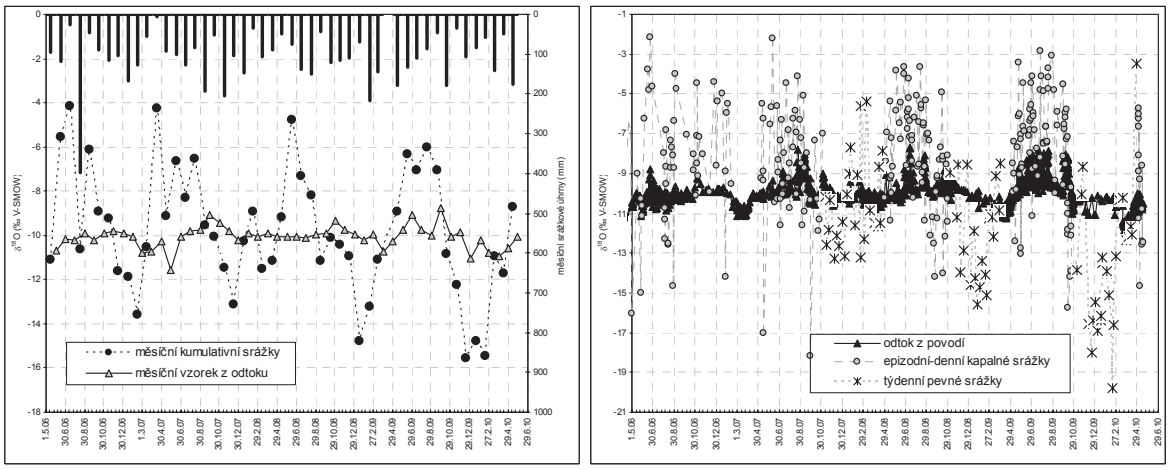
V Jizerských horách probíhá dlouhodobě hydrologický výzkum na několika experimentálních povodích ČHMÚ. Detailně sledovaným územím je horní část povodí Černé Nisy po limnigrafický profil Uhlířská (Obr.1). Experimentální povodí zaujímá plochu 1,78 km^2. Průměrná nadmořská výška povodí je 822 m n. m., měrný profil Uhlířská je ve výšce 777 m n. m. Povodí leží v oblasti s vysokým srážkovým úhrnem v ČR, převyšujícím 1300 mm za rok. Průměrná roční teplota je 6,5 °C. Území dnešního experimentálního povodí bylo v

kalamitních těžbách počátkem osmdesátých let z 50 % odlesněno. Půdní profily na svazích povodí Uhlířská vzniklé na zvětralém žulovém substrátu patří do skupiny kambizemí se základním označením hnědé půdy kyselé, s půdním podtypem oglejené půdy zrašelinělé. Z hlediska textury jde o půdy hlinito-písčité až písčito-hlinité. Půdní profil je zpravidla tvořen 5 cm vegetačního krytu, 15-20 cm zrašelinělé humusové vrstvy černé barvy, 10 cm přechodové oglejené šedočerné jílovito-hlinité vrstvy, 30 cm hnědé či okrové hlinito-písčité vrstvy a 30 cm eluviální žlutohnědé vrstvy, která plynule přechází do zvětralého žulového substrátu [10].

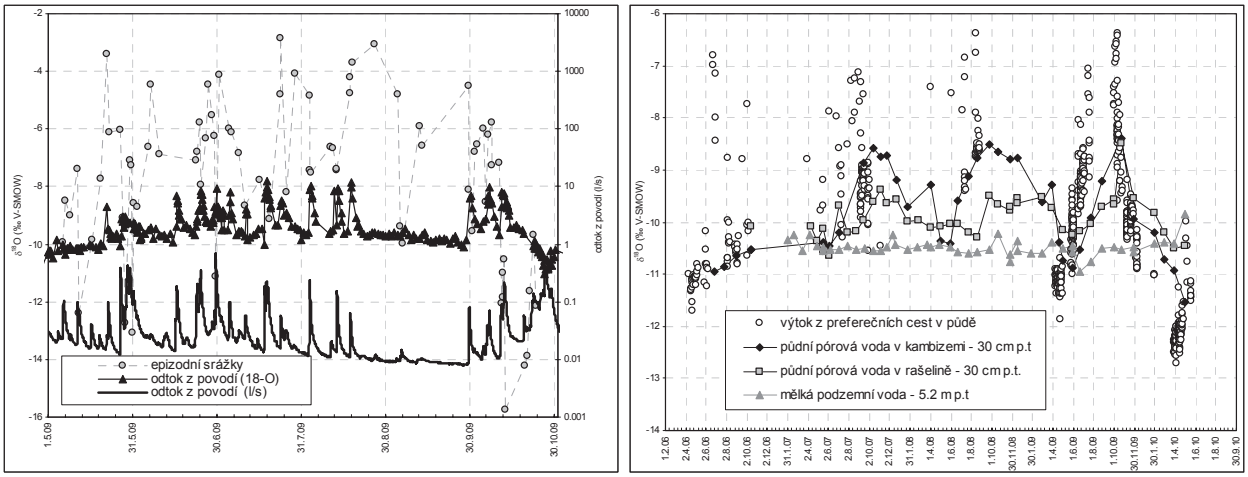
Terénní experimenty a kontinuální měření a pozorování, prováděná na experimentálním povodí, jsou koncipována s cílem vysvětlit mechanismus odtoku z mělkého půdního profilu [3]. Pro tyto účely byla v roce 1996 vytýčena výzkumná plocha na zcela odlesněném svahu. Důvodem pro studium prostorově vymezeného území je extrémní heterogenita povodí, ve kterém procesy v proměnlivě nasyceném půdním prostředí nemohou být detailně a s uspokojivou přesností popsány na celém povodí.



Obr. 1: Schema vzorkování vod pro stanovení stabilních izotopů vodíku a kyslíku v povodí (vlevo) a z podpovrchového příkopu (vpravo)



Obr. 2: Izotopy kyslíku v kumulativních srážkách a měsíčním vzorku odtoku (vlevo), v okamžitých a týdenních srážkách a okamžitém odtoku (vpravo)



Obr. 3: Izotopy kyslíku během odtokových událostí (vlevo), v pórové půdní vodě, podpovrchovém odtoku a podzemní vodě (vpravo)

Celkové vykreslení průběhu $\delta^{18}O$ v průběhu hydrologického cyklu (Obr. 2 a 3) ukazuje relativně široké rozmezí kolísání hodnot $\delta^{18}O$ v denních tekutých srážkách (-2 ‰ až -18 ‰). Hodnota koncentrace izotopu $\delta^{18}O$ je dána povahou a průběhem srážky a je pravděpodobné, že rozdělení srážky na kratší než denní směsné vzorky by ukázalo ještě širší rozmezí hodnot. Měsíční směsné vzorky za celé období vykazují rozpětí $\delta^{18}O$ přibližně -4 ‰ až -14 ‰. Hodnoty $\delta^{18}O$ ve srážkách stanovené během zimního období se pohybují v rozmezí -10 ‰ až -20 ‰ mají vliv na výchylku hodnot $\delta^{18}O$ směrem k izotopově lehčí vodě v celkovém odtoku (jak v uzávěrovém profilu UHL, tak dílčím povodí k profilu POR). Srážková voda infiltruje do půdního pokryvu typu kambizemě s výraznými preferenčními cestami, který pokrývá 90 % plochy povodí [11], kde je amplituda hodnot již poměrně výrazně redukována ve vodě odtékající formou rychlého podpovrchového odtoku ($\delta^{18}O$: -6 ‰ až -13 ‰). Hodnoty odtoku $\delta^{18}O$ se v měrných odtokových profilech Černé Nisy pohybují v rozmezí -8 ‰ až -12 ‰, což indikuje významné mísení vod z různých období, které procházejí jak půdním profilem tak podzemní zvodní. Půdní pórová voda, která je sbírána prostřednictvím keramických podtlakových vzorkovačů (Obr. 1 vpravo) jak v profilu kambizemě na svazích, tak v profilu organozemě (rašeliny) v údolí povodí, vždy ve dvou lokalitách a dvou horizontech 30 a 60 cm pod povrchem, indikuje významné mísení, resp. jen velmi malé změny koncentrace $\delta^{18}O$ v téměř stagnující pórové vodě. Hodnoty $\delta^{18}O$ pro profily kambizemě se pohybují v rozmezí -8 ‰ až -11 ‰, v profilech organozemě jen -9,5 ‰ až -10,5 ‰, kdy větší fluktuace jsou vždy pozorovány v mělčích horizontech. Ze vzorkování pórovitého prostředí pod povrchem (Obr. 3 vpravo) vyplývá, že půdní profil má dominantní vliv v počátečním mísení srážkové vody za různá období, ještě předtím, že je voda důkladně smísena v podzemním zvodni. Podzemní voda má téměř konstantní signál $\delta^{18}O$, jehož fluktuace je na hranici detekovatelnosti použitými analytickými metodami, kdy převážná většina hodnot i pro mělké vrty se pohybuje v rozmezí -9,9 ‰ až -10,6 ‰.

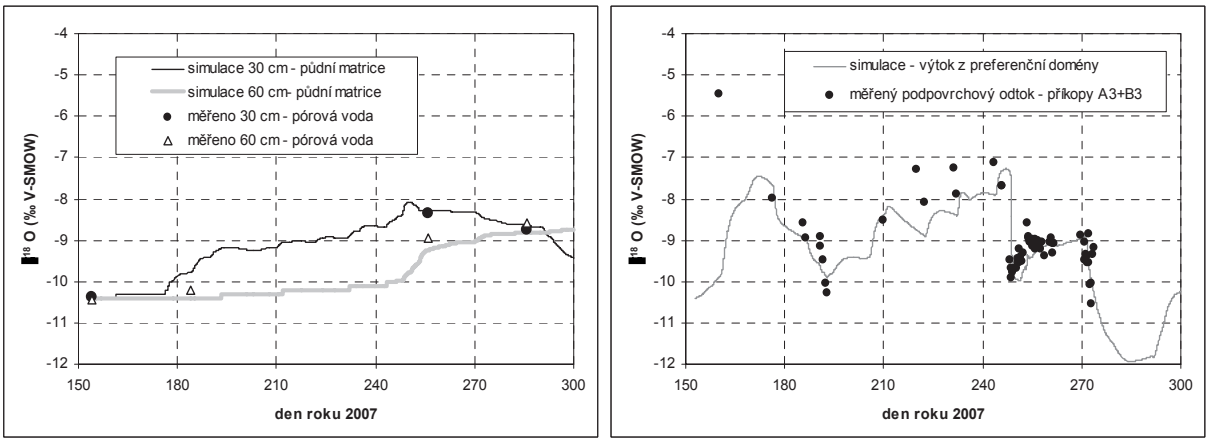
Na základě útlumu sezónních amplitud izotopového složení ve srážkách a v odtoku z povodí bylo pomocí rovnice (2) odhadnuta průměrná přibližná doba zdržení vody v povodí odpovídající 7 měsícům [10].

Na Obr. 3 vlevo jsou demonstrovány jednotlivé odtokové události a jejich izotopové složení vyvolané izotopově těžšími letními srážkami. Izotopovou separaci srážkové a předsrážkové vody lze stanovit R_s okamžitý objemový podíl předsrážkové vody na odtoku dle rovnice (3).

$$R_s = \frac{Q_s}{Q_t} = \frac{c_t - c_n}{c_s - c_n} \tag{3}$$

kde: Q_t celkový odtok z povodí, Q_s odtok předsrážkové z povodí, c_t celková koncentrace ^{18}O v odtoku, c_s dlouhodobá koncentrace ^{18}O v podzemní vodě, nebo základním odtoku, c_n koncentrace ^{18}O ve srážce. Z obrázku 3 vlevo je patrné, že poměr předsrážkové vody je většinou dominantní a během povodňové události odtéká 50-75 % předsrážkové vody. Voda je z pórovitého prostředí v údolí drénována tlakově na základě hmoty vody, infiltrující na svazích. Pro stejné průtoky je na počátku odtokové události podíl předsrážkové vody (tj. vody přítomné v povodí již před srážkovou událostí) vyšší, něž na konci sestupné větve hydrogramu.

Pro fyzikální modelování pohybu vody a transportu izotopů byl proveden výpočet pomocí modelu S_1D_Dual [12]. Ten je založen na řešení Richardsovy rovnice v proměnlivě nasyceném pórovitém prostředí s využitím principu duální propustnosti dělící půdní profil na matrici a doménu preferenčního proudění. Modifikovaná advekčně disperzní rovnice je použita k simulaci pohybu vody s proměnlivým obsahem ^{18}O zadané formou hodnot $\delta^{18}O$. Obr. 4 ukazuje odlišný průběh izotopového složení vody v půdní matrici a v preferenční cestách a potvrzuje nejednoznačnost proudění vody v půdním profilu.



Obr. 4: Simulace pohybu ^{18}O v kambizemi - půdní matrice (vlevo) a preferenční cesty (vlevo)

V měřítku celého povodí dochází nejdříve k odtoku stávající vody ze zvodněného podzemního prostředí, vytlačené v důsledku tlakového gradientu. Převažující podíl podpovrchové vody v odtoku potvrdila i separace složek odtoku podle geochemických parametrů. Během rychlého odtoku postupně narůstá podíl vody z příčinné srážkové události, která se podílí na ředění odtékajících vod. Odtok této vody je zrychlen systémem dílčích drenážních bází podzemních a půdních vod ve formě umělých i přirozených lesních rýh, strží a nasycených ploch s probíhajícím vratným odtokem. Zvodeň působí významně při dlouhodobém mísení infiltrovaných vod. Průměrná doba zdržení vody v povodí, stanovená více přístupy, byla určena v řádu několika měsíců [11].

Detekce stabilních izotopů potvrzuje složitost probíhajících procesů v povodích a nabízí možnost jejich bližšího popisu. Pomocí vzájemného porovnání obsahu izotopů kyslíku a vodíku je možné též kvantifikovat výpar, odlišovat jednotlivé vodní masy v podzemních zvodněných strukturách, stanovovat průsaky hrázemi nebo např. sledovat vodní toky v rostlinách.

Literatura

[1] CRAIG, H. – GORDON, L., 1965. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere. In: *Ed. Tongiorgio, E. Stable isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*, Spoleto, pp 9-130.

[2] HORTON, R. E., 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. Trans. Amer. Geophys. Union 14, pp 446-460.

[3] HRNČÍŘ, M. – ŠANDA, M. – KULASOVÁ, A. – CÍSLEROVÁ, M., 2010. Runoff formation in a small catchment at hillslope and catchment scales. Hydrol. Proc. doi: 10.1002/hyp.7614.

[4] IAEA. 2006. Isotope Hydrology Information System. The ISOHIS Database. Accessible at: http://isohis.iaea.org

[5] KENDALL, C. – MCDONNELL, J. J. (Eds.), 1999. Isotope Tracers in Catchment Hydrology. Elsevier Science B.V., Amsterdam. ISBN 13**:** 978-0-444-50155-4.

[6] KIRCHNER, J. W., 2003. A double paradox in catchment hydrology and geochemistry. Hydrol. Proceses. 17, 871–874.

[7] MALOSZEWSKI, P. – ZUBER, A., 1996. Lumped parameter models for the interpretation of environmental tracer data. In: Manual on mathematical models in isotope hydrology; TECDOC-910, IAEA, Vienna.

[8] MCDONNELL, J. J., 2003. Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response. Hydrol. Processes 17, 1869-1875.

[9] PENNA, D. – STENNI, B. – ŠANDA, M. – WREDE, S. – BOGAARD, T. A. – GOBBI, A. – BORGA, M. – FISCHER, B. M. C. – BONAZZA, M. – CHÁROVÁ, Z., 2010. On the reproducibility and repeatability of laser absorption spectroscopy measurements for δ2H and δ18O isotopic analysis, Hydrol. Earth Syst. Sci., 14, 1551-1566, doi:10.5194/hess-14-1551-2010, 2010.

[10] ŠANDA, M. – CÍSLEROVÁ, M., 2009. Transforming hydrographs in the hillslope subsurface. J. Hydrol. Hydrom. 57: 264-275, doi: 10.2478/v10098-009-0023-z.

[11] ŠANDA, M. – KULASOVÁ, A. – CÍSLEROVÁ, M., 2009. Hydrological Processes in the Subsurface Investigated by Water Isotopes and Silica. Soil and Water Res. 4: 83-92

[12] VOGEL, T. – ŠANDA, M. – DUŠEK, J. – DOHNAL, M. – VOTRUBOVÁ, J., 2010. Using oxygen-18 to study the role of preferential flow in the formation of hillslope runoff. Vadose Zone Journal, 9:1–8 doi:10.2136/vzj2009.

Kontakty na autora

1 ČVUT v Praze, Fakulta stavební, e-mail: martin.sanda@fsv.cvut.cz

PREZENTACE POSTERŮ K SEKCI 2

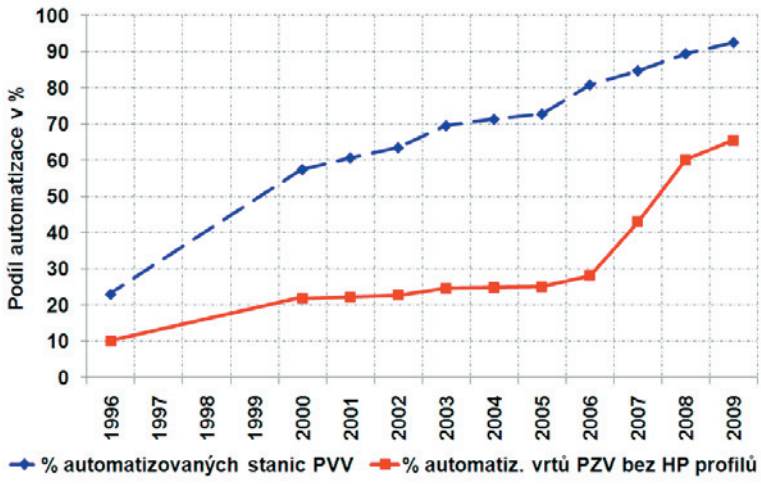
PŘÍSTROJOVÁ TECHNIKA HYDROLOGICKÉ SLUŽBY ČHMÚ NA POČÁTKU 21. STOLETÍ

Robert Žalio[1], Jiří Sklenář [2]

Abstrakt

K hlavním úkolům hydrologické služby Českého hydrometeorologického ústavu (dále ČHMÚ) patří zřizování a provoz státní monitorovací a pozorovací sítě pro sledování kvantitativního a kvalitativního stavu hydrosféry. K primárnímu zajištění tohoto úkolu je nezbytná přístrojová technika, pomocí které dochází ke sběru dat a k jejich následnému zpracování. Stejně jako jiné vědní obory i hydrologická přístrojová technika prochází procesem neustálého rozvoje. Cílem příspěvku je popis vývoje modernizace a automatizace přístrojové techniky ČHMÚ. Ještě v 80. letech 20. století byly vybavovány pozorovací objekty limnigrafickými přístroji s mechanickým záznamem. Významným krokem v automatizaci hydrologických sítí bylo v letech 1986–87 nasazení záznamových jednotek AMRS 16A do objektů hlubinné sítě podzemních vod [2]. Od začátku 90. let docházelo k využívání nejprve záznamových jednotek s lokálním záznamem dat, později i komunikačních jednotek různých typů s připojenými měřicími sondami. Příkladem automatizace hydroprognózních stanic PVV po povodni 1997 bylo vybavení dataloggery s hlasovým výstupem (výrobce NOEL) a dálkovým přenosem dat přes pevnou linku i pomocí radiotelefonu mobilní sítě NMT, později GSM. Vývoj automatizace je dokumentován i počty objektů v pozorovacích staničních sítích povrchových vod (dále PVV) a podzemních vod (dále PZV) ČHMÚ v různých obdobích (Tab.1) včetně údajů o vývoji automatizace těchto objektů (Obr.1). Zatímco v době vzniku HMÚ v r. 1954 bylo v činnosti 226 vodoměrných stanic, v r. 2009 činil jejich počet 512. V r. 1996 bylo automatizováno 23 % objektů PVV a jen 10 % objektů PZV. U stanic PVV bylo v r. 2000 automatizováno 58 %, z toho 162 pouze s lokálním záznamem a 121 se záznamem i dálkovým přenosem dat. Zatímco v r. 2005 činil podíl automatizovaných stanic 73 %, v r. 2009 bylo automatizováno již celkem 93 % stanic (v r. 2005 se jednalo o 198 stanic s lokálním záznam a 169 stanic i s přenosem dat, v r. 2009 – 173 s lokálním záznamem a již 301 i s přenosem dat). Jedná se o moderní telemetrické stanice fy Fiedler M4016 (především v oblasti působnosti poboček Praha, Č. Budějovice, Brno a Ostrava) a stanice NOEL 3000 firmy LEC (pobočky H. Králové, Plzeň a Ústí n. L.) uvedené do provozu během uplynulých cca 5 let. S využitím těchto automatických stanic ČHMÚ v současné době získává většinu naměřených dat. V současnosti se pro dálkový přenos dat využívá technologie mobilního datového přenosu GPRS (oproti do počátku 21. stol. užívanému přenosu dat s využitím jednotné telefonní sítě). Data jsou prezentována mimo jiné i na internetu. V síti PZV se počet mělkých vrtů snížil z 1464 objektů v r. 2000 na 981 v r. 2009, počet hlubokých vrtů se za stejné období zvýšil z 251 na 399 objektů. Pramenů bylo pozorováno 405 v r. 2000, v r. 2009 pouze 349. V roce 2000 bylo automatizováno 22 % vrtů (údaje bez HP profilů), tj. 270 stanic, v roce 2005 25 % vrtů, což představovalo 305 stanic. V r. 2009 dosáhl podíl automatizovaných stanic hodnoty 66 % (658 stanic s lokálním záznamem a 247 stanic se záznamem i dálkovým přenosem dat), které představují sběrné a přenosové jednotky firem Fiedler, LEC a Sekanina. Dále je pojednáno o struktuře přístrojového vybavení. V odděleních PVV stále patří k důležitým přístrojům při měření průtoků hydrometrická vrtule, jedná se o 32 vrtulí C31 a 21 vrtulí C2 od firmy OTT, Německo. Mimo převažujících manometrických čidel pro měření výšky hladiny jsou provozována i bublinková, plováková a radarová čidla. V odděleních PZV se pro měření výšky hladiny používají tlaková, příp. plováková čidla. Pracovníci i pozorovatelé jsou pro měření výšky hladiny vody ve vrtech vybaveni 590 elektrokontaktními hladinoměry. Pro operativní měření průtoků jsou v hydrologické službě od r. 2003 pořizovány mobilní ultrazvukové průtokoměry ADCP, které v současnosti představují nejmodernější vybavení nejen v ČHMÚ, ale i v ČR. Z těchto měřicích systémů ADCP slouží v současné době hydrologům ČHMÚ 4 ks Rio Grande a 8 ks StreamPro (výrobce RD Instruments, USA). V r. 2007 proběhlo na setkání uživatelů

ADCP v Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Koblenz na Rýnu srovnávací měření průtoků. Tři přístroje Rio Grande ve vlastnictví ČHMÚ změřily průtok s odchylkou 1 % od referenční hodnoty [1]. Autoři se dále zmiňují o metrologickém zabezpečení v oboru hydrologie, které začalo být během několika uplynulých let zaváděno v rámci zajištění jednotnosti a přesnosti měřidel a měření (mj. evidence měřidel, kategorizace měřidel, kalibrace přístrojů). Na základě udělení autorizace k výkonu úředního měření průtoku vody na vodních tocích (udělil Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví) a osvědčení o technické a metrologické způsobilosti úředního měření (udělil Český metrologický institut) provádí ČHMÚ výkon úředního měření. V r. 2010 pracovalo v hydrologické službě ČHMÚ celkem 9 úředních měřičů s platným certifikátem. Součástí plánů do budoucnosti je pokračování v automatizaci stávajících měřicích systémů a v další modernizaci hydrologické služby včetně sledování nových vývojových trendů v hydrologické přístrojové technice.



Obr. 1: Vývoj automatizace pozorovacích objektů – PVV a PZV (období 1996–2009)

Tab. 1: Objekty PVV a PZV – vývoj počtu (období 1954–2009)

Rok	Objekty PVV		Objekty PZV			Zdroj
	Vodoměrné stanice	Poznámka	Vrty	Prameny	Celkem objekty PZV	
1954	226	z toho 145 vybaveno limnigrafy	-	-	-	[3]
1969	391	z toho 280 vybaveno limnigrafy	1169	554	1723	[5]
1996	455 [4]	celkem 527 objektů PVV	-	-	2414	[6]
2000	492	-	1715	405	2110	[7]
2005	504	-	1686	379	2065	[7]
2009	512	z toho 313 vybaveno limnigrafy	1815	349	2164	[7]

Literatura

[1] ADLER, M. – NICODEMUS, U. et al., 2008. Bericht – 5. ADCP Anwendertreffen zur Qualitätssicherung von Abflussdaten vom 11.-13. 9. 2007 in Koblenz. BfG, Koblenz. 68 s.

[2] KOŽNÁREK, Z., 2000. Rozvoj hydrologické přístrojové techniky v ČHMÚ. In: *Hydrologické dny 2000. Praha: ČHMÚ, I. díl, s. 115–118*. ISBN 80-85813-76-9.

[3] KRŠKA, K. – VLASÁK, V., 2008. Historie a současnost hydrometeorolog. služby na jižní Moravě. ČHMÚ, Praha, 2008. 254 s. ISBN 978-80-86690-52-0.

[4] KUBÁT, J., 1999. Společné úkoly meteorologické a hydrologické služby ČHMÚ. Meteorologické zprávy, roč. 52, č. 6, s. 170–175. ISSN 0026-1173.

[5] Hydrologická a meteorologická služba ČSSR, HMÚ, Praha, 1970, 53 s.

[6] Výroční zpráva 1996, ČHMÚ, Praha, 1997. 49 s. ISBN 80-85813-46-7.

[7] Zprávy o činnosti hydrologie 2000-2009. [Interní publikace]. ČHMÚ, Praha.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, e-mail: robert.zalio@chmi.cz, jiri.sklenar@chmi.cz

MĚŘENÍ PRŮTOKŮ PŘÍSTROJI TYPU ADCP V ČHMÚ NA POBOČCE PRAHA

Tomáš Fryč[1]

Abstrakt

Příspěvek se zabývá měřením a vyhodnocováním průtoků přístroji typu ADCP v ČHMÚ na pobočce Praha. Jde o ukázky přístrojů Rio Grande a StreamPro při různých způsobech měření, zpracování dat v programu WinRiver a Agila. Dále se uvádí stručný statistický přehled používání ADCP na pobočce Praha a ukázka zatím největšího změřeného průtoku na území ČR tímto přístrojem.

Moderní přístroj typu ADCP (Acoustics Doppler Current Profiler) představuje od roku 2004 revoluční způsob měření průtoku v ČHMÚ.

Systém ADCP lze zjednodušeně charakterizovat jako kontinuální měření rychlostních segmentů v profilu vodního toku s využitím sondy pracující na principu Dopplerova jevu s plně automatizovaným zpracováním. Člun, na kterém je sonda ADCP umístěna, se pohybuje od jednoho břehu vodního toku ke druhému a ultrazvukové zařízení snímá akusticky vodní těleso pod sebou. Směrem ke dnu jsou vysílány ve čtyřech paprscích signály o dané frekvenci, jsou odráženy částicemi rozptýlenými ve vodě a zpětně zachyceny sondou ADCP jako tzv. echa. Změna frekvence mezi vysílaným a přijímaným signálem podává informace o pohybu částic. Systém ADCP je schopen rozlišovat přijatá echa z různých hloubek a na základě toho zkonstruovat rychlostní profil. Další ultrazvukové signály (reflexe ode dna řeky) jsou nutné k určení hloubky a rychlosti pohybu člunu. Postupnou sumací naměřených hodnot rychlostního a příčného profilu získáme výsledný průtok ve vodním toku.

V ČHMÚ na pobočce Praha nyní používáme dva přístroje typu ADCP. **Rio Grande** na velké vodní toky a **StreamPro** na malé toky. Pro úspěšný výsledek měření průtoku je nejdůležitější zvolit vhodný příčný profil, v kterém budeme měření provádět. S tím souvisí i způsob, kterým se bude měřící člun přetahovat z jednoho břehu na druhý. Při měření velkým člunem Rio Grande nejčastěji měřič přechází po mostě a člun táhne na laně pod mostem. Menší člun StreamPro drží měřič většinou přímo v ruce před sebou a brodí s ním vodní tok v příslušném měřeném profilu. Více o způsobech přetahování člunu bude prezentováno v posteru.

Vlastní měření průtoku probíhá tak, že se plovák se sondou umístí na hladinu vodního toku u jednoho břehu, naváže se spojení přes modemy mezi obslužným počítačem a měřící sondou, a pak se již plovák pomalu rovnoměrně přetahuje na druhý břeh. Pro upřesnění výsledku se měřící proces několikrát opakuje. Na počítači je okamžitě vidět, jak se načítá průtok, jaké jsou rychlosti, hloubka atd. Z takto získaných, většinou jen málo se lišících průtoků, pak SW Agila vypočte výsledný průtok, který se následně „v kanceláři“ exportuje do hlavního hydrologického databázového programu ČHMÚ WinZPV.

Hlavní výhodou tohoto způsobu měření je rychlost změření průtoku při zachování vysoké přesnosti. V roce 2006 jsme při rozsáhlé jarní povodni stihli zaměřit víceméně všechny kulminace a i zatím největší změřený průtok v ČR 2711 $m^3.s^{-1}$ na Labi v Děčíně při maximální hloubce přes 10 metrů. Naopak nejmenší, dobře změřený průtok sondou ADCP, máme zatím změřen na Lánském potoce na stanici Běleč, 0,036 $m^3.s^{-1}$ při průměrné hloubce 27 cm, šířce 0,7 m a rychlosti 0,2 $m.s^{-1}$. Ročně provedeme v ČHMÚ na pobočce Praha přístroji ADCP 200 – 300 měření.

Klíčová slova: měření průtoku, ADCP, Rio Grande, StreamPro, povrchové vody

Literatura

ČHMÚ, 2007. Měření průtoků systémem ADCP při povodních v roce 2006. In: *Hydrologická ročenka ČR 2006*, ČHMÚ, Praha, s. 153-156

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Praha, e-mail: fryc@chmi.cz

AUTOMATIZACE MĚŘENÍ VYDATNOSTÍ PRAMENŮ S VYUŽITÍM PARSHALLOVA ŽLABU

Josef Glanc[1]

Abstrakt

Příspěvek popisuje zkušenosti s využíváním Parshallových žlabů při automatickém měření vydatností pramenů a hodnotí provozní vlastnosti Parshallových žlabů v různých lokalitách a podmínkách především z hlediska možnosti ovlivnění měření, přesnosti měření, četnosti nutné údržby a odolnosti vůči přírodním podmínkám i vandalismu.

Záměr částečně automatizovat měření vydatností pramenů v pozorovací síti ČHMÚ při zachování nebo zvýšení přesnosti měření byl důvodem k výstavbě měrných objektů typu Parshallův žlab na území pobočky Plzeň v rámci rekonstrukce pozorovací sítě podzemních vod ČHMÚ (projekt ISPA/FS) v letech 2006 a 2007. Cílem bylo ověřit celkovou vhodnost tohoto typu měrného objektu pro síť pramenů ČHMÚ včetně jeho využití při automatizaci.

Při stavbě byly použity prefabrikované žlaby firmy Pars aqua s.r.o. velikostí P1 (rozsah měřených průtoků 0,26 – 6,22 $l.s^{-1}$), P2 (0,52 – 15,1 $l.s^{-1}$) a P4 (1,52 – 168 $l.s^{-1}$). Prameny se nachází v nadmořských výškách 460 – 670 m n. m. v částečně nebo zcela zalesněných lokalitách. Žlaby jsou vystaveny působení přírodních podmínek v místním klimatu, některé navíc většímu zanášení splaveninami (typ prameniště a pohyb lesní zvěře), další pak občasným útokům vandalů. Na všech objektech jsou instalovány automatické přístroje, které provádí měření výšky hladiny vody s přesností na 1 mm v denním nebo hodinovém intervalu.

Z dosavadních zkušeností vyplývá, že používání Parshallových žlabů pro měření vydatnosti a její automatizaci je v mnoha ohledech výhodné. Zásadní je přesnost měření, která je zaručena kalibrací ověřenou konzumční křivkou a je daná rozměrovou přesností prefabrikovaného žlabu. Žlaby je možné použít v úsecích, kde není dostatek spádu pro stavbu objektu s měřením pod přepadovou deskou. Především u větších žlabů nedochází za běžných podmínek k usazování splavenin ani k zachytávání plovoucích předmětů v hrdle žlabu a nepotvrdily se ani obavy ze zanášení boční měrné šachty. Objekt je také poměrně odolný vůči vandalům. Z hlediska automatizace je pak zásadní výhodou to, že i menší změna průtoku znamená výraznější změnu výšky hladiny vody v místě měření.

I přes své výhody není Parshallův žlab univerzálním typem měrného objektu a výběru vhodné lokality je vždy nutné věnovat pozornost. Zvláště u žlabů velikosti P1 dochází často k uvíznutí předmětů v hrdle žlabu a vzdouvání vody a případně i k zanášení splaveninami. Pro správnou funkci žlabu je nezbytné:

- dodržet stavební a hydraulické podmínky pro instalaci žlabu
- stanovit vhodnou velikost žlabu, která bude pokrývat celý rozsah vydatností pramene
- předejít zanášení žlabu a zachytávání plovoucích předmětů v hrdle žlabu výběrem vhodné lokality nebo celkovým stavebním a technickým řešením objektu (prostor pro usazování splavenin, zachycení plovoucích předmětů, zakrytí celého objektu)
- zajistit měření výšky vody kvalitním přístrojem (osvědčily se manometrické sondy zanořené pod hladinou, jako nevhodná byla vyhodnocena plováková čidla)

zajistit pravidelnou kontrolu žlabu, pročištění a případné odečtení chyby při vzdutí hladiny pro následnou korekci dat; četnost kontrol je zásadně vyšší u žlabů velikosti P1 (šířka hrdla 2,54 cm) a obecně závisí na konkrétních podmínkách, ve kterých jsou jednotlivé žlaby provozovány (typ porostu, roční období, obsah splavenin, dostupnost lokality)

Klíčová slova: Parshallův žlab, pramen, podzemní voda, automatizace měření vydatnosti

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Plzeň, e-mail: glanc@chmi.cz

APLIKACE PASIVNÍCH VZORKOVAČŮ PRO MONITORING POLÁRNÍCH ORGANICKÝCH LÁTEK

Vít Kodeš[1], Roman Grabic[2]

Abstrakt

V příspěvku jsou prezentovány výsledky aplikace pasivních vzorkovačů v monitoringu polárních látek (zejména pesticidů a léčiv a perfluorovaných látek) v povrchových a podzemních vodách. Pasivní vzorkovače POCIS umožňují časově integrované vzorkování i látek, které jsou klasickými metodami vzorkování ve vodách obtížně vzorkovatelné. Díky dlouhodobé expozici ve vodě se koncentrační hladiny ve vzorkovači pohybují výše než koncentrační hladiny v bodových vzorcích, tudíž poskytují více pozitivních nálezů než bodové vzorky a jsou proto ideálním zařízením pro screening polárních látek.

Pasivní vzorkovače POCIS (Polar Organic Chemical Integrative Sampler) je určen pro vzorkování polárních tj. ve vodě rozpustných látek a vyrábí se ve dvou modifikacích. Pesticidní POCIS je vyvinut pro středně polární pesticidy. Farmaceutický POCIS je pak vyvinut pro silně polární látky, které jsou dobře rozpustné ve vodě – např. fenoxyalkánové kyseliny a léčiva. Pasivní vzorkovače POCIS obsahují náplň 0,2 g sorbentu. Exponované vzorky se skladují při -18 °C po prakticky neomezenou dobu bez rizika degradace sledovaných látek. Při vlastním zpracování se odstraní polopropustná membrána a sorbent se převede do kolony. Vymytí analytů ze sorbentu se provádí standardním postupem. Výsledné extrakty se převedou do 2 ml metanolu k vlastním LC/MS/MS analýzám. Extrakty jsou také dobře použitelné pro následné ekotoxikologické testy.

V monitoringu jakosti povrchových a podzemních vod ČHMÚ se vzorkovače POCIS používají od roku 2006 pro screening širokého spektra látek. V roce 2009 bylo v těchto vzorkovačích sledováno 98 léčiv, 77 pesticidů a 7 perfluorovaných sloučenin tj. celkem 182 polárních látek. Celkem 120 látek bylo pozitivně zjištěno (62 léčiv, 51 pesticidů a 7 perfluorovaných sloučenin).

Díky dlouhodobé expozici ve vodě se koncentrační hladiny ve vzorkovači pohybují výše než koncentrační hladiny v bodových vzorcích, tudíž poskytují více pozitivních nálezů než bodové vzorky a díky fixaci sledovaných látek v sorbentu vzorkovače se při správném skladování mohou vzorky uchovávat v nezměněném stavu pro následné analýzy prakticky neomezenou dobu. Pasivní vzorkovače jsou proto ideálním zařízením pro screening polárních látek umožňující na rozdíl od vzorků vod uchovávat vzorky až do doby, kdy budou k dispozici nové analytické postupy pro stanovení dalších nových polárních látek a tyto látky lze potom zpětně stanovit. Dosud nebyly stanoveny normy environmentální kvality pro pasivní vzorkovače a tak se výsledky monitoringu pasivními vzorkovači nedají přímo využít pro účely hodnocení stavu vodních útvarů. Prozatím nacházejí uplatnění pouze v rámci situačního monitoringu vod.

Klíčová slova: pasivní vzorkovače, polární látky, povrchová voda, monitoring

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, oddělení jakosti vody, e-mail: kodes@chmi.cz

2 Fakulta rybářství a ochrany vod, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, e-mail: r.grabic@vurh.jcu.cz

KONTAMINACE POVRCHOVÝCH VOD, PLAVENIN A SEDIMENTŮ VLIVEM VYPOUŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD

Jarmila Halířová[1], Dušan Hypr[1], Pavel Stierand[1]

Abstrakt

V letech 2006–2009 řešil ČHMÚ ve spolupráci se Zdravotním ústavem Ostrava a Veterinární a farmaceutickou univerzitou v Brně projekt zaměřený na sledování toxických látek a endokrinně účinných látek v jednotlivých složkách říčního prostředí (kovy, pesticidy, PAU, PCB, PBDE, PFOS, léčiva, alkylfenoly). Na osmi profilech toků Svratky a Svitavy situovaných nad i pod městskou aglomerací a na vstupu i výstupu z ČOV byly odebrány bodové nebo expozicí pasivních vzorkovačů získané vzorky jednotlivých matric (povrchová a odpadní voda, sedimenty, plaveniny, biota). Chemický monitoring byl doplněn stanovením hodnot biochemických markerů v rybách, prokazujících účinky a dopad znečištění na biotu.

Chemický monitoring prokázal v povrchových vodách toků Svratky a Svitavy v regionu brněnské aglomerace nálezy běžně nesledovaných potenciálně nebezpečných látek s pravděpodobnými nebo prokázanými endokrinními a toxickými účinky – triclosan a methyltriclosan, alkylfenoly, bisfenol A, polybromované difenylethery, léčiva a perfluorované organické sloučeniny. Většina ze sledovaných látek je obsažena v malých koncentracích v povrchových vodách Svratky a Svitavy již na vstupu do regionu brněnské aglomerace a prokazatelně bylo ověřeno, že městská aglomerace Brno přispívá ke zvýšení obsahů řady sledovaných látek v tocích zejména prostřednictvím vypouštěných odpadních vod z ČOV Modřice.

Čištěné odpadní vody vnášejí do povrchových toků rtuť, kongenery PCB, diuron, atrazin, terbutryn, gamma HCH, hexachlorbenzen, PBDE a bisfenol A. Tyto látky jsou vázané na nerozpuštěné částice obsažené v odpadních vodách. Jejich obsahy na odtoku z ČOV jsou oproti přitékající odpadní vodě v řadě případů sníženy, ale vyšší než hodnoty měřené v povrchových vodách. Na profilech Svratky pod ČOV byly v jednotlivých vzorkovaných matricích prokázány zvýšené obsahy u těchto látek. Odpadní vody na výstupu z ČOV jsou také hlavním zdrojem některých léčiv (karbamazepin, diclofenak, sulfamethazin, sulfamethoxazol a erythromycin), alkylfenolů, triclosanu a methyltriclosanu v povrchových vodách. Potvrzeno bylo postupné snižování obsahu uvedených látek směrem po toku, a to jak vlivem ředění povrchovými vodami, tak sorpcí na říční sedimenty (lokalita Rajhradice) a také jejich degradací. Z pohledu odstraňování sledovaných látek z odpadních vod v rámci technologie čištění odpadních vod lze monitorované látky rozdělit na látky odstranitelné nebo zčásti odstranitelné (kovy, antibiotika, PBDE, alkylfenoly, PAU, PCB, alachlor), dále na látky u nichž vliv technologie čištění odpadní vody není prokazatelný, a které procesem čištění pravděpodobně procházejí bez eliminace (některá léčiva jako např. sulfamethazin, sulfapyridin, carbamazepin, diclofenac) a konečně na látky, které v rámci čistírenského procesu nově vznikají (např. methyl derivát triclosanu - methyltriclosan) a jsou vypouštěnými odpadními vodami z ČOV vnášeny do povrchových vod.

Ověřena byla také účelnost použití pasivního vzorkování jak pro polární tak i hydrofobní látky. Potvrdilo se, že sledování výskytu některých látek pouze ve vzorcích povrchových vod může vést k chybným interpretacím o (ne)přítomnosti látky v prostředí.

Na základě zjištěných výsledků bylo doporučeno rozšíření programů státního monitoringu jakosti vod o sledování nových potenciálně nebezpečných látek (triclosan, PBDE, léčiva, alkylfenoly) ve vhodných matricích.

Klíčová slova: monitoring, plaveniny, sedimenty, odpadní vody, biomarkery, endokrinní látky

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, e-mail: jarmila.halirova@chmi.cz

VÝSKYT PESTICIDŮ V POVRCHOVÝCH VODÁCH V MATRICI SEDIMENT A V MATRICI PLAVENINY V ROCE 2009

Jitka Vejvodová[1], Vít Kodeš[1]

Abstrakt

V příspěvku jsou zpracovány výsledky screeningu pesticidů v hydrosféře ČR v roce 2009 a porovnání zastoupení jednotlivých analyzovaných pesticidů a jejich metabolitů v říčních sedimentech a plaveninách a rozdíl v koncentracích jednotlivých pesticidů v obou matricích.

Pesticidy a jejich metabolity byly pro analýzu v pevných matricích vybírány primárně s ohledem na fyzikálně-chemické vlastnosti a sekundárně s ohledem na aplikované množství. Jednalo se jak o látky v současnosti používané, tak o pesticidy jejichž aplikace byla již zakázána. Počet sledovaných látek byl pro obě matrice shodný, 47. Profily byly totožné s profily pro odběr povrchové vody, u plavenin byla odběrová místa limitována možností přístupu mobilní odstředivky. Sedimenty byly analyzovány na 93 profilech, plaveniny na 72 profilech. Pro každou matrici byl proveden pouze jeden odběr, pro plaveniny v období květen – říjen 2009, pro sedimenty v období srpen – říjen 2009.

Ze skupiny „staré zátěže“ bylo z 19 látek zjištěno nad MS 8, jak u sedimentů, tak u plavenin byly nad MS látky téměř totožné. Nejčastěji bylo zastoupeno p,p‘-DDE, p,p‘-DDT a p,p‘-DDD. Ze skupiny 28 „používaných pesticidů“ bylo pozitivně analyzováno v sedimentech 12 pesticidů a jejich metabolitů, zatímco v plaveninách 20 pesticidů a jejich metabolitů. Nejvyšší četnost výskytu měl shodně v obou matricích metabolit Glyfosátu, AMPA, druhým pesticidem byl, také shodně pro obě matrice, Glyfosát. U dalších pesticidů je četnost výskytu totožných látek v sedimentech podstatně nižší než v plaveninách, např. třetí a čtvrtý nejčastěji zastoupený pesticid v plaveninách, Linuron (38 %vzorků) a Terbuthylazin (30 % vzorků), nebyl stanoven nad MS v sedimentech ani na jednom profilu. Ve výskytu maximálních koncentracích byly nejvyšší rozdíly u HCB („staré zátěže“), přestože byla jejich četnost výskytu nad MS u obou matric srovnatelná. Nejvyšší koncentrace HCB dosahovala v plaveninách 16 $\mu g.kg^{-1}$, v sedimentech 2 290 $\mu g.kg^{-1}$. Velké rozdíly maximálních koncentrací byly zjištěny i u metabolitu AMPA, nejvyšší koncentrace v plaveninách byla naměřenana profilu CHMI 3145 Bystřice-Kosičky, 1 060 $\mu g.kg^{-1}$, zatímco pro sediment dosáhla nejvyšší hodnota 1 700 $\mu g.kg^{-1}$ v profilu CHMI 3454 Ohře-Želina. Opačná situace byla u koncentrací Alachloru, v sedimentech dosáhla nejvyšší hodnota 19 $\mu g.kg^{-1}$ a byl stanoven v 5 % vzorků, v plaveninách dosáhla nejvyšší koncentrace této látky 1 050 $\mu g.kg^{-1}$, nad MS byl analyzován na 26 % vzorků. Obdobně byly zjištěny velké rozdíly u Glyfosátu, v plaveninách dosahovaly nejvyšší koncentrace až 3 100 $\mu g.kg^{-1}$, zatímco v sedimentech byla naměřena nejvyšší hodnota 630 $\mu g.kg^{-1}$.

Ze screeningu pevných matric vyplynulo, že zatímco zastoupení jednotlivých sledovaných pesticidů řadících se ke „starým zátěžím“ je u obou matric srovnatelná, u pesticidů v současnosti používaných je jejich četnost výskytu v sedimentech nižší než v plaveninách. Pro maximální koncentrace však není tento trend zcela jednoznačný.

Klíčová slova: pesticidy; metabolity pesticidů, sediment, plaveniny; monitoring

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, oddělení jakosti vody, Praha,
e-mail: jitka.vejvodova@chmi.cz, kodes@chmi.cz

VÝSKYT PESTICIDŮ V POVRCHOVÝCH VODÁCH A VE VODÁRENSKÝCH NÁDRŽÍCH V ROCE 2009

Jitka Vejvodová[1], Vít Kodeš[1], Markéta Kollerová[1]

Abstrakt

V příspěvku jsou zpracovány výsledky screeningu pesticidů v hydrosféře ČR v roce 2009 a porovnání zastoupení jednotlivých analyzovaných pesticidů a jejich metabolitů v povrchových vodách v matrici voda a ve vodárenských nádržích, rovněž v matrici voda, a rozdíl v koncentracích jednotlivých pesticidů v obou skupinách.

V povrchových vodách bylo sledováno 110 v současnosti používaných pesticidů a jejich metabolitů na 100 profilech. Monitoring proběhl v období květen – září 2009 a provedeny byly 4 bodové odběry na každém z profilů v intervalech cca 4 – 5 týdnů. Celkem bylo analyzováno 400 vzorků pro každou látku a na každém profilu bylo získáno 440 hodnot o výskytu pesticidů a jejich metabolitů. Monitoring vodárenských nádrží proběhl v druhé polovině roku 2009 na 46 objektech. Na každém z nich byly provedeny rovněž 4 odběry v rozmezí 3 – 5 týdnů. Vzorek byl směsný a vždy odebíraný u hráze. V každém vzorku bylo analyzováno minimálně 99 aktuálně používaných pesticidů a jejich metabolitů. Pro každou látku tak bylo získáno 184 hodnot.

Podle předpokladu dosahovala četnost a koncentrace stejných látek v povrchových vodách vyšších hodnot než ve vodárenských nádržích. Terbuthylazin byl v povrchových vodách detekován nad mezí stanovitelnosti (MS) v téměř 60 % vzorků a jeho maximální koncentrace dosahovala až 2,6 $\mu g.l^{-1}$. Ve vodárenských nádržích, přestože patřil k nejčetněji zastoupeným pesticidům, byl jeho výskyt nad MS pouze v necelých 24 % vzorků a jeho maximální koncentrace dosahovala 0,21 $\mu g.l^{-1}$. Obdobně tomu bylo i u ostatních pesticidů, např. MCPA, MCPP, Chlorotoluron, Linuron, Alachlor, Metazachlor, Metolachlor. Jediným pesticidem u kterého absolutní četnost výskytu i maximální koncentrace dosáhly ve vodárenských nádržích vyšších hodnot než v povrchových vodách byl metabolit Metolachlor ESA. V povrchových vodách byla jeho maximální koncentrace 0,12 $\mu g.l^{-1}$ a počet vzorků nad MS 17, ve vodárenských nádržích dosáhla jeho maximální koncentrace 0,97 $\mu g.l^{-1}$ a pozitivně byl stanoven v 35 vzorcích.

Na závěr bylo provedeno hodnocení pesticidů a jejich metabolitů podle četnosti překročení MS, četnosti překročení hodnoty 0,1 $\mu g.l^{-1}$ a maximální naměřené koncentrace. Každému z těchto kriterií byla přiřazena určitá váha. Na základě takto získaného hodnocení byla vytvořena tabulka problematických pesticidů a jejich metabolitů. V povrchových vodách získal nejvyšší bodové ohodnocení Terbuthylazin, druhým nejproblematičtějším pesticidem byl vyhodnocen jeho metabolit, Desethylterbuthylazin, na třetím místě byl Atrazin. Ve vodárenských nádržích dopadlo hodnocenní odlišně oproti povrchovým vodám, nejproblematičtějším pesticidem, respektive metabolitem pesticidu Glyfosátu, byla AMPA, druhé nejvyšší bodové ohodnocení získal Glyfosát na třetím místě byl Metolachlor ESA.

Klíčová slova: pesticidy, metabolity pesticidů, povrchová voda, vodárenské nádrže, monitoring

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, oddělení jakosti vody, Praha,
e-mail: jitka.vejvodova@chmi.cz, kodes@chmi.cz, kollerova@chmi.cz

VÝSKYT PESTICIDŮ V PODZEMNÍCH VODÁCH V ROCE 2009

Markéta Kollerová[1], Vít Kodeš[1], Jitka Vejvodová[1]

Abstrakt

V příspěvku jsou zpracovány výsledky monitoringu pesticidů a jejich metabolitů v podzemních vodách ČR v roce 2009 a zhodnocení těchto výsledků na základě překročení meze stanovitelnosti, hodnoty 0,1 μg.l^{-1} a podle maximální koncentrace.

V rámci monitoringu pesticidů v podzemních vodách bylo v roce 2009 odebráno 1263 vzorků z objektů zařazených do monitoringu jakosti vod ČHMÚ. Na vrtech a pramenech byly vzorky odebrány 2krát za rok, na jaře a na podzim, na vybraných vodních zdrojích pouze jednou na podzim. Sledováno bylo 138 pesticidů a jejich metabolitů, většinu tvoří látky aktuálně sledované, pouze několik z nich patří mezi v současné době pesticidy již nepoužívané, které přestavují staré zátěže. Pesticidy byly vybírány především podle fyzikálně-chemických vlastností, v druhé řadě podle aplikovaných množství.

Pesticidy byly rozděleny do 9 skupin podle chemického typu pesticidů. U 64 (46 %) z celkového počtu sledovaných látek byla naměřena hodnota nad mezí stanovitelnosti, u 41 (30 %) látek hodnota přesahovala koncentraci 0,1 μg.l^{-1} což představuje limitní hodnotu pro pesticidy v podzemních vodách. Nejčastěji detekovaným pesticidem byl Atrazine-desethyl (metabolit Atrazinu), který byl naměřen celkem 204krát (asi 16 % vzorků), dalšími, často se vyskytujícími látkami jsou Atrazine a Alachlor ESA (metabolit Alachloru), se 149, resp. 82 pozitivními měřeními. Nejvyšší koncentrace byly naměřeny pro látky clopyralid (10 μg.l^{-1}), Metolachlor ESA (metabolit Metolachloru) (5,51 μg.l^{-1}) a Atrazine-hydroxy (metabolit Atrazinu) (3,86 μg.l^{-1}).

Pesticidy a jejich metabolity se na závěr hodnotily podle toho, kolikrát překročily mez stanovitelnosti, hodnotu 0,1 μg.l^{-1} a podle jejich maximálních koncentrací. Každému kriteriu byla přiřazena určitá váha a na základě těchto údajů byl vytvořen seznam nejproblémovějších pesticidů a jejich metabolitů, kde se na prvním místě umístil Atrazine-desethyl (metabolit Atrazinu) s 204 hodnotami nad mezí stanovitelnosti, 28 hodnotami přesahujícími koncentraci 0,1 μg.l^{-1} a maximální koncentrací 0,448 μg.l^{-1}, na dalších místech figurují Atrazine, metabolity Alachlor ESA a Metolachlor ESA a Hexazinone. Obecně se v podzemních vodách ukazují jako problematičtější metabolity pesticidů než primární účinné látky.

Klíčová slova: podzemní voda, pesticidy, metabolity pesticidů, monitoring

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, oddělení jakosti vody, Praha,
e-mail: kollerova@chmi.cz, kodes@chmi.cz, jitka.vejvodova@chmi.cz

HODNOCENÍ VLIVU ROZDÍLNÉHO KRAJINNÉHO POKRYVU NA ODTOKOVÝ PROCES V EXPERIMENTÁLNÍCH POVODÍCH ZBYTINY

Zdeněk Kliment[1], Václav Královec[1], Antonín Malý[2]

Abstrakt

Příspěvek se zabývá výzkumem odezvy odtoku na spadlé srážky v plošně malých povodích, která se odlišují krajinným pokryvem a různou měrou antropogenního ovlivnění. Výzkumná lokalita je situována v oblasti horního povodí šumavské Blanice. V příspěvku jsou obsaženy výsledky z prvních let pozorování (období květen 2006 – říjen 2009). I přes krátkou dobu pozorování byly identifikovány odlišnosti v hydrologickém režimu obou povodí. Byly nalezeny velké rozdíly v rozkolísanosti odtokového režimu, zvláště pro nízké a střední vodní stavy. Při detailní analýze hyetogramů a hydrogramů vybraných srážko-odtokových epizod byly odhaleny některé rozdíly v citlivosti obou hydrologických systémů na hlavní příčinné proměnné.

Na jaře roku 2006 byla katedrou Fyzické geografie a geoekologie PřF UK založena v pramenné oblasti Blanice v katastru obce Zbytiny (býv. okr. Prachatice) párová experimentální povodí Zbytinského a Tetřívčího potoka. Povodí Tetřívčího potoka reprezentuje lesní krajinu doplněnou fragmenty přirozených luk, povodí Zbytinského potoka tvoří dříve intenzivně využívaná, podpovrchově odvodňovaná půda, dnes pokrytá hlavně obhospodařovanými loukami, [2].

Na základě rozdílného vegetačního krytu se předpokládaly také rozdíly v rozkolísanosti průtoků v závěrových profilech obou povodí. Pro posouzení variability průměrných hodinových průtoků byla použita metoda pulzací hydrogramu, [1]. Ke zjištění rozdílů v citlivosti reakce odtokového systému lesního a nelesního povodí na srážky byla aplikována metoda detailního rozboru hydrogramů a hyetogramů, [3]. Z důvodu absence desetiminutových srážkových dat v zimním období byla pozornost věnována pouze období teplého půlroku (květen – říjen). V rámci sledovaného období bylo vybráno 50 srážko-odtokových epizod, přičemž bylo pro každou z nich odvozeno 20 charakteristik. Vybrané charakteristiky byly podrobeny statistickému vyhodnocení.

Ze srovnání počtu pulzů hydrogramu nad danou mez je zřejmé, že největší rozdíly ve variabilitě průtoků jsou patrné u malých a středních průtoků. V kategorii 1-3násobku mediánu průtoku kolísají průtoky na Zbytinském potoce o 45-87 % více než na Tetřívčím potoce. U velmi malých průtoků v kategorii 0,5-1násobku mediánu je to dokonce mnohem více, až 38krát. Průměrná doba jednoho pulzu je naopak delší v zalesněném povodí. Zjednodušeně se dá říci, že každá odtoková vlna trvá v zalesněném povodí zhruba o 30 % delší dobu. Výsledky zjištěné při analýze hydrogramů potvrzují některá tvrzení z odborné literatury, v jiných případech je jejich interpretace složitější. U lesního povodí byla zjištěna delší doba prodlení (tj. doba mezi kulminací srážky a průtoku) a delší doba trvání sestupné větve hydrogramu. Korelační analýza jednotlivých závislých a nezávislých proměnných ukázala, že na kulminaci specifického průtoku má na obou povodích největší vliv intenzita a množství srážek. Dobu prodlení naopak nejvíce ovlivňuje doba trvání srážky. U Zbytinského potoka byla navíc zjištěna i negativní závislost doby prodlení na maximální intenzitě srážky, což ukazuje na rychlejší nástup povodně při intenzivnějších deštích.

Klíčová slova: srážko-odtokový proces, párový experimentální výzkum, povodí Blanice

Literatura

[1] ARCHER, D. R., 2007. The use of flow variability analysis to assess the impact of land use change on the paired catchments, mid-Wales. Journal of Hydrology, roč. 347, č. 3-4, pp 487–496. ISSN 0022-1694.

[2] MALÝ, A., 2009. Vliv rozdílného využití krajiny na srážko-odtokový proces v experimentálních povodích Zbytiny. [Diplomová práce]. KFGG PřF UK, Praha. 151 s.

[3] PAVLÁSEK, J. – MÁCA, P. – ŘEDINOVÁ, J., 2006. Analýza hydrologických dat z Modravských povodí, Journal of Hydrology and Hydromechanics, roč. 54, č. 2, s. 207–216. ISSN 0042-790X.

Kontakty na autora

1 Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přf UK,
e-mail: kliment@natur.cuni.cz, kralovec@natur.cuni.cz

2 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, e-mail: antonin.maly@chmi.cz

56 LET VÝZKUMU SRÁŽKO-ODTOKOVÝCH VZTAHŮ V MALÉM HORSKÉM POVODÍ V BESKYDECH

Milan Bíba[1], Kateřina Janová[1], Zdeněk Vícha[1]

Abstrakt

Vztah srážek a odtoků je velmi těsný a spolu s poměry orografickými a půdními omezuje možný vliv lesních porostů na odtoky vody z povodí. Postupným vyhodnocováním dat získaných dlouhodobým měřením prvků vodní bilance na experimentálním povodí Červík nebyl prokázán signifikantní vliv těžebních a lesopěstebních zásahů na odtoky vody z povodí, a to jak u minimálních průtoků, tak i u kulminací při zvýšených průtocích. Každé horské povodí se specificky liší od jiných (i blízko se nacházejících) podle místních geomorfologických a klimatických podmínek, proto zásadní zobecnění získaných poznatků by vedlo k chybným či nepřesným závěrům. Pro složitost vzájemných vztahů les – půda – voda je potřeba tyto vztahy hodnotit na základě dat naměřených v mnohaletých a homogenních časových řadách. Poznatky z výzkumu vodního režimu v horských lesnatých povodích mohou významně přispět k realistickému pohledu na protipovodňovou ochranu.

Na malém beskydském povodí Červík (CE) probíhá již od roku 1953 unikátní výzkum srážko-odtokových vztahů. Cílem výzkumu bylo sledovat vliv lesa a způsobu jeho obhospodařování na vodní bilanci v pramenných oblastech a prokázat tak hydrologickou účinnost lesa, a také zjistit do jaké míry ovlivňují těžební a pěstební zásahy vodní režim. Již zmíněné experimentální povodí má rozlohu 1,85 km^2 a nachází se v k.ú. Staré Hamry, v nadmořské výšce 640–960 m n. m. Z dřevin zde převažuje smrk (75 %) a buk (24 %). Na základě rozdílů v hospodaření je povodí rozděleno na podpovodí CA (zde byla prováděna intenzivní holosečná obnova) a CB (ponecháno téměř bez zásahů). Kontinuálně jsou zde různými metodami (klasickými i digitálními) měřeny srážky, odtok vody z povodí, ale také teplota vody a teplota a vlhkost vzduchu. Zavedení digitálního měření umožňuje získat data v krátkých (minutových) intervalech a zpřesnit tak data získaná klasickými metodami. Je tak umožněno přesnější určení závislosti odtoků na srážkách, zejména v případě přívalových dešťů s vysokou intenzitou a krátkou dobou trvání. Dlouholetá měření ukázala, že vliv porostních obnov na odtok vody z povodí není příliš významný, a to jak u minimálních průtoků, tak i při zvýšených průtocích. Vysoká vsakovací schopnost lesních půd zůstává i po porostní obnově zachována, retenční schopnost lesa je tedy závislá zejména na retenční kapacitě půdy. Odtoky jsou pak lineárně závislé na srážkách. Vztah srážek a odtoků je velmi těsný a spolu s poměry orografickými a půdními omezuje možný vliv lesních porostů na odtoky. Avšak zejména při běžných srážkových úhrnech je pozitivní role šetrného a racionálního lesního hospodaření velmi důležitá.

Klíčová slova: formování odtoku, gravitačně destabilizované proudění, kapilární síly

Literatura

[1] BÍBA, M. – JAŘABÁČ, M. – VÍCHA, Z., 2006. Findings after the fifty-years long forest-hydrological research in two Beskidian experimental watersheds. Zprávy lesnického výzkumu, svazek 51, č. 1.

[2] BÍBA, M. – OCEÁNSKÁ, Z. – VÍCHA, Z. – JAŘABÁČ, M., 2006. Forest-hydrological research in small experimental catchments in the Beskydy Mountains. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 54, 2.

[3] CHLEBEK, A. – JAŘABÁČ, M., 1995. Forty years of the forest-hydrological research in the Beskydy Mts. 1953–1993. Lesnický průvodce, 2/5. ODIS VÚLHM Praha.

Kontakty na autora

1 Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., Jíloviště-Strnady 136, Praha 5 – Zbraslav, e-mail: biba@vulhm.cz, janova@vulhm.cz, vicha@vulhm.cz

SLEDOVÁNÍ SUCHÉHO OBDOBÍ POMOCÍ TENZOMETRICKÝCH MĚŘENÍ V EXPERIMENTÁLNÍM POVODÍ UHLÍŘSKÁ V JIZERSKÝCH HORÁCH

Alena Kulasová[1], Libuše Bubeníčková[2], Miroslav Tesař [3], Jiří Polívka[3]

Abstrakt

V experimentálním povodí Uhlířská v Jizerských horách se provádí měření půdní vlhkosti pomocí manuálních i automatických tenzometrů. Povodí Uhlířská leží na jižních svazích Jizerských hor v nadmořské výšce cca 800 m. Vybrané lokality na mýtinách i v lese jsou sledovány oběma způsoby od roku 2001, kdy automatické přístroje doplnily původní manuální měření. Manuální odečet se provádí jedenkrát za týden, automaticky jsou hodnoty zaznamenávány po deseti minutách.

Měření probíhá v období vegetace, zpravidla od dubna do října. V letech 2001 až 2006 se vyskytlo několik případů bezsrážkových a teplých období s výraznou odezvou poklesu vlhkosti v půdě a výskytu malých průtoků na Černá Nise.

V příspěvku se zabýváme porovnáním vybraných případů se zaměřením na srážky, vlhkost vzduchu, na teplotu vzduchu i teplotu v půdě a sací tlaky měřené automatickými tenzometry v různých půdních horizontech (15, 30, 45 a 60 centimetrů) pod travním a lesním porostem. Výběr období byl řízen výskytem minimálních průtoků v závěrovém limnigrafickém profilu Uhlířská o ploše povodí 1,87 km^2. Nejdéle se vyskytovaly minimální průtoky (menši než Q_{300d}) v roce 2003 a to od konce července s krátkými přerušeními do konce října (celkem 111 dní), které dále klesaly k nižším průtokovým hodnotám. V roce 2002, 2004 a 2006 bylo trvání minimálních průtoků cca poloviční, v roce 2001 a 2005 se minima nevyskytovala.

V porovnání roku 2002 a 2003 byly z počátku sací tlaky podobné, avšak v roce 2002 po extrémní srpnové srážce došlo k nárazovému nasycení půdního profilu a proto ani v závěru vegetačního období nedosáhly tak extrémních hodnot jako v roce 2003, kdy se srážky nevyskytovaly. V tomto extrémním suchém roce byly dosahovány nejvyšší sací tlaky v lesním profilu. Měření prokázala, že vzrostlý les v delším období sucha vyčerpává půdní vláhu i z hlubších půdních horizontů.

Pozorování v jednotlivých suchých obdobích jsou na mýtinách a v lese porovnány graficky na příslušném posteru.

Klíčová slova: srážky, teplota vzduchu, teplota v půdě, sací tlaky v půdě, tenzometrická měření

Literatura

[1] Databáze klimatologických a hydrologických měření 2001-2006, ČHMÚ

[2] Databáze tenzometrických měření 2001-2006, ÚH ČSAV

Kontakty na autora

1 Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.M., Praha, e-mail: alena.kulasova@vuv.cz

2 Český hydrometeorologický ústav, Praha, e-mail: bubenickova@chmi.cz

3 Ústav pro hydrodynamiku ČSAV, Praha, e-mail: miroslav.tesar@iol.cz, assax@iol.cz

SEKCE 3

ZMĚNY V INTERAKCÍCH PODPOVRCHOVÝCH A POVRCHOVÝCH VOD

INTERAKCE PODZEMNÍCH A POVRCHOVÝCH VOD V KVARTÉRNÍCH A KŘÍDOVÝCH RAJONECH

Petr Ferbar[1], Zdeněk Herrman[2]

Abstrakt

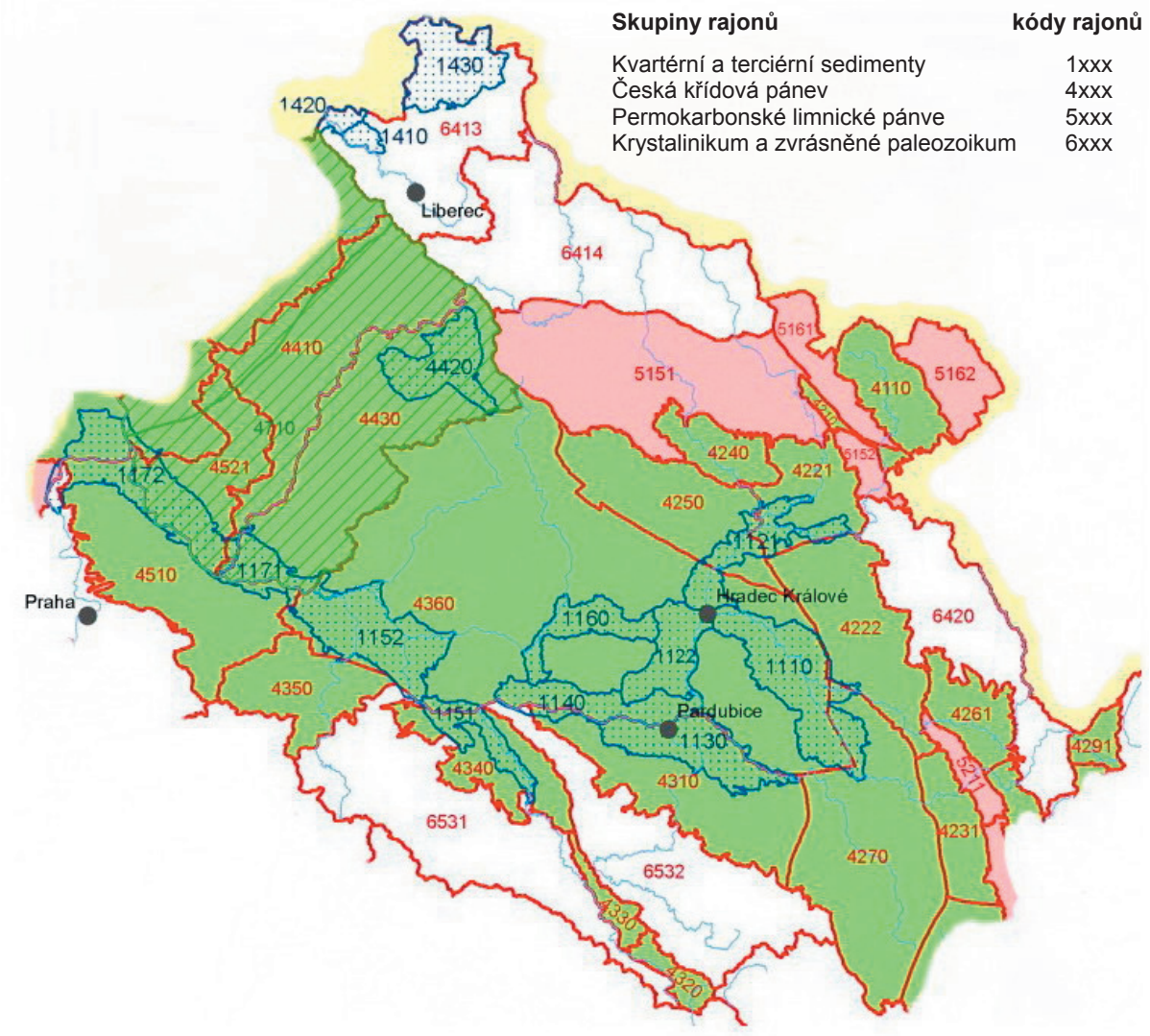
Interakce podzemních a povrchových vod je důležitým, avšak často podceňovaným fenoménem ve vodním hospodářství. K významné výměně vody mezi kolektory podzemních vod a povrchovými toky dochází zejména u velmi propustných vrstevních kolektorů. V oblasti povodí Horního a středního Labe jsou tyto kolektory vyvinuty zejména v křídových pánvích a kvartérních sedimentech. Pro identifikaci výměny vody mezi kolektorem podzemních vod a povrchovým tokem byla použita analýza konfigurace hladiny podzemní vody v mapách hydroizopiez, analýza strukturních poměrů kolektorů a výsledky hydraulických modelů. Ke zpracování všech informací byl použit informační systém GIS na platformě MapInfo, kde byly kombinovány informace z různých vrstev (vrstvy útvarů podzemních vod, vrstvy útvarů povrchových vod apod.). Výsledkem analýzy byla identifikace ztrátových úseků a příronových úseků toků v pánevních kolektorech, tedy míst dotace podzemních vod vcezem do kolektoru a míst odvodnění kolektorů přírone do toku. Současně byly vymezeny části toků obklopené mocnými štěrkopískovými náplavy, ve kterých je podzemní voda v hydraulické spojitosti s tokem při časově proměnné výměně vody mezi tokem a kolektorem. Tyto informace jsou základním a důležitým materiálem pro rozhodování, sestavení konjunktivní vodohospodářské bilance, předpovědi šíření případné kontaminace z toku do kolektoru a naopak, vytipování mokřadních systémů závislých na dotaci podzemní vodou, stanovování zásob vod apod. Údaje o místech, kde dochází k těmto vzájemným interakcím byly rovněž v podobě informačních vrstev implementovány do geografického informačního systému (GIS), který je propojen s účelovými databázemi a poskytuje tak ucelenou informaci pro rozhodování.

Klíčová slova: interakce, rajon, kvartér, křída, povodeň, sucho

1. Úvod

V rámci koloběhu vody v přírodě je nutno chápat povrchové a podzemní vody jako dvě formy sestupné cesty srážkové vody z výše položených míst do míst níže položených, případně až do oceánu. Rozdíl je pouze v rychlosti postupu a prostorovém chápání jejich existence. V dřívějších dobách převládalo spíše chápání povrchové a podzemní vody jako dvou oddělených entit. Podzemní vody byly považovány za statické suroviny nezávislé na povrchové vodě. Pochybnosti nastaly v souvislosti s významnými odběry podzemních vod, které měly za následek redukci či úplnou ztrátu průtoku v okolních povrchových tocích (začalo se uvažovat o určité hydraulické spojitosti). Nověji se v rámcové směrnici WFD rozdíl odstranil a podzemní i povrchová voda jsou chápány jako součást jednotného oběhu.

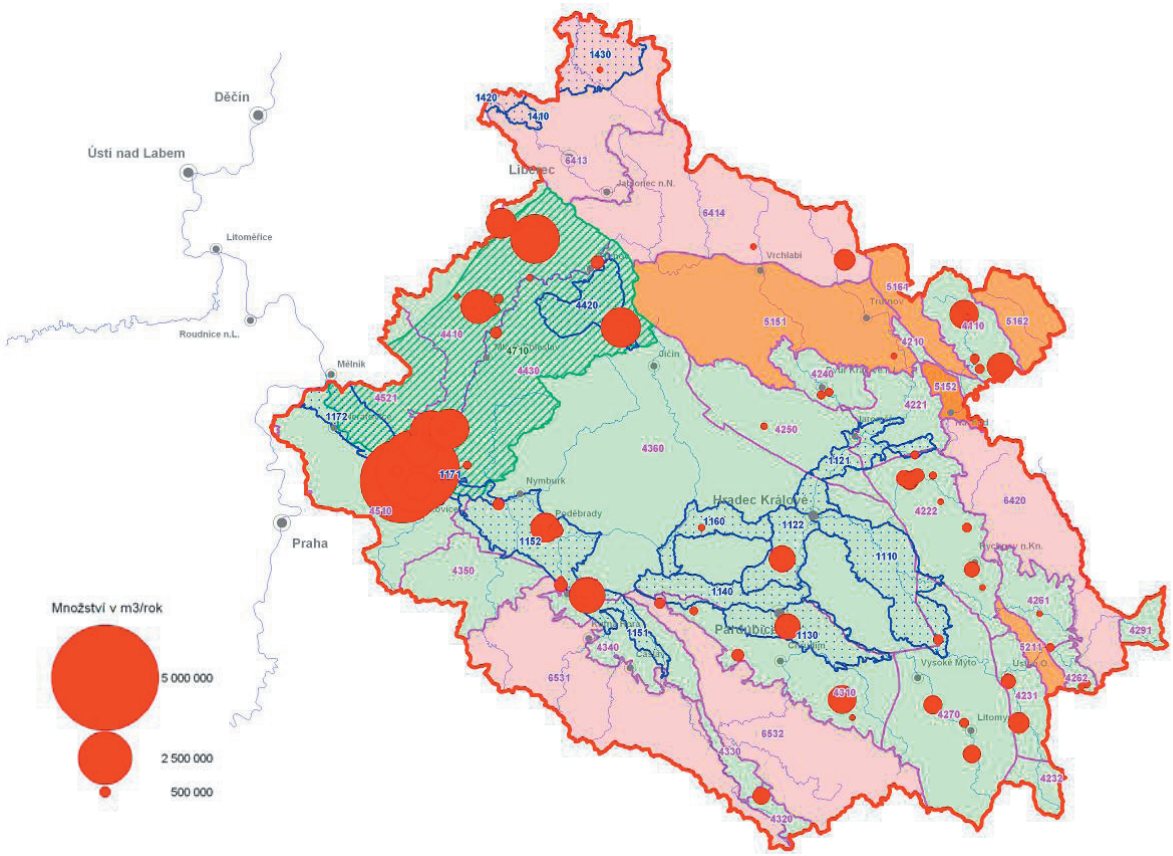
Oblast povodí Horního a středního Labe, kterou včetně dolního úseku toku Labe (Mělník – státní hranice) spravuje Povodí Labe, státní podnik má z hydrogeologického hlediska charakter kotliny s centrální křídovou pánví s pokryvem kvartérních říčních sedimentů. Horská pásma tvoří zejména krystalinika, při jejichž úpatí se rozkládají permské pánve. Hydrogeologické rajony se dají rozdělit do 4 skupin: 1 – Kvartérní a terciérní sedimenty, 2 – Česká křídová pánev, 3 – Permokarbonské limnické pánve, 4 – Krystalinikum a zvrásněné paleozoikum (Obr. 1).



Obr. 1: Hydrogeologické rajony (rajonizace 2006) v oblasti povodí Horního a středního Labe.

Nejvíce zastoupenou a zároveň nejvýznamnější skupinou rajonů jsou křídové rajony, zejména zvrásněné okrajové synklinály, které disponují největšími zdroji podzemní vody (např. Podorlická synklinála, Kyšperská synklinála, Vysokomýtská synklinála, Ústecká synklinála apod.). Druhými největšími zásobárnami podzemní vody jsou v dané oblasti kvartérní rajony, kde je zvodnění vázáno na fluviální sedimenty v podobě štěrků a písků. Z hlediska jejich využitelnosti je však někdy problém s její zhoršenou jakostí vlivem antropogenní činnosti ve spojení s vysokou zranitelností tohoto kolektoru. Převážná část těchto rajonů je situována okolo významného vodního toku Labe a jeho neméně významných přítoků (Úpa, Metuje, Orlice, Loučná, Doubrava). Odlišné jsou kvartérní rajony v povodí Lužické Nisy, jejichž výplň tvoří převážně glacifluviální sedimenty.

Pro představu a orientaci o množství vody, se kterým se nakládá v rámci územní, které spravuje Povodí Labe, státní podnik uvádíme následující fakta: Za rok 2008 činily vodárenské odběry z podzemních zdrojů, resp. odběry podzemních vod pro pitné účely více jak 88 % (tj. 101,4 mil. m^3 vody) ze všech odebraných podzemních vod. Celkový odběr podzemních vod za rok 2008 tedy činil 114,9 mil. m^3, tj. cca 3,64 $m^3.s^{-1}$ (FERBAR, P., 2009). Drtivá většina odebraných podzemních vod je soustředěna právě do významných křídových jednokolektorových či vícekolektorových, často artésky zvodnělých okrajových struktur (Obr. 2). Odběry povrchových vod představovaly v roce 2008 celkem 820,7 mil. m^3 vody, avšak z toho pro pitné účely bylo pouze 39,3 mil. m^3 vody, tj. 4,9 % (FERBAR, P. et al. 2009).



Obr. 2: Rozložení odběrů podzemních vod v oblasti povodí Horního a středního Labe.

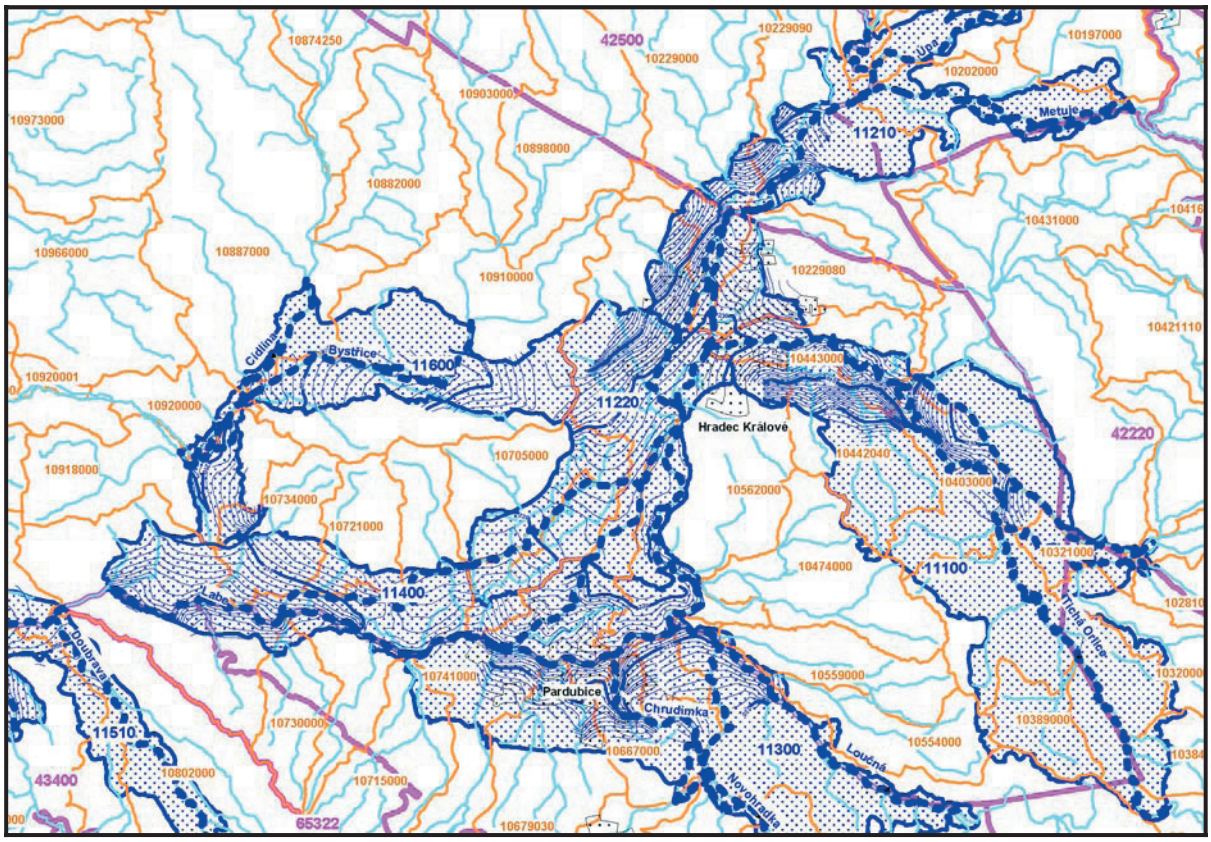
2. Interakce povrchových a podzemních vod

K výměně podzemní a povrchové vody dochází hlavně u velmi propustných vrstevných kolektorů v křídové pánvi a ve fluviálních, či glacifluviálních kvartérních sedimentech, proto byla pozornost zaměřena na identifikace míst výměny vody mezi kolektorem a povrchovými toky v kvartérních sedimentech a ve vybraných křídových sedimentech. Hydrogeologické rajony v krystaliniku a permokarbonských limnických pánvích se plynule odvodňují do nejbližší vodoteče, významné příronové úseky jsou vázány na tektonické linie.

2.1. Interakce podzemních a povrchových vod v rámci kvartérních rajonů

Na tocích ve fluviálních sedimentech nebyly identifikovány ztrátové a příronové úseky, neboť za normálních podmínek převládá příron podzemní vody z údolní terasy a vyšších teras do hlavní vodoteče. Při zvýšení hladiny dochází ke změně směru výměny a voda z toku se vcezuje do kolektoru a tok je jakoby ztrátový. V průběhu času je tedy tok jak příronový, tak I ztrátový. Vodoteče ve fluviálních sedimentech, ve kterých dochází k této výměně vody, byly zařazeny do toků v hydraulické spojitosti s kolektorem (Obr. 3).

Praktické využití znalostí o interakci podzemních a povrchových vod se uplatnilo při hodnocení výměny vody mezi fluviálním kolektorem údolní terasy a tokem za povodně na Labi v roce 1997. Využitím podrobného studia režimu hladin ve vrtech převážně v údolní nivě a nižších terasách bylo zjištěno, že velký objem vody zdržené v kolektoru vyvolal významnou transformaci povodňové vlny. Při povodni došlo k akumulaci podzemní vody v řádu desítek milionů m^3 vody, která se následně pozvolna ještě několik měsíců uvolňovala do toku. Studium podílu změn zásob podzemní vody na objemu říčního odtoku naznačilo, že změna objemu zásob podzemní vody v aluviálním kolektoru může snížit vrchol povodňové vlny (až o 1/3), zpozdit kulminaci vlny a protáhnout její sestupnou větev.

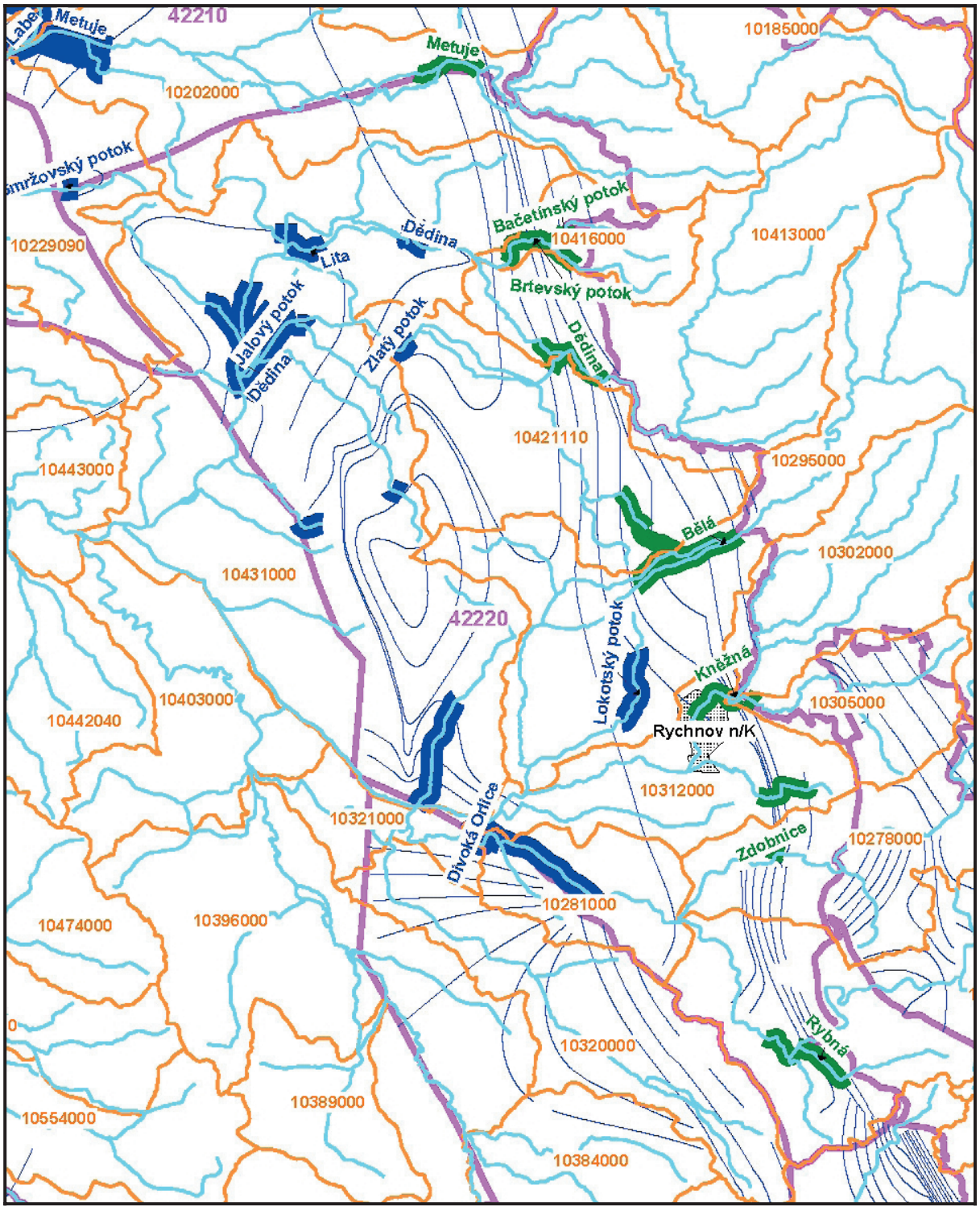


Obr. 3: Toky v hydraulické spojitosti s rajony podzemních vod (silná přerušovaná čára).

2.2. Interakce podzemních a povrchových vod v rámci křídových rajonů

Příronové a ztrátové úseky v křídových rajonech byly identifikovány na základě map hydroizopiez sestavených v rámci "Hydrogeologické syntézy české křídové pánve" (HERČÍK, F. et al., 1987). Tyto obrazy proudových systémů byly většinou následně verifikovány hydraulickým modelováním.

Pro příklad identifikace míst výměny podzemní a povrchové vody zde byl vybrán jeden z nejvýznamnějších hydrogeologických rajonů v oblasti povodí Horního a středního Labe, kterým je původní rajon 422 Podorlická křída, dnes dle nové rajonizace (2006) rozdělen na dva rajony – 4221 Podorlická křída v povodí Úpy a Metuje a 4222 Podorlická křída v povodí Orlice (OLMER, M. et al., 2005). Jedná se o mělkou, na jihu hlubší, křídovou pánev mezi krystalinikem Orlických hor a libřickou a potštejnskou antiklinálou. Nejvýznamnějším a vodárensky značně využívaným kolektorem je zde puklinově propustný kolektor B, vyvinutý v bělohorském souvrství, stáří spodního turonu (prachovce, slínovce a též spongolity). Průměrná mocnost kolektoru činí cca 30 – 40 m, průtočnost kolektoru je vysoká až velmi vysoká. Charakter uložení tohoto kolektoru způsobuje členění zvodnění na oblasti stoku a oblast nádrže. Nejvýznamnější oblasti stoku jsou při zdviženém severním a východním okraji rajonu a dále strukturní elevace libřické a potštejnské antiklinály. Nádrž podzemní vody má plochu hladiny o výšce 260 – 280 m n. m. v povodí Labe a Dědiny a 290 – 310 m n. m. v povodí Divoké Orlice. K dotaci srážek přitom dochází infiltrací srážek na výchozech kolektoru, nebo též vcezem z toků přitékajících z Orlických hor. Odběry z Podorlické křídy tvoří posledních několik let průměrně cca 350 $l.s^{-1}$, značná část odběrů je z prameniště „Litá" a „Mokré", ležící v blízkosti významné lokality – alkalického mokřadu přírodní rezervace „Zbytka". Svými několika artéskými vrty patří mezi zásadní a strategické zdroje dotující Vodárenskou soustavu Východní Čechy (VSVČ), na kterou je celkem připojeno téměř půl milionu obyvatel (470 tis. obyvatel).

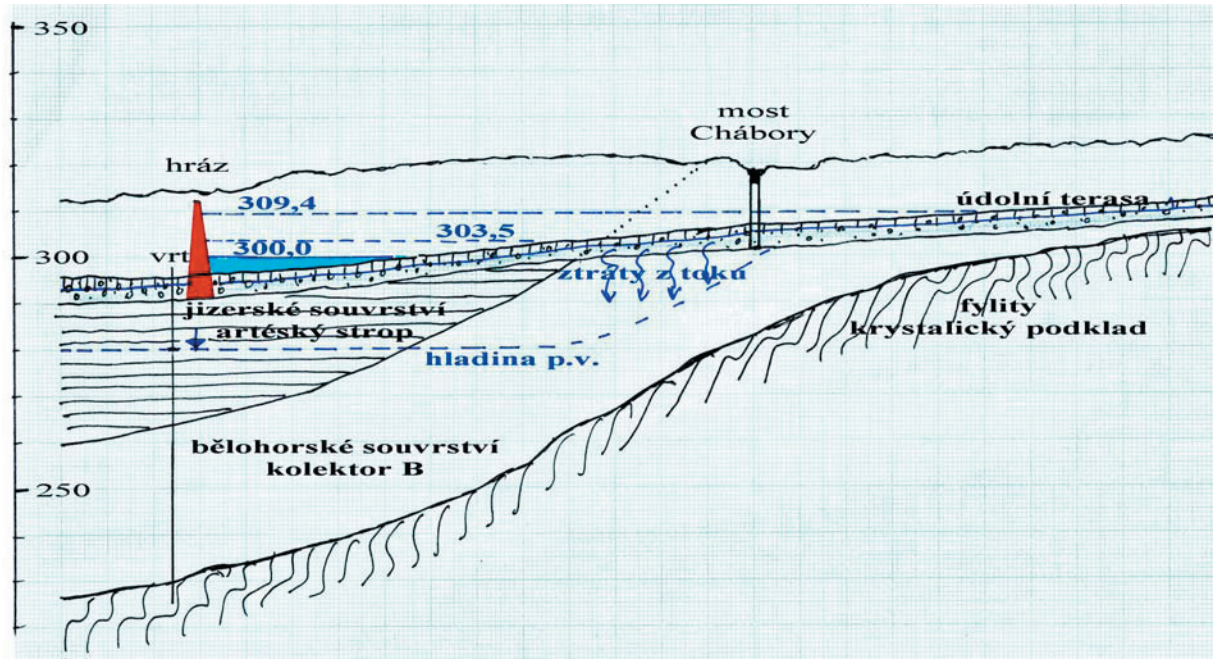


Obr. 4: Přírůnové a ztrátové úseky v HG rajonu 4222 Podorlická křída v povodí Orlice – ztrátové úseky = tučná zelená (čb. světlá) linie, přírůnové úseky = tučná modrá (čb. tmavá).

V rámci jižní části rajonu Podorlické křídy (rajon 4222) byly identifikovány ztrátové úseky zejména na toku Dědina v oblasti Chábor, dále horní části toků Bělá, Kněžná, Zdobnice a Rybná v místech přítoku z krystalinika Orlických hor do Podorlické křídové pánve (Obr. 4). Naopak přírůnové úseky byly identifikovány na Divoké Orlici, Zlatém potoce, Lité a též Dědině, zejména pak při západní hranici tohoto rajonu.

Opět dobré znalosti o hydrogeologickém prostředí a místech interakce povrchových a podzemních vod vedly k myšlence využití řízené dotace podzemních vod z povrchového

toku Dědina do vodohospodářsky významného křídového kolektoru B při projektování vodní nádrže Mělčany (tj. VD Mělčany). V případě klimatické změny bude obecně třeba nezbytné zabývat se otázkou možnosti posílit dotaci podzemních vod řízeným zasakováním říční vody do kolektoru podzemních vod, zejména v oblastech intenzivního využívání těchto vod. Pro tento účel, jak již bylo výše zmíněno, byla mimo jiné plánována i vodní nádrž Mělčany na Dědině, jejíž prvotní a nejdůležitější účel bylo zajištění protipovodňové ochrany, což vzešlo z ničivých povodní na Dědině v roce 1998, dále pak pro nadlepšování minimálních průtoků atd. V rámci provedené studie o možnostech doplňování zásob podzemních vod z VD Mělčany byly vytipovány 2 místa (Obr. 5), kde přírodní podmínky umožňují řízenou dotaci vody do křídového kolektoru (pod mostem v Cháborech – dotace přes štěrky a pod hrází VD Mělčany – přímá dotace do kolektoru). Velikost dotace by mohla dosáhnout až hodnoty okolo 100 $l.s^{-1}$, což by se jevilo jako významné posílení zdrojů podzemních vod (HERRMANN, Z., 2005). Hlavními výhodami využití kolektoru pro „uskladnění“ vody v obdobích sucha proti nádrži povrchové vody je ochrana krajiny (voda v kolektoru nezabírá žádné území), zamezení ztrát výparem z kolektoru a zlepšení kvality vody filtrací v hornině. V mnoha zemích světa prochází myšlenka využití řízené dotace podzemních vod (MAR – Management of Aquifer Recharge) na rozdíl od ČR intenzivním rozvojem. Umělá infiltrace povrchových vod do vod podzemních ale není v ČR úplnou neznámou, využívána je již řadu let na klasických zdrojích ve vodárně Káraný, kde je povrchová voda z Jizery uměle infiltrována do štěrkopísků a odtud následně zpětně exploatována pro vodárenské využití.



Obr. 5: Hydrogeologický řez a situace v podzákladí VD Mělčany.

3. Závěr

Hlavním cílem prací vedoucích k identifikaci míst interakce podzemních a povrchových vod bylo získat dostatek informací v tomto oboru, které nám usnadní proces rozhodování ve vodním hospodářství, možnost sestavení konjunktivní vodohospodářské bilance, předpovědi šíření případné kontaminace z toku do kolektoru a naopak, stanovování zásob vod, vytipování mokřadních systémů závislých na dotaci podzemní vodou, vytipování míst vhodných pro umělou, resp. řízenou dotaci podzemních vod do vod povrchových, případně i orientační kvantifikaci transformace povodňové vlny v rámci údolní nivy apod. Pro zpřesnění identifikace míst interakce a kvantifikaci množství vody podílející se na výměnách je však třeba do budoucna další cílený terénní průzkum nejlépe v rámci regionálního hydrogeologického průzkumu, či v rámci dalších souvisejících dílčích projektů.

Literatura:

[1] FERBAR, P., 2009. Vodohospodářská bilance za rok 2008. Zpráva o hodnocení množství a jakosti podzemních vod pro území ve správě Povodí Labe, státní podnik. - MS Povodí Labe, státní podnik, Hradec Králové.

[2] FERBAR, P. – HAVRÁNEK, L. – SKALICKÁ, I., 2009. Vodohospodářská bilance za rok 2008. Zpráva o hodnocení množství povrchových vod pro území ve správě Povodí Labe, státní podnik. – MS Povodí Labe, státní podnik, Hradec Králové.

[3] HERČÍK, F. – HERRMANN, Z. – NAKLÁDAL, V., 1987. Hydrogeologická syntéza české křídové pánve. – MS Stavební geologie, Praha.

[4] HERRMANN, Z., 2005. Vodní nádrž Mělčany - ovlivnění podzemních vod - MS AQUATEST, Praha.

[5] OLMER, M. – HERRMANN, Z. – KADLECOVÁ, R. – PRCHALOVÁ, H., 2006. Hydrogeologická rajonizace České republiky. Sborník geologických věd, HIG 23, Česká geologická služba, Praha.

[6] Plán oblasti povodí Horního středního Labe. Povodí Labe, státní podnik. Dostupné na: http://www.pla.cz/planet/projects/planovaniov/

[7] Plán rozvoje vodovodů a kanalizací Královéhradeckého kraje. Dostupné na: http://mapy.kr-kralovehradecky.cz/vak/

[8] RÁMCOVÁ SMĚRNICE O VODĚ. 2000. Směrnice 2000/60/ES Evropského parlamentu a Rady z 23. října 2000 ustavující rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky. Dostupné na: http://www.mze.cz/attachments/Rámcová_směrnice.pdf

Kontakty na autora

1 Povodí Labe, státní podnik, e-mail: ferbar@pla.cz

2 Česká geologická služba, e-mail: herraqua@tiscali.cz

STANOVENÍ ZÁKLADNÍHO ODTOKU AUTOMATICKOU SEPARACÍ HYDROGRAMU

***Radek Vlnas*[1]**

Abstrakt

Příspěvek shrnuje poslední vývoj v oblasti digitální filtrace hydrogramu a představuje výsledky separace základního odtoku pomocí dvouparametrického Eckhardtova filtru. Dále podává srovnání s dříve používanou metodou podle Klinera a Kněžka.

Klíčová slova: základní odtok, automatická separace, výtoková čára

1. Úvod

Podle Rámcové směrnice o vodách a navazujících právních předpisů vyhodnocuje ČHMÚ každoročně velikost základního odtoku v měsíčním kroku. Tyto údaje představují limitní hodnoty pro různé aktivity v oblasti hospodaření s vodními zdroji, jakými jsou například odběry vody pro průmysl, domácnosti nebo zavlažování nebo pro hodnocení množství a kvality vody. Porozumění procesu tvorby této složky odtoku je výhodné při stanovení hydrologické bilance. Informace o průběhu základního odtoku jsou užitečné při kalibraci hydrologických modelů, protože fluktuace základního odtoku do značné míry ovlivňuje shodu celkového měřeného a modelovaného odtoku.

Častou metodou stanovení základního odtoku je analýza hydrogramu. V současnosti vývoj v této oblasti směřuje k využívání metod separace hydrogramu s vysokým podílem automatizace zpracování dat. Vysoké míry objektivity takového postupu je dosaženo použitím pevně stanovených parametrů, které jsou zárukou konzistentního řešení. Kvalita dat v oblasti nízkých průtoků je ovšem i při analýze hydrogramu velmi často omezujícím faktorem.

2. Filtrace hydrogramu

Hall definuje základní odtok jako složku celkového odtoku jejímž zdrojem je podzemní voda [1]. Výtoková čára je částí poklesové větve hydrogramu v bezsrážkovém období. Podle Boussinesqovy rovnice [2] předpokládající chování zásoby podzemní vody jako lineární nádrže pro tuto část hydrogramu platí:

$$S = kQ \tag{1}$$

kde S je zásoba podzemní vody, Q je odtok, k je výtokový koeficient. V souladu s Hallovou definicí může být odtok Q v případě rezervoáru podzemní vody ztotožněn se základním odtokem bf .

Rovnici výtokové čáry odvodili kolem roku 1904 Maillet [3] a Horton [4]:

$$Q_t = Q_0 \cdot \exp(-t/k) \tag{2}$$

kde Q_t je odtok v čase t, Q_0 je počáteční odtok. Za předpokladu konstantního časového kroku může být výraz $\exp(-1/k)$ nahrazen parametrem a a pro po sobě jdoucí časové kroky pak platí:

$$Q_i = aQ_{i-1} \tag{3}$$

kde i je časový krok. Wittenberg a Sivapalan [5] zjistili, že parametr a odvozený pro různé oblasti odtoku není konstantní, ale zvyšuje se s poklesem hydrogramu, což znamená, že v praxi je vztah mezi zásobou a odtokem často nelineární. Zavedli tudíž nelineární vztah ve tvaru

$$S = kQ^b \tag{4}$$

Exponent b má šikmé rozdělení pravděpodobnosti s modem 0,3 a 0,4 s střední hodnotou b = 0,5. Wittenberg [6] také odvodil tvar rovnice (3) pro tento nelineární vztah.

Výše uvedené vztahy však popisují pouze část sestupné větve hydrogramu, kdy vlivem absence infiltrace nedochází k dotaci zásob podzemní vody. Otázkou tedy je, jakým způsobem stanovit vztah pro odtok podzemní vody i v obdobích dotace a zvětšování průtoku vody v toku.

Použití digitální filtrace k separaci základního odtoku jako první navrhli Lyne a Hollick [7], kteří aplikovali teorii separace signálu rozdílné frekvence. Přes dodatečné úpravy dalšími autory však bylo faktem, že filtrace postrádala fyzikální základ týkající se výtoku z nádrže a poskytovala základní odtok s konstantní hodnotou $\mathrm{BFI} = 0{,}5$. Parametr BFI je podíl základního a celkového odtoku a pohybuje se v rozmezí od 0,2 ve slabě rozrušených horninách krystalinika až po 0,8 v sedimentech České křídové tabule.

Eckhardt [8] následně odvodil rovnici filtrace za předpokladu platnosti lineárního vztahu mezi zásobou podzemní vody a odtokem i v oblasti hydrogramu mimo výtokovou čáru:

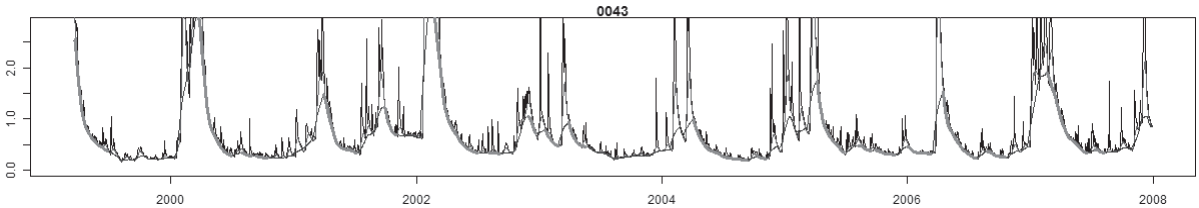
$$bf_i = \frac{(1-\mathrm{BFI}_{\max})a.bf_{i-1} + (1-a)\mathrm{BFI}_{\max}Q_i}{1-a\mathrm{BFI}_{\max}} \tag{5}$$

kde bf je základní odtok, Q je celkový odtok, a je parametr, $\mathrm{BFI}_{\max}$ je maximální baseflow index a i je časový krok.

3. Odvození parametrů

Eckhardtův filtr byl testován na souboru 206 vodoměrných stanic v denním kroku v období 1971–2003.

Parametr a může být vyjádřen pomocí výtokového koeficientu k z rovnice (2). Čili tento parametr může být odvozen z analýzy výtokových čar. K tomu účelu byl vyvinut program inspirovaný prací Rutledge [9, 10]. Vzhledem k tomu, že i evidentní období recese jsou v záznamu hydrogramu často přerušována vlivem krátkodobé srážkové činnosti popř. odběrů vody a podobně, lze doporučit vyhlazení časové řady pomocí sekvence klouzavých 11 denních minim a 31 denních středních hodnot. Části na začátku takto stanovených výtokových čar jsou ovlivněny hypodermickým odtokem a části na konci pak často nepřesnostmi ve vyhodnocení nízkých průtoků. Tyto části jsou tudíž z analýzy vynechávány (Obr. 1)

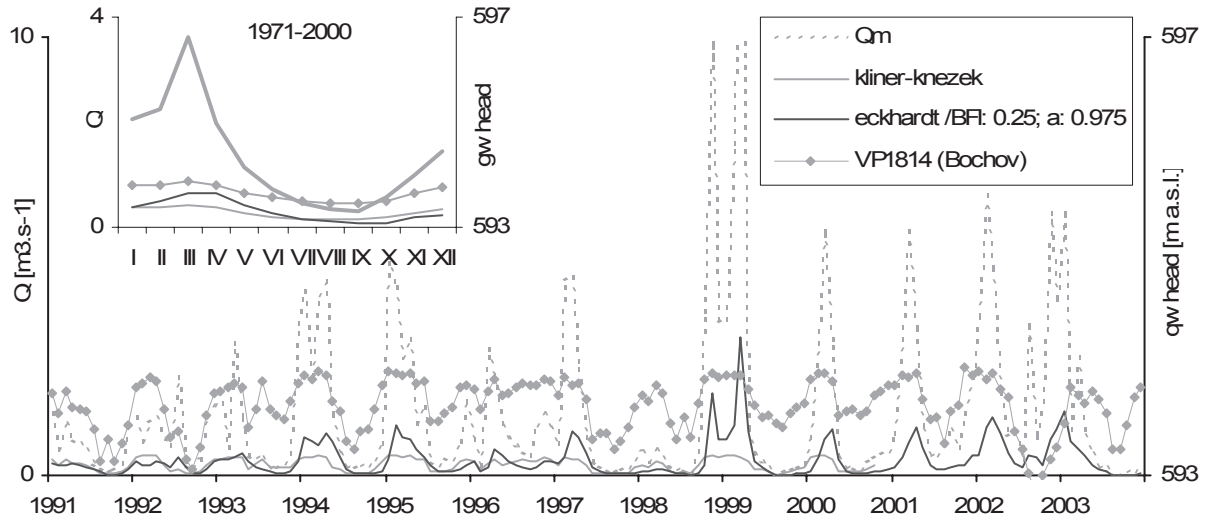


Obr. 1: Analýza výtokové čáry ve stanici 0043 Chotěvice. Slabá černá čára je průměrný denní průtok, silná šedá značí identifikované výtokové čáry.

Parametr BFI_{max} je maximální poměr základního a celkového odtoku. Tento parametr lze odladit pomocí manuální kalibrace. Nejvhodnější BFI_{max} je obvykle taková hodnota, při níž je přirozeně splněna podmínka, že základní odtok je menší než celkový a současně separovaný základní odtok sleduje průběh výtokové čáry. Porovnáním takto dosažených hodnot BFI_{max} s hydrogeologickou rajonizací ukázalo velmi dobrou shodu s litologií povodí.

4. Srovnání metod

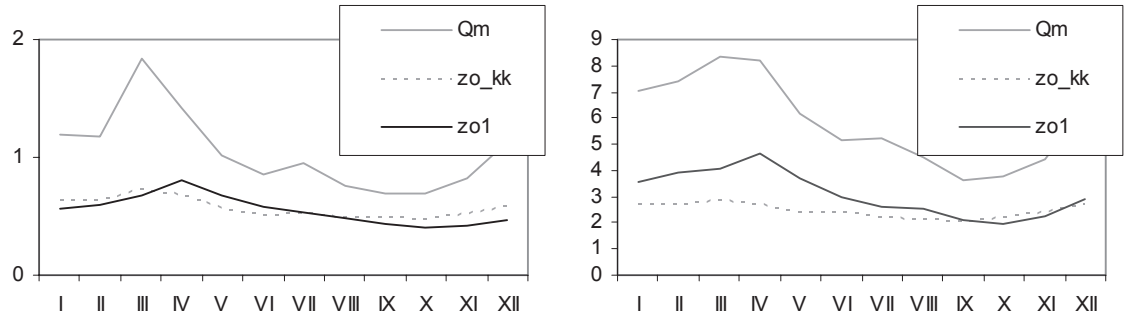
Separace základního odtoku filtrací hydrogramu podle Eckhardta je poměrně objektivní: parametr a lze odvodit analýzou výtokových čar a BFI_{max} je možné kalibrovat podle průběhu celkového a základního odtoku s přesností do 10 %. Oproti tomu je dříve používaná podle Kliner Kněžkova metoda více subjektivní. Velmi záleží na individuálním rozhodnutí zpracovatele jak určí vztah mezi hladinou vody ve vrtu a odtokem. Kromě toho je metoda velmi citlivá na výběr odpovídající objektu vrtu nebo pramene. Fakt že metoda zahrnuje pozorování podzemní vody je nesporně výhodou. Odpovídající objekt sledování režimu podzemní vody je však často obtížné nalézt. Příklad separace oběma metodami podává Obr. 2. Nejbližší vhodný objekt pozorování podzemní vody je v tomto případě v povodí Teplé v nivě Lomnického potoka, které sousedí s povodím Úterského potoka (krystalinikum), ale je orientováno na sever. Maximální úrovně hladiny ve vrtu jsou konstantní v celém období. Dokonce i v roce 2002 během katastrofálních povodní nepřekročila úroveň hladiny maximum z jiných let. To znamená, že bez ohledu na intenzitu dotace podzemní vody poskytuje v tomto případě metoda Klinera a Kněžka také hodnoty shora omezené tímto maximem. Z grafu je zřejmé, že více než stav podzemní vody v povodí sleduje vrt pouze lokální procesy v návaznosti na aktuální hladinu vody v toku.



Obr. 2: Srovnání měsíčních hodnot základního odtoku ve stanici 1750 Trpísty (Úterský p.) odvozených metodou Klinera a Kněžka a digitální filtrací hydrogramu podle Eckhardta. VP 1814 je vrt použitý pro separaci podle metody Klinera a Kněžka. Qm je celkový odtok.

5. Závěr

Eckhardtova metoda separace základního odtoku byla testována na sadě 206 vodoměrných stanic v období 1971–2003. Pro 30 stanic bylo současně provedeno srovnání s výsledky dosaženými pomocí metody Klinera a Kněžka. Výsledky obou metod se v lepších případech liší v rozmezí do 10 % vzhledem k celkovému odtoku (Obr. 3A). Mnohem větší rozdíly byly zaznamenány ve stanicích, kde objekt sledování podzemní vody není z různých příčin vhodný (Obr. 3B). Lze tedy předpokládat, že Eckhardtovu metodu separace základního odtoku lze rutinně používat pro potřeby ČHMÚ.



Obr. 3A: 0170 Maršov nad Metují (Metuje), Obr. 3B: 1830 Štěnovice (Úhlava), zo1 je základní odtok separovaný pomocí Eckhardtova filtru, zo_kk metodou Klinera a Kněžka.

Poděkování
Tato práce byla podpořena grantem Ministerstva životního prostředí ČR „Zákonitosti interakce systému voda/hornina/krajina a jejich využití při ochraně podzemních vod v České republice“ (VaV SP/2e1/153/07).

Literatura

[1] HALL, F.R., 1968. Base flow recession - a review. Water Resources Research 4(5), pp 973-983.

[2] BOUSSINESQ, J., 1877. Essai sur la théorie des eaux courantes. Mém. prés. par divers savants à l’Acad. des Sci. de l’Inst. Nat. de France, 23., 680 p.

[3] MAILLET, E., 1905. Essais d’Hydraulique Souterraine et Fluviale. Hermann, Paris. 218 p.

[4] HORTON, R. E., 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. Trans. Am. Geophys. Union 14. pp 446–460.

[5] WITTENBERG, H. – SIVAPALAN. M., 1999. Watershed groundwater balance estimation using recession analysis and baseflow separation. Journal of Hydrology 219, pp 20–33.

[6] WITTENBERG, H., 1999. Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes. Hydrological Processes 13, pp 715–726.

[7] LYNE, V. D. – HOLLICK, M., 1979. Stochastic time-variable rainfall runoff modelling. Hydrology and Water Resources Symposium, Institution of Engineers Australia, Perth, pp 89–92.

[8] ECKHARDT, K., 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. Hydrological Processes 19, pp 507–515.

[9] RUTLEDGE, A. T., 1998. Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from stream flow records. USGS WRIR. 98–4148.

[10] RUTLEDGE, A. T., 2007. RECESS: A computer program for analysis of streamflow recession [online]. USGS, WWW: http://water.usgs.gov/ogw/recess/

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav Praha, e-mail: vlnas@chmi.cz

VYHODNOCENÍ A MODELOVÁNÍ ČASOVÝCH ŘAD OBJEKTŮ PODZEMNÍCH VOD S DLOUHODOBÝM A STŘEDNĚDOBÝM CHODEM

Vladimír Sosna[1]

Abstrakt

S pomocí koeficientu ročního chodu je možné časové režimy výšek hladin ve vrtech a vydatností pramenů roztřídit do tří kategorií. Na objekty s výrazným ročním chodem, s dlouhodobým chodem a na směs obou typů režimů. Časové režimy s dlouhodobým a smíšeným chodem lze modelovat například pomocí pololetních úhrnů srážek metodou vícenásobné lineární regrese nebo neuronovou sítí. Nejdůležitější využití modelů je predikce časového režimu výšek hladin ve vrtech nebo vydatností pramenů.

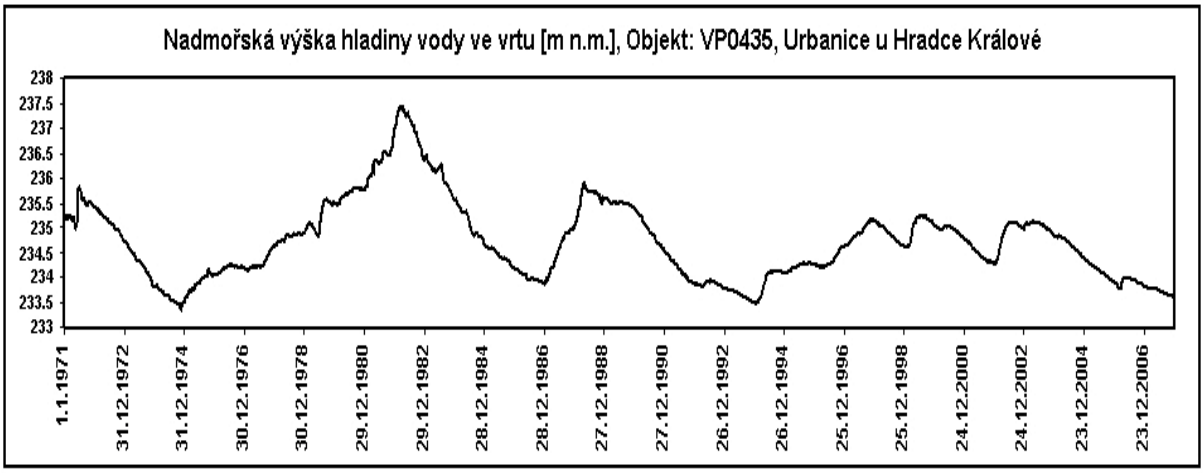
Klíčová slova: podzemní vody, statistická analýza časových řad, dlouhodobý chod, koeficient ročního chodu, modelování, vícenásobná lineární regrese

1. Základní vlastnosti časových řad vrtů

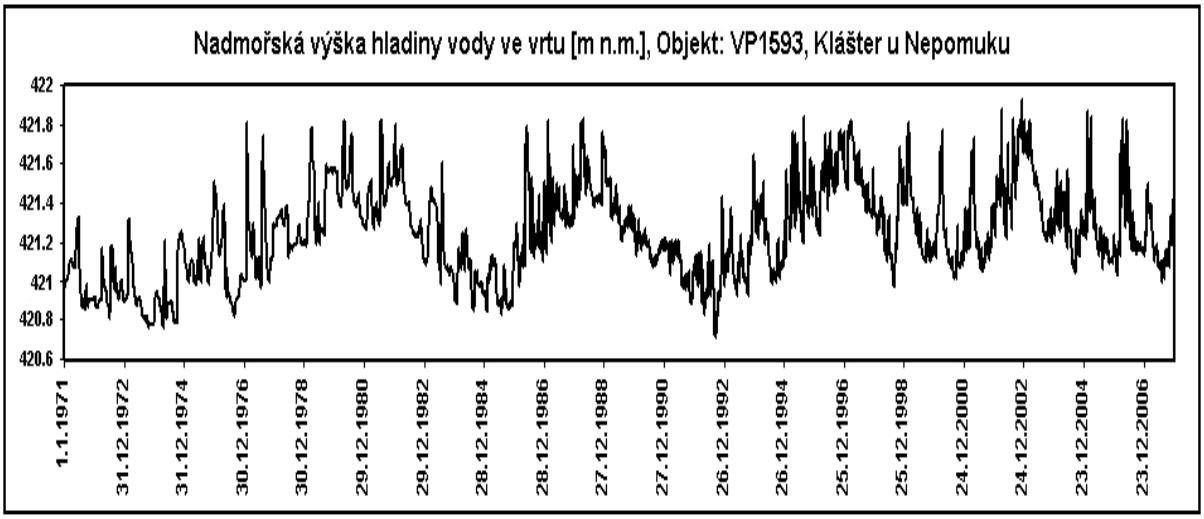
Časový režim výšek hladin vody ve vrtech je užitečné rozdělit na tři složky. První představuje dlouhodobé kolísání hladin. Nejlépe se charakterizuje pomocí časové řady ročních mediánů (použití průměrů je nevhodné pro malou robustnost této statistiky a sešikmení dat). Druhou představuje roční chod hladin a třetí tvoří velmi krátkodobé děje (vliv vydatných srážek, krátkodobé čerpání v blízkosti objektu, vliv blízkého toku a podobně). Pro srovnání jsou na prvních třech obrázcích uvedeny grafy časových řad týdenního měření výšky hladiny vody ve vrtech, které se liší mírou zastoupení ročního chodu. První objekt Obr. 1 VP0435 Urbanice je typickým zástupcem vrtu s dlouhodobým chodem, druhý objekt Obr. 2 VP1593 Klášter má částečně potlačený roční chod a převládá dlouhodobý. Poslední objekt Obr. 3 VP0663 Březno má naopak potlačený dlouhodobý chod a velmi výrazný roční chod. Následující dva obrázky Obr. 4, Obr. 5 obsahují grafy autokorelační funkce pro objekty uvedené na Obr. 1 a Obr. 3. Počítány byly pro týdenní měření. U prvního vrtu se zcela potlačeným ročním chodem klesá autokorelační funkce monotónně, jen velmi pomalu a koeficienty autokorelace značně přesahují v grafu vyznačenou 95 procentní konfidenční mez. Svědčí to o velmi silné závislosti mezi daty týdenního měření značně přesahující dobu jednoho roku (významné jsou i autokorelační koeficienty nad 52 týdnů). Naopak u vrtu s výrazným ročním chodem je znázorněn graf autokorelační funkce typický pro periodické časové řady. Autokorelační funkce vykazuje lokální minimum v bodě odpovídající půlperiodě (zde 26. týden roku) a maximum pro celou délku periody (zde 52. týden, tedy 1 rok).

2. Koeficient ročního chodu

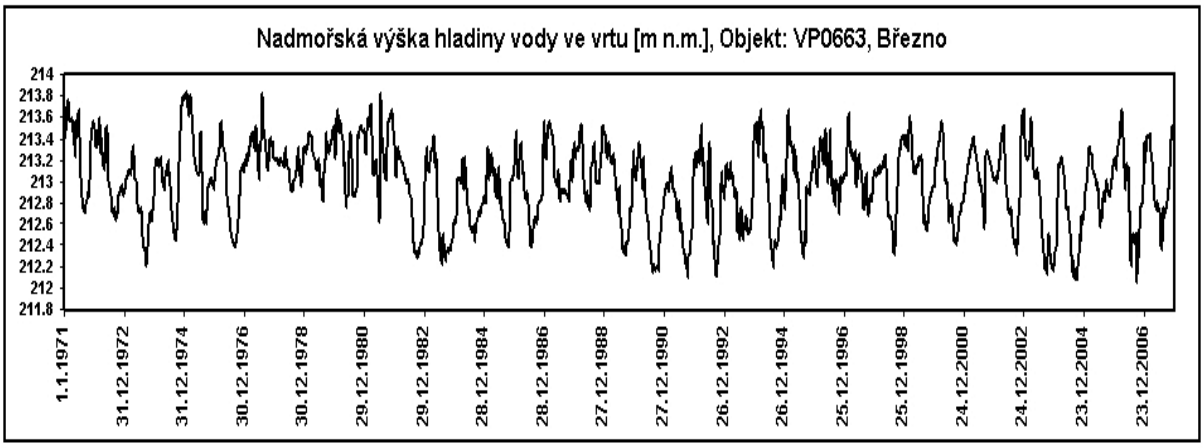
Rozlišit o jaký se jedná typ vrtu nebo pramenu z hlediska zastoupení ročního chodu lze pomocí časových grafů i autokorelační funkce. Takové třídění je značně zdlouhavé a také subjektivní. Je proto vhodné zavést jednoduchou statistiku, pomocí které lze objekty zařadit do tří kategorií. V praxi ČHMÚ se osvědčil tzv. koeficient ročního chodu. Jedná se o hodnotu dlouhodobého normálu amplitudy ročního chodu normalizovaného pomocí směrodatné odchylky. Pro výpočet se používají časové řady měsíčních mediánů. Koeficient ročního chodu (KRCH) má hodnoty v intervalu 0 až 0,5 pro objekty bez ročního chodu, hodnoty mezi 0,5 až 1,5 pro vrty s částečně potlačeným ročním chodem a nad 1,5 pro objekty s výrazně vyjádřeným ročním chodem. Pro ilustraci vrt z Obr. 1 má KRCH=0,24, z Obr. 2 KRCH=0,98 a vrt z Obr. 3 KRCH=2,12.



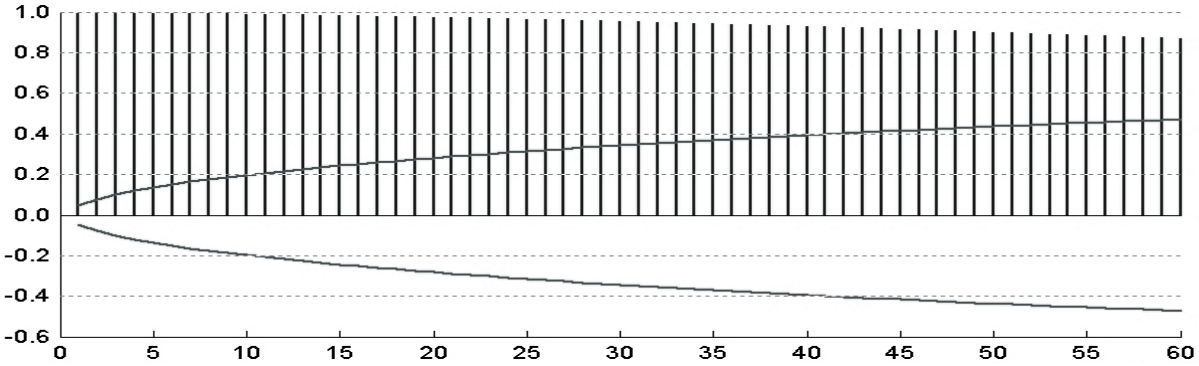
Obr. 1: Graf výšky hladiny vrtu, objekt se zcela potlačeným ročním chodem



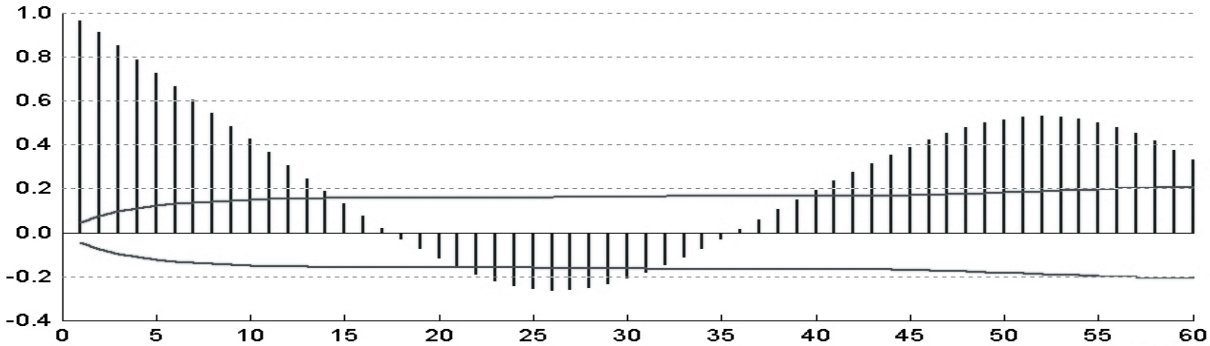
Obr. 2: Graf výšky hladiny vrtu, objekt se smíšeným chodem



Obr. 3: Graf výšky hladiny vrtu, objekt s výrazným ročním chodem



Obr. 4: Graf autokorelační funkce, objekt se zcela potlačeným ročním chodem

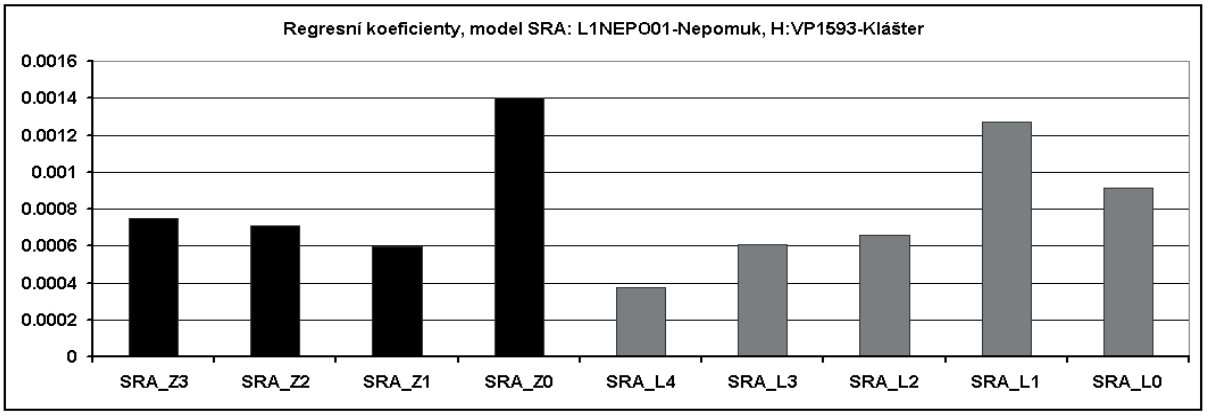


Obr. 5: Graf autokorelační funkce, objekt s výrazným ročním chodem

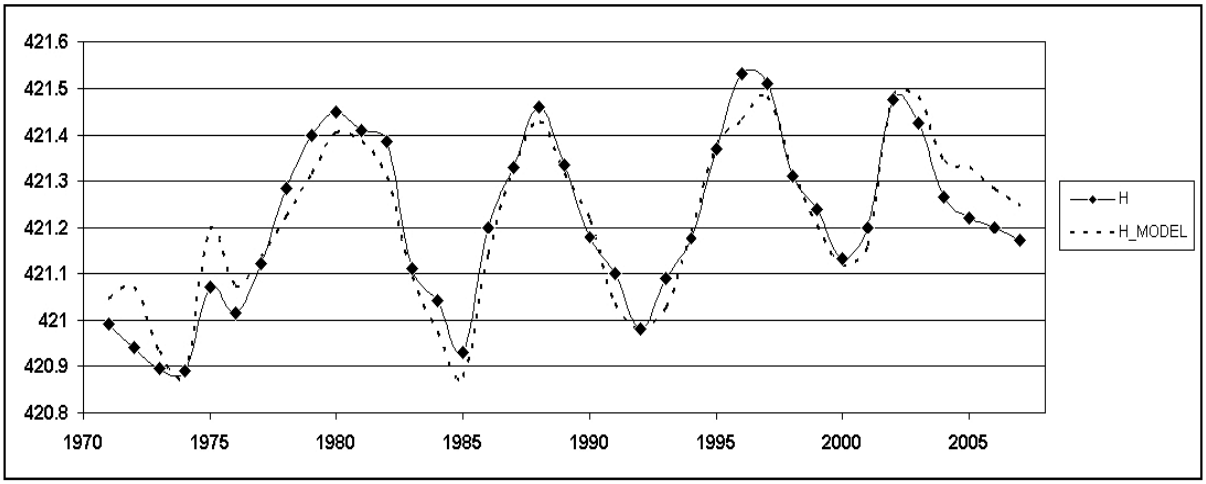
3. Modelování časových řad výšek hladin vody ve vrtu

Časové řady objektů vrtů s dlouhodobým chodem jsou evidentně závislé na průběhu počasí za období několika let. Především, kromě jiného, na spadlých srážkách. Studium vlastností objektů tohoto typu není možné bez objasnění vztahů mezi meteorologickými veličinami a chováním daného objektu. Způsobů modelování těchto vztahů existuje mnoho. Jako nejjednodušší a účinné se zatím jeví použití metody vícenásobné lineární regrese. Vyzkoušeno bylo i modelování pomocí neuronové sítě.

Následuje ukázka modelu založeného na vícenásobné lineární regresi. Jako nezávisle proměnné jsou použity pololetní úhrny srážek z klimatologické stanice Nepomuk (L1NEPO01). Jedná se o pololetí hydrologického roku, zimní: listopad až duben a letní: květen až říjen. Takto je alespoň přibližně odděleno období vegetačního klidu od zbytku roku. V modelu je srážka za zimní pololetí tři roky zpět označena SRA_Z3, dva roky SRA_Z2 až SRA_Z0 představuje zimní pololetí roku, ke kterému je vztažena závisle proměnná. Podobně u letních pololetí SRA_L4 až SRA_L0. Závisle proměnnou tvoří roční hodnoty (mediány, s horším výsledkem lze použít i průměry). V modelu jsou mediány kalendářních roků označeny jako H. Použita byla data objektu VP1593 Klášter. Tento vrt patří do kategorie objektů se smíšeným chodem viz. Obr. 2. Na obrázku Obr. 6 je znázorněn sloupcový graf regresních koeficientů modelu (absolutní člen není uveden). Dává nám možnost přehledného porovnání vlivu jednotlivých zimních a letních pololetí na chování ročních hodnot hladiny vody ve vrtu. Regresní koeficienty tvoří vlastně váhy. Pozor na rozlišení letních a zimních pololetí. Koeficient determinance tohoto konkrétního modelu je roven R2=0,892, koeficient korelace mezi pozorovanou veličinou a vypočítanou je r=0,945. Hodnoty všech deseti koeficientů modelu vyhovují s 95procentní jistotou testu významnosti (jsou různé od nuly). Byl proveden Fisher-Snedecorův test významnosti modelu, testována byla multikolinearita nezávisle proměnných i homoskedasticita a normalita reziduí. Vše nasvědčuje, že model je z hlediska matematické statistiky korektní. Na obrázku Obr. 7 je znázorněn konečný výsledek modelu v podobě časového grafu závislosti pozorované a vypočítané roční hodnoty výšky hladiny vody ve vrtu na čase.



Obr. 6: Graf regresních koeficientů modelu



Obr. 7: Graf závislosti pozorované a vypočítané hodnoty výšky hladiny vody ve vrtu na čase

4. Závěr

Závěrem je třeba zdůraznit užitečnost modelování časových řad vrtů a pramenů s dlouhodobým nebo střednědobým chodem. Významné využití je především při výpočtu predikce chování objektu nebo i skupin objektů v dané oblasti minimálně na jeden rok dopředu a to i variantně (pro podnormální, normální a nadnormální srážky v budoucím období). Dále jej lze využít při testování homogenity řad, zjišťování zda se v důsledku změn klimatu nemění srážko-odtokové vztahy v oblasti podzemních vod v čase (například v důsledku poklesu podílu sněhových srážek na celkovém množství srážek v zimním období). Neméně významné je využití při doplňování chybějících dat v časových řadách. Užitečná je jistě i znalost velikosti regresních koeficientů (vah) pro vysvětlení mechanismu závislosti režimu vrtu nebo pramenu na srážkách, zvláště pokud využijeme další informace získané při geologickém průzkumu okolí sledovaného objektu, poznatky o tvaru a pokrytí terénu a podobně.

Práce na vývoji modelů režimů vrtů a pramenů s dlouhodobým nebo střednědobým chodem jsou řešeny v rámci projektu VAV č.SP/2e1/153/07 „Zákonitosti interakce systému voda-hornina-krajina a jejich využití při ochraně podzemních vod v České republice“. Autor příspěvku děkuje za poskytnuté prostředky.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, OPZV, e-mail: sosna@chmi.cz

DYNAMIKA ZÁSOB VODY V ZÓNE AERÁCIE PÔD ŽITNÉHO OSTROVA

Július Šútor[1], Vlasta Štekauerová [1]

Abstrakt

Zásoba vody v zóne aerácie pôdy predstavuje disponibilný zdroj vody pre poľnohospodárske a lesné ekosystémy, čím determinuje ich existenciu. Ekosystémy indikujú spoľahlivosť, odolnosť a zraniteľnosť tohoto vodného zdroja, ktorý je vplyvom meteorologických javov, vegetačného pokryvu, hladiny podzemnej vody, inžinierskych stavieb a vodohospodárskych úprav realizovaných v záujmovom území. Reálne zásoby vody v aktívnom horizonte zóny aerácie pôdy sa kvantifikujú priamym monitoringom a potenciálne zásoby výpočtovým postupom s využitím vlhkostnej retenčnej krivky, resp. pomocou hydrolimitov PVK (poľná vodná kapacita), BZD (bod zníženej dostupnosti) a BV (bod vädnutia). Pre stanovenie vplyvu pôdneho druhu na pôdnu retenciu vody boli použité súbory údajov získané priamym meraním na 17 lokalitách Žitného ostrova počas roku 1994. Rozmiestnenie monitorovaných lokalít v území Žitného ostrova sledovalo transverzálu Biskupické rameno - Šamorín - Baka - Baloň (dĺžka 54 km). V predkladanom príspevku sa uvádzajú výsledky monitoringu zásob vody v šiestich pôdnych druhoch z vyššie uvedených lokalít Žitného ostrova. Bola získaná závislosť zásob vody W_p-mon v zóne aerácie pôdy počas roka a priebeh vlhkosti pôdy po výške zóny aerácie pôdy v klimatických a meteorologických podmienkach Žitného ostrova v roku 1994 od pôdneho druhu.

Klíčová slova: pôda, vlhkostný režim, zásoba vody, monitoring, retenčná krivka

1. Úvod

Nasýtenosť zóny aerácie pôdy vodou patrí medzi základné hydrologické charakteristiky územia, resp. povodia riek. Závisí predovšetkým na relatívne stabilných vlastnostiach pôdy, tj. na jej zrnitostnom zložení, objemovej hmotnosti, obsahu humusu, chemizmu, atď. a k nim odpovedajúcich retenčných, hydraulických, drenážných a kapilárných vlastnostiach. Medzi variabilné podmienky sa počítajú hlavne stochastické charakteristiky meteorologické a klimatologické, ktoré determinujú výpar z povrchu pôdy a transpiráciu vody z rastlinného krytu. Medzi variabilné podmienky patrí ešte rastlinný kryt, topografia povrchu pôdy, režim hladiny podzemnej vody (tj. poloha a zmeny v čase a priestore), ak je v kontakte s aktívnym horizontom zóny aerácie pôdy a antropogénna činnosť v danom území.

Integrálnym dopadom uvedených podmienok je variabilita zásob vody v zóne aerácie pôdy v čase a priestore a to aj vo vymedzenom horizonte, ktorý je v záujme nášho riešeného problému.

Kvantifikácia zásob vody v pôde, vzhľadom na jej stabilné vlastnosti, je daná vlhkostnou retenčnou čiarou. Táto, okrem iného, poskytuje hodnoty retencie vody pre jej vybrané charakteristické body , tj. pre poľnú vodnú kapacitu (PVK), bod zníženia dostupnosti (BZD) a bod vädnutia (BV). Tieto hodnoty sú rozdielne pre jednotlivé pôdne druhy. Sú to hodnoty, ktoré obecne kvantifikujú zásoby vody v pôde vo vzťahu k zabezpečeniu porastu vodou.
Zásoba vody v aktívnom horizonte zóny aerácie pôdy patrí k vodným zdrojom povodia, ktorý zásobuje vodou vegetačný pokryv. Jej určovanie sa zabezpečuje priamym monitoringom vlhkosti pôdy alebo numerickou simuláciou na matematickom modeli vodného režimu pôd. Systematický celoplošný monitoring zásob vody v aktívnom horizonte zóny aerácie pôdy v povodiach Slovenska nie je organizovaný. Sporadické informácie sú publikované v rámci riešenia výskumných úloh z oblasti závlahového hospodárstva, ekológie, hydrológie a pedológie [5]. V literatúre sú známe súbory údajov z územia Žitného ostrova v oblasti v VD

Gabčíkovo [1], [2]. V tejto oblasti bolo zabezpečené systematické pozorovanie v rokoch 1986 až 1997 [3]. Bolo zamerané na hodnotenie dopadu výstavby VD Gabčíkovo na vodný režim pôd. Monitoring vlhkosti pôdz bol realizovaný na 17 lokalitách s poľnohospodársky využívanou pôdou a na 23 lokalitách umiestnených v lužných lesoch. Po roku 1997 bola oblasť monitorovania zúžená a orientovaná prevažne na pôdy lužného lesa inundovaného územia starého koryta Dunaja.

V predkladanom príspevku sa uvádzajú výsledky spracovania vplyvu zrnitostného zloženia pôd (pôdnych druhov) na zásoby vody v zóne aerácie pôdy vo vybraných lokalitách Žitného ostrova. Za týmto účelom sa využívajú súbory údajov obsahu vody v zóne aerácie pôdy, získané priamym monitoringom [4] na vybraných lokalitách prislúchajúcich k jednotlivým pôdnym druhom.

2. Metodický postup

Objektívna metóda pre hodnotenie zásob vody v zóne aerácie pôdy je založená na jej priamom monitoringu, tak ako napr. monitoring hladinového a prietokového režimu na vodných tokoch tvorí základ pri riešení problémov v povrchovej hydrológii a monitoring hladinového režimu a kvality podzemnej vody je rozhodujúci pre riešenie problémov hydrológie podzemných vôd.

Pôdy Žitného ostrova sú v rámci pedologického prieskumu triedené podľa genézy na pôdne typy a podľa zrnitostného zloženia na pôdne druhy. Pôdny druh ako základná klasifikačná jednotka triedenia pôd podľa zrnitostného zloženia má pre praktické aj vedecké účely mnohoznačný význam. Poznanie podielu jednotlivých zrnitostných frakcií v pôde umožňuje posudzovať jej fyzikálne, hydrofyzikálne, fyzikálno-chemické a biologické vlastnosti.

Triedenie pôd na sedem pôdnych druhov, ktoré je založené na obsahu častíc I.kategórie (priemer častíc < 0,01mm), je nasledovné:

- piesočnaté pôdy (obsah častíc I. kategórie je v intervale 0 až 10 %)
- hlinitopiesočnaté pôdy (obsah častíc I. kategórie je v intervale 10 až 20 %)
- piesočnatohlinité (obsah častíc I. kategórie je v intervale 20 až 30 %)
- hlinité pôdy (obsah častíc I. kategórie je v intervale 30 až 45 %)
- ílovitohlinité pôdy (obsah častíc I. kategórie je v intervale 45 až 60 %)
- ílovité pôdy (obsah častíc I. kategórie je v intervale 60 až 75 %)
- íly (obsah častíc I. kategórie je v intervale viac ako 75 %).

Pre zjednodušenie problému a berúc do úvahy percentuálne zastúpenie pôdnych druhov na celkovej výmere pôd sa vytvorili pre podmienky pôd Žitného ostrova štyri skupiny pôd:

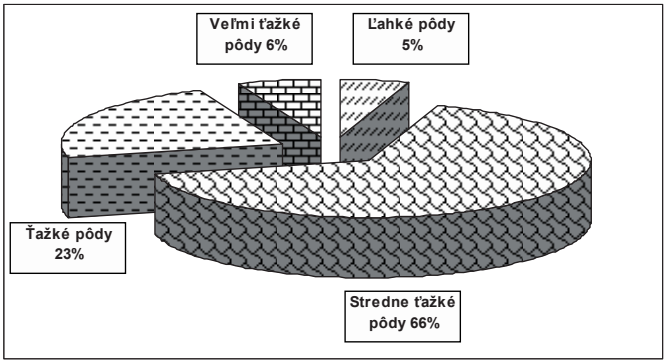
- ľahké pôdy (piesočnaté a hlinitopiesočnaté pôdy)
- stredne ťažké pôdy (piesočnatohlinité a hlinité pôdy)
- ťažké pôdy (ílovitohlinité pôdy)
- veľmi ťažké pôdy (ílovité pôdy a íl).

V tabuľke 1 je uvedená výmera týchto pôdnych skupín pre Žitný ostrov.

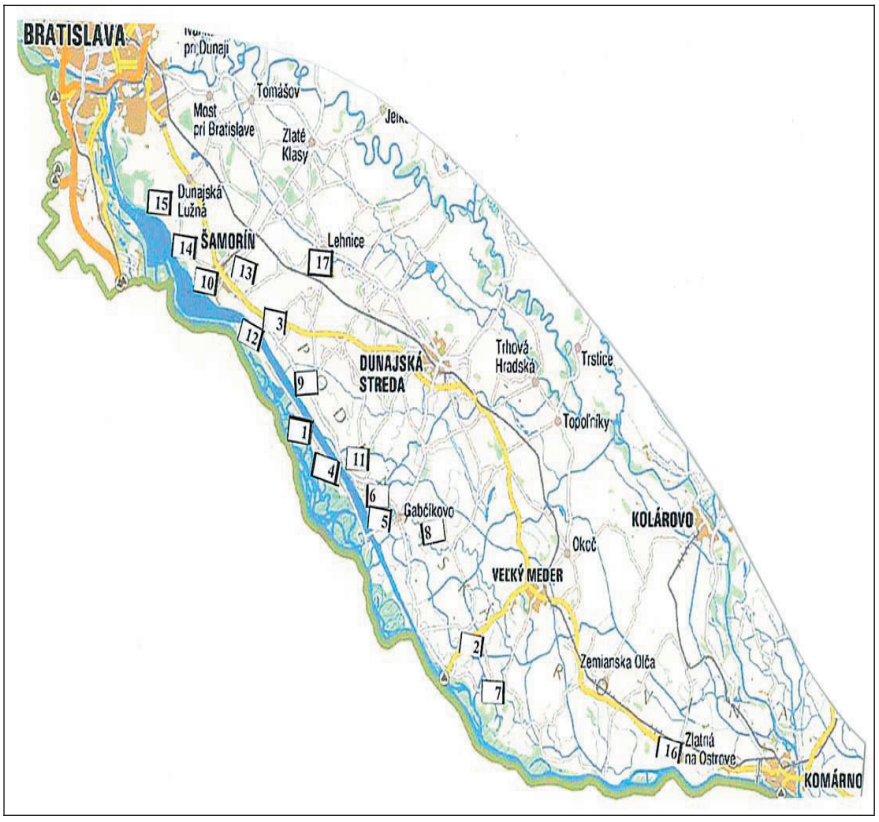
Tab. 1: Pôdne skupiny a ich výmera v podmienkach Žitného ostrova v % a v ha

Pôdy	Výmera v %	Výmera v ha
Ľahké pôdy	5	7 197,651
Stredne ťažké pôdy	66	95 008,993
Ťažké pôdy	23	33 109,194
Veľmi ťažké pôdy	6	8 637,181
Spolu	100	143 953,02

Grafické zobrazenie participácie jednotlivých pôdnych druhov v percentuálnom vyjadrení na celkovej výmere pôd Žitného ostrova je na obrázku 1.



Obr.1: Pôdy prírodného prostredia Žitného ostrova a ich výmera vyjadrená v % z celkovej plochy poľnohospodárskej a lesnej pôdy.



Obr. 2: Rozmiestnenie monitorovaných lokalít na území Žitného ostrova.

Zredukovanie 7 pôdnych druhov na 4 pôdne skupiny zjednodušuje situáciu popisu, avšak pre kvantifikáciu zásob vody napr. výpočtovou metódou, skresľuje realitu. Pre stanovenie potenciálnych zásob vody sa berú priemerne hodnoty hydrolimitov pre vždy dva pôdne druhy. Ak jeden pôdny druh plošne prevyšuje druhy, potom na úkor tohoto priemerovania sa dostávajú nepresné hodnoty celkových zásob vody na ich výmere. Skrytá je výmera jedného či druhého pôdneho druhu.

Pre stanovenie vplyvu pôdneho druhu na ich retenciu vody boli z monitoringu na 17 lokalitách Žitného ostrova vybrané súbory údajov získaných v roku 1994. Rozmiestnenie monitorovaných lokalít v území Žitného ostrova sledovalo transverzálu T1 Biskupické rameno - Šamorín - Baka - Baloň (dĺžka 54 km). Situačný náčrt sa uvádza na Obr. 2.

Monitoring bol organizovaný v roku 1994 dvakrát za mesiac. Výber lokalít bol stimulovaný pokrytím zastúpenia pôdnych druhov vyskytujúcich sa na území Žitného ostrova. Vybrané lokality sú už uvádzané v súvislosti s inými fenoménmi [3]. Meranie vlhkosti pôdy bolo robené gravimetrickou a neutrónovou metódou. Následným spracovaním získaných údajov vlhkosti pôdy boli výpočtom stanovené priemerné ročné chody zásob vody pre relevantné pôdne druhy na sledovaných lokalitách Žitného ostrova počas roku 1994, Obr. 2. Zobrazenie je robené zostupne vzhľadom na obsah I. kategórie zrnitostného zloženia (priemer častíc < 0,01mm), t.j. hodnoty zásob vody v pôdach sú radené od ílovitých pôd až po piesočnaté. Zobrazené hodnoty preukazujú závislosť zásob vody v pôde od jej zrnitostného zloženia. Závislosť je pre monitorovaný rok 1994 lineárna. Maximálna hodnota odpovedá ílovitým pôdam a minimálna piesočnatým.

Tab. 2: Číslo lokality, názov lokality, príslušnosť jednotlivých lokalít k pôdnemu druhu, priemerné ročné hodnoty zásob vody W_p v zóne aerácie pôdy a zásoba vody odpovedajúca hydrolimitu PVK (legenda k Obr. 2).

Lokalita označenie	Lokalita	Pôdny druh	Zásoba vody W_P	Zásoba vody pre PVK
lok 19	Kráľ. lúka	ílovitá	361,99	427,70
MP 12	Čiližs. Radvaň	Ílovitohlinitá	348,19	432,90
lok 12	Báč	Ílovitohlinitá	348,39	388,30
lok 7	Kľučovec	ílovitohlinitá	291,75	347,40
lok 18	Bodíky	hlinitá	290,13	320,03
lok 20	Dekan	hlinitá	296,93	369,32
Mp 8	Baka	hlinitá	290,26	285,60
Mp 10	Gabčíkovo	hlinitá	278,88	284,20
Mp 5	Šúlany	hlinitá	276,10	325,50
lok 9	Trstená	hlinitá	266,65	320,03
lok 13	Mliečno	hlinitá	244,91	338,60
lok 17	Dobrohošť	hlinitopiesočnatá	207,79	318,30
lok 5	Zlatná na Ostr.	hlinitopiesočnatá	203,42	273,10
lok N8	Lehnice	hlinitopiesočnatá	206,00	262,40
Mp 2	Hamuliakovo	hlinitopiesočnatá	188,77	321,00
Mp 3	Čilistov	piesočnatohlinitá	237,35	284,20
lok 14	Kalinkovo hor.	piesočnatá	170,64	358,70

Prírodné prostredie Žitného ostrova tvorí osobitný prírodný charakteristický celok, ktorý sa vyznačuje celým radom zvláštností geologického, hydrogeologického, geochemického a pedologického charakteru.

Geologicky je toto územie budované kvartérnymi aluviálnymi sedimentami pleistocenného a holocénneho veku. Pôdny a substrátový horizont sa vyskytuje na hrubom štrkonosnom podloží. Uvedený horizont je pomenovaný ako pokryvná vrstva prírodného prostredia

Žitného ostrova. Jej mocnosť je závislá na hĺbke štrkonosného horizontu pod povrchom pôdy.

Štrkonosný horizont sa nachádza od 50, resp. 70 cm pod povrchom pôdy (v strednej a najmä hornej časti ostrova - smerom k Bratislave) až do 6, resp. 8 m (prevažne v dolnej časti ostrova – smerom ku Komárnu). Rozhranie pokryvná vrstva pôdy - štrkonosný horizont hrá významnú úlohu v tvorbe a dynamike zásob vody v zóne aerácie pôd v prírodnom prostredí Žitného ostrova.

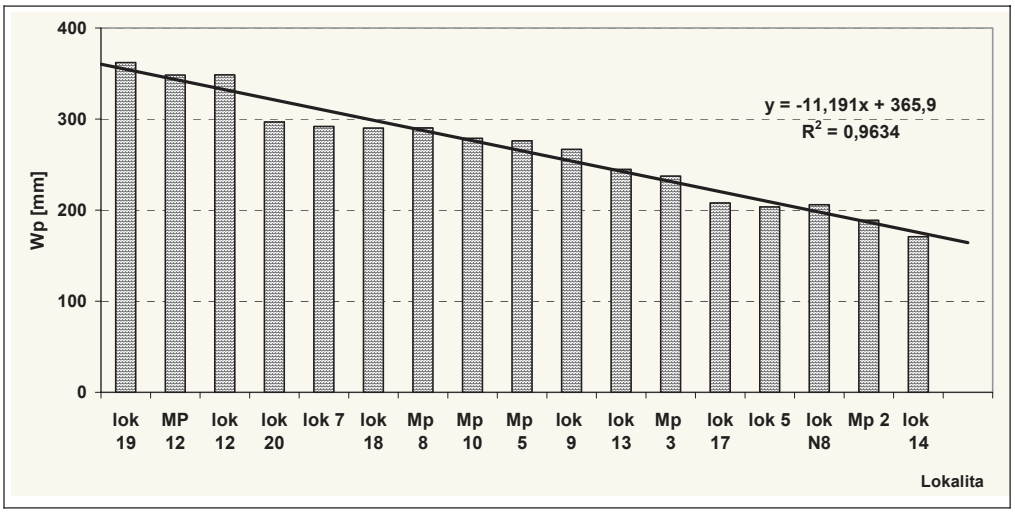
Oblasť prírodného prostredia nad rozhraním pokryvná vrstva - štrkové podložie sa významne líši retenciou a dynamikou vody v porovnaní s týmito vlastnosťami pod týmto rozhraním. Pod týmto rozhraním je retenčný objem vody nad klesajúcou hladinou podzemnej vody zanedbateľný.

V týchto podmienkach režim podzemnej vody (poloha a rozkyv hladiny) determinuje tvorbu a dynamiku zásob vody v pokryvnej vrstve v závislosti od formy interakcie hladiny podzemnej vody s pokryvnou vrstvou pôdy. Môžu nastať tri prípady :

V prvom prípade charakteristická tým, že počas celého roka fluktuujúca hladina podzemnej vody nedosiahla pokryvnú vrstvu pôdy nad štrkovým podložím, resp. nikdy neprešla hranicou štrkového podložia, v druhom prípade fluktuujúca hladina podzemnej vody sa objavovala v pokryvnej vrstve počas celého roku a v treťom prípade fluktuujúca hladina podzemnej vody niekedy pretínala hranicu štrkového podložia a teda sa niekedy počas roka nachádzala aj v pokryvnej vrsve pôdy. Časové relácie výskytu hladiny podzemnej vody v pokryvnej vrstve, resp. pod rozhraním, v tomto treťom prípade nebolo možné presne špecifikovať vzhľadom na dlhé časové odstupy medzi meraniami.

Monitorované lokality uvedené na Obr. 2 možno zaradiť do skupiny, kde hladina podzemnej vody bola počas roka v pokryvnej vrstve nad rozhraním, teda v podmienkach týkajúcich sa prvého prípadu.

Zásoby vody v zóne aerácie pôd na 17 monitorovaných lokalitách (Obr. 2) sú spracované ako ročné priemerné hodnoty. Výsledky sa uvádzajú na Obr. 3, kde je vidieť lineárna závislosť od obsahu častíc I. kategórie (lokality boli zoradené podľa druhu pôd od ílovitých pôd až po piesočnaté). V Tab. 3 sú uvedené hodnoty koeficientu korelácie vyjadrujúce vzťahy medzi zásobami vody v jednotlivých lokalitách.



Obr. 3: Priemerné ročné hodnoty zásob vody v zóne aerácie pôdy Wp na jednotlivých monitorovacích lokalitách v území Žitného ostrova v roku 1994. Mocnosť zóny aerácie pôdy je 100 cm.

Tab. 3: Korelačná matica vzťahov zásob vody v 100 cm horizonte zóny aerácie pôdy na 17 lokalitách Žitného ostrova v roku 1994

	Stí.1	Stí.2	Stí.3	Stí.4	Stí.5	Stí.6	Stí.7	Stí.8	Stí.9	Stí.10	Stí.11	Stí.12	Stí.13	Stí.14	Stí.15	Stí.16	Stí.17
Stípec 1	1,00																
Stípec 2	0,72	1,00															
Stípec 3	0,60	0,89	1,00														
Stípec 4	0,84	0,92	0,85	1,00													
Stípec 5	0,94	0,72	0,67	0,86	1,00												
Stípec 6	0,95	0,80	0,72	0,86	0,96	1,00											
Stípec 7	0,67	0,95	0,91	0,91	0,71	0,74	1,00										
Stípec 8	0,83	0,95	0,90	0,94	0,86	0,90	0,93	1,00									
Stípec 9	0,50	0,90	0,92	0,82	0,54	0,58	0,95	0,84	1,00								
Stípec 10	0,82	0,93	0,82	0,87	0,82	0,89	0,90	0,97	0,79	1,00							
Stípec 11	0,80	0,89	0,88	0,91	0,89	0,91	0,84	0,93	0,78	0,87	1,00						
Stípec 12	0,83	0,88	0,89	0,94	0,91	0,92	0,90	0,95	0,81	0,88	0,96	1,00					
Stípec 13	0,86	0,89	0,85	0,95	0,91	0,94	0,89	0,95	0,77	0,90	0,94	0,99	1,00				
Stípec 14	0,65	0,95	0,97	0,92	0,70	0,74	0,97	0,93	0,95	0,86	0,89	0,92	0,90	1,00			
Stípec 15	0,91	0,80	0,78	0,87	0,96	0,98	0,77	0,92	0,63	0,89	0,93	0,94	0,94	0,78	1,00		
Stípec 16	0,89	0,91	0,85	0,92	0,89	0,94	0,91	0,98	0,79	0,98	0,91	0,95	0,95	0,88	0,94	1,00	
Stípec 17	0,80	0,93	0,85	0,90	0,80	0,84	0,92	0,97	0,83	0,96	0,86	0,89	0,89	0,90	0,84	0,96	1,00

Podľa stupňa, resp. tesnosti závislosti hovoríme o:

– žiadnej korelácii, koeficient korelácie sa rovná ± (0,01 až 0,29)

– mierne tesnej korelácii, koeficient korelácie sa rovná ± (0,3 až 0,69)

– stredne tesnej korelácii, koeficient korelácie sa rovná ± (0,7 až 0,89)

– veľmi tesnej korelách, koeficient korelácie sa rovná ± (0,9 až 0,99).

3. Záver

Dynamika zásob vody v zóne aerácie pôdy v podmienkach Žitného ostrova bola spracovaná s využitím monitorovaných súborov zásob vody na 17 lokalitách (Obr. 2). Výber lokalít bol stimulovaný pokrytím zastúpenia pôdnych druhov vyskytujúcich sa na území Žitného ostrova. Meranie vlhkosti pôdy bolo robené gravimetrickou a neutrónovou metódou. Následným spracovaním získaných údajov vlhkosti pôdy boli výpočtom stanovené priemerné ročné chody zásob vody pre relevantné pôdne druhy Žitného ostrova pre rok 1994 (Obr. 3).

Závislosť hodnôt zásob vody na obsahu častíc I. kategórie (priemer častíc < 0,01 mm), resp. v závislosti od pôdnych druhov, vykazuje linearitu. Je to vyvolané predovšetkým známou závislosťou triedenia pôd podľa zrnitostného zloženia. Okrem toho, tento výsledok je silne ovplyvnený skutočnosťou, že počas celého roku 1994 sa poloha hladiny podzemnej vody vyskytovala v pokryvnej vrstve pôdy, teda nad štrkovým rozhraním. Tieto podmienky odpovedajú analyzovanému prípadu 1. odchyľka od lineárnej tendencie (Obr. 3) môže byť spôsobená nehomogenitou plošného rozdelenia úhrnov zrážok a od variability vegetačného pokryvu (evapotranspirácie) pozdĺž monitorovaných lokalít. Dopad získaných poznatkov liearnej závislosti zásob vody od obsahu častíc I. kategórie má dôležitý význam pri možnosti lineárnej extrapolácie výsledkov z monitorovaných údajov na lokalite príslušnej k jednému pôdnemu druhu na iný pôdny druh. Za týmto účelom je potrebné ďalej viesť a vyhodnocovať údaje monitoringu v podmienkach relevantných k podmienkam uvedench v tomto príspevku.

Poďakovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou pre podporu vedy a techniky prostredníctvom finančnej podpory č. APVV-0271-07 a grantovou agentúrou VEGA 2/0120/08.

Literatúra

[1] ŠTEKAUEROVÁ, V. – NAGY, V., 2003. Influence of climate condition on security necessary water for vegetation in various ecosystems. Pollution and water resources Columbia University Seminar Proceedings. The Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Hungary, pp 206–219, ISBN 963 9052 31 0.

[2] ŠTEKAUEROVÁ, V. – NAGY, V. – MANIAK, S., 2005. Vlhkostné pomery pôd na obidvoch stranách Dunaja. Acta Hydrol. Slovaca, Roč.6, No 1, 168-176. ISSN 1335-629.

[3] ŠÚTOR, J. – REHÁK, Š., 1999. Evaluation of disposable water supply in soil for biosphere in the area of Žitný ostrov. In: *Scientific Papers of the Research Institute of Irrigation Bratislava*, No 24, pp 173-187.

[4] ŠÚTOR, J., 1998. Monitorovanie, spracovávanie a interpretácia zásob vody v zóne aerácie pokryvnej vrstvy Žitného ostrova, Výskumná správa z monitoringu za roky 1989-1997, ÚH SAV, April 1998, zv. I. až zv. III., 300 s.

[5] ŠÚTOR, J.,1999. Water storage monitoring in the aeration zone of soil and its interpretation. In: *Pollution and Water Resources Columbia University Seminar Proceedings*. Vol. XXX., „Environmental Protection of Soil and Water Resources“, pp152–159, ISBN 80-967808-7-5.

Kontakty na autora

1 Ústav hydrológie SAV, Račianska 75, 831 02 Bratislava,
e-mail: sutor@uh.savba.sk, stekauer@uh.savba.sk

PRIEBEH ZLOŽIEK VODNEJ BILANCIE PÔDY V PROCESE VZNIKU PÔDNEHO SUCHA

Branislav Kandra[1], Milan Gomboš[1], Andrej Tall [1]

Abstrakt

Začiatok pôdneho sucha možno definovať ako vlhkosť, ktorá je na retenčnej čiare vyjadrená bodom zníženej dostupnosti s hodnotou pF = 3,3. Pôdne sucho vzniká s určitou časovou retardáciou ako dôsledok meteorologického sucha. Meteorologické sucho je definované ako časový úsek jedného alebo viacerých dní počas ktorých sa nevyskytli žiadne alebo sa vyskytli iba nepatrné zrážky. V predloženom príspevku boli na základe 38 ročného radu vegetačných období metódou štatistickej analýzy vyseparované štatisticky významné bezzrážkové periódy. Do hodnotenia bolo spolu vybraných 5 najdlhších období. V priebehu týchto úsekov meteorologického sucha boli metódou numerickej simulácie kvantifikované jednotlivé zložky vodnej bilancie pôdy. Kvantifikácia týchto zložiek bola uskutočnená na matematickom modeli GLOBAL s časovým výpočtovým krokom jeden deň. Hodnotil sa vývoj potenciálnej a aktuálnej evapotranspirácie, priebeh zásoby vody do hĺbky 1 m a priebeh hladiny podzemnej vody.

Ďalšie hodnotenie spočívalo v konfrontácii dvoch paralelných priebehov zásoby vody v bezzrážkovom úseku vegetačného obdobia 1974. Prvý priebeh odrážal skutočný stav vlhkosti pôdy v danom čase a druhý bol ovplyvnený fiktívnou zmenou počiatočnej zásoby vody na úroveň blízku plnej vodnej kapacity. Uvedenou zmenou sa sledoval ďalší vývoj zásoby vody v pôde s dôrazom na očakávané zlepšenie dostupnosti vody pre porast.

Kľúčové slová: pôdne sucho, zásoba vody v pôde, numerická simulácia, fyziologický stres rastlín

1. Úvod

O optimálnom vlhkostnom stave pôdy z hľadiska dostupnosti vody pre rastliny sa môže hovoriť vtedy, ak tento stav nevyvolá žiadny negatívny účinok na fyziologické procesy rastlín. V prípade zníženia vlhkosti pod optimálnu hranicu, rastliny trpia nedostatkom vody a nastáva fyziologický stres. Tento vlhkostný stav pôdy sa nazýva stav pôdneho sucha [1], [2]. Pôdne sucho začína v bode, na retenčnej čiare označovanom ako bod zníženej dostupnosti (BZD), ktorému zodpovedá vlhkostný potenciál s hodnotou pF = 3,3 [3]. Nedostatok vody v pôde je úzko spojený s prejavom meteorologických prvkov. Pôdne sucho vzniká s určitou časovou retardáciou ako dôsledok meteorologického sucha, ktoré je najčastejšie definované ako záporná odchýlka zrážok od normálu v priebehu určitého časového obdobia.

Cieľom predloženého príspevku je analýza najdlhších bezzrážkových období (BO) v skúmanom rade vegetačných období rokov 1970-2008. Kvantifikované sú rozhodujúce zložky vodného režimu v procese vzniku fyziologického stresu poľných plodín počas separovaných BO, ktoré viedli k tvorbe pôdneho sucha. Ďalej je analyzovaný vplyv počiatočných zásob vody v pôde na ich ďalší vývoj a dostupnosť pre rastlinný kryt v priebehu bezzrážkových úsekov.

2. Metodický postup

Výber bezzrážkových období vychádzal z údajov získaných z klimatickej stanice Milhostov, situovanej v centrálnej časti Východoslovenskej nížiny (VSN). V blízkosti stanice sa nachádzajú skúšobné políčka centra výskumu rastlinnej výroby, ktoré sú v správe Výskumného ústavu agroekológie Michalovce. Pre uvedenú lokalitu sú typické stredne ťažké ílovito hlinité pôdy typu fluvizem glejová.

Na danej lokalite bol za účelom hodnotenia zložiek vodnej bilancie v období pôdneho sucha vybraný pôdny profil o mocnosti 1 m nachádzajúci sa na hone č. 9. V uvedenej lokalite boli zo skúmaného 38 ročného radu vegetačných období (1970-2008) separované štatisticky významné časové úseky bezzrážkových dní s denným úhrnom zrážok f(0)=0,00 mm. Do podrobnej analýzy sa vybrali najdlhšie bezzrážkové udalosti, ktoré nastali počas vegetačného obdobia (apríl-september). Vo výbere figurovali aj také dni bez zrážok, ktoré začínali v marci a presahovali do vegetačného obdobia. Celkovo sa do hodnotenia zaradilo 5 najdlhších bezzrážkových období. Počas týchto úsekov meteorologického sucha boli analyzované jednotlivé zložky vodného režimu vo vybranom pedoprofile Milhostova. Kvantifikácia týchto zložiek bola uskutočnená metódou numerickej simulácie na matematickom modeli GLOBAL s časovým výpočtovým krokom jeden deň [4]. Hodnotil sa vývoj potenciálnej a aktuálnej evapotranspirácie, priebeh zásoby vody v 1 m pôdneho profilu a priebeh hladiny podzemnej vody.

Ďalší krok predstavoval konfrontáciu dvoch paralelných priebehov zásoby vody v bezzrážkovom úseku vegetačného obdobia 1974. Prvý priebeh odrážal skutočný stav vlhkosti pôdy v danom čase a druhý bol ovplyvnený fiktívnou zmenou počiatočnej zásoby vody na úroveň blízku plnej vodnej kapacity. Uvedenou zmenou sa sledoval ďalší vývoj zásoby vody v pôde s dôrazom na očakávané zlepšenie dostupnosti vody pre porast.

3. Výsledky

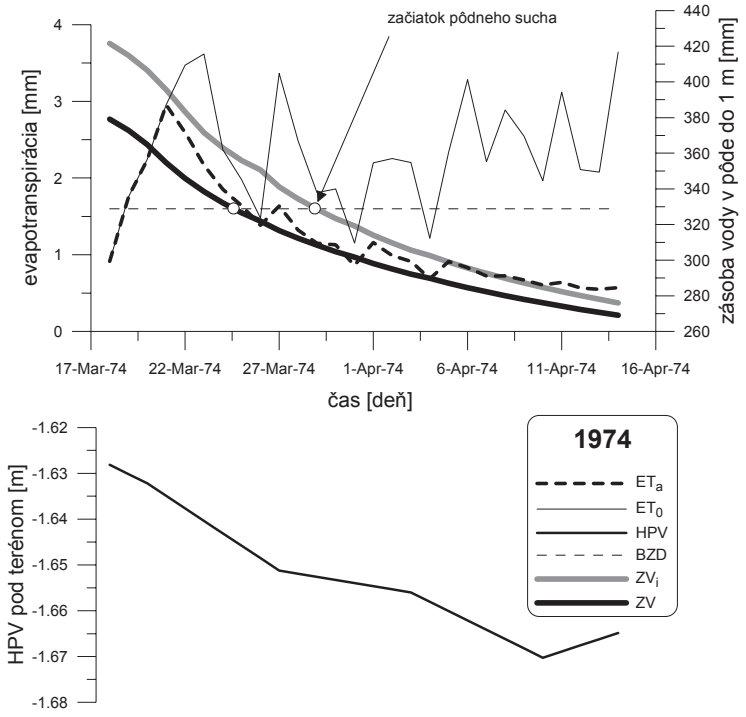
V tabuľke 1 je vybraných 5 bezzrážkových období, ich charakteristiky a pravdepodobnosti výskytu. Tieto časové úseky predstavujú obdobia meteorologického sucha, v priebehu ktorých došlo k výraznému zníženiu zásoby vody v pôde. Dynamiku vlhkostných zmien v pôde ako aj ich intenzitu charakterizuje pomerné číslo $i_{zz} = \Delta ZV/d$ [mm.deň$^{-1}$]. Zmeny zásob vody v pôde ZV a ich intenzita i_{zz} v BO je závislá od vlhkosti pôdy na počiatku meteorologického sucha, evapotranspirácie a polohy HPV.

Identifikáciu začiatku pôdneho sucha umožňujú hodnoty ukazovateľa pôdneho sucha I_{PS} = ZV/BZD. Ak je I_{PS} = 1 nastáva štart pôdneho sucha a rastliny sa dostávajú do fyziologického stresu v dôsledku nedostatku vody pričom tento stav trvá až kým nie je $I_{PS} > 1$.

Pri znižovaní vlhkosti pôdy sa rozlišujú dve etapy. V prvej dochádza ku klesaniu vlhkosti smerom od poľnej vodnej kapacity (PVK) k BZD. V tomto štádiu sa nedostatok vody na rastlinách neprejaví a môže sa hovoriť stále o optimálnej vlhkosti. Hodnota výparového deficitu VD = 0, čiže $ET_a = ET_0$. Druhá etapa začína klesaním vlhkosti pod BZD. Tu sa jedná o radikálne vysušovanie pôdneho profilu pri ktorom rastliny trpia nedostatkom vody a dochádza k vzniku fyziologického stresu. Proces vysušovania nastáva pri hodnote VD > 0, pričom $ET_a < ET_0$. Zvýšenie hodnoty VD signifikuje štart pôdneho sucha a približne sa kryje s dosiahnutím BZD. Identifikácia sucha pomocou výparového deficitu je však presnejšia ako cez BZD, no vyžaduje náročné výpočty a rozsiahlu databázu vstupných údajov.

Tab. 1: Základné charakteristiky hodnotených bezzrážkových období vo vzťahu k vodnému režimu a pravdepodobnosti prekročenia (“d” – počet dní v BO, “P” – hodnoty teoretickej čiary prekročenia najdlhších BO v hodnotenom období 1970-2008, ”p” – periodicita najdlhších BO, “ZV” – zásoba vody do 1 m, “I_{PS}” – ukazovateľ pôdneho sucha (ZV/BZD; BZD=328,8 mm), „i_{ZZ}“ – intenzita zmeny zásob vody v pôde (ΔZV/d), “VD” – výparový deficit (ET_0-ET_a), HPV – hladina podzemnej vody v cm pod terénom)

Bezzrážkové obdobie		d	P	p	ZV	ZV	I_{PS}	I_{PS}	VD
začiatok BO	koniec BO	-	-	-	na zač.	na konci	na zač.	na konci	na zač.
		[dni]	[%]	roky	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[mm]
18.3.1974	14.4.1974	28	5,6	18,0	379,01	269,10	1,15	0,82	0,00
5.8.1976	31.8.1976	27	6,8	14,6	171,88	126,72	0,52	0,39	0,37
14.3.1995	9.4.1995	27	6,8	14,6	400,76	295,31	1,22	0,90	0,00
24.3.1999	12.4.1999	20	23,8	4,2	512,83	482,34	1,56	1,47	0,00
23.3.2002	11.4.2002	20	23,8	4,2	408,42	249,68	1,24	0,76	0,00
Bezzrážkové obdobie		**VD**	**VD**	**∑VD**	**i_{ZZ}**	**HPV**	**HPV**	**ΔHPV**	**ΔHPV/d**
začiatok BO	**koniec BO**	**max**	**na konci**	**-**	**-**	**na zač.**	**na konci**	**-**	**-**
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm/d]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm/d]
18.3.1974	14.4.1974	3,07	3,07	31,35	3,9	-152,81	-166,48	-13,67	-0,1
5.8.1976	31.8.1976	3,70	2,31	57,11	1,7	-152,28	-166,96	-14,68	-0,5
14.3.1995	9.4.1995	0,79	0,51	2,13	3,9	-153,10	-149,83	3,26	0,1
24.3.1999	12.4.1999	0,00	0,00	0,00	1,5	-55,24	-71,21	-15,97	-0,8
23.3.2002	11.4.2002	1,84	1,12	10,65	7,9	-108,40	-117,93	-9,53	-0,5



Obr. 1: Vplyv zmeny počiatočnej zásoby vody v pôde na dostupnosť vody pre rastliny (ZV_i – zvýšená počiatočná ZV) s vyjadrením denný hodnôt potenciálnej a aktuálnej evapotranspirácie vo vzájomnom vzťahu k ZV a hladine podzemnej vody počas BO

Na obr. 1 je znázornené oneskorenie štartu pôdneho sucha vplyvom zvýšenia počiatočnej zásoby vody (ZV_i) v pôde na začiatku BO. Optimálny vlhkostný stav pôdy sa predĺžil o 3 dni, teda z pôvodných 7 na 10 dní. Z obrázka vyplýva, že ak pôdny profil neovplyvňuje HPV, prechod pôdneho profilu do stavu pôdneho sucha je spojený so vznikom výparového deficitu ∑VD. Ďalej sú tu zobrazené denné hodnoty potenciálnej (ET_0) a aktuálnej (ET_a) evapotranspirácie, ZV, HPV a BZD počas BO vegetačnej sezóny roku 1974.

4. Záver

V príspevku boli analyzované obdobia bez zrážok získané selekciou z časového radu VO 1970-2008. Vybrané úseky predstavovali obdobia meteorologického sucha, počas ktorých boli numerickou simuláciou kvantifikované vybrané zložky vodného režimu a vypočítaná zásoba vody v pôde do hĺbky 1 m.

Cieľom bolo zhodnotiť dopad bezzrážkových období na štart a priebeh pôdneho sucha ako príčiny vzniku fyziologického stresu rastlín. Z výsledkov vyplýva, že zmena zásob vody v pôde a ich intenzita počas meteorologického sucha je malá v prípade, že HPV zasahuje do bilancovanej vrstvy pôdy a zásobuje ju vodou. Znižovanie vlhkosti pôdy prebieha v dvoch etapách. Prvá predstavuje pokles smerom od PVK k BZD, kedy hodnota VD = 0 ($ET_a = ET_0$) a druhá etapa pokles smerom pod BZD, kedy VD > 0 ($ET_a < ET_0$). Druhá etapa vedie k vzniku pôdneho sucha a spôsobuje fyziologický stres rastlín. Vplyv počiatočných zásob vody v pôde na ich ďalší vývoj počas BO je možné dokumentovať na priebehu ZV v roku 1974 (obr. 1). Počiatočná zásoba vody v pôde blízka stavu nasýtenia (421,54 mm) predĺžila obdobie optimálnej vlhkosti pôdy (nad úrovňou BZD) z pôvodných 7 na 10 dní.

Poďakovanie

Táto práca bola podporovaná grantovou agentúrou VEGA 2/0130/09 a agentúrou na podporu výskumu a vývoja APVV 0271-07.

Literatúra

[1] GOMBOŠ, M., 2008. Water storage dependability in root zone of soil. In: *Cereal Research Communications*, vol. 36, Supp., pp 1191-1194.

[2] GOMBOŠ, M. – PAVELKOVÁ, D., 2009. Analýza meteorologického sucha v centrálnej časti Východoslovenskej nížiny. In: *Acta Hydrologica Slovaca*, roč. 10, č. 1, s. 69-74. ISSN 1335-6291.

[3] TALL, A., 2007. Impact of canopy on the water storage dynamics in soil. In*: Cereal Research Communications*, vol. 35, no. 2, pp 1185-1188.

[4] MAJERČÁK, J. – NOVÁK, V., 1994. GLOBAL - one dimensional variable saturated flow model, including root water uptake, evapotranspiration structure, corn yield, interception of precipitations and winter regime calculation. In*: Research Report, Bratislava*, Institute of Hydrology, Slovak Academy of Sciences. p 75.

Kontakty na autora

1 Ústav hydrológie SAV, Výskumná hydrologická základňa Michalovce,
e-mail: kandra@uh.savba.sk, gombos@uh.savba.sk, tall@uh. savba.sk

VLIV REZIDUÁLNÍHO VZDUCHU V PÓRECH NA INFILTRACI DO PŮDY V BLÍZKOSTI NASYCENÍ

Michal Sněhota[1], Martina Sobotková [1], David Zumr[1], Vladimíra Jelínková [1], Milena Císlerová [1]

Abstrakt

Infiltrace do půdy během srážek s vysokou intenzitou vyvolává v půdě stavy vlhkosti blízké nasycení, při kterých za určitých podmínek zaniká spojitost půdního vzduchu s atmosférou předpokládaná Richardsovou rovnici. Pro zlepšení znalostí o proudění vody v blízkosti nasycení byla provedena série terénních a laboratorních experimentů ve čtyřech odlišných měřítcích. Laboratorní experimenty byly prováděny na vzorcích referenčního křemičitého písku a na neporušených vzorcích heterogenních půd ze dvou horských povodí. Pomocí laboratorních experimentů byl potvrzen předpoklad vztahu mezi změnami (kvazi)ustálené rychlosti infiltrace a množstvím a distribucí uzavřeného vzduchu v pórech. Bylo zjištěno že objemové změny uzavřeného vzduchu byly doprovázeny výrazným zvyšováním nebo snižováním (kvazi)ustálených rychlostí infiltrace, přestože jsou při experimentu konstantně nastaveny okrajové podmínky, odpovídající plně nasycenému proudění. Zachycení vzduchu, jeho další vývoj a vliv na proudění je odlišný u homogenního písku a u heterogenních půd, kde dominuje preferenční proudění. Experimenty prokázaly, že v heterogenní půdě jsou zmiňované efekty výraznější než v homogenním písku. Zjištěné skutečnosti přispívají k detailnímu objasnění mechanismu elementárního hydrologického procesu infiltrace.

Klíčová slova: půda, uzavřený vzduch, infiltrace, hydraulická vodivost, neinvazivní metody

1. Úvod

Hydraulické charakteristiky, tj. retenční čára a funkce hydraulické vodivosti jsou běžně uvažovány jako v čase neměnné nebo měnící se jen pomalu. Tento předpoklad je také standardně uplatňován při modelování infiltrace. Výsledky některých experimentů publikovaných v literatuře ale ukazují, že se například nasycená hydraulická vodivost může výrazně měnit i v časovém horizontu jednoho infiltračního experimentu. Časová nestabilita hydraulické vodivosti, je v literatuře přisuzována z velké části vlivu přítomnosti uzavřeného vzduchu v pórech jinak zcela nasycené půdy [1, 2]. Jako uzavřený vzduch (entrapped air) se obvykle označuje takový půdní vzduch, který při zvlhčování pórovitého média postupně ztratí spojitost s atmosférou. Jiným případem podobně nespojité plynné fáze jsou bublinky biogenních plynů, které také mohou výrazně ovlivňovat proudění vody v rašeliništích [3]. Vlivem ztráty kontinuity plynné fáze a přítomnosti uzavřeného vzduchu může být hydraulická vodivost půdy snížena o 50 až 70 % [4]. Faybishenko [5] zavedl pro časově proměnlivou charakteristiku vyjadřující schopnost půdy vést vodu při nulových nebo kladných tlakových výškách termín “kvazi-nasycená hydraulická vodivost” a při experimentech na velkých vzorcích heterogenních půd zjistil, že kvazi-nasycená hydraulická vodivost může být 5–8x nižší než hodnota koeficientu nasycené hydraulické vodivosti (Ks) zcela nasycené půdy. Snížení hydraulické vodivosti z důvodu přítomnosti uzavřeného vzduchu bylo zjištěno nejen v laboratorních podmínkách, ale i v terénu při monitorování infiltrace z nádrže pro řízené zasakování [6].

Přesný mechanismus zachytávání vzduchu v pórech a jeho následné redistribuce není dosud znám. Výsledky experimentů [7] ukazují, že vlivy uzavřeného vzduchu na proudění jsou významnější v půdách s přítomností preferenčního proudění.

Standardní přístupy k modelování infiltrace založené na řešení Richardsovy rovnice výše uvedené efekty neuvažují. Přestože uzavřený vzduch může zásadně ovlivňovat infiltraci, nebyl dosud vyvinut jednoduše použitelný matematický model popisující zachycení a vývoj

uzavřeného vzduchu v půdě. Dosud publikované práce představily matematický popis některých dílčích procesů např. rozpouštění bublinek zachyceného plynu [8, 9] a to pouze pro homogenní pórovité prostředí. Důvodem chybějícího matematického popisu je mimo jiné také nedostatek podrobných experimentálních dat.

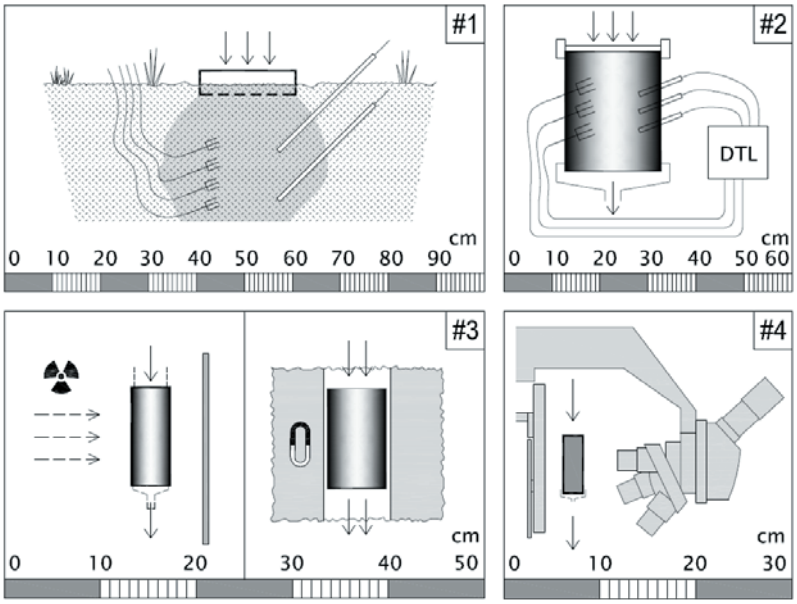
Tento příspěvek ukazuje některé výsledky probíhajícího komplexního experimentálního výzkumu zaměřeného na objasnění podstaty vzniku a vývoje uzavřeného vzduchu a jeho vlivu na infiltraci vody do půdy.

2. Materiál a metody

Infiltrace do půdy byla studována v následujících čtyřech měřítcích experimentu:

- měřítko #1: opakované výtopové infiltrace na experimentální ploše v terénu [10]
- měřítko #2: infiltrační experimenty na velkých neporušených půdních vzorcích [7]
  měřítko #3: infiltrační experimenty na malých neporušených půdních vzorcích se současným snímkováním vzorku pomocí nukleární magnetické rezonance [11] a neutronové tomografie
- měřítko #4: infiltrační experimenty na miniaturních vzorcích, se snímkováním optickým mikroskopem [12].

Výhoda experimentů s velkou oblastí proudění (měřítka #1 a #2) spočívá v tom, že výsledky měření jsou reprezentativní pro studovanou půdu. Naopak použití malých vzorků (měřítka #3 a #4) umožnilo využití moderních neinvazivních vizualizačních metod pro detailní zkoumání procesů uvnitř půdy. Velikost vzorku nebo domény proudění pro jednotlivá měřítka experimentu je znázorněna na obrázku 1.



Obr. 1: Schematické zobrazení experimentů ve čtyřech měřítcích

2.1 Studovaná půda

Ve všech měřítcích experimentu byla zkoumanou půdou hrubá písčitohlinitá půda ze skupiny kambisolů odebraná z lokality Korkusova Huť (KH). Pro tuto půdu byla v minulosti opakovaně zjištěna nestabilita hydraulických charakteristik [2]. Jako referenční médium byl v měřítcích experimentu #2 a #4 použit také jemný křemičitý písek (SAND).

2.2 Infiltrační experimenty v terénu (měřítko #1)

Série výtopových a podtlakových infiltračních experimentů byla provedena v lokalitě KH. Cílem experimentů bylo podrobně vyšetřit režimy proudění ve studované půdě při opakované výtopové infiltraci (kvazi-nasycené proudění) a to pro půdu s různou počáteční vlhkostí před zahájením experimentu. Infiltrace byly prováděny na kruhové ploše o průměru 20 cm. Vlhkost byla ve čtyřech hloubkách kontinuálně monitorována reflektometrickými vlhkostními čidly (TDR). Tlakové výšky byly měřeny v hloubkách 20 a 40 cm pod povrchem. Čidla byla nainstalována z bočního výkopu, s minimálním porušení půdního profilu pod místem infiltrace.

2.3 Infiltrační experimenty na velkých neporušených vzorcích (měřítko #2)

Opakované výtopové infiltrace byly prováděny na neporušeném vzorku o objemu sedmi litrů. Spodní okraj vzorku byl podepřen perforovanou destičkou umožnující volný gravitační výtok ze vzorku (okrajová podmínka "seepage face"). Experimenty byly zahajovány do půdy o různé počáteční vlhkosti, a byly prováděny střídavě s běžnou vodou a s vodou odplyněnou. Předpokladem bylo, že při infiltraci do půdy s vyšší vlhkostí dojde k uzavření většího množství vzduchu a objemový tok proudění v ustálené fázi experimentu bude v jeho důsledku nižší. Dále bylo předpokládáno, že při infiltraci odplyněné vody dojde k částečnému rozpouštění uzavřeného vzduchu a ke zvýšení rychlosti proudění vzorkem. Experimenty byly provedeny na automatizované infiltrační sestavě [8], která zajišťovala kontinuální záznam hodnot kumulativních vtoků a výtoků, změn hmotnosti vzorku, tlakové výšky ve třech tenzometrech a objemové vlhkosti pomocí tří sond TDR. Na změny okamžitého objemu uzavřeného vzduchu ve vzorku se usuzovalo ze změn hmotnosti vzorku při kvazi ustáleném proudění.

2.4 Snímkování infiltrace neinvazivními metodami nukleární magnetickou rezonancí (MRI) a neutronovou tomografií (NT) (měřítko #3)

Pro velmi detailní studium procesu infiltrace bylo využito moderních neinvazivních diagnostických metod.

Ve výzkumném centru v Jülichu (FZJ), ICGIII/ICGIV bylo provedeno MRI snímkování opakované výtopové infiltrace v malém neporušeném vzorku půdy KH. MRI v půdě detekuje a zobrazuje vodu přitomnou ve velkých pórech. Snímkování půdy je na samé hranici možností současné MR techniky. Na špičkovém MRI skeneru ve FZJ se podařilo při experimentu získat 3D snímky počátečního zvlhčování půdy při infiltraci do suché i vlhké půdy a podrobnější 3D snímky distribuce vody během kvazi-ustáleného proudění.

Velmi detailní 3D snímkování opakované infiltrace do malého vzorku půdy KH bylo provedeno metodou NT na zařízení NEUTRA ve švýcarském Paul Scherrer Institutu (PSI). Zařízení v PSI umožňuje provádět neutronovou radiografii a tomografii vzorků. Princip metody je podobný standardní rentgenové počítačové tomografii, neutrony jsou narozdíl od rengenových paprsků nejcitlivější na kolize s lehkými prvky například vodou. Výsledkem NT je trojrozměrný snímek atenuačních koeficientů. Za určitých předpokladů je pomocí NT možné získat informaci o prostorovém rozložení vlhkosti ve vzorku ve vysokém rozlišení 3D snímku.

2.5 Infiltrační experimenty sledované optickou mikroskopií (měřítko #4)

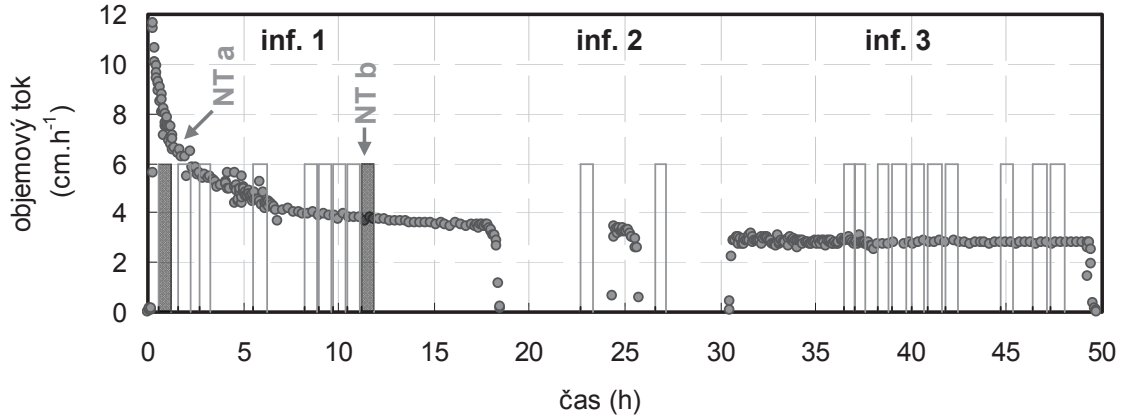
Ještě detailnější zkoumání procesu infiltrace umožnilo použití optického mikroskopu. I v tomto případě byla na vzorcích uzavřených ve speciální transparentní kyvetce provedena opakovaná výtopová infiltrace. Mikroskopem opatřeným digitální kamerou byl snímán obraz na boční stěně vzorku. Rozměry sledované oblasti byly 6x4 mm. Obrazová data byla ukládána v intervalu 1–5 s. Na digitálních snímcích byly poté identifikovány bublinky, jejich vznik a vývoj během experimentu. Pro tytéž experimenty byla také vyhodnocena data infiltračních a výtokových rychlostí.

3. Výsledky

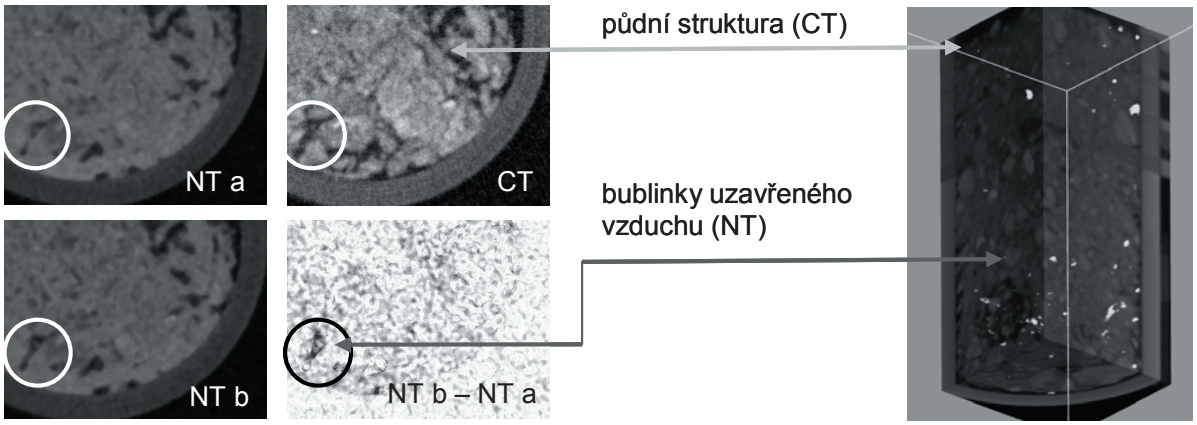
Výsledkem experimentů v každém ze čtyř měřítek je rozsáhlý soubor dat. Experimenty provedené na půdě KH v měřítcích #3 až #4 vykazovaly nestandardní průběh výtokových rychlostí, který je ale ve shodě s výsledky dříve provedených experimentů na stejné půdě [2, 12]. V obrázku 2 je jako příklad uveden průběh výtokových rychlostí při experimentu snímkovaném NT. Z obrázku je patrné, že při první infiltraci (inf. 1) započal výtok velmi krátce po zahájení infiltrace a objemový tok dosáhl hodnoty 12 $cm.h^{-1}$. Poté, při nepřerušené infiltraci, se objemové toky na vtoku i výtoku postupně snižovaly na hodnotu 3,6 $cm.h^{-1}$, tedy na 1/3 původní hodnoty. Při druhé infiltraci (inf. 2), která byla z technických důvodů předčasně ukončena i při třetí infiltraci (inf. 3) byly výtokové rychlosti vždy nižší než při předcházejících infiltracích. Při třetí infiltraci již k dalšímu poklesu objemových toků nedocházelo. Pro objasnění příčin poklesu výtokových rychlostí během první infiltrace byly analyzovány snímky NT získané během stejného experimentu. Vybrány byly dva snímky (označené v tomto textu jako NTa, NTb) (viz Obr. 2). Z rozdílu hodnot atenuačních koeficientů ve snímcích na obrázku 3 je patrné, že během první infiltrace došlo ke snížení atenuace neutronů (úbytku vody) v některých oblastech vzorku. Lokální úbytek vody za daných podmínek experimentu může být způsoben pouze jejím nahrazením plynnou fází - uzavřeným vzduchem. Obrázek 3 (vpravo) ukazuje vizualizaci nově vzniklých bublinek uzavřeného vzduchu během první infiltrace. Porovnáním snímku rentgenové počítačové tomografie a neutronové tomografie (viz Obr. 3 vlevo) bylo zjištěno, že určité množství vzduchu bylo již na počátku infiltrace zachyceno ve velkých pórech půdy. Zachycení bublinek ve větších pórech a zvětšování jejich velikosti během první infiltrace bylo shodně pozorováno také při experimentu se sledováním vzorku optickým mikroskopem (měřítko #4) [13].

Experimenty na velkých neporušených vzorcích (měřítko #2) byly dosud dokončeny pouze pro materiál SAND. Při opakované infiltraci na vzorku tohoto materiálu nebyl pozorován rozdíl mezi výtokovými rychlostmi při ustáleném proudění první a druhé infiltrace, proudění je v tomto ohledu v souladu s Richardsovou rovnicí. Při dalším experimentu, při kterém byla infiltrována odplyněná voda, infiltrační a výtoková rychlost postupně vzrůstala. Zároveň byl vlhkostními čidly detekován postupný nárůst vlhkosti. Tato pozorování indikují přítomnost uzavřeného vzduchu, který byl při infiltraci odplyněné vody do půdy postupně rozpouštěn.

Při opakovaných terénních výtopových infiltračních experimentech na lokalitě KH došlo k poklesu infiltrační rychlosti při první výtopové infiltraci, při všech dalších infiltracích byla infiltrační rychlost nižší než na konci první infiltrace a byla poměrně stabilní. Vzhledem ke komplexnosti terénního infiltračního experimentu bude možné výsledky terénních infiltrací interpretovat až po provedení důkladné analýzy dat inverzním modelováním infiltrace.



Obr. 2: Vývoj objemových toků na výtoku ze vzorku při experimentu monitorovaném neutronovou tomografií (body). Tenkými rámečky jsou vyznačeny časy snímkování NT, vyplněné rámečky vyznačují časy pořízení vybraných snímků (NTa, NTb).



Obr. 3: Příklad výsledků snímkováním vzorku neutronovou tomografií a rentgenovou počítačovou tomografií. Vlevo je zobrazen jeden řez vzorkem snímkovaný rentgenovou počítačovou tomografií (CT), neutronovou tomografií ve dvou časech po zahájení experimentu (NT a, NT b) a rozdíl hodnot atenuačních koeficientů těchto dvou snímků. Kroužkem je vyznačena oblast ve které došlo mezi snímkováním NTa a NTb k lokálnímu úbytku vody. Vpravo jsou na pozadí výřezu CT snímku bílou barvou zobrazeny bublinky uzavřeného vzduchu vzniklé v době mezi pořízením snímků NTa a NTb. Renderovaný 3D snímek zobrazuje 1/8 objemu vzorku.

4. Diskuse a závěr

Výsledky experimentů, které využívají kombinace standardních hydropedologických postupů s moderními neinvazívními metodami ukázaly, že při výtopové infiltraci do heterogenní půdy KH docházelo k významnému snižování objemového toku vzorkem při fázi experimentu, ve které se dle Richardsovy teorie očekává ustálené proudění. Pro danou konfiguraci experimentu lze tento jev popsat jako snižování kvazi-nasycené vodivosti půdy. Neinvazivními metodami bylo ve stejné fázi experimentu detekováno zvětšování objemu uzavřeného vzduchu ve velkých pórech.

Výsledky experimentů podporují platnost následující hypotézy definované dříve autory tohoto příspěvku [7]. Pokles kvazi-nasycené vodivosti půdy je způsoben úbytkem gravitační vody vytěsněné z preferenčních cest zvětšujícími se bublinkami uzavřeného vzduchu. Vzduch pochází z půdní matrice, ve které byl na počátku infiltrace uzavřen vodou protékající preferenčními cestami obklopujícími půdní matrici. Při pokračující infiltraci je voda přitahována do půdní matrice kapilárními silami a vzduch je vytěsňován do větších pórů - preferenčních cest. Zvětšující se bublinky uzavřeného vzduchu stále více blokují proudění v preferenčních cestách a celková hydraulická vodivost půdy se postupně zmenšuje.

Tyto jevy nelze matematicky simulovat použitím Richardovy rovnice, ani jejím rozšířením pro popis preferenčního proudění. Závěry zde popsané jsou platné pro studovanou půdy a aktuální uspořádání experimentů. Pro definování závěrů obecných bude třeba provést doplňující série experimentů na dalších půdách.

Poděkování

Tento výzkum vznikl v rámci projektu GAČR č. 103/08/1552.

Literatura

[1] CHRISTIANSEN, J. E., 1944. Effect of entrapped air upon the permeability of soils. Soil Sci. 58:355–365. ISSN: 0038-075X.

[2] CÍSLEROVÁ, M. – ŠIMŮNEK, J. –VOGEL. T. 1988. Changes of steady-state infiltration rates in recurrent ponding infiltration experiments. J. Hydrol. 104, 1–16. ISSN: 0022-1694

[3] BAIRD, A. J. – BECKWITH, C. W. – WALDRON, S. – WADDINGTON, J. M., 2004. Ebullition of methane-containing gas bubbles from near-surface Sphagnum peat. Geophysical Research Letters, 31(21), 4. ISSN: 0094-8276.

[4] SCHULTZE, B. – IPPISCH, O. – HUWE, B. – DURNER. W. 1999. Dynamic nonequilibrium during unsaturated water flow. pp 877–892. In: *Proc. of the Int. Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media.* Riverside, CA. 22–24 Oct. 1997. U.S. Salinity Lab., Riverside.

[5] FAYBISHENKO, B A., 1995. Hydraulic behaviour of quasi-saturated soils in the presence of entrapped air – laboratory experiment. Water Resour. Res., 31, 10, 2421-2435. ISSN: 0043-1397.

[6] HEILWEIL, V. M. – SOLOMON, D. K. – PERKINS, K. S. – ELLETT, K. M., 2004. Gas-partitioning tracer test to quantify trapped gas during recharge. Ground Water, 42, 4: 589-600. 0017-467X.

[7] SNĚHOTA, M. – SOBOTKOVÁ, M. – CÍSLEROVÁ, M., 2008. Impact of the entrapped air on water flow and solute transport in heterogeneous soil: experimental set-up In: *Journal of Hydrology and Hydromechanics.* 2008, 56, 4, 247-256. ISSN 0042-790X.

[8] KLUMP, S. – CIRPKA, O. A. – SURBECK, H. – KIPFER, R., 2008. Experimental and numerical studies on excess-air formation in quasi-saturated porous media, Water Resour. Res., 44, pp 1-15, 2008. ISSN: 0043-1397.

[9] AESCHBACH-HERTIG, W. – EL-GAMAL, H. – WIESER, M. – PALCSU, L., 2008. Modeling excess air and degassing in groundwater by equilibrium partitioning with a gas phase. Water Resources Research, 44, 8: 12. ISSN: 0043-1397.

[10] SNĚHOTA, M. – ZUMR, D. – PAVELKOVÁ, H. – SOBOTKOVÁ, M. – DOHNAL, M. et al., 2008. Field measurement of hydraulic properties of cambisols by instrumented infiltration experiment In: *Hydrological Extremes in Small Basins (XII Biennal International Conference ERB 2008).* Krakow: Jagellonian University in Krakow, pp 1-4. ISBN 978-83-88424-38-0.

[11] SNĚHOTA, M. – CÍSLEROVÁ, M. – AMIN, M. H. G. – HALL, L. D., 2010. Tracing the entrapped air in heterogeneous soil by means of magnetic resonance imaging In: *Vadose Zone Journal*. 9, 2, pp 373-384. ISSN 1539-1663.

[12] VOTRUBOVA, J. – CÍSLEROVÁ, M. – AMIN, M. H .G. – HALL, L. D., 2003. Recurrent ponded infiltration into structured soil: A magnetic resonance imaging study. Water Resources Research, 39, 12. ISSN: 0043-1397.

[13] DOBEŠ, J. – SNĚHOTA, M., 2009. Sledování uzavřeného vzduchu v půdě v blízkosti nasycení optickou mikroskopií In: *Zborník recenzovaných príspevkov, 17. Posterový deň s medzinárodnou účasťou a Deň otvorených dverí na ÚH SAV [CD-ROM].* Bratislava: Ústav hydrológie SAV, ISBN 978-80-89139-19-4.

Kontakty na autora

1 České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, e-mail: michal.snehota@fsv.cvut.cz

PREZENTACE POSTERŮ K SEKCI 3

INDIKACE PŘESYCENÍ PŮDY VODOU NA MALÉM HORSKÉM POVODÍ

Aleš Vondrka[1], Miloslav Šír [2], Miroslav Tesař [2]

Abstrakt

Experimentální výzkum srážko-odtokového vztahu na malém povodí prokázal, že rozhodujícími faktory formování dešťového odtoku jsou: stavba a tvar povodí, hydrofyzikální vlastnosti půdy a podloží, zaplnění podloží vodou, retenční kapacita povodí (zahrnuje rovněž vliv rostlinného krytu), tenzometrické tlaky v půdě, které ukazují, jak pevně je voda poutána v půdních pórech [1]. Bylo prokázáno, že vzrůst tenzometrických tlaků nad určitou limitní hodnotu vyvolává gravitačně destabilizované proudění vody v půdě. V jeho důsledku vznikají na malých povodích povodňové vlny se strmým nástupem [3]. Vzestupná část odtoku je tvořena převážně „starou" vodou poutanou v půdě. Analýza tvorby odtoku v těchto situacích umožní lépe pochopit mechanismy tvorby extrémních odtoků na malých povodích, zejména podíl „staré" a „nové" vody v jednotlivých fázích odtoku. V příspěvku se popisuje metoda separace hydrogramu dešťového odtoku založená na měření koncentrace iontů ve vodách. Cílem je odlišit „starou" a „novou" vodu protékající uzávěrovým profilem malého horského povodí. Jako „nová voda" se označuje voda srážková, která byla v kontaktu s půdou jen velice krátkou dobu – několik minut nebo hodin. Termín „stará voda" označuje vodu, která byla zadržena v půdě po mnoho dní nebo týdnů. Jako stopovače se použijí Na^+ a K^+ ionty [3]. Je totiž známo, že koncentrace K^+ v půdní vodě klesá s trváním styku vody s půdou a kořeny rostlin, tudíž koncentrace K^+ ve vodě v toku je indikátorem stáří vody, která tokem protéká [4]. Metoda umožňuje včasnou výstrahu před vznikem nebezpečné odtokové situace na malém povodí tím, že s dostatečným předstihem indikuje gravitačně nestabilní stav půdní vody, tedy počínající přesycení půdy v povodí vodou. Příspěvek vznikl v rámci řešení grantů GAČR (526/08/1016, 205/09/1918) a MŽP ČR (Vav Sp 1a6/151/07).

Klíčová slova: půdní voda, separace hydrogramu, gravitačně destabilizované proudění

Literatura

[1] HLAVČOVÁ, K. – HOLKO, L. – SZOLGAY, J., 2001. Runoff Generation and Modelling on the Hillslopes and in the Small Catchments. Životné Prostredie, roč. 35, pp 126–132.

[2] PITTER, P., 1999. Hydrochemie. VŠCHT Praha, s. 85 – 87.

[3] TESAŘ, M. – ŠÍR, M. – PRAŽÁK, J. – LICHNER, Ľ., 2004. Instability driven flow and runoff formation in a small catchment. Geologica Acta, roč. 2, č. 1, s. 147–156.

[4] VONDRKA, A. – ŠÍR, M. – TESAŘ, M., 2007. Separace hydrogramu dešťového odtoku pomocí elektrochemických měření. In: *Sborník příspěvků z workshopu Adolfa Patery „Extrémní hydrologické jevy v povodích".* Bratislava 13. 9. 2007, s. 155–162.

Kontakty na autora

1 Střední škola rybářská a vodohospodářská Jakuba Krčína, Třeboň, e-mail: avondrka@ssrv.cz

2 Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v.v.i., Pod Paťankou 30/5, 166 12 Praha 6, e-mail: milo_sir@yahoo.com, tesarihas@iol.cz

VPLYV HYDROFÓBNOSTI POVRCHU PÔDY NA INFILTRÁCIU DÁŽĎOVEJ VODY DO PÔDY

Ľubomír Lichner[1], Tomáš Orfánus[1], Miroslav Tesař [2], Miloslav Šír[2]

Abstrakt

Hydrofóbne látky v povrchovej vrstve pôdy zmenšujú infiltráciu vody do pôdy a spôsobujú tvorbu výtopy. Počas dažďa s dostatočnou intenzitou možno preto pozorovať hortonovské povrchové prúdenie, ktoré vzniká vtedy, keď intenzita zrážky prekročí rýchlosť infiltrácie do pôdy. Lokalizácia a frekvencia preferovaných ciest (makropórov otvorených na povrchu pôdy) a plôch zmáčavej alebo menej hydrofóbnej pôdy (priestorová variabilita hydrofóbnosti povrchovej vrstvy pôdy) určuje plošný rozsah povrchového prúdenia. Preferované prúdenie je prúdenie vertikálne orientovanými preferovanými cestami v pôde, ktoré sú počas prívalovej zrážky vlhkejšie a vedú viac vody cez jednotkovú plochu prierezu ako okolitá pôda. Aj keď preferované prúdenie vody v pôde sa nespája výlučne s hydrofóbnymi pôdami, hydrofóbnosť môže mať za následok buď zníženie rýchlosti prúdenia vody v pôdnej matrici a nasmerovanie časti vody do makropórov alebo prúdenie prstami (fingering) v hydrofóbnej pôdnej matrici. Hlavné hydrologické a geomorfologické dôsledky hydrofóbnosti sú: (a) zmenšenie rýchlosti infiltrácie vody do pôdy, (b) zväčšenie povrchového prúdenia, (c) priestorovo lokalizovaná infiltrácia a/alebo perkolácia a prúdenie prstami, (d) účinky na trojrozmerné rozdelenie a dynamiku pôdnej vlhkosti, evapotranspiráciu, ako aj klíčenie a rast rastlín, (e) zväčšenie odtoku po búrke, (f) zväčšenie celkového odtoku a (g) zväčšenie erózie pôdy. V príspevku sú uvedené metódy terénneho merania stálosti a indexu hydrofóbnosti pôdy a ich výsledky, závislé jednak od aktuálneho počasia a z toho vyplývajúcej vlhkosti a teploty pôdy a teploty vzduchu, ale tiež od priestorovej variability rozdelenia hydrofóbnych látok v povrchovej vrstve pôdy. Sú tu prezentované aj dôsledky hydrofóbnosti pôdy, a to prerozdelenie vody na povrchu pôdy v dôsledku povrchového odtoku, vytváranie kaluží v plytkých priehlbinách terénu a prúdenie prstami v piesočnatej pôde pokrytej borovicovým lesom a trávnatým porastom pri infiltrácii vody aplikovanej postrekom [1], [2]. V závere sú opísané metódy predikcie hydrofóbnosti a včasnej výstrahy pred vznikom preferovaného prúdenia v pôde. Príspevok vznikol v rámci riešenia grantu VEGA 2/0170/09 a MŠMT ČR (MEB 0808114).

Klíčová slova: hydrofóbnosť pôdy, index hydrofóbnosti, prúdenie prstami

Literatura

[1] LICHNER, Ľ. – HALLETT, P. D. – FEENEY, D. S. – ĎUGOVÁ, O. – ŠÍR, M. – TESAŘ, M., 2007. Field measurement of soil water repellency and its impact on water flow under different vegetation. Biologia, roč. 62, č. 5, s. 537–541.

[2] LICHNER, Ľ. – NAGY, V. – HOUŠKOVÁ, B. – ŠÍR, M. – TESAŘ, M., 2008. Impact of land-use change on hydraulic properties of wettable and hydrophobic soils. Cereal Research Communications, roč. 36, Suppl., s. 1599–1602.

Kontakty na autora

1 Ústav hydrológie SAV, Račianska 75, 831 02 Bratislava,
e-mail: lichner@uh.savba.sk, rfanus@uh.savba.sk

2 Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v.v.i., Pod Paťankou 30/5, 166 12 Praha 6,
e-mail:milo_sir@yahoo.com, tesarihas@iol.cz

ZÁSOBY PÔDNEJ VODY V ZÁVISLOSTI OD HLADINY PODZEMNEJ VODY

Katarína Nováková[1], Igor Sobocký[1]

Abstrakt

V povodí rieky Moravy boli podľa pôdneho druhu vybrané 4 lokality, na ktorých prebieha monitoring hĺbok hladín podzemnej vody a vlhkosti pôdy. Sú to lokality: Veľké Leváre – piesočnatá pôda, Kostolište – hlinitopiesočnatá pôda, Jakubov – piesočnatohlinitá pôda, Vysoká pri Morave – hlinitá pôda. V príspevku sú vyhodnotené hydrofyzikálne vlastnosti pôdy na jednotlivých lokalitách. Vlhkosť pôdy sa merala v dvojtýždňových intervaloch od povrchu pôdy po hladinu podzemnej vody, na stanovenie vlhkosti bola použitá neutrónová metóda. Kolísanie hladín podzemnej vody počas hydrologického roka má vplyv na zásobu vody v pôdnom profile. Vo vegetačnom období pri poklese hladiny podzemnej vody a pri zvýšenej evapotranspirácii klesajú zásoby vody v pôde do takej miery, že by bolo vhodné použiť doplnkovú závlahu. Obsah vody v pôde závisí aj od retenčnej schopnosti pôd, ktorá je rozdielna na vybraných lokalitách a závisí predovšetkým od zrnitostného zloženia pôdy.

Z meraní vlhkosti pôdy na sledovaných lokalitách sa vypočítali zásoby vody vo vrstve pôdy do 0,3 m a od 0,3 m po hladinu podzemnej vody [1]. Hladina podzemnej vody významne ovplyvňuje zásobu vody v pôde [2]. Najplytšia hladina podzemnej vody bola skoro na jar na lokalite Veľké Leváre 0,80 m a najhlbšia na konci vegetačního obdoba na lokalite Vysoká pri Morave 1,88 m. Z retenčných čiar, ktoré boli stanovené na sledovaných lokalitách, sa určilo rozmedzie vlhkosti optimálne pre rostliny. Zásoby vody v pôde sú najnižšie na lokalite Veľké Leváre s piesočnatou pôdou, najmä vo vrstve 0 - 0,3 m, a to počas celého vegetačného obdobia a často klesajú až na bod vädnutia. Hladina podzemnej vody ovplyvňuje vlhkosť iba najhlbšej vrstvy (asi 0,3 m nad hladinou podzemnej vody), do ktorej už nesiaha koreňová sústava. Na tejto lokalite je nevyhnutné zavlažovať. Na ďalších lokalitách v dôsledku lepšej retenčnej schopnosti pôdy sú zásoby vody v celom pôdnom profile podstatne vyššie.

Kľúčové slová: zásoba pôdnej vody, hladina podzemnej vody, hydrofyzikálne vlastnosti

Literatúra

[1] ŠÚTOR, J. – MAJERČÁK, J., 2000. Kvantifikácia dynamiky zásob vody v nenasýtenej zóne pôdy ako súčasti hydrologického cyklu. In: *Zborník z 5. medzinárodnej konferencie UNESCO Hydrologické dny- Nové podnety a vize pro příští století.* Plzeň: s. 83-88. ISBN 80-85813-76-9

[2] KANDRA, B. – GOMBOŠ, M. – ŠÚTOR, J. – TALL, A., 2009. Interakcia zóny aerácie pôdy s hladinou podzemnej vody. In: *17th International Poster Day. Transport of Water, Chemicals and Energy in the Soil- Plant- Atmosphere System.* Bratislava: ÚH SAV, s. 277-285. ISBN 978-80-89139-19-4

Kontakty na autora

1 Výskumný ústav pôdoznalectva a ochrany pôdy, Bratislava, e-mail: k.novakova@vupop.sk, i.sobocky@vupop.sk

VZÁJEMNÉ OVLIVŇOVÁNÍ A PROPORCE POVRCHOVÉ A PODZEMNÍ VODY V CELKOVÝCH ODTOCÍCH

Josef Buchtele[1], Miroslav Tesař [1], Miloslav Šír[1]

Abstrakt

Určujícími činiteli pro vytváření a vývoj vodních zdrojů je kolísavý příkon sluneční energie, kolísavý srážkový režim a často i měnící se vegetační a geomorfologické podmínky v povodí. Ve vodním režimu povodí se projevují účinky meziročního kolísání hydrologického cyklu a účinky vnějších impulsů a zásahů, jako jsou výbuchy sopek, odlesnění, změna obhospodařování půd apod. Účinky všech těchto vlivů na vodní režim lze identifikovat a kvantifikovat pomocí simulací srážko-odtokového procesu koncepčně bilančními modely. K modelování srážko-odtokového procesu pro experimentální a vodohospodářsky významná povodí v ČR se používá model SAC-SMA [1], [2], [4]. Jeho užitím např. pro povodí Svitavy, Dědiny a Košáteckého potoka byl zjištěn výraznější pokles průtoků v tocích v bezsrážkových obdobích ve srovnání s roky předcházejícími vodárenským odběrům z geologických křídových struktur v těchto povodích. Ze simulací pro zmiňovaná povodí lze usuzovat, že podpovrchový odtok může tvořit v celoročních odtocích až 70 %. Naproti tomu při výrazné povodni na Moravě v červenci 1997 byl poměr povrchového a podzemního odtoku právě opačný. Modelem SAC-SMA lze simulovat také vliv jiných změn v povodí (změna vegetačního krytu, obdělávání, infiltrační schopnosti půd apod.) na vytváření zásob vody a odtok vody z povodí [3]. V příspěvku jsou ukázány výsledky simulací za použití modelu SAC-SMA na vybraných povodích ČR s ohledem na vzájemné ovlivňování a proporce povrchové a podzemní vody v celkových odtocích. Pozornost bude zaměřena zejména na dlouhodobé sledování a vyhodnocování jednotlivých prvků vodní bilance na malém lesním povodí Liz v horské oblasti Šumavy a jejich srovnání s modelovými výstupy. Příspěvek vznikl v rámci řešení projektu MŽP ČR (VaV Sp 1a6/151/07).

Klíčová slova: podpovrchový odtok, podzemní odtok, vodní bilance povodí

Literatura

[1] BUCHTELE, J. – BUCHTELOVÁ, M., 2006. K poznatkům z dlouhodobých řad sledování povodňového režimu v povodí Vltavské kaskády. Vodní hopodářství, roč. 56, č. 11, s. 378–380. ISSN 1211-0760.

[2] BUCHTELE, J. – BUCHTELOVÁ, M. – FOŘTOVÁ, M., 2008. Kolísání a tendence v režimu odtoků povodí českého Labe. Vodní hopodářství, roč. 58, č. 7, s. 251–255. ISSN 1211-0760.

[3] BUCHTELE, J. – BUCHTELOVÁ, M. – TESAŘ, M. – ŠÍR, M., 2005. Porovnání měření a simulace půdní vody. In: *Hydrologie malého povodí 2005*. Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, s. 15–22. ISBN 80-02-01754-4.

[4] BUCHTELE, J. – TESAŘ, M., 2010. Simulation of a rainfall-runoff process for the evaluation of variability in the river flow regime in small basins with vegetation changes. *Folia Geographica*, roč. XLI, s. 103–110. ISSN 0071-6715.

Kontakty na autora

1 Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v.v.i., Pod Paťankou 30/5, 166 12 Praha 6,
e-mail: j.buchtele@volny.cz, tesarihas@iol.cz, milo_sir@yahoo.com

VZNIK GRAVITAČNĚ DESTABILIZOVANÉHO PROUDĚNÍ A JEHO ROLE VE VYTVÁŘENÍ ODTOKU Z POVODÍ

Tomáš Fürst[1], Michal Bíl[1], Rostislav Vodák[1], Josef Pražák[2], Miroslav Tesař [3], Miloslav Šír [3]

Abstrakt

Formování odtoku v malém povodí je charakterizované dvěma anomálními jevy: (1) Vyskytují se situace, kdy vsak dešťové vody způsobí snížení objemu vody zadržované v půdě. (2) V těchto situacích dochází ke gravitačně destabilizovanému proudění vody v půdě, které způsobuje výtok vody do podložních horizontů. V takovém případě protéká půdou velké množství vody. V hydrologickém měřítku tak dochází k formování objemově významného odtoku z povodí. Gravitačně destabilizované proudění vody je vysvětlováno jako následek náhlého zvodivění půdy vlivem nepatrného zvětšení vlhkosti, tedy zmenšení kapilárních sil, které poutají vodu v půdě [2]. Tento typ proudění není popsatelný standardní teorií proudění půdní vody, která je založena na rovnici difúzního typu [1].Gravitačně destabilizované proudění objasňuje, proč půda zeslabuje nebo zesiluje srážkové pulzy při jejich transformaci na výtok v závislosti na aktuální retenci vody v půdě. Je-li retence nižší než prahová (kapilární síly jsou velké), pak jsou srážkové pulzy utlumeny až k nulovému výtoku. Je-li větší (kapilární síly jsou malé), může být výtok z půdy dokonce i větší než srážkový přítok, a to o objem vody zadržované před deštěm v půdě a pak náhle uvolněné. Tímto způsobem se vysvětluje rychlý růst vzestupné větve hydrogramu odtoku z povodí při srážce [3]. Rychlý výtok může být způsoben jakýmkoliv deštěm nezávisle na jeho intenzitě, trvání a úhrnu. V příspěvku je analyzován hydrodynamický mechanismus gravitačně destabilizovaného proudění pomocí simulačních výpočtů. Na příkladu malého horského povodí je ukázáno, jak vzniká gravitačně destabilizované proudění a jak vytváří odtokové vlny. Je navržena metoda včasné výstrahy před gravitačně destabilizovaným prouděním založená na měření kapilárních sil (tenzometrických tlaků) v půdě. Příspěvek vznikl v rámci řešení grantu GAČR 526/08/1016.

Klíčová slova: formování odtoku, gravitačně destabilizované proudění, kapilární síly

Literatura

[1] FÜRST, T. – VODÁK, R. – ŠÍR, M. – BÍL, M., 2009. On the incompatibility of Richards' equation and finger-like infiltration in unsaturated homogeneous porous media, Water Resources Research, roč. 45, W03408, doi:10.1029/2008WR007062.

[2] ŠÍR, M. – TESAŘ, M. – VONDRKA, A. – PRAŽÁK, J. – BÍL, M. – FÜRST, T., 2007. Identification of hydrophysical soil properties invoking the gravity-driven flow. In: *Proc. of. Conf. 15th International Poster Day "Transport of Water, Chemicals and Energy in the System Soil – Crop Canopy – Atmosphere"*. 15th November 2007, Bratislava, pp 560–568.

[3] TESAŘ, M. – ŠÍR, M. – PRAŽÁK, J. – LICHNER, Ľ., 2004. Instability driven flow and runoff formation in a small catchment. Geologica Acta, roč. 2, č. 1, pp 147–156.

Kontakty na autora

1 Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, tř. 17. listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc, e-mail: rostislav.vodak@upol.cz, tomas.furst@upol.cz, michal.bil@upol.cz

2 Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i., Dolejškova 1402/5, 182 00 Praha 8, e-mail: prazak@it.cas.cz

3 Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v.v.i., Pod Paťankou 30/5, 166 12 Praha 6, e-mail: tesarihas@iol.cz, milo_sir@yahoo.com

SIMULACE VLIVU REDISTRIBUCE SRÁŽKOVÉ VODY V BUKOVÉM A SMRKOVÉM LESE NA HYDROLOGICKÝ REŽIM PŮD NA SVAHU

Radka Kodešová[1], Antonín Nikodem[1], Libuše Bubeníčková[2], Luboš Borůvka [1], Lenka Pavlů [1]

Abstrakt

Proudění vody v dvourozměrném půdním profilu na svahu bylo modelováno pomocí programu HYDRUS 2D/3D [3,4]. Tento model popisuje proudění vody v půdě na základě Richardsovy rovnice. Pomocí tohoto modelu je možné například simulovat dotaci podzemní vody nebo povrchový odtok (a to v případě, že infiltrační kapacita půdy a rychlost infiltrace je nižší než intenzita dotovaných srážek). Studie byla provedena pro dva půdní typy (podzol a kambizem) z lokality Paličník a Smědavská hora v Jizerských horách. Pozornost byla zaměřena na vliv přerozdělení srážkové vody (podkorunové srážky a stok po kmeni) [1] na proudění vody v půdě, povrchový odtok, dotace podzemní vody atd. Byly porovnány 3 varianty: a) rovnoměrná distribuce srážek, b) redistribuce srážek pod buky, c) redistribuce srážek pod smrky. Studie proudění vody v podzolu v bukovém lese byla již publikována [2].

Bylo prokázáno, že v bukovém lese (kde je procento stoku po kmeni vyšší než ve smrkovém lese) se významně zvýšil simulovaný povrchový odtok. Zároveň se však zvýšil i vliv soustředěného infiltračního toku podél kmene stromu na režim půdní vody. Soustředěný tok u kmenů stromů (v obou případech – buk a smrk) zapříčinil nerovnoměrné rozdělení vody v simulovaných půdních transektech a zvýšil odtok vody dnem půdního profilu (zvýšil dotaci podzemní vody).

Klíčová slova: lesní půda, vodní režim, podkorunové srážky, stok po kmeni, numerická simulace

Literatura

[1] KANTOR, P., 1985. Příspěvek k problematice horizontálních srážek v horských lesích. Zprávy lesnického výzkumu, 30, s. 42–45. ISSN 0322-9688.

[2] NIKODEM, A. – KODEŠOVÁ, R. – DRÁBEK, O. – BUBENÍČKOVÁ, L. – BORŮVKA, L. – PAVLŮ, L. – TEJNECKÝ, V., 2010. A numerical study of the impact of precipitation redistribution in a beech forest canopy on water and aluminium transport in a Podzol. Vadose Zone Journal, 9, pp 238-251. ISSN 1539-1663.

[3] ŠIMŮNEK, J. – VAN GENUCHTEN, M. TH. – ŠEJNA, M., 2006. The HYDRUS software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 1.0. Technical Manual. PC Progress, Prague.

[4] ŠIMŮNEK, J. – VAN GENUCHTEN, M. TH. – ŠEJNA, M., 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes. Vadose Zone Journal, 7, pp 587–600. ISSN 1539-1663.

Kontakty na autora

1 Česká zemědělská univerzita v Praze, e-mail: kodesova@af.czu.cz, nikodem@af.czu.cz, boruvka@af.czu.cz, pavlu@af.czu.cz

2 Český hydrometeorologický ústav, e-mail: bubenickova@chmi.cz

SEKCE 4

NOVÉ PŘÍSTUPY K ODVOZENÍ HYDROLOGICKÝCH REŽIMOVÝCH CHARAKTERISTIK

MAPOVANIE N-ROČNÝCH MAXIMÁLNYCH DENNÝCH ÚHRNOV ZRÁŽOK NA ÚZEMÍ SLOVENSKA

Renáta Remiašová[1], Pavol Faško[2], Silvia Kohnová[1], Kamila Hlavčová[1], Ladislav Gaál[1]

Abstrakt

Mapovanie povodňového rizika, hydrologické modelovanie, dimenzovanie rôznych vodohospodárskych stavieb, či integrovaný manažment povodí si vyžaduje poznanie pravdepodobnosti výskytu maximálnych úhrnov zrážok. Mimoriadne úhrny zrážok sa vyskytujú sporadicky a ich veľkosť je výsledkom kombinácie viacerých klimatologických faktorov. Predložený príspevok sa zaoberá mapovaním 2 a 100ročných maximálnych denných úhrnov zrážok na území Slovenska. Na analýzu bol použitý rad ročných maximálnych denných úhrnov zrážok za obdobie 1951-2000 z 557 staníc na Slovensku. Testovaných bolo 5 typov trojparametrických distribučných funkcií: generalizované extremálne rozdelenie (GEV), generalizované logistické rozdelenie (GLO), generalizované normálne rozdelenie (GNO), Pearsonovo rozdelenie III. Typu (PE3) a generalizované rozdelenie Pareto (GPA). Lokálny odhad ich parametrov bol vykonaný pomocou L-momentového algoritmu. Pre regionálny odhad bola použitá metóda vplyvného regiónu (ROI) a extremálne rozdelenie GEV. Pre priestorovú regionalizáciu zrážok boli použité viaceré interpolačné metódy: metóda inverzne váženej vzdialenosti, kriging a cokriging. V závere je urobené porovnanie máp 100ročných maximálnych denných úhrnov zrážok zíkaných interpoláčnou metódou kriging s expertne vytvorenou mapou.

Klíčová slova: ročné maximálne denné úhrny zrážok, frekvenčná analýza, interpolačné metódy

1. Úvod

Mimoriadne úhrny zrážok sa vyskytujú sporadicky a ich veľkosť je výsledkom kombinácie klimatologických faktorov. Úlohou analýzy početnosti výskytu (frekvenčnej analýzy) extrémnych úhrnov zrážok je podávať pravdepodobnostné odhady o veľkosti zrážkového úhrnu určitého trvania, ktorý sa môže pozorovať na určitej stanici alebo na uvažovanom území s danou pravdepodobnosťou. Priestorová analýza mimoriadnych úhrnov zrážok sa spravidla odvádza z maxím denného úhrnu (resp. iného časového intervalu) zaznamenaných na príslušných meteorologických staniciach a následne sa interpoluje do priestoru pre každý bod skúmaného územia. V uplynulom období sa spracovaniu a vyhodnocovaniu maximálnych zrážok venovala pozornosť vo svete, ako aj v Európe. V USA bol vypracovaný atlas NOAA č. 14, ktorý slúži na odhad návrhových hodnôt úhrnov zrážok pre trvanie od 5 minút až po 60 dní, a to pre priemernú dobu opakovania *N* od 2 do 1000 rokov. Na Novom Zélande vyvinuli softvér HIRDS určený na odhad návrhových hodnôt mimoriadnych úhrnov zrážok [1]. Zahŕňa v sebe odhad parametrov metódou pravdepodobnosťou vážených momentov [2], metódu vplyvného regiónu [3], mapovanie tzv. indexového dažďa a regionálnych čiar prekročenia. Návrhové hodnoty úhrnov zrážok sa určujú na základe rozdelenia GEV. Príručka FEH [4] je určená na odhad návrhových prietokov, resp. vysokých úhrnov zrážok na území Veľkej Británie. V rámci rozsiahleho vedecko-výskumného projektu KOSTRA [5] sa štatistickým spracovaním extrémnych hodnôt zrážkových úhrnov zaoberala Nemecká meteorologická služba. Weisse a Bois [6,7] porovnávali kriging a regresnú metódu pri mapovaní 10 a 100ročných návrhových úhrnov zrážok trvania 1–24 hodín vo Francúzskych Alpách.

Extrémnymi dennými úhrnmi zrážok a ich významnosťou sa v našom regióne zaoberali viacerí autori [8,9,10,11,12,13,14]. Práce [15,16] sú venované problematike možného rastu výskytu a úhrnov extrémnych zrážok v súvislosti s klimatickou zmenou.

Odhad zrážkového úhrnu určitého trvania sa vzťahuje len na príslušnú meteorologickú stanicu. Modelovanie rôznych procesov v prírode si však vyžaduje priestorovú informáciu, preto sa v posledných rokoch hovorí o narastajúcej potrebe zovšeobecňovať výsledky bodových meraní na celé záujmové územie. Existuje široký výber interpolačných metód, od jednoduchých – Thiessenovych polygónov, či metódy inverzne váženej vzdialenosti (IDW) až po zložitejšie stochastické metódy, medzi ktoré sa radí kriging a cokriging, prípadne ich rôzne varianty [17,18].

2. Vstupné údaje

Ako vstupné údaje boli použité spracované ročné maximálne denné úhrny zrážok z 557 staníc za obdobie 1951–2000. Jedná sa o taký výber staníc, kde kontinuálny rad doplnených údajov nie je dlhší ako 5 rokov a celkove menej ako 10 rokov. Doplňovanie chýbajúcich maxím denných úhrnov zrážok urobil P. Faško z SHMÚ ešte v roku 2000.

3. Metódy odhadu N-ročných maximálnych úhrnov zrážok

Na určenie návrhových hodnôt (resp. kvantilov) ročných maximálnych denných úhrnov zrážok sme použili lokálny odhad parametrov teoretického rozdelenia pravdepodobnosti. Nakoľko sme sa rozhodli, že odhad parametrov vybraných distribučných funkcií vykonáme pomocou L-momentového algoritmu [2], na každej stanici sme potrebovali určiť trojicu parametrov (lokálne štatistiky) priemer, L-koeficient variácie a L-šikmosť. Výber vhodnej distribučnej funkcie, resp. metódy odhadu jej parametrov majú mimoriadny vplyv na výsledné návrhové hodnoty. Testovali sme 5 typov distribučných funkcií: generalizované extremálne rozdelenie (GEV), generalizované logistické rozdelenie (GLO), generalizované normálne rozdelenie (GNO), Pearsonovo rozdelenie III. typu (PE3) a generalizované rozdelenie Pareto (GPA). Ide o trojparametrické rozdelenia, matematický popis pozri bližšie v prácach [2,19].

Na overenie vhodnosti vybraného rozdelenia pravdepodobnosti s odhadnutými parametrami sme použili Anderson-Darlingov test dobrej zhody. Patrí medzi tzv. EDF (empirical distribution function) testy, ktoré sú založené na porovnávaní medzi hypotetickou a empirickou distribučnou funkciou. Výsledkom Anderson-Darlingovho testu je hodnota A^2 a jej pravdepodobnosť P [20], pričom platí:

$$A^2 = -n - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\{(2i-1)\ln[F(x_i,\theta)] + (2n+1-2i)\ln[1-F(x_i,\theta)]\} \quad (1)$$

kde n je veľkosť výberového súboru, F označuje vybranú distribučná funkciu a θ je vektor parametrov distribučnej funkcie. Kritické hodnoty testu sa určujú na základe hladiny významnosti α. Pre účely tejto práce sme použili kritické hodnoty na hladine významnosti α = 10 %, t.j. testom neprešli všetky hodnoty $P(A^2)$ väčšie než 0,90. Prehľad testovaných distribučných funkcií s počtom staníc, pre ktoré je dané teoretické rozdelenie vhodné je uvedený v Tab. 1. Z analýzy jednoznačne vyplýva, že pre väčšinu staníc (501) z celkového počtu 557 je najvhodnejšie použiť extremálne rozdelenie GEV.

Tab.1: Počet staníc, ktoré prešli testom dobrej zhody

Distribučná funkcia	Počet staníc	Počet staníc v [%]
GEV	501	89,95 %
GLO	475	85,28 %
GNO	454	81,51 %
PE3	418	75,05 %
GPA	142	25,49 %

Regionálny odhad kvantilov sme vykonali pomocou metódy vplyvného regiónu (ROI) [3]. ROI je jednou z alternatív regionálnej frekvenčnej analýzy. Zásadným pilierom metódy ROI je myšlienka, že nie je nutné vymedziť pevné hranice medzi regiónmi; namiesto toho sa regióny definujú flexibilným spôsobom. To znamená, že každá analyzovaná stanica má svoj vlastný, unikátny región, ktorý pozostáva z určitého počtu dostatočne podobných staníc, z ktorých sa potom prenášajú informácie o extrémnych úhrnov zrážok do miesta záujmu. Podobnosť staníc sme posudzovali na základe geografickej blízkosti (skutočnej vzdialenosti medzi stanicami). Tento predpoklad je podopretý aj faktom, že analyzujeme ročné maximá jednodenných úhrnov zrážok, ktorých výskyt prevažuje v teplom polroku, pričom mimoriadne úhrny zrážok v tejto sezóne často pochádzajú z konvektívnych zrážkotvorných procesov s obmedzeným priestorovým rozsahom.

Metodika ROI pozostáva z dvoch kľúčových krokov. V prvom kroku definujeme vplyvný región pre danú stanicu s cieľovým počtom staníc N_T= 5 staníc v regióne, ktorý zahŕňa danú stanicu a N_T - 1najbližších staníc k nej. Ak vplyvný región s počtom staníc N_T je homogénny, čo sa overuje testom regionálnej homogenity od Lua a Stedingera [21], cieľový počet staníc bude aj finálnym počtom staníc vo vplyvnom regióne. V opačnom prípade nastane iteračný proces pridávania ďalšej najbližšej stanice do existujúceho regiónu a následného testovania homogenity, kým sa región vplyvu stáva homogénnym. V prípade zlyhania procesu budovania (t.j. nenastane homogenita ani po pridaní všetkých možných staníc do regiónu vplyvu) nastupuje opačný proces - postupné odstránenie najvzdialenejšej stanice z existujúceho regiónu a následné testovanie homogenity, kým sa región vplyvu stáva homogénnym. V druhom kroku sa každej stanici, ktorú sme zaradili do vplyvného regiónu cieľovej stanice priradí nenulový regionálny váhový koeficient, ktorý je nepriamo úmerný jej skutočnej vzdialenosti k cieľovej stanici. Tieto váhy potom hrajú úlohu v prenose informácií do cieľovej stanice: regionálny odhad L-koeficientu variácie a L-šikmosti na cieľovej stanici sa určuje ako vážený regionálny priemer odpovedajúcich štatistík zo všetkých staníc vplyvného regiónu [12].

4. Mapovanie N-ročných maximálnych denných úhrnov

Na priestorovú interpoláciu kvantilov ročných maximálnych denných úhrnov zrážok bola použitá metóda kriging. Geoštatistická analýza pozostáva z týchto základných krokov: skúmania kovariancie hodnôt bodových meraní ako funkcie ich vzájomnej vzdialenosti, definovania, resp. určenia teoretického modelu tejto závislosti – tzv. semivariogramu a použitia modelu semivariogramu pri určení váh jednotlivým bodom zúčastňujúcim sa interpolácie. Hodnoty podobnosti jednotlivých dvojíc bodov, ktoré sú od seba rôzne vzdialené, sa v geoštatistike vyjadrujú vo forme kovariancie. Najčastejšie používanou grafickou formou vyjadrenia tejto podobnosti (priestorovej korelácie) je konštrukcia semivariogramu [22]. Semivariancia ako meradlo priestorovej korelácie je definovaná ako:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Y(x_i + h)]^2 \qquad (2)$$

kde $N(h)$ je počet dvojíc nachádzajúcich sa vo vzdialenosti h, $Z(x_i)$ je hodnota premennej v bode i a $Z(x_i+h)$ je hodnota premennej vo vzdialenosti h od bodu i.

Na získanie optimálnych váh pre interpoláciu je potrebné určiť (aproximovať) na vypočítané bodové hodnoty semivariancie jeden z teoretických modelov. Táto aproximácia môže byť realizovaná buď vizuálne alebo pomocou niektorej z matematických metód (napr. metódou najmenších štvorcov). Za model teoretického semivariogramu sme zvolili exponenciálny model vyjadrený v tvare:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1[1 - e^{-(h/a)}] \tag{3}$$

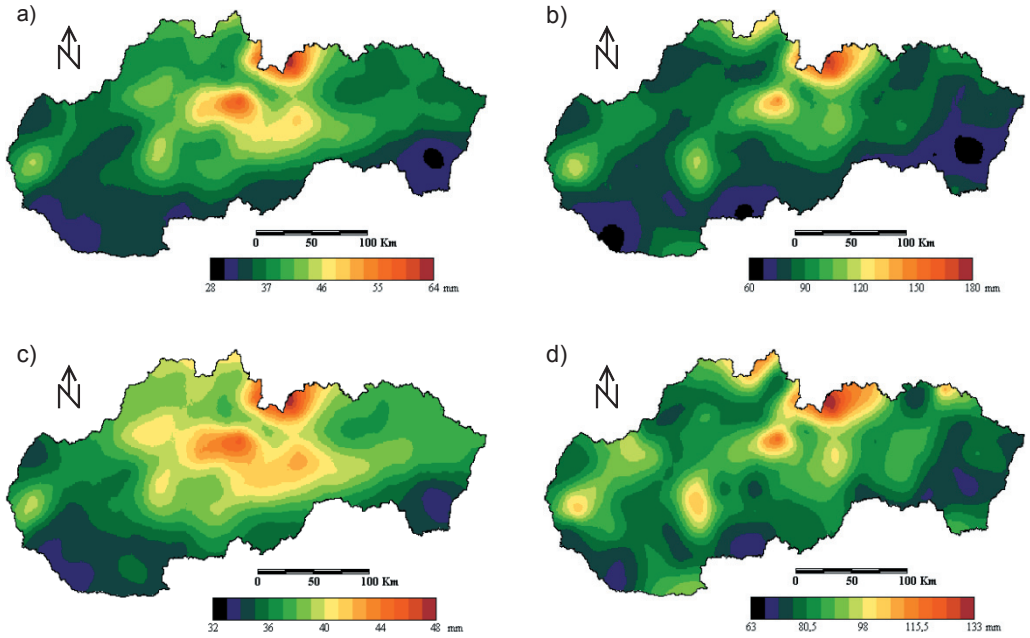
kde C_0 je koeficient, charakterizujúci variabilitu skúmaného javu v rámci malej vzdialenosti h od bodu alebo tiež chybu merania skúmanej premennej, C_1 je rozdiel C_{SILL} - C_0, C_{SILL} je variancia náhodnej premennej a a je rozsah vplyvu funkcie semivariogramu, resp. vzdialenosť v akej dosiahne funkcia C_{SILL}. Indikuje vzdialenosť, v ktorej už hodnoty nevykazujú priestorovú koreláciu.

Váhy údajov, používaných na interpoláciu krigingom sú závislé od pozície voči interpolovanému bodu. Hodnota krigingom určeného odhadu v bode x_0 sa vypočíta podľa vzťahu:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^{n} w_i z(x_i) \tag{4}$$

kde n je počet bodov s priamym pozorovaním, $z(x_i)$ sú pozorovania zvolené z okolia x_0, $z^*(x_0)$ je odhad skúmanej premennej v bode x_0 a w_i sú váhy určené na základe zvoleného modelu semivariogramu, podľa vzájomnej vzdialenosti bodov x_i a bodu x_0 [23].

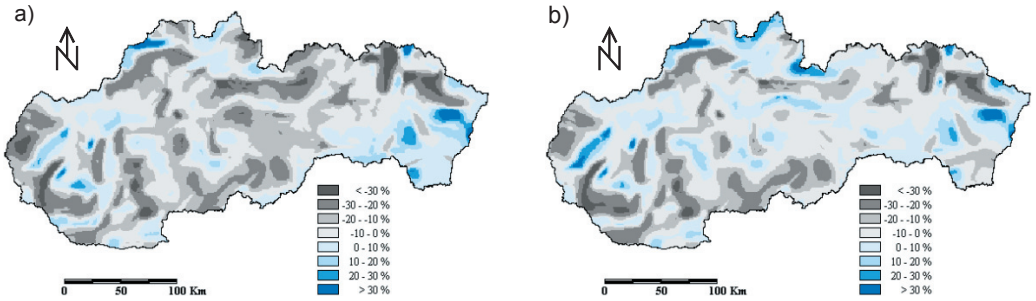
Mapy kvantilov mimoriadnych úhrnov zrážok získaných interpolačnou metódou kriging (Obr. 1 a, b pre 2ročné maximálne denné úhrny zrážok a Obr.1 c, d pre 100ročné maximálne denné úhrny zrážok) sú charakteristické hladkým povrchom, ktorý poukazuje na postupné zvyšovanie úhrnu zrážok hlavne v oblasti Vysokých a Nízkych Tatier.



Obr. 1: Mapy kvantilov a) 2ročných maximálnych denných úhrnov zrážok získaných lokálnym odhadom GEV, b) 100ročných maximálnych denných úhrnov zrážok získaných lokálnym odhadom GEV, c) 2ročných maximálnych denných úhrnov zrážok získaných regionálnym odhadom ROI, d) 100ročných maximálnych úhrnov zrážok získaných regionálnym odhadom ROI

Z mapového výstupu rozloženia mimoriadnych úhrnov zrážok získaných lokálnym odhadom GEV (Obr.1 a, b) boli zistené maximálne úhrny zrážok pre okolie staníc Tatranská Javorina a Podspády (okolo 60 mm v prípade 2ročného maximálneho denného úhrnu zrážok a okolo 170 mm v prípade 100ročného maximálneho denného úhrnu zrážok). Použitím metódy kriging boli vyhladené hodnoty extrémnych úhrnov zrážok, zistených v niektorých staniciach. Ďalej sú na Obr. 1 c, d zobrazené výsledky priameho mapovania 2 a 100ročných maximálnych denných úhrnov zrážok získaných metódou ROI s požadovaných počtom cieľových staníc vytvárajúcich vplyvný región (N_T) rovným 5. Zo vzájomného porovnania máp lokálneho odhadu a máp odhadov založených na regionálnom prístupe možno vidieť, že rozdiely sú hlavne v oblastiach, kde boli lokálnym odhadom určené vysoké úhrny zrážok (oblasť Vysokých a Nízkych Tatier). Rozdiel činí až 40 mm v prípade 2ročných maximálnych denných úhrnov zrážok a 135 mm v prípade 100ročných maximálnych denných úhrnov zrážok.

Na Obr. 2 sme pomocou mapovej algebry porovnali mapové výsledky získané teoretickým rozdelením GEV a metódou ROI s digitálnou interpretáciou expertne vytvorenej mapy [11]. Absolútne percentuálne rozdiely medzi mapou získanou priamym mapovaním kvantilov 100ročných maximálnych denných úhrnov zrážok získaných pomocou GEV a expertne vytvorenou mapou sú nasledovné: pre 47 % Slovenska je rozdiel do 10 %, pre 30,5 % územia 10-20 % a pre 19 % územia je rozdiel 20-30 %. Najväčšie rozdiely v odhadoch (nad 30%) sú na severovýchode Slovenska, v oblasti Javorníkov, Oravských Beskýd, Veľkej Fatry, Malých Karpát a Štiavnických vrchov. Ide o miesta s nedostatočným počtom pozorovacích staníc. Rozdiely získané porovnaním mapy 100ročných maximálnych denných úhrnov zrážok získaných metódou ROI s expertne vytvorenou mapou sú v rozmedzí 0-10 % pre 57 % z celkovej rozlohy Slovenska, 10-20 % pre 25 % územia, 20-30 % pre 15 % územia a zvyšné 3 % územia majú absolútny percentuálny rozdiel viac ako 30 %. Použite metódy ROI s 5 stanicami tvoriacimi vplyvný región podhodnotilo celé územie Vysokých Tatier , Malých Karpát, oblasť Javorníkov a Oravských Beskýd a Vihorlatských vrchov.



Obr. 2: Mapy percentuálnych rozdielov medzi expertne vytvorenou mapou, a) mapou 100ročných maximálnych denných úhrnov zrážok získaných lokálnym odhadom GEV, b) mapou 100ročných maximálnych denných úhrnov zrážok získaných regionálnym odhadom ROI

5. Záver

Cieľom príspevku bolo na základe údajov ročných maximálnych denných úhrnov zrážok z 557 staníc z celého Slovenska demonštrovať možnosti analýzy a priestorového spracovania maximálnych N-ročných denných úhrnov zrážok interpolačnou metódou kriging. Záverom bolo urobené porovnanie absolútneho percentuálneho rozdielu medzi mapami 100ročných maximálnych denných úhrnov zrážok získaných na základe extremálneho rozdelenia GEV a metódou ROI s expertne vytvorenou mapou izočiar 100ročných maximálnych denných úhrnov zrážok. Rozdiely medzi mapami získanými metódou kriging a expertnou metódou sú podobné, takže majú systémový pôvod. Vyplývajú najmä z nedostatkov siete zrážkomerných staníc, z mimoriadnej priestorovej premenlivosti analyzovanej charakteristiky zrážok a z možností použitých metód.

Literatúra

[1] THOMPSON, C. S., 2002. The high intensity rainfall design system HIRD. In: *International Conference on Flood Estimation. International Commiccion of the Rhine Basin*. Lelystad, CHR Report. No. II-17, pp 273-281.

[2] HOSKING, J. R. M. – WALLIS, J. R., 1997. Regional frequency analysis: an approach based on L-moments. Cambridge University Press, Cambridge; New York; Oakleigh, 224 pp. ISBN 0-521-43045-3.

[3] BURN, D. H., 1990. Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. Water Resources Research, 26 (10), pp 2257-2265.

[4] FEH (Flood Estimation Handbook), 1999. Institute of Hydrology, Wallingford. Volume 1-5. 325 pp.

[5] BARTHELS, H. – MALITZ, G. – ASMUS, S. – ALBRECHT, F. M. – DIETZER, B. – GÜNTHER, T. – ERTEL, H., 1997. Starkniederschlagshöhen für Deutschland, KOSTRA. Deutscher Wetterdienst – Hydrometeorologie, Offenbach, Selbstverlag.

[6] WEISSE, A. K. – BOIS, P., 2001. Topographic effects on statistical charakteristics of heavy rainfall and mapping in the French Alps. Journal of Applied Meteorology 40 (4), pp 720-740.

[7] WEISSE, A. K. – Bois, P., 2002. A comparison of methods for mapping statistical characteristics of heavy rainfall in the French Alps: The use of daily information. Hydrological Sciences Journal, 47 (5), pp 739-752.

[8] FAŠKO, P. – LAPIN, M. – ŠŤASTNÝ, P. – VIVODA, J., 2000. Daily Precipitation Extremes in Slovakia Based on Data from 607 Stations and 50-year Period. In: *Zborník z VIII. Posterového dňa s medzinárodnou účasťou „Transport vody, chemikálií a energie v systéme Pôda-Rastlina-Atmosféra“*. ÚH SAV a GFÚ SAV, Bratislava. 7 s., ISBN 80-968480-0-3.

[9] FAŠKO, P. – LAPIN, M. – ŠŤASTNÝ, P. – VIVODA, J. – 2000. Maximum daily sums of precipitation in Slovakia in the second half of the 20th century. In: *Images of Weather and Climate*. *Prace Geograficzne, fasc. 108*. Institute of Geography of the Jagellonian University, Cracow, pp 131-138.

[10] STEHLOVÁ, K. – KOHNOVÁ, S. – SZOLGAY, J., 2001. Analýza dvojdňových úhrnov zrážok v oblasti horného Hrona. Acta Hydrologica Slovaca 2 (1), s. 167-174.

[11] GAÁL, L. – LAPIN, M. – FAŠKO, P., 2004. Maximálne viacdenné úhrny zrážok na Slovensku. In: *Sborník abstraktů – Seminář „Extrémy počasí a podnebí“*, Brno. 15 s., ISBN 80-86690-12-1.

[12] GAÁL, L., 2006. Metódy výpočtu štatistických charakteristík návrhových hodnôt krátkodobých až viacdenných úhrnov zrážok na Slovensku. [Dizertačná práca], Univerzita Komenského v Bratislave. 228 s.

[13] KOHNOVÁ, S. – GAÁL, L. – SZOLGAY, J. – HLAVČOVÁ, K., 2005. Analýza maximálnych úhrnov zrážok v povodí horného Hrona. Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita v Bratislave. 1. vyd. 120 s., ISBN 80-227-2339-8.

[14] PARAJKA, J. – KOHNOVÁ, S. – SZOLGAY, J., 2002. Priestorová interpolácia N-ročných maximálnych denných zrážkových úhrnov v povodí horného Hrona pomocou stochastických interpolačných metód. Acta Hydrologica Slovaca 3 (1), s. 35-45.

[15] LAPIN, M. – HLAVČOVÁ, K. – PETROVIČ, P., 2003. Vplyv klimatickej zmeny na hydrologické procesy. Acta Hydrologica Slovaca 4 (2), s. 211-221.

[16] LAPIN, M. – HLAVČOVÁ, K., 2003. Changes in summer type of flash floods in the Slovak Carpathians due to changing climate. In: *Proceedings of the International Conference on Alpine Meteorology and MAP2003 Meeting.* Brig, Switzerland, Publ. of MeteoSwiss 66, pp 105-108.

[17] GOOVAERTS, P., 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. Journal of Hydrology, 228, pp 113-129.

[18] HEVESI, J. A. – FLINT, A. L. – ISTOK, J. D., 1992. Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part II: Isohyetal maps. Journal of Applied Meteorology, 31, pp 677-688.

[19] HOSKING, J. R. M., 1990. L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. J. R. Statist. Sot., Ser. B, 52(2), pp 105-124.

[20] LAIO, F., 2004. Cramer-von Mises and Anderson-Darling goodness of fit tests for extreme value distributions with unknown parameters. Water Resources Research 40.

[21] LU, L. H. – STEDINGER, J. R., 1992. Sampling variance of normalized GEV/PWM quantile estimators and a regional homogeneity test. Journal of Hydrology 138(1-2), pp 223-245.

[22] ISAAKS, E. H. – SRIVASTAVA, R. H., 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, Oxford.

[23] PAPAMICHAIL, D. M. – METAXA, I. G., 1996. Geostatistical analysis of spatial variability of rainfall and optimal design of a rain gauge network. Water Resources Management 10.

Kontakty na autora

1 Katedra vodného hospodárstva krajiny, Stavebná fakulta Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, e-mail: remiasova@svf.stuba.sk, silvia.kohnova@stuba.sk, kamila.hlavcova@stuba.sk, ladislav.gaal@stuba.sk

2 Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniová 17, 833 15 Bratislava, e-mail: pavol.fasko@shmu.sk

VYUŽITIE METÓDY JEDNODUCHÉHO ŠKÁLOVANIA NA ODHAD NÁVRHOVÝCH KRÁTKODOBÝCH ÚHRNOV ZRÁŽOK VO VYSOKOHORSKEJ OBLASTI SLOVENSKA

Márta Bara[1], Jana Látečková[1], Silvia Kohnová[1], Ladislav Gaál[1], Ján Szolgay[1], Kamila Hlavčová[1]

Abstrakt

V rámci tejto štúdie bola testovaná možnosť využitia metódy jednoduchého škálovania zrážok pre odhad návrhových hodnôt zrážkových intenzít vo vysokohorskom prostredí na Slovensku. Pre analýzu bolo vybraných 9 zrážkomerných staníc v širšej oblasti na severe Slovenska, z ktorých tri stanice boli označené za verifikačné. Pre analyzovaný región sa určil priemerný regionálny škálovací koeficient a odvodila sa bezrozmerná regionálna čiara prekročenia jednodenných maximálnych úhrnov zrážok v teplom polroku. Následne sa pre verifikačné stanice metódou indexovej hodnoty odhadli lokálne jednodenné návrhové hodnoty pre rôzne významné doby opakovania *T*. Návrhové zrážkové intenzity pre vybrané trvania zrážkových oddielov pre tri verifikačné stanice sa stanovili zoškálovaním T-ročných kvantilov jednodenných maximálnych zrážok pomocou regionálneho škálovacieho koeficientu. Určené návrhové hodnoty sa porovnali s výsledkami používanými doteraz v inžinierskej praxi. Štúdia potvrdila možnosť využitia metódy jednoduchého škálovania na odhad návrhových hodnôt zrážkových intenzít vo vysokohorských podmienkach na Slovensku.

Kľúčové slová: jednoduché škálovanie zrážok, návrhové hodnoty zrážkových intenzít, jednodenné maximálne úhrny zrážok

1. Úvod

Vzťah medzi intenzitou zrážok, trvaním a periodicitou (intensity-duration-frequency, skr. IDF) je dôležitý vo vodnom hospodárstve i vo vodohospodárskej praxi. Prvé IDF čiary boli vytvorené v 30. rokoch 19. storočia [2]. Od tej doby bolo odvodených množstvo rozdielnych regionálnych IDF vzťahov a máp po celom svete.

Na Slovensku boli prvé IDF krivky zkonštruované zkonštruované v roku 1950 [4]. V sedemdesiatych rokoch Šamaj a Valovič [15] odvodili IDF čiary pre 68 ombrografických staníc na celom území Slovenska.

Koutsoyiannis a kol. [7] urobili pokrok vo formulácii a konštrukcii IDF čiar s efektívnou parametrizáciou, ktorá dovoľuje aplikovať teóriu jednoduchého škálovania pre rôzne IDF charakteristiky zrážok. Použitím metódy jednoduchého škálovania je možné odhadovať kvantily zrážok pre vybrané významné doby opakovania a trvania kratšie ako jeden deň použitím kvantilov maximálnych denných úhrnov zrážok, ktoré sú dostupné zo širokej siete zrážkomerných staníc [9, 10, 18, 19]. V posledných rokoch boli navrhované rôzne modely pre jednoduché i viacnásobné škálovanie [8, 13, 16, 17] a tiež bolo vytvorených množstvo štúdií venovaných extrémnym úhrnom zrážok a ich škálovacím vlastnostiam [3, 11, 12, 14].

V tejto štúdii bol vytvorený a použitý regionálny prístup pre nepriamy odhad IDF čiar na miestach bez priamych pozorovaní. Na overenie použitej metódy v širšej oblasti Vysokých Tatier (odteraz: „tatranský región“) boli vybrané tri stanice za verifikačné, kde sa metódou indexovej hodnoty odhadli lokálne návrhové hodnoty jednodenných úhrnov zrážok v teplom polroku pre rôzne doby opakovania *T*. Použitím regionálneho škálovacieho koeficienta pre

IDF krivky boli pomocou škálovania odhadnuté kvantily úhrnov zrážok.odpovedajúce trvaniam kratších než jeden deň. Získané kvantily IDF čiar sa potom porovnávali s tými, ktoré vytvorili Šamaj a Valovič [15].

2. Metodika

Súčasťou tejto kapitoly je popis regionálnej frekvenčnej analýzy, založenej na metóde indexovej hodnoty [6] a opis metódy jednoduchého škálovania [9]. Regionálna frekvenčná analýza bola založená na regionalizácii maximálnych úhrnov zrážok v teplom polroku [5]. Táto štúdia vychádza z algoritmu regionalizácie navrhnutého Hoskingom a Wallisom [6], ktorý pozostáva zo štyroch krokov: kontrola kvality údajov, identifikácia homogénneho regiónu, výber funkcie rozdelenia pravdepodobnosti a odhad regionálnych bezrozmerných kvantilov, resp. skutočných lokálnych kvantilov. Nutnou podmienkou možnosti aplikácie algoritmu je regionálna homogenita, ktorá predpokladá, že distribučné funkcie na jednotlivých staniciach v regióne sú totožné až na škálovací faktor (indexovú hodnotu), ktorý je špecifický pre danú stanicu.

Gaál [5] vyčlenil tri homogénne regióny ako výsledok kombinácie klastrovej analýzy (objektívna metóda) a regionalizácie založenej na poznatkoch orografických a cirkulačných pomerov krajiny (subjektívna metóda). Homogenita vytvorených regiónov bola kvantifikovaná mierou homogenity H_1 [6] ktorá naznačovala homogenitu všetkých troch regiónov. Hoskingov a Wallisov [6] *Z*-test bol použitý na výber vhodnej funkcie rozdelenia pravdepodobnosti v regiónoch. Výsledky *Z*-testu [5] ukázali, že zovšeobecnené extremálne rozdelenie (generalized extreme value, skr. GEV) je vhodné pre modelovanie rozdelenia pravdepodobnosti maximálnych úhrnov zrážok v teplom polroku, a preto bolo použité pre regionálny odhad kvantilov v tejto štúdii.

Metóda jednoduchého škálovania [9] je vo všeobecnosti používaná na odvodenie IDF čiar, t.j. na odhad kvantilov úhrnov zrážok pre trvania kratšie ako jeden deň. Metodológia použitá v tomto príspevku nasleduje metodiku použitú v [9] a [19].

Nech I^T_d a $I^T_{\lambda d}$ označujú ročné maximálne intenzity zrážok pre trvania d respektíve λd, s rovnakou dobou opakovania T. Dve náhodné premenné I^T_d a $I^T_{\lambda d}$ majú škálovaciu vlastnosť [9, 19] ak platí

$$I_{\lambda d}{}^T = \lambda^\beta I_d{}^T, \tag{1}$$

kde rovnosť je chápaná v zmysle zhodnosti pravdepodobnostného rozdelenia oboch premenných a β reprezentuje škálovací koeficient. Vzťah (1) umožňuje odhad návrhových zrážok pre vybrané trvania a doby opakovania.

3. Vstupné údaje

V tejto štúdii sme pracovali s dvoma súbormi staníc, resp. zrážkových údajov. Prvý súbor pozostával zo 16 klimatologických staníc (s radom pozorovania denných úhrnov zrážok väčšinou z obdobia 1961-2003), na základe ktorých sa vyčlenil severný región Slovenska [5] a na základe ktorých (s výnimkou troch verifikačných staníc) sa určovala regionálna bezrozmerná čiara prekročenia maximálnych jednodenných úhrnov zrážok.

Druhý súbor tvorili stanice severu Slovenska, z ktorých sú k dispozícii kvantily intenzít zrážok rôznych trvaní v rozpätí od 5 minút do 180 minút a údaje odhadnuté empiricky Šamajom a Valovičom [15]. Je ich deväť a sú uvedené v tabuľke 1. Pri výbere týchto staníc sme si kládli dôraz na to, aby buď išlo o tie isté stanice ako v prípade regionalizácie Gaála [5] alebo aby sme našli ekvivalentné stanice nachádzajúce sa čo najbližšie k sebe (tolerovali sme vzájomnú vzdialenosť max. 20 km v rámci rovnakých klimatických podmienok).

Údaje Šamaja a Valoviča [15] boli prepočítané podľa metodiky Bara [1]. Jeden z najdôležitejších krokov tejto metódy bolo rozšírenie dát o denné úhrny zrážok o trvaní 1440 minút (čiže 1 deň), pričom tieto kvantily boli odhadnuté pomocou distribučnej funkcie GEV. Údaje k tomuto kroku boli poskytnuté z archívu Slovenského hydrometeorologického ústavu.

Na verifikáciu boli vybrané tri stanice – Liptovský Hrádok, Štrbské Pleso a Gelnica. Tieto stanice boli vybrané podľa nasledovných kritérií: i) charakterizujú rozličné geografické polohy vo vyčlenenom regióne a ii) reprezentujú priemer, minimum a maximum škálovacích koeficientov v regióne.

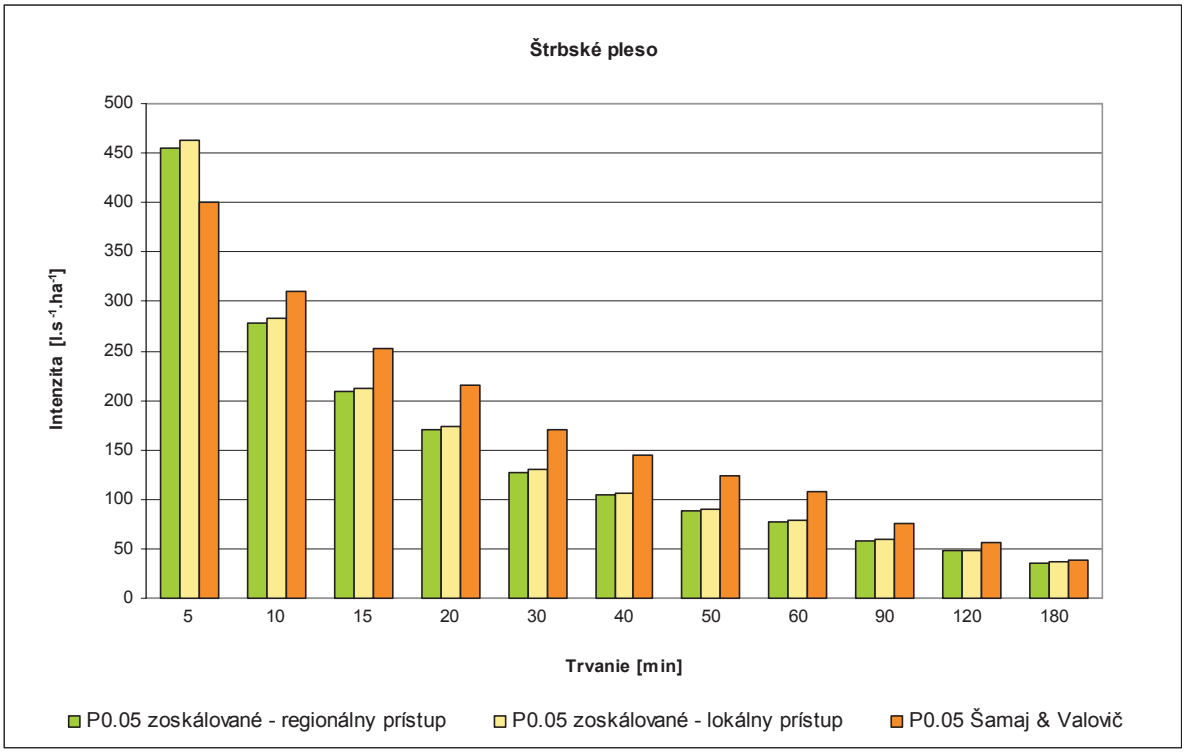
Tab. 1: Zoznam použitých zrážkomerných staníc pre odhad kvantilov intenzít zrážok

Stanica	Dĺžka pozorovania	Roky pozorovania
Gelnica	29	1935-1944, 1947-1965
Liptovský Hrádok	32	1931-1944, 1948-1965
Liptovská Teplička	19	1925-1930, 1932-1944
Papín	13	1923-1929, 1933-1938
Poprad – letisko	20	1946-1965
Prešov – letisko	18	1946-1956, 1959-1965
Skalnaté Pleso	17	1944-1960
Starý Smokovec	43	1923-1965
Štrbské Pleso	42	1922-1944, 1948-1965

4. Výsledky

Návrhové hodnoty maximálnych denných úhrnov zrážok boli odhadnuté pre tri stanice použitím indexovej metódy [6]. Podľa tejto metódy, sú návrhové hodnoty na danej stanici odhadnuté ako súčin bezrozmernej regionálnej čiary prekročenia a lokálnej indexovej hodnoty. Regionálne čiary prekročenia maximálnych denných úhrnov zrážok v teplom polroku boli odvodené použitím distribučnej funkcie GEV. Indexová hodnota bola odhadnutá ako aritmetický priemer výberového súboru.

Návrhové hodnoty zrážok pre zvolenú dobu opakovania a trvania kratšie ako jeden deň boli vypočítané z denných maximálnych úhrnov zrážok použitím metódy jednoduchého škálovania. Škálovací koeficient sa určil ako priemer 6 lokálnych škálovacích koeficientov vo zvolenom regióne (t.j. zo všetkých staníc, s výnimkou troch verifikačných). Následne boli odvodené kvantily IDF kriviek pre tri zvolené verifikačné stanice použitím návrhových hodnôt maximálnych denných úhrnov zrážok (odvodené regionálne a lokálne), v kombinácii s regionálne odvodenýn škálovacím koeficientom. Návrhové zrážky pre stanicu Štrbské Pleso sú znázornené na Obr. 1, kde sú porovnané výsledky na základe troch rôznych prístupov: i) regionálne odhadnuté návrhové hodnoty denných úhrnov zrážok ii) lokálne odhadnuté návrhové hodnoty denných úhrnov zrážok iii) návrhové zrážky odhadnuté Šamajom a Valovičom [15].



Obr. 2: Porovnanie návrhových hodnôt zrážok pre peridiodicitu *P* = 0,05 odhadnutých tromi rozdielnymi spôsobmi v stanici Štrbské Pleso

Kvantily IDF kriviek sme následne porovnali pomocou relatívnych odchýliek *RD*:

$$RD = \frac{X - Y}{Y} 100 \quad (\%), \qquad (2)$$

kde:

X – návrhové hodnoty zrážok odhadnuté pomocou škálovania a

Y – návrhové hodnoty odhadnuté Šamajom a Valovičom [15].

V tabuľke č. 2 sú uvedené relatívne odchýlky *RD* pre stanicu Štrbské Pleso. Pri zvyšných dvoch verifikačných staniciach bola štatistika *RD* podobná ako pri stanici Štrbské Pleso.

Môžeme konštatovať, že verifikačné stanice dosahujú relatívne odchýlky okolo 34 % (v absolútnej hodnote) a ich priemer je okolo 25 %. Z výsledkov je možné vidieť, že návrhové hodnoty zrážok získané škálovaním maximálnych denných úhrnov zrážok sú značne podhodnotené v porovnaní s hodnotami odvodenými Šamajom a Valovičom [15]. Neistota v rámci relatívnych odchýliek (25 %) môže vyplývať zo značných rozdielov nadmorských výšok medzi jednotlivými zrážkomernými stanicami. Najmenšie rozdiely v odhadoch boli pozorované pre zrážky s dlhšími trvaniami (60 min, 120 min, 180 min). Výsledky všetkých skúmaných metód veľmi podobné od trvania okolo 60 minút.

Tab. 2: Relatívne odchýlky (v %) medzi návrhovými hodnotami zrážok odhadnutými škálovaním maximálnych denných úhrnov zrážok a hodnotami odhadnutými Šamajom a Valovičom [15] v stanici Štrbské Pleso

Periodicita (POT)	Trvanie zrážkových oddielov [min] - Štrbské Pleso										
	5	10	15	20	30	40	50	60	90	120	180
0.50	2.2	-10.5	-13.5	-14.6	-16.2	-15.5	-14.4	-12.5	-7.4	-1.9	5.1
0.20	5.6	-10.1	-13.7	-16.0	-18.6	-18.8	-19.1	-17.1	-10.5	-6.5	1.3
0.10	10.4	-9.2	-15.3	-18.1	-21.5	-23.7	-23.4	-22.8	-18.3	-12.6	-7.4
0.05	13.7	-10.3	-17.6	-21.0	-25.1	-27.9	-27.9	-27.2	-22.1	-16.5	-8.5
0.02	14.0	-10.8	-19.9	-24.7	-27.8	-29.1	-29.5	-28.8	-27.1	-24.3	-15.4

5. Záver

Cieľom štúdie bolo testovať použiteľnosť jednoduchého škálovania pre regionálny odhad IDF kriviek vo zvolenom homogénnom regióne Slovenska. Zvolený región zahŕňal 9 zrážkomerných staníc, pričom tri z nich boli vybrané za verifikačné. V regiónoch bola odvodená bezrozmerná regionálna čiara prekročenia maximálnych denných úhrnov zrážok v teplom polroku a tiež bol odvodený regionálny škálovací koeficient použitím údajov zo všetkých zrážkomerných staníc, okrem verifikačných staníc. Na základe vypočítaného regionálneho škálovacieho koeficienta boli odvodené lokálne IDF krivky pre tri verifikačné stanice, získané škálovaním momentov maximálnych denných úhrnov zrážok a to lokálne i regionálne. Z výsledkov je vidieť, že návrhové hodnoty zrážok získané škálovaním maximálnych denných úhrnov zrážok sú značne podhodnotené v porovnaní s hodnotami odvodenými Šamajom a Valovičom [15]. Výsledky tejto štúdie overili hodnotenie použiteľnosti teórie jednoduchého škálovania pri regionálnom odhade IDF kriviek na Slovensku.

Poďakovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0443-07 a VEGA 1/0103/10. Článok vznikol tiež vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Centrum excelentnosti protipovodňovej ochrany územia ITMS 26240120004 spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

[1] BARA, M. – GAÁL, L. – KOHNOVÁ, S. – SZOLGAY, J. – HLAVČOVÁ, K., 2008. Simple scaling of extreme rainfall in Slovakia: a case study. Meteorological Journal, Vol. 11, No. 4, pp.153-157.

[2] BERNARD, M. M., 1932. Formulas for rainfall intensities of long durations. Trans. ASCE, 96: pp. 592–624 .

[3] DE MICHELE, C. – KOTTEGODA, N. T. – ROSSO, R., 2002. IDAF (intensity-duration-area-frequency) curves of extreme storm rainfall: a scaling approach. Water Science and Technology, Vol. 25, No. 2, pp. 83–90 .

[4] DUB, O., 1950. Hydrological data for the sewage system design. Voda, 5-6.

[5] GAÁL, L., 2006. Estimation methods of statistical properties of short-term to several-day design precipitation in Slovakia. [Ph.D. thesis]. Univerzita Komenského, Bratislava. 228 s. [in Slovak]

[6] HOSKING, J. R. M. – WALLIS, J. R., 1997. Regional frequency analysis: an approach based on L-moments. Cambridge University Press, Cambridge. 224 p.

[7] KOUTSOYIANNIS, D. – KOZONIS, D. – MANETAS, A., 1998. A mathematical framework for studying rainfall intensityduration-frequency relationships. Journal of Hydrology, Vol. 206, pp.118-135.

[8] MARIEN, J. L. – VANDEWIELE, G. L., 1986. A point rainfall generator with internal storm structure. Water Resources Research, Vol. 22, No.4, pp. 5231-5238.

[9] MENABDE, M. – SEED, A. – PEGRAM, G., 1999. A simple scaling model for extreme rainfall. Water Resources Research, Vol. 35, No. 1, pp. 335-339 .

[10] MINH NHAT, L. – TACHIKAWA, Y. – SAYAMA T. – TAKARA, K., 2007. Regional rainfall intensity-duration-frequency relationships for ungauged catchments based on scaling properties. Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.,No 50B. theory, pp. 33 - 43

[11] MOLNAR, P. – BURLANDO, P., 2005. Preservation of rainfall properties in stochastic disaggregation by a simple random cascade model. Atmospheric Research, Vol. 77, pp.137-151 .

[12] RODRIGUEZ-ITURBE, I. – GUPTA, V. K. – WAYMIRE, E. C., 1984. Scale considerations in the modeling of temporal rainfall. Water Resources Research, Vol. 20, No. 11, pp. 1611-1619

[14] ROSSO, R. – BURLANDO, P., 1990. Scale invariance in temporal and spatial rainfall. In: Proceedings of the 15th General Assembly of the European Geophysical Society, 23-27 April, 1990, Copenhagen. Annales Geophysicae, 145 p.

[15] ŠAMAJ, F. – VALOVIČ, Š., 1973. Intenzity krátkodobých dažďov na Slovensku. Zborník prác HMÚ č. 5, SPN Bratislava

[16] VENEZIANO, D. – LEPORE, CH. – LANGOUSIS, A. – FURCOLO, P., 2007. Marginal methods of IDF estimation in scaling and non-scaling rainfall. Water Resources Research. Vol. 43, No. 10. W10418.

[17] WAYMIRE, E. C. – GUPTA, V. K., 1981. The mathematical structure of rainfall representation. 1. A review of stochastic rainfall models, 2. A review of the point processes.

[18] WILLEMS, P., 2000. Compound intensity/duration/frequency-relationships of extreme precipitation for two seasons and two storm types. Journal of Hydrology, Vol. 233, No. 1-4, pp. 189-205 .

[19] YU, P. SH. – YANG, T. CH. – LIN, CH. S., 2004. Regional rainfall intensity formulas based on scaling property of rainfall. Journal of Hydrology, Vol. 295, No. 1-4, pp. 108-123.

Kontakty na autora

1 Katedra vodného hospodárstva krajiny STU v Bratislave,
e-mail: marta.bara@stuba.sk, jana.lateckova@stuba.sk, silvia.kohnova@stuba.sk, jan.szolgay@stuba.sk, kamila.hlavcova@stuba.sk

SOUČASNÉ PŘÍSTUPY A VÝVOJOVÉ TRENDY V URČOVÁNÍ NÁVRHOVÝCH HYDROLOGICKÝCH VELIČIN V ČR

***Bohuslava Kulasová*[1]**

Abstrakt

V příspěvku jsou souhrnně prezentovány současné i nově připravované přístupy používané v ČHMÚ při odvozování režimových charakteristik průtoků. Prezentace je zaměřena na zpracování návrhových hydrologických charakteristik, a to jak M-denních, tak i N-letých průtoků. V současné době probíhají práce na zpracování charakteristik M-denních průtoků za nové referenční období, které bude lépe vystihovat současný hydrologický režim. Nově vyvinutá metodika pro odvozování charakteristik M-denních průtoků v nepozorovaných profilech s využitím GIS je tématem příspěvku L. Budíka z ČHMÚ Brno.

Dále je příspěvek zaměřen na odvozování extrémních teoretických povodňových vln, které jsou poskytovány zejména pro účely posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních (dle TNV 75 2935). K odvození se používají buď statistické přístupy s využitím podmíněných pravděpodobností překročení objemu povodňových vln a pro případy nepozorovaných malých toků jsou používány deterministické přístupy.

Klíčová slova: maximální průtoky, minimální průtoky, teoretické povodňové vlny, hydrologické studie

1. Hydrologické podklady ve smyslu ČSN 75 1400 „Hydrologické údaje povrchových vod“

ČHMÚ zpracovává a poskytuje režimové údaje povrchových vod pro různé účely v souladu s normou ČSN 75 1400 „Hydrologické údaje povrchových vod“ [1], která byla aktualizována v roce 1997. Její další aktualizace je naplánována na rok 2011. Dle této normy se hydrologické údaje povrchových vod rozdělují na standardní a nestandardní.

Zpracování nebo ověřování standardních hydrologických údajů dle článku 5.1 normy provádí odborně způsobilá právnická osoba, dle Věstníku MŽP ČR, částka 2/1997, je touto činností pověřen ČHMÚ. V rámci standardních údajů jsou nejčastěji používané základní hydrologické údaje, které popisují hydrologický režim v tocích. Patří k nim plocha povodí, dlouhodobá průměrná roční výška srážek na povodí, dlouhodobý průměrný průtok, M-denní (p-procentní denní) průtoky a N-leté (maximální) průtoky (pro doby opakování N ≤ 100 let). Dalším příkladem standardních údajů mohou být teoretické povodňové vlny určené kulminačním průtokem s dobou opakování N ≤ 100 let. Vzhledem k pravděpodobnostnímu charakteru hydrologických údajů se poskytované údaje o průtocích zatřídí podle předpokládané spolehlivosti do jedné ze čtyř tříd. Standardní údaje jsou poskytovány pro libovolný profil říční sítě, zpracovávají je pobočky ČHMÚ ve své územní působnosti. Nestandardní hydrologické údaje, např. N-leté minimální průtoky daného trvání, teoretické povodňové vlny určené kulminačním průtokem s dobou opakování N > 100 let, ČHMÚ poskytuje formou hydrologických studií. Dle normy mohou být hydrologické studie zpracovány a poskytovány také jinými odbornými pracovišti.

2. N-leté průtoky

Obecně může být zpracování N-letých průtoků založeno buď na řadách ročních maximálních průtoků nebo na řadách průtoků vybraných nad určitou předem zvolenou mezí. V ČHMÚ se používá první způsob, tj. odvození je založeno na řadách ročních maximálních průtoků.

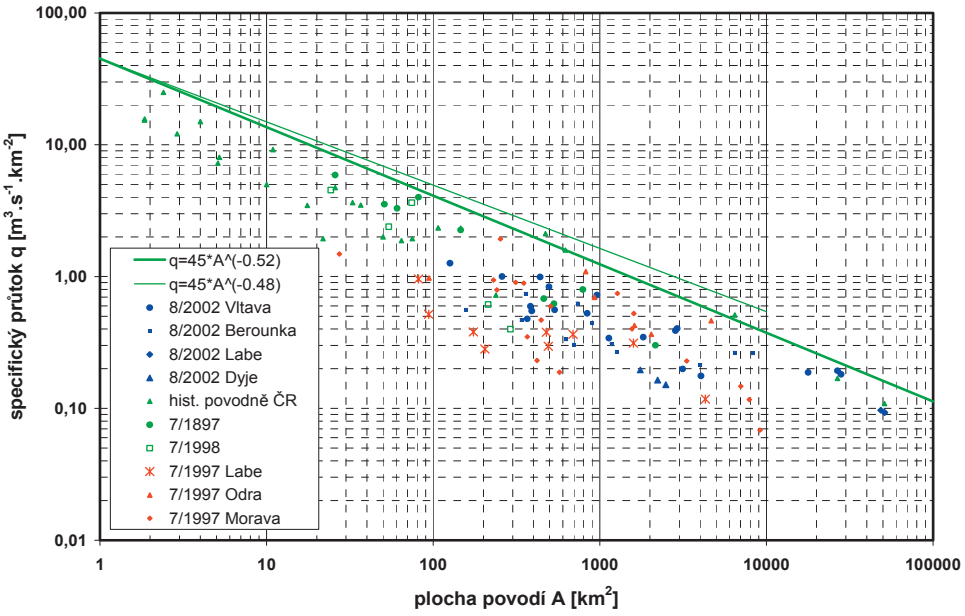
Zpracovávají se průtokové řady za co možná nejdelší období pozorování (řada musí být alespoň 30 let dlouhá), a to pokud možno včetně historických povodní.

Protože hydrologický režim je zatížen antropogenními vlivy a ČHMÚ běžně poskytuje N-leté průtoky odpovídající „přirozenému“ hydrologickému režimu, vstupují do odvození většinou pouze řady průtoků z období před počátkem významného ovlivnění (např. před uvedením příslušného vodního díla do provozu), případně kulminační průtoky ovlivněné provozem vodního díla jsou „odovlivněny“.

N-leté kulminační průtoky ve vodoměrných stanicích jsou stanovovány pomocí interního programu LNWIN. K odvození parametrů se používá metoda momentů a k extrapolaci čar překročení teoretická logaritmicko-normální rozdělení dvouparametrická (LN2) nebo tříparametrická (LN3). Pro kratší pozorované řady program umožňuje opravy výběrových charakteristik rozdělení o systematické vychýlení. Dále se používají metody regionální analýzy. Byla vyvinuta původní metodika extrapolace charakteristik maximálních průtoků ze stanic do nepozorovaných profilů - soutokových uzlů říční sítě. Tato metodika využívá jednak regionální regresní vztahy mezi statistickými charakteristikami maximálních průtoků a vybranými fyzicko-geografickými charakteristikami povodí a jednak se využívají statistické zákonitosti skladby maximálních průtoků v soutokových uzlech. Charakteristiky maximálních průtoků jsou v systému říční sítě vyrovnány, aby bylo minimalizováno nebezpečí vychýlení odhadů pro jednotlivé profily.

Výsledkem zpracování je soubor statistických charakteristik maximálních průtoků, tzv. katastr N-letých průtoků. Jeho aktualizace se provádí systematicky v celé ČR zpravidla po uplynutí určité doby od posledního zpracování (např. v 60. a 80. letech 20. století) nebo po výskytu extrémních povodní, např. po katastrofální povodni v červenci 1997 (povodí Odry, Moravy a horního Labe), po extrémní povodni v srpnu 2002 (povodí Vltavy včetně Berounky a dolního Labe), po jarní povodni 2006 (zejména povodí Dyje) a po přívalových povodních v červnu 2009 (povodí některých toků v povodí Odry).

Obdobným způsobem se na objednávku odvozují z řad sezónních kulminačních průtoků i N-leté sezónní průtoky. Většinou se odvozují při zpracování teoretických letních a zimních povodňových vln (viz dále). Jako zimní sezóna se v českých podmínkách uvažuje období listopad až duben, jako letní sezóna období květen až říjen.



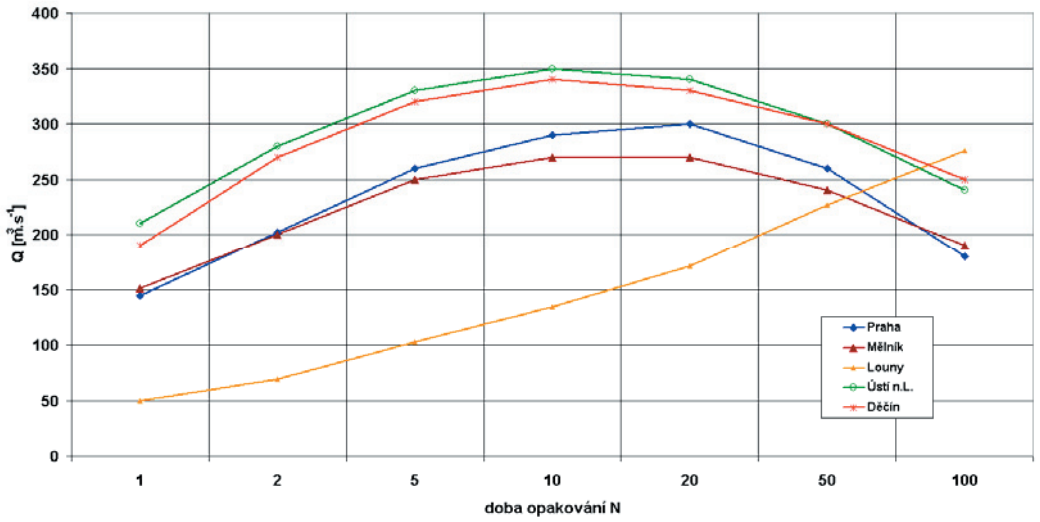
Obr. 1: Obalová křivka maximálních průtoků

Odvozené hodnoty N-letých průtoků pro delší doby opakování (N >>100 let) se porovnávají s obalovou křivkou, viz Obr. 1, znázorňující vztah maximálních specifických průtoků na ploše povodí, která byla odvozena na základě výskytu největších povodní, a to včetně historických, v České republice a na Slovensku. Tento graf je postupně doplňován o nové případy extrémních povodní.

V letech 2003-2005 byl v ČHMÚ řešen grantový projekt „Vliv, analýza a možnosti využití ochranné funkce údolních nádrží pro ochranu před povodněmi v povodí Labe“, jehož koordinátorem byl VÚV T. G. Masaryka. Cílem úkolu bylo analyzovat vliv vodních děl (manipulací a využití jejich ochranné funkce) na zmenšování maximálních průtoků na Labi s využitím znalostí a výsledků z vyhodnocení povodňové situace v povodí Vltavy a dolního Labe v srpnu 2002.

Pro simulace průběhu povodňových vln v dílčích úsecích Labe a jeho přítoků byl vytvořen simulační model založený na systému Aqualog. Výstupem modelu byly v profilu hráze VD Orlík a ve vodoměrných stanicích Praha-Chuchle, Mělník, Louny, Ústí n. L. a Děčín dva typy řad maximálních ročních průtoků: řady neovlivněných průtoků a řady ovlivněných průtoků vodními díly Lipno, Orlík, Slapy a Nechranice. Ve vodoměrných stanicích byly stanoveny N-leté průtoky pro stav povodí bez nádrží a pro stav s nádržemi. Pro standardní stupnici N-letých průtoků pak byly vypočteny rozdíly, tj. ovlivnění maximálních průtoků vlivem manipulací. Výsledky zpracování ukázaly, že vliv Vltavské kaskády se nejvíce projevuje v oblasti povodní s dobou opakování N = 10 až 20 let, viz Obr. 2. Zmenšení N-letých průtoků ve stanicích na Labi nad soutokem s Ohří způsobené Vltavskou kaskádou klesá směrem po toku jen velmi málo, ve stanicích Ústí n. L. a Děčín pod soutokem s Ohří je znatelně zvětšeno o vliv nádrže Nechranice. Výsledky získané pro Ohři jsou odlišné, retenční schopnost VD Nechranice v porovnání s hodnotami N-letých průtoků je tak velká, že zmenšení maximálních průtoků s dobou opakování stoupá v celém rozsahu dob opakování N=1 až 100 let (viz Obr. 2).

Řady neovlivněných maximálních průtoků získaných ze simulačních modelů byly ve výše zmíněných stanicích základem pro odvození N-letých průtoků „přirozených“, které ČHMÚ běžně poskytuje.



Obr. 2: Průběh rozdílů přirozených a ovlivněných N-letých průtoků

V roce 2008 vznesl státní podnik Povodí Labe žádost na ČHMÚ řešit závažnou aktuální problematiku, kterou jsou N-leté průtoky ovlivněné realizací protipovodňových opatření (např. poldrů). Vzhledem k naplňování nových legislativních povinností, např. v souvislosti s implementací Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/60/ES o vyhodnocování a

zvládání povodňových rizik, kdy nabývá na významu potřeba vymezení záplavových území a hodnocení povodňového rizika v úsecích toků ovlivněných provedenými nebo plánovanými protipovodňovými opatřeními, je to požadavek oprávněný, ale v současné době neexistuje v ČR jednotný metodický postup pro stanovení takto ovlivněných N-letých průtoků. Použít výše popsaný postup řešený v rámci tříletého grantového projektu by bylo metodicky správné i ověřené, ale protože tento postup je časově velmi náročný na sestavení modelu i na přípravu vstupních dat, bylo by možné ho využít jen v rámci velmi rozsáhlých studií.

V letech 2009–2011 VÚV T. G. Masaryka., v. v. i. řeší v rámci výzkumného záměru studii s cílem zpracovat příslušný (méně časově náročný) metodický postup na odvození N-letých průtoků ovlivněných protipovodňovými opatřeními, a to včetně jeho ověření na povodí Tiché Orlice. ČHMÚ na řešení tohoto úkolu smluvně spolupracuje. Výsledky řešení budou k dispozici na konci roku 2011.

3. Odvozování teoretických povodňových vln statistickými a deterministickými přístupy

Tyto nové metodické přístupy byly v ČHMÚ řešeny v rámci grantových projektů [2] a [3] a upřesněny v příručce [4]. Odvozování extrémních teoretických povodňových vln většinou za účelem posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních [5] se provádí formou hydrologické studie.

3.1 Statistické přístupy s využitím podmíněných pravděpodobností překročení objemů

Při odvozování teoretických povodňových vln původními statistickými přístupy dle normy [1] je uvažována pouze pravděpodobnost kulminačního průtoku a objem odtoku je statisticky neurčitý. Z toho důvodu se přistoupilo k řešení nových statistických přístupů, které využívají navíc i pravděpodobnostní vyjádření objemu odtoku při kulminačním průtoku dané doby opakování N. Řešení je založeno na aplikaci vícenásobné nelineární regrese pro vyjádření vztahu mezi kulminačním průtokem a trváním odtoku jako nezávislými proměnnými a objemem odtoku jako závislou proměnnou. Tato metoda s využitím podmíněné pravděpodobnosti překročení objemu, umožňuje v porovnání s přiřazením „příslušného objemu“ ve smyslu normy [1] exaktněji definovat vlastnosti povodňové vlny.

Na požadavek objednatele (dle kategorie vodního díla) se většinou zpracovávají teoretické povodňové vlny s pravděpodobností kulminačního průtoku pQ = 0,001 (doba opakování N =10 000 let) nebo pQ = 0,001 (N = 1000 let). Dle našich zkušeností doporučujeme použít podmíněnou pravděpodobnost objemu ppW = 0,5 a ppW = 0,4.

Z výsledků analýzy sezonality průtokového režimu, kde se hodnotí nejen sezonalita kulminačních průtoků, ale i objemů, se odvozují letní, příp. i zimní teoretické povodňové vlny.

Tento statistický přístup lze použít jen v případech, kde jsou k dispozici relativně dlouhé pozorované průtokové řady. Pro střední a velká povodí lze využít řady průměrných denních průtoků (uložených v databázi ČHMÚ), pro menší povodí se používají řady hodinových průtoků, zpracování však vyžaduje časově velmi náročnou přípravu pozorovaných hydrogramů v hodinovém intervalu (průběhy povodní se většinou připravují, příp. ověřují a doplňují v rámci studie).

Extrémní teoretické povodňové vlny založené na statistickém zpracování průtoků je třeba, zvláště na menších a středních povodích, ověřovat z fyzikálního hlediska jednoduchými deterministickými přístupy.

3.2 Deterministické přístupy

Pro odvozování teoretických povodňových vln deterministickými přístupy je používán modelovací systém HEC-HMS. Jedná se o soubor několika modelů pro stanovení výšky efektivního deště a odvození průběhu povodňové vlny na základě transformační funkce povodí. V ČHMÚ se jako transformační funkce povodí využívá Clarkova dvouparametrického okamžitého jednotkového hydrogramu a pro stanovení odtokových ztrát metody *CN*-křivek.

Metodika odvození využívá datové podklady odvozené v projektu [2] a [3], a to návrhové N-leté maximální srážky (řešeno v ČHMÚ), typy návrhového hyetogramu (řešeno v ÚFA AV ČR), hydropedologické charakteristiky (řešeno ve VÚMOP). Tvar odvozené vlny je determinován tvarem návrhového hyetogramu. Návrhové hyetogramy odpovídají rozložení srážek za povodní způsobených buď přívalovými nebo orograficky významně zesílenými srážkami. Jedná se proto o povodně vyskytující se převážně v letní sezóně.

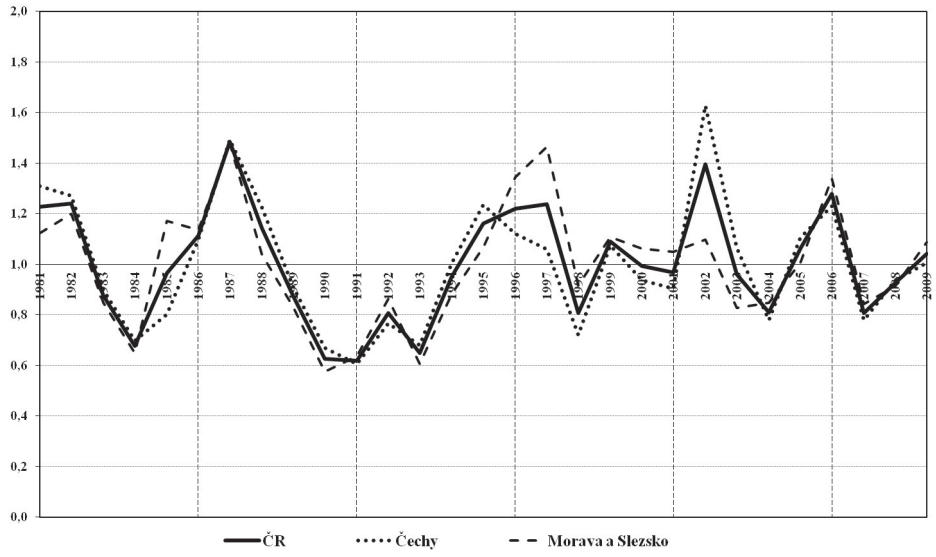
Z důvodu odlišného utváření povodňových vln za různých srážkových situací je vhodné odvodit několik variant teoretických povodňových vln. Kulminační průtok teoretické povodňové vlny stanovené na základě zatěžovacího hyetogramu návrhové srážky o době opakování *N* nemusí být nutně charakterizován stejnou dobou opakování *N*. Objem povodňové vlny by u srážek s malou pravděpodobností výskytu měl mít shodnou dobu opakování jako návrhová srážka.

Předností modelu je možnost kompozice řešeného povodí z menších dílčích povodí, pro která se stanovují příslušné parametry. Deterministický přístup se používá především pro nepozorovaná povodí cca do 500 km^2.

4. M-denní průtoky

ČHMÚ poskytuje M-denní průtoky za období 1931-1980. V současné době probíhají práce na odvození charakteristik M-denních průtoků za nové období pro celou ČR. I když v loňském roce bylo neoficiálně uvedeno, že nové M-denní průtoky budou odvozeny za období 1961–2005, byl při dalším zpřesňování metodických přístupů tento původní záměr přehodnocen. Bylo zvoleno odvozovat M-denní průtoky za referenční období 1981–2010. Třicetileté období z hlediska délky lze ještě považovat za dostatečné, vyhoví doporučené délce výchozí řady, což je 30–40 (50) let [6].

Byla zjišťována vodnost jednotlivých let uvedeného třicetiletí cca ze 100 vybraných vodoměrných stanic v ČR. Byly vypočteny procentuální podíly průměrných ročních průtoků jednotlivých let na dlouhodobém průměru 1981–2009, které byly následně v jednotlivých rocích ze všech stanic zprůměrovány. Jak je patrné z Obr. 3, toto nově navržené období též zahrnuje hydrologicky významné roky, a to jak nadprůměrně vodné roky (např. 1987, 1997 na Moravě, 2002 v Čechách, 2006), tak i suché roky (např. 1984, počátek 90. let, 1998, 2003).



Obr. 3: Procentuální podíly průměrných ročních průtoků z dlouhodobého průměrného průtoku za období 1981–2009

K rozhodnutí použít jako referenční období 1981–2010 nás přivedlo několik důvodů. Jednak toto období z hlediska polohy v časové řadě je nejblíže k současnosti a bude tak nejlépe vystihovat současný hydrologický režim, což uživatelé hydrologických dat požadují. Dále období 1981–2010 umožňuje zahrnout do zpracování více vodoměrných stanic a bude i snazší doplňování neúplných řad. V neposlední řadě je to důvod praktický. Jak známo, hydrologický režim je zatížen antropogenními vlivy a ČHMÚ má záměr poskytovat M-denní průtoky „přirozené“ i ovlivněné, a to dle účelu, pro který budou tyto údaje sloužit. Při zpracování budou využity komplexnější údaje o ovlivnění (odběry vody povrchové, odběry vody podzemní, vypouštění vod, manipulace na nádržích, převody vody mezi povodími), které jsou uloženy v databázi VÚV T.G.Masaryka, v.v.i., a které jsou k dispozici pro celou ČR až od roku 1979.

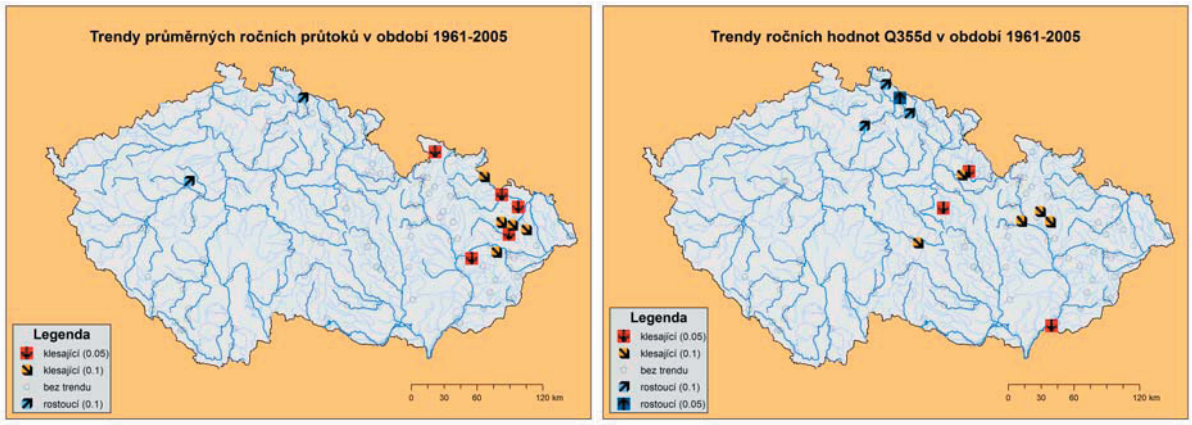
Zpracování ve vodoměrných stanicích je založeno na řadách průměrných denních průtoků. Je navržena metodika extrapolace M-denních průtoků ze stanic do nepozorovaných profilů (soutokových uzlů) říční sítě prostřednictvím teoretického rozdělení pravděpodobnosti. Nově je použito teoretické logaritmicko-normální rozdělení pětiparametrické (LN5), které je k empirickým křivkám překročení více přiléhavé. Obdobně jako u N-letých průtoků jsou i v tomto případě odvozování používány metody regionální analýzy. Využívají se regresní vztahy mezi statistickými charakteristikami průměrných průtoků a fyzicko-geografickými charakteristikami povodí. Dále jednotlivé kvantily v soutokových uzlech a mezipovodích jsou mezi sebou provázány systémem bilančních vazeb. Odvozování v síti soutokových uzlů bude probíhat nad novým datovým modelem zdigitalizovaných rozvodnic v měřítku 1:10 000, který vznikne v průběhu 1. poloviny roku 2011. Výsledkem celého zpracování bude tzv. katastr M-denních, příp. p-procentních průtoků za období 1981–2010. Dle současných předpokladů bude ČHMÚ poskytovat tyto nově odvozené M-denní průtoky od roku 2013. Dále se předpokládá, že každých 10 let budou M-denní průtoky aktualizovány. Podrobnější popis metodických přístupů použitých při zpracování katastru M-denních průtoků je uveden v příspěvku L. Budíka z ČHMÚ Brno.

V letech 2007–2011 ČHMÚ řeší v rámci grantového projektu „Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření“ vliv klimatické změny na minimální průtoky.

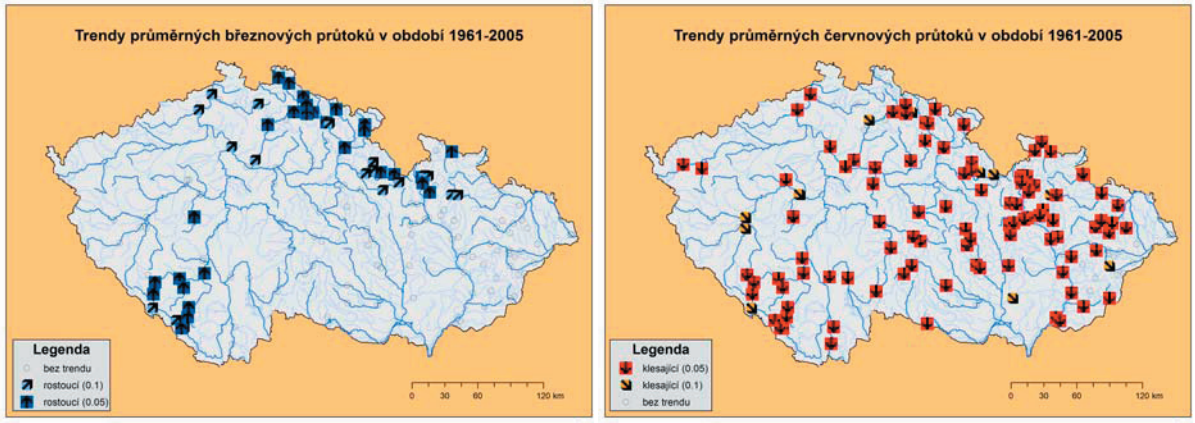
V letech 2007–2008 byly zpracovány za období 1961– 2005 trendy vybraných průtoků, a to průměrných ročních, měsíčních průtoků po jednotlivých měsících, ročních minimálních 7denních průtoků a kvantilů M-denních průtoků (Q_{330d}, Q_{355d} a Q_{364d}) reprezentujících malé až minimální průtoky. Pro analýzu bylo vybráno cca 150 vodoměrných stanic s relativně neovlivněným hydrologickým režimem, pro výpočet trendů byl použit modifikovaný Mann-Kendallův test. Trendy byly vyhodnoceny na základě dvou zvolených hladin významnosti: 0,1 a 0,05. Vypočítané trendy byly rozděleny do pěti skupin (bez trendu, s trendem rostoucím, klesajícím, významně rostoucím, významně klesajícím).

Trendy průměrných ročních průtoků i minimálních průtoků nebyly ve většině stanic nalezeny, viz Obr. 4. Zajímavější výsledky byly zjištěny u průměrných měsíčních průtoků zpracovaných po jednotlivých měsících, viz Obr. 5. V zimních měsících má 15–30 % stanic trend rostoucí. V březnu je cca u třetiny stanic (v horských a podhorských oblastech) trend významně rostoucí. Jednou z příčin zvětšování průtoků v zimě jsou pravděpodobně zvyšující se zimní teploty, kdy srážky častěji dopadají ve formě deště. Naopak v červnu byl u více než 70 % stanic zjištěn klesající trend, téměř u všech stanic významně klesající. Zmenšování průtoků v létě lze vysvětlit nárůstem průměrné teploty vzduchu a tím i evapotranspirace a poklesem srážkových úhrnů.

I když průměrné roční průtoky ve většině stanic nevykázaly statisticky významný trend, v zimních měsících byl u třetiny stanic vysledován trend rostoucí a v letních měsících ve většině stanic trend klesající.



Obr. 4: Trendy průměrných ročních průtoků a průtoku Q_{355d}



Obr. 5: Trendy vybraných průměrných měsíčních průtoků (III, VI)

Hlavním cílem řešení zmíněného projektu je odvodit vybrané hydrologické charakteristiky minimálních průtoků, které budou prezentovat budoucí hydrologický režim a porovnat je s obdobnými charakteristikami prezentujícími současný hydrologický režim. Odvození bude vycházet z řad denních průtoků simulovaných na základě scénářů klimatické změny a několika klimatických modelů pro tři třicetileté časové horizonty: 2010–2039, 2040–2069 a 2070–2099. Tímto odvozením a porovnáním vybraných průtoků z křivky překročení M-denních průtoků (s důrazem na minimální průtoky) se zabývá článek autorů Boháč, Kukla, Kulasová. I když jsou zatím k dispozici pouze dílčí výsledky (projekt končí v roce 2011), lze už z dosavadního hodnocení usuzovat, že v prvním časovém horizontu (2010–2039) se sledované kvantily M-denních průtoků reprezentující malé až minimální průtoky budou zmenšovat jen málo, ale ve druhém a třetím časovém horizontu (2040–2069 a 2070–2099) bude jejich zmenšení výraznější. Pokud budou na konci řešení zmíněného projektu tyto dílčí výsledky potvrzeny, mohli by se při poskytování M-denních průtoků pro některé speciální účely využívat.

Literatura

[1] ČSN 75 1400 Hydrologické údaje povrchových vod, Praha, ČHMÚ, Hydroprojekt, Český normalizační institut, 1997.

[2] KULASOVÁ, B., a kol., 2000. DÚ 2.4 Statistické metody odhadu charakteristik extrémních povodní. Grantový projekt VaV 510/3/97 „Vývoj metod pro stanovení extrémních povodní“. Závěrečná zpráva . Praha, ČHMÚ.

[3] KULASOVÁ, B. – ŠERCL, P. – BOHÁČ, M., 2004. Projekt QD1368 „Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní“. Závěrečná zpráva. Praha, ČHMÚ.

[4] KULASOVÁ, B. – ŠERCL, P. – BOHÁČ, M., 2007. Metodická příručka pro výběr a aplikaci vhodné metody odvození hydrologických podkladů za účelem posouzení bezpečnosti vodních děl. Projekt QD1368 „Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní“. Dílčí výstup V07. Praha, ČHMÚ, aktualizace 2007.

[5] TNV 75 2935 Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních, Praha, VD–TBD, a. s., Hydroprojekt CZ, a.s, 2003.

[6] KAŠPÁREK, L., a kol., 1999. Metody výpočtu hydrologických dat v měnících se podmínkách. DÚ 01 Metody zpracování dat v nestacionárních podmínkách. Praha, VÚV T. G. Masaryka.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav Praha, e-mail: kulasova@chmi.cz

ZPŘESNĚNÍ METOD PRO ODVOZOVÁNÍ KŘIVEK PŘEKROČENÍ M-DENNÍCH PRŮTOKŮ V NEPOZOROVANÝCH PROFILECH S VYUŽITÍM GIS

Ladislav Budík[1]

Abstrakt

Základem nového inovovaného metodického postupu pro odvozování M-denních průtoků v nepozorovaných profilech je původní metodický postup používaný v ČHMÚ a publikovaný v literatuře [2]. Pro odvození M-denních průtoků za nové referenční období bylo použito teoretické logaritmicko-normální pětiparametrické rozdělení LN5, viz [1]. Při jeho použití se dosáhne nižší (cca poloviční) průměrné procentuální chyby proložení (MAPE) ve srovnání s dosud používaným rozdělením LN3, viz [2]. Skládání křivek překročení jednotlivých povodí se provádí numericky podle nově vytvořeného vzorce, přičemž pro koeficient korelace řad je použit vzorec odvozený pomocí regrese. K výpočtu je přidána paušální transformace velikosti průtoku po toku, která je závislá na komunikaci s nivou a říčním korytem. Parametry teoretického rozdělení LN5 se odvozují regresními rovnicemi, které jsou sestaveny na základě fyzicko-geografických a geologicko-hydrologických parametrů povodí z GIS. Způsob výpočtu umožňuje počítat neovlivněné i ovlivněné M-denní průtoky (lidskou činností). Po zadání GIS parametrů povodí a parametrů stanic ohraničujících mezipovodí je výpočet víceméně automatizován. Způsob výpočtu M-denních průtoků je sestaven tak, že lze počítat M-denní průtoky i po jednotlivých desetiletích.

Klíčová slova: M-denní průtoky, nepozorované profily, teoretické logaritmicko-normální pětiparametrické rozdělení LN5, ovlivněné a neovlivněné průtoky

1. Úvod

ČHMÚ dlouhá léta používá k odvozování M-denních průtoků v nepozorovaných profilech tzv. Katastr, odvozený z období 1931-1980 (dále jen Katastr 31- 80). Postup je popsán v publikaci [2]. Tento způsob výpočtu nahrazoval dřívější metodu odvození s pomocí analogonů (podobných povodí). Katastr 31- 80 byl založen na proložení empirické křivky překročení M-denních průtoků teoretickým logaritmicko-normálním tříparametrickým rozdělením LN3. Tento příspěvek se bude zabývat zdokonalením a zpřesněním tohoto postupu za použití teoretického logaritmicko-normálního pětiparametrického rozdělení LN5 v novém referenčním období.

2. Teoretická křivka překročení průtoků

Pro Katastr 31–80 byla data prokládána teoretickou křivkou LN3. V některých úsecích vodních toků byly poměrně velké odchylky od pozorovaných hodnot - viz Tab. 1. To vedlo ke vzniku nového teoretického rozdělení označeného později LN5, které vychází z teoretického rozdělení LN3 a je schopno k pozorovaným hodnotám přilehnout lépe.

Rozdělení LN3 je transformací normálního rozdělení. To znamená, že odečtením konstanty od dat s rozdělením LN3 a logaritmováním výsledku získáme hodnoty s normálním rozdělením.

Rozdělení LN3 se tedy z normálního rozdělení získá transformací

$$y = e^{x} + y_0 , \qquad (1)$$

kde veličina x se řídí normálním rozdělením a y_0 je konstanta.

Transformace pro rozdělení LN5 je zobecněním transformace normálního rozdělení na LN3 a má následující tvar

$$y = e^{sign(x)\cdot|x|^b + a} + y_0 \,, \tag{2}$$

kde navíc *a* a *b* jsou konstanty. Vztah lze přepsat do tvaru

$$y = e^a e^{sign(x)\cdot|x|^b} + y_0 \,. \tag{3}$$

V rozdělení LN3 přejde tato transformace pro *a*=0 a *b*=1, tedy LN3 je zvláštním případem rozdělení LN5. Dále se budeme již zabývat pouze rozdělením LN5, neboť LN3 bylo dostatečně popsáno a jeho funkce jsou součástí Katastru 31-80.

Rozdíly v přiléhavosti teoretických rozdělení LN3 a LN5 k hydrologickým datům jsou dostatečně zřejmé z následující tabulky 1.

Tab. 1: Průměrné procentuální chyby (absolutní hodnota) proložení (MAPE) pro vybrané stanice z povodí Moravy a Dyje

Profil (tok)	Plocha povodí (km^2)	LN3	Qa	LN5	Qa
Batelov (Jihlava)	73,5	5,5	5,7	2,5	0,3
Kašava (Dřevnice)	22,7	1,7	1,4	1,4	1,4
Landštejn n. n. (Pstruhovec)	6,3	3,7	0,1	3,7	0,1
Borovnice (Svratka)	128,0	4,4	0,8	1,8	0,6
Luhačovice n.n. (Luhačovický p.)	36,6	5,6	2,0	2,2	1,7
Sloup (Sloupský p.)	50,0	16,8	15,0	3,7	2,4
Chomýž (Rusava)	22,8	5,5	5,7	1,2	1,4
Dolní Bory - Olší (Oslava)	210,9	5,7	1,8	2,6	0.2
Vranov p.n. (Dyje)	2216,1	23,3	3,3	7,7	0,2

3. Doplňování křivek překročení při kratší délce pozorování průtoků

Toto doplnění lze provést s pomocí analogonu (stanice s vyhodnocenými průtoky v rozsahu referenčního období) a přepočtem přes standardizovanou proměnnou pro každý kvantil M-denních průtoků zvlášť. Tento postup je ověřen na pokusně zkracovaných řadách a má poměrně malou chybu.

Oba profily (analogon a stanice s prodlužovanou řadou) se standardizují a provede se LN3 transformace na normální rozdělení s průměrem 0. Zde je velmi důležité určení konstanty y_0 z transformace LN5. Úplné přiblížení k normálnímu rozdělení se samozřejmě nepodaří, protože průtoková data se neřídí přesně rozdělením LN5 a vždy zůstanou různě velké odchylky. Tyto odchylky se vyhodnotí pro jednotlivé vybrané kvantily M-denních průtoků pro oba posuzované profily, přičemž vyhodnocení pro analogon se provede v délce prodlužovaného profilu i v délce cílové. Vyhodnocované kvantity M-denních průtoků musí být pro jednodušší vyhodnocení rozloženy symetricky kolem mediánu.

U stanice (analogon) vyhodnotíme rozdíly mezi transformovanými hodnotami jednotlivých kvantilů M-denních průtoků do normálního rozdělení. Budeme předpokládat, že tyto změny vzhledem k vysokému stupni korelace mezi prodlužovanou řadou a analogonem jsou u prodlužované řady stejné. Potom tento rozdíl (změnu hodnot standardizovaného kvantilu) přičteme k transformovaným kvantilům M-denních průtoků („skoro normální“) u prodlužo-

vaného profilu. Po těchto úpravách získáme zpětnou transformací žádaná prodloužená data M-denních průtoků.

4. Startovací parametry optimalizace

Startovací parametry optimalizace se kvůli přesnosti výpočtu odhadují oproti Katastru 31–80 (plochy cca 50 km^2) na povodích hydrologického seznamu (plochy cca 5 km^2). Lépe se tak rozliší jednotlivá menší povodí jednak vzhledem ke změnám charakteristik daných GIS a dále je to nutné kvůli níže popsané transformaci parametrů LN5 podél toku bez přítoků. V Katastru 31–80 se pro každé větší povodí odvozovala regresní rovnice závislá na srážce nebo byly stanoveny třídy povodí (v počtu sedmi) a pro každou zvlášť byla stanovena závislost parametrů LN3. Tehdy uživatel zadával expertně třídu povodí. V současné době je možno postup automatizovat s pomocí informací z databází a map geologických a fyzicko–geografických charakteristik GIS. S jejich pomocí lze sestavit regresní rovnice pro jednotlivé parametry a poté vypočítat startovací parametry pro jednotlivá nepozorovaná menší povodí mnohem přesněji než jen s pomocí srážky.

Dále jsou uvedeny jako příklad předběžné regresní rovnice (4) až (8) pro jednotlivé parametry LN5. Nejpřesnější je rovnice pro dlouhodobý průměrný specifický průtok q_a.

$$q_a = \left\{ a_1 \cdot P^2 - a_2 \cdot P \cdot ret^{0.5} \cdot \left[\frac{(3000-h)}{3000} \right]^{0.7} - a_3 \cdot \frac{P}{500} \cdot (3000-h)^{0.7} \right\} \cdot (1 + k \cdot P_{dPZV}) \quad (4)$$

$$b = a_1 \cdot h + a_2 \cdot Sl + a_3 \cdot \inf + konst \quad (5)$$

$$\sigma = a_1 \cdot Sl + a_2 \cdot Ll + a_3 \cdot k + a_4 \cdot P + a_5 \cdot \inf + konst \quad (6)$$

$$\mu = a_1 \cdot Sl + a_2 \cdot P^2 + a_3 \cdot k + a_4 \cdot Jl + konst \quad (7)$$

$$q_{100} = a_1 \cdot Hgt + a_2 \cdot P + a_3 \cdot Ll + a_4 \cdot h + konst \quad (8)$$

kde q_a je dlouhodobý specifický odtok, P je dlouhodobá průměrná srážka, *ret* je půdní retence, h nadmořská výška, *Ll, Sl* a *Jl* je podíl listnatého, smíšeného a jehličnatého lesa na povodí, *inf* je půdní infiltrace, H_{gt} hydrologická třída povodí (viz výše), k je koeficient odtoku, P_{dPZV} je hydrogeologická charakteristika. Parametr b je parametr určující sílu exponenciální transformace normálního rozdělení, σ je rozptyl normálního rozdělení, μ je střední hodnota normálního rozdělení, q_{100} je specifický odtok s pravděpodobností překročení 100 %. Parametr a v rozdělení LN5 je určen pomocí q_a.

Parametr q_{100} bude nahrazen parametrem $K_{100\%}$ (teoreticky hodnota y_0 v rovnici (3)), pro který se sestavuje mapa pokrývající celou ČR.

Pro přesnost výpočtu je vzhledem k použití optimalizace důležité, aby vzájemné poměry mezi regresně odhadnutými parametry jednotlivých nepozorovaných povodí byly co nejblíže skutečnosti, protože použitím optimalizačního procesu lze dosáhnout posunu k reálné hodnotě, avšak zůstává zachován vzájemný poměr regresních parametrů nepozorovaných povodí.

5. Princip výpočtu Katastru

Princip zůstává týž jako v současné metodice ČHMÚ, viz [2]. Optimalizace parametrů v nepozorovaných profilech se provádí na parametry ve vodoměrných stanicích. Oproti současné metodice je rozdíl ve způsobu skládání M-denních průtoků v soutokových uzlech a počítání vývoje M-denních průtoků po povodích.

Ze stanic, kde byla k dispozici měřená data nad soutokovým a pod soutokovým uzlem, byl regresí odvozen přibližný vzorec (9) pro stanovení koeficientu korelace *r* v závislosti na ploše povodí *A* ve tvaru

$$r = 1 - \left(A_h + A_p\right) \cdot \frac{0.1}{12000} \ , \tag{9}$$

kde A_h je plocha povodí k hornímu profilu, A_p plocha přítoku nebo mezipovodí. Při ploše povodí 120 000 km^2 vychází koeficient korelace *r* roven nule. Vzorec byl odvozován na plochách povodí do 30 000 km^2.

Transformace M-denních průtoků podél toku bez přítoků byla opět odvozena regresí. Odvozována byla transformace koeficientu variace a 99% průtoku. Z parametrů toku je třeba pro určení této transformace znát navíc délky úseků toku. Odvozené vztahy jsou

$$Cv_d = Cv_h \cdot e^{(\ln 0{,}997063 \cdot (L_h - L_d))} \tag{10}$$

$$K_{99d} = K_{99h} \cdot e^{(\ln 1.008 \cdot (L_h - L_d))} \ , \tag{11}$$

kde Cv_d a Cv_h jsou koeficienty variace dolního a horního profilu mezipovodí, K_{99d} a K_{99h} je poměr 99 % průtoku ku Q_a pro dolní a horní profil, L_h–L_d je délka úseku toku.

Ze vztahů (10) a (11) je odvozen vztah (16) pro transformaci směrodatné proměnné podél toku bez přítoků. S jeho pomocí lze spočítat změnu libovolného průtoku podél říčního toku. Jedná se o přibližný vzorec odvozený z chování toků. Způsob odvození je následující:

Libovolný M-denní průtok lze spočítat jako

$$\mathrm{Q}_M = \mathrm{Q}_a \cdot (1 + t_M \cdot C_v) \tag{12}$$

$$\frac{\mathrm{Q}_M}{\mathrm{Q}_a} = K_M = 1 + t_M \cdot C_v \ , \tag{13}$$

kde Q_a je dlouhodobý průměrný průtok, Q_M je hodnota M-denního průtoku, t_M je směrodatná proměnná, C_v je koeficient variace. Při odvození stačí zjistit poměr, v jakém se mění t_M.C_v, např. při K_{99}. Tuto změnu máme definovanou z předchozích zpracování, viz vztah (11). C_v je konstantní pro všechna K_M (a tedy i Q_M), takže ve vztahu (14) máme definován poměr změny směrodatné proměnné t_M transformací podél toku bez přítoků a mezipovodí.

$$trn = \frac{\mathrm{Q}_{99trn} - \mathrm{Q}_a}{\mathrm{Q}_{99} - \mathrm{Q}_a} \ , \tag{14}$$

kde *trn* je transformační číslo průtoků – poměr t_M.C_v po a před transformací.

Při průtoku právě Q_a je změna transformací nulová, při průtocích větších než Q_a se průtok zmenší, při průtocích menších než Q_a se průtok zvětší. Potom *trn* je rovno

$$trn = \frac{1}{e^{\ln(1.0008) \cdot |dL|}} \ , \tag{15}$$

kde *dL* je délka úseku toku v kilometrech. Tento vztah byl odvozován pro malé toky s průtokem Q_a řádově v jednotkách m^3.s^{-1}. Ze zkušenosti s odvozováním charakteristik průtoků na velkých tocích vyplývá, že tato transformace s rostoucími minimálními průtoky relativně slábne a u toků s minimálními průtoky v desítkách m^3.s^{-1} je zanedbatelná. Tato zkušenost byla vložena do vzorce s pomocí tzv. logistické funkce, která zde má při minimálních průtocích řádově tisíciny m^3.s^{-1} hodnoty prakticky rovné jedné a při minimálních průtocích nad 10 m^3.s^{-1} je prakticky rovna nule. Výsledný vztah potom vypadá takto:

$$trn = 1 - \left[1 - \frac{1}{e^{\ln(1.0008)\cdot|dL|}} \right] \cdot \frac{1}{e^{Q_{\min}}} \tag{16}$$

Při velkých minimálních průtocích je tedy transformační schopnost *trn* zanedbatelná. Možnosti průsaku nivních vod do koryta a obráceně vně koryta jsou zanedbatelné oproti velikosti průtoku tokem.

Protože pro rozdělení LN5 nejsou k dispozici žádné vztahy mezi jednotlivými parametry (pro funkce popisující pravděpodobnostní chování LN5 neumíme najít explicitní vyjádření), je nutno všechny výpočty řešit numericky. Pro skládání křivek v soutokových uzlech byl použit přibližný vztah (17) uvedený v [1]:

$$\mathrm{Q}_d = trn \cdot \left[\max(\mathrm{Q}_p, \mathrm{Q}_h) - \mathrm{Q}_{ah} \right] + \mathrm{Q}_{ah} + r \cdot (\mathrm{Q}_p - \mathrm{Q}_{ap}) + \mathrm{Q}_{ap},$$

když $\dfrac{\min(\mathrm{Q}_p, \mathrm{Q}_h)}{\mathrm{Q}_p} = 1$ a řada Q_h je hlavní tok (17)

$$\mathrm{Q}_d = trn \cdot \left[\max(\mathrm{Q}_p, \mathrm{Q}_h) - \mathrm{Q}_{ap} \right] + \mathrm{Q}_{ap} + r \cdot (\mathrm{Q}_h - \mathrm{Q}_{ah}) + \mathrm{Q}_{ah},$$

kde Q_p je M-denní průtok přítoku nebo mezipovodí, Q_h je M-denní průtok hlavního toku nad soutokem, Q_{ah} je průměrný dlouhodobý průtok hlavního toku nad soutokem, Q_{ap} je průměrný dlouhodobý průtok přítoku.

Vztahy (9), (16) a (17) jsou základními vzorci pro odhad chování křivek překročení průtoků v soutokových uzlech. S pomocí těchto výše popsaných vztahů jsou sestaveny výpočetní tabulky s programy v MS Excelu 2003 pro automatizovaný výpočet.

Po ukončení výpočtu průtoků v nepozorovaných profilech optimalizací je nutno ještě provést korekci průtoků v rámci počítaného úseku s ohledem na rozdíly mezi optimalizovanou hodnotou jednotlivých průtoků závěrového profilu a hodnotou získanou z pozorovaných dat. Musí být splněny bilanční podmínky skládání průtoků v soutokových uzlech (pro větší průtoky než Q_a platí, že hodnota odpovídající určité pravděpodobnosti v profilu pod soutokem je menší než součet odpovídajících hodnot nad soutokem, pro menší průtoky než Q_a je to obráceně).

6. Ovlivnění průtoků

Výrazným problémem zpracování nového Katastru bude řešení ovlivnění průtoků, které je mnohdy docela masivní (Vltava, Jizera, Želivka, Moravice, Ostravice, Jihlava, Dyje atd.). Tuto skutečnost komplikuje nedostatečná přesnost údajů o ovlivnění, které existují v měsíčním kroku až od roku 1979. Naopak výhodou je, že ovlivnění obvykle není příliš variabilní. Výjimkou je ovlivnění provozem přehrad a závlah. U těchto dvou typů ovlivnění se může snadno stát, že po opravě průtoku o hodnotu průměrného měsíčního ovlivnění vychází v toku záporný průtok.

K odvození Katastru M-denních průtoků odovlivněných mohou být v zásadě dva možné přístupy:

1. Jednak mohou být využity odovlivněné měsíční průtoky (uložené v databázi ČHMÚ) získané na základě pozorovaných dat a měsíčních údajů o ovlivnění. Vyskytnou-li se při použití problémy, je třeba je řešit expertně a poté odvodit tzv. „neovlivněný Katastr". „ovlivněný Katastr" by z „neovlivněného" získaného tímto postupem bylo možno spočítat poměrně složitými postupy, které by byly jen velmi obtížně aplikovatelné na celá povodí ČR.

2. Druhou možností je vybrat důležité ovlivňovatele, většinou jsou to větší odběry pro vodárenské účely (bývají to zároveň i převody vody), vypouštění odpadních vod větších

měst, energetika (chlazení), doly, závlahy. Ostatní uživatelé většinou vypouští prakticky odebrané množství o kousek níže po toku a do režimu průtoků zasáhnou jen minimálně. Těmto vybraným ovlivňovatelům potom přisoudit křivku překročení s parametry LN5 (příp. LN3) a koeficient korelace s tokem, z nějž odebírají či do nějž vrací vodu. Tento postup má významnou výhodu oproti předchozímu, že vypočítáme parametry ovlivněného katastru na ovlivněných tocích, ale odtoky mezipovodí a pramenných povodí jsou neovlivněné. Z těchto neovlivněných mezipovodí a pramenných povodí lze potom sestavit „neovlivněný Katastr".

Výstupem zpracování tedy bude „ovlivněný" a „neovlivněný Katastr" v celém rozsahu křivky překročení M-denních průtoků.

7. Závěr

Lze konstatovat, že pro zpracování Katastru M-denních průtoků za nové referenční období je připraven dokonalejší, leč složitější systém než byl použit při minulém hromadném zpracování. To vyplývá i z toho, že se bude nutno vypořádat se složitějšími podmínkami než v předchozím zpracování (např. ovlivnění průtoků). Zároveň jsou k dispozici podstatně širší vstupní podklady (mapy GIS, databáze ovlivnění, apod.). Další výhodou nového způsobu odvození M-denních průtoků je, že ho lze počítat i po jednotlivých desetiletích. Jednotlivá 10letá období lze skládat do libovolných větších celků. Současně všichni zpracovatelé mají k dispozici nesrovnatelně výkonnější počítače s mnohem rozsáhlejšími možnostmi než byly počítače používané v 80. letech 20. století. I to je důvod, proč nelze zůstat u jednodušších a méně přesných výpočtů.

Literatura

[1] BUDÍK L., 2010. M-Day Discharge in an Unobserved Catchments Using Theoretical Probability Distribution LN5, Aplimat International Conference, Bratislava, 2–5 February 2010

[2] KAŠPÁREK, L. – NOVICKÝ, O., 1992. Hydrologická data pro návrhové účely. In: *Světový klimatický program Voda.* ČHMÚ, Praha. 142 s. ISBN 80–901262-1-9.

[3] 20th Conference on the Climate and change. In: *88th AMSAnnual Meeting, LA*, 20–24 January 2008. Dostupné na <www.ametsoc.org/MEET/annual/programsandevents.html>

Kontakty na autora

1 Český Hydrometeorologický Ústav, pobočka Brno, e-mail: budik@chmi.cz

VPLYV RÔZNYCH FAKTOROV NA ODHAD N-ROČNÝCH PRIETOKOV METÓDOU POT

Veronika Bačová Mitková [1]

Abstrakt

Cieľom tohto príspevku je prezentovať alternatívny prístup analýzy extrémnych hydrologických udalostí pri odhade prietokov s rôznou dobou opakovania a vplyvu rôznych faktorov na presnosť resp. rozkolísanosť odhadu týchto prietokov. Na odhad N-ročných prietokov bola vybraná metóda Peak Over Threshold (POT), ktorá sa používa ako alternatíva určovania N-ročných prietokov k metóde ročných maxím pri analýzach extrémnych hydrologických udalostí. Vstupné údaje pre odhad N-ročných prietokov tvoril súbor denných prietokov Dunaja v stanici Bratislava za obdobie 1917–2002.

Kľúčová slova: metóda Peak Over Threshold, povodeň, N-ročný prietok, rozdelenie pravdepodobnosti.

1. Úvod

Pri analýzach extrémnych javov sa, vzhľadom na neistoty vo vedomostiach o fyzikálnych procesoch vzniku týchto javov využívajú metódy matematickej štatistiky a počty pravdepodobnosti. Vo svetovej hydrológii bol výskum v sedemdesiatych a osemdesiatych rokoch zameraný najmä na odvodenie efektívnejších štatistických procedúr. Boli vyvinuté nové typy rozdelenia pravdepodobnosti a metódy odhadu ich parametrov. V deväťdesiatych rokoch boli práce zamerané hlavne na porovnávanie už existujúcich metód. Na Slovensku v posledných rokoch taktiež prebieha prehodnocovanie tradičných metód výpočtu návrhových maximálnych prietokov (Q_N) v povodiach [15, 10, 8]. Rady ročných maxím sú veľmi často využívané pri pravdepodobnostnom odhade veličín v hydrológii, ale tieto rady neodrážajú skutočné informácie o režime rieky. Rady ročných maxím obsahujú iba jednu hodnotu za rok a preto sa v tomto rade môže stratiť informácia o vrcholovom prietoku, ktorý je vyšší ako maximum v inom roku [9, 1]. Neistotou určovania N-ročných maximálnych prietokov Dunaja v Bratislave sa zaoberali napríklad na STU SvF [14], kde okrem iných vplyvov uvažovali pri analýze aj s vplyvom rozsahu analyzovaného obdobia na presnosť určenia N-ročných prietokov. Ďalším nedostatkom pri analýzach metód výpočtu Q_N z radov ročných maxím je hlavne nedostatok dostatočne dlhých pozorovaní, nakoľko sa pri odhadoch dosiahnutia možných prietokov vychádza z minulosti. Tieto obmedzenia vedú k využitiu metódy POT – Peak Over Threshold. Rady údajov pri metóde POT obsahujú všetky hodnoty prietokov nad zvolenou prahovou hodnotou [2, 13]. Metóda POT sa používa preto ako alternatíva k metóde využitia ročných maxím na odhad N-ročných prietokov pri štatistických analýzach extrémnych hydrologických situácií [3, 5, 6, 11]. Cieľom daného príspevku je:spracovanie dostupných údajov o prietokoch na Dunaji v stanici, voľba prahovej hladiny POT, rozdelenie súboru prietokov na: sezóny a rôzne dĺžky časových radov za účelom určenia vplyvu týchto faktorov na odhad N-ročných prietokov metódou POT a porovnanie a zhodnotenie výsledkov odhadu N-ročných prietokov na Dunaji v stanici Bratislava: metódou POT [16].

2. Vstupné údaje a metóda POT

2.1 Vstupné údaje

Vstupné údaje pre odhad návrhových maximálnych prietokov tvoril súbor denných prietokov Dunaja v stanici Bratislava za obdobie 1917–2002. Údaje o prietokoch pre dané obdobie poskytol SHMÚ Bratislava. Na základe denných prietokov boli vybrané prietokové vlny, ktoré

by mohli byť zaradené do súboru potrebného k štatistickému spracovaniu. K týmto vlnám boli vybraté maximálne prietoky z archívu SHMU. Vzhľadom na skutočnosť, že vrcholové prietoky vĺn v archíve SHMU sú zaznamenané od roku 1930, boli pre roky 1917–1929 maximálne prietoky dopočítané pomocou koeficientov, určených z regresných vzťahov pre jednotlivé mesiace roka.

2.2 Metóda Peak Over Threshold

Metóda POT spočíva vo zvolení kulminačných prietokov nad vopred zvolenú hranicu tak, aby bol počet prvkov štatistického súboru $n > N$, kde N je počet rokov pozorovania. Pre prvý výber dát sa ako prahová hodnota volí hodnota okolo Q_a (dlhodobý ročný prietok). Táto hodnota je pomerne nízka a súbor vrcholových prietokov vĺn môže mať príliš veľký rozptyl, môže teda obsahovať vlny, ktoré nemusia byť vrcholmi významných povodní. Postupným zvyšovaním prahovej hodnoty sa dosiahne požadovaný počet udalosti za dane obdobie (rok), ktoré sú nad touto prahovou hodnotou. Prahová hodnota sa potom zvyčajne volí tak, aby súbor hodnôt zaradených do štatistického spracovania obsahoval v priemere okolo päť vrcholových hodnôt za rok. Pri výbere povodňových udalostí musí byť zabezpečená aj ich nezávislosť [2]. Podrobný opis metódy POT ako aj postup pri výbere vĺn do súboru POT dát je uvedený v predchádzajúcich prácach Mitková et al. [12, 7]). Pri metóde POT vstupný súbor údajov pozostáva zo všetkých kulminačných prietokov povodní za obdobie N rokov, ktoré presahujú prahovú hodnotu x_B (nižšie značné ako Q_{POT}). Pri POT metóde máme dve premenné: počet kulminácií (vrcholov) v každom roku ν a prietoky nad prahovou hodnotou $Z = X - x_B$. Distribučnú funkciu ročných maximálnych prietokov dostaneme kombináciou distribučných funkcií počtu vrcholov a prietokov nad prahovou hodnotou Q_{POT} [5].

3. Vplyv voľby prahovej hodnoty POT na odhad N-ročných prietokov

Napríklad Lang a kol. [4] študovali problém výberu prahovej hodnoty a využili pri tom súbor porovnávacích testov v určitom intervale akceptovateľných prahov. Interval akceptovateľných prahov bol nájdený na základe testov stability distribučných parametrov a verifikáciou pomocou Poisonovej distribúcie. Ako druhé zobrali takú hodnotu z tohto intervalu, aby počet prekročení bol 2-3 v roku. Pre prvý výber dát sa ako prahová hodnota volí hodnota okolo Q_a (dlhodobý ročný prietok). Táto hodnota je pomerne nízka a súbor vrcholových prietokov vĺn môže mať príliš veľký rozptyl, môže teda obsahovať vlny, ktoré nemusia byť vrcholmi významných povodní. Postupným zvyšovaním prahovej hodnoty sa dosiahne požadovaný počet udalosti za dane obdobie (rok), ktoré sú nad touto prahovou hodnotou. Prahová hodnota sa potom zvyčajne volí tak, aby súbor hodnôt zaradených do štatistického spracovania obsahoval v priemere daný počet vrcholových hodnôt za rok.

V našej práci bola prahová hodnota POT volená na hraniciach 0,7 - 0,95 percentilu (Tab.1). V tabuľke 1 sú vypísané hodnoty 100 a 1000ročných prietokov odhadnuté metódou POT pri rôznych hladinách prahovej hodnoty. Najvyššia hodnota odhadnutého N-ročného prietoku bola na hladine prahovej hodnoty 2750 $m^3 \cdot s^{-1}$ (0,8 percentilu) s priemerným počtom vrcholov v roku 3,25 a Poissonovou distribúciou.

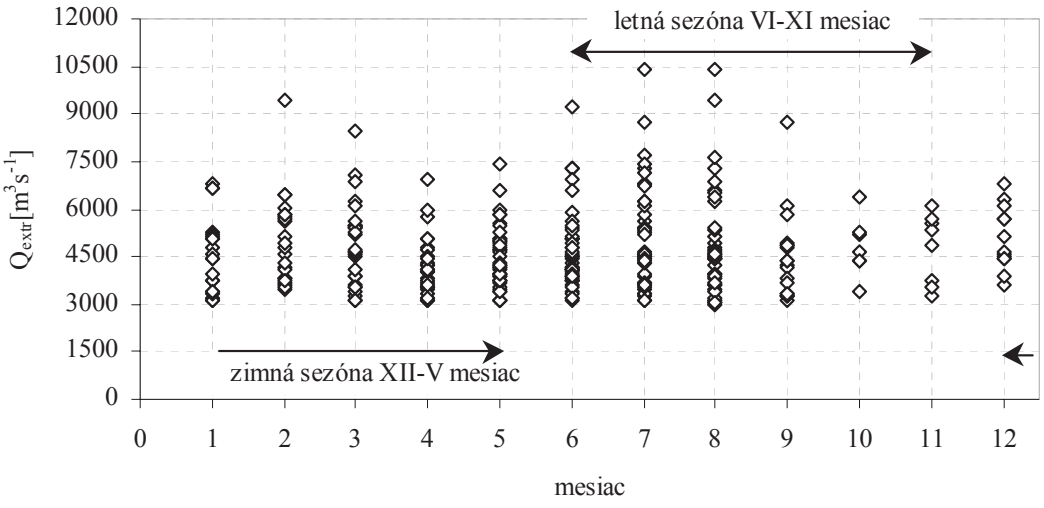
Tab. 1: Hodnoty N-ročných prietokov s dobou opakovanie 100 a 1000 rokov pre rôzne hladiny prahovej hodnoty Q_{POT} (Q [$m^3.s^{-1}$]).

Percentil	Q_{POT}	Q_{100POT}	$Q_{1000POT}$	N	n	Q_{100LN}	Q_{1000LN}	Q_{100LP3}	$Q_{1000LP3}$
0,7	2200	10100	12200	3,72					
0,75	2500	10300	12500	3,49					
0,8	2750	10410	12520	3,245	86	10018	12119	10303	12806
0,85	3000	10300	12500	2,93					
0,9	3400	9810	11900	2,43					
0,95	3800	10000	12100	2,03					

4. Vplyv sezónnosti na odhad N-ročných prietokov

Pri rozdelení roka na sezóny sme vychádzali z analýzy výskytu povodní na Dunaji v jednotlivých mesiacoch a z hodnotenia odtokového režim Dunaja počas roka. Najvodnejším mesiacom (obdobie 1901–2000) bol mesiac jún, s dlhodobým priemerným mesačným prietokom 2789 $m^3.s^{-1}$, najsuchší bol mesiac október, s dlhodobým priemerným mesačným prietokom 1527 $m^3.s^{-1}$ [7]. Z hľadiska odtokového režimu Dunaja sme namerané údaje rozdelili do dvoch sezón (Obr. 1):

- letná sezóna zahrňuje VI-XI mesiac, kedy k výskytu kulminačných prietokov dochádza len z výdatných zrážok na celom danom úseku Dunaja;
- zimná sezóna zahrňuje XII-V mesiac, kedy k výskytu kulminačných prietokov dochádza kombináciou výdatných zrážok vo forme snehu a dažďa ako aj topením snehu v oblasti alpských prítokov Dunaja na jeho hornom úseku.



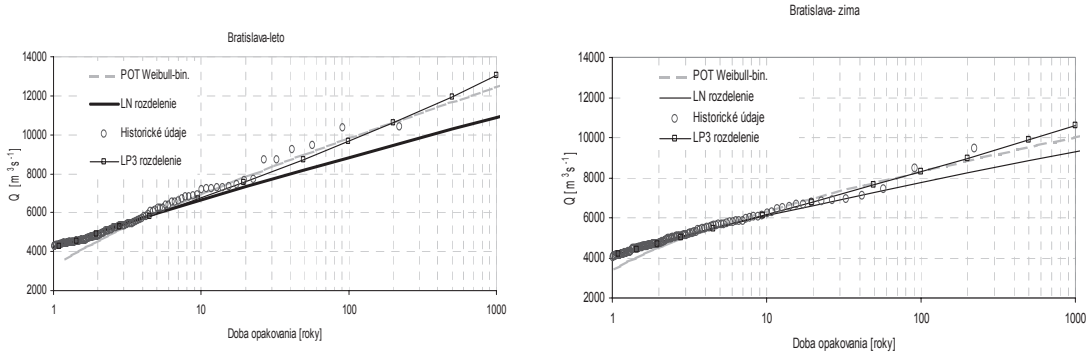
Obr. 1: Extrémne prietoky v jednotlivých mesiacoch počas rokov 1917-2002 v stanici Dunaj: Bratislava.

V prípade Dunaja sme zvolili prahovú hodnotu na úrovni 0,8 percentilu. Počty vĺn v jednotlivých sezónach majú Poissonovo rozdelenie. Na zachovanie podmienok nezávislosti vybraných maximálnych prietokov vĺn, boli použité tri filtre s nasledujúcou podmienkou

Q_{n-1}< Qn > Q_{n+1}. Pri odhade N-ročných maximálnych prietokov metódou POT bolo aplikované teoretické rozdelenie Weibull. Distribučná funkciu ročných maximálnych prietokov sme dostali kombináciou distribučných funkcií počtu vrcholov a prietokov nad prahovou hodnotou Q_{POT} [6]. Hodnoty N-ročných prietokov metódou POT boli následne porovnané s hodnotami N-ročných prietokov určených z radu ročných maxím nami zvolenými štatistickými odhadmi: LN - Lognormalne rozdelenie, LP III- Log-Pearsonovo III typu. Lognormálne rozdelenie pravdepodobnosti a Log-Pearsonovo III typu rozdelenie pravdepodobnosti sú jedny z najpoužívanejších distribúcií v hydrológii. Podľa výsledkov testov zhody (Kolmogorov-Smirnov a χ2) nemôžme zamietnuť hypotézu, že dané dáta majú distribúciu LN a LP III na hladine významnosti 95 %. Na Obr. 2 sú znázornené čiary opakovania maximálnych prietokov určené metódou POT porovnané nami zvolenými štatistickými odhadmi LN rozdelenie a LP III rozdelenie pre dané sezóny. Pri odhade N-ročných maximálnych sezónnych prietokov metódou POT bolo aplikované teoretické Weibullovo rozdelenie. Na porovnanie výsledkov odhadu N-ročných prietokov metódou POT boli prevedené aj odhady z ročných maxím za dané obdobia. Z výsledkov analýzy vyplýva, že pre letnú sezónu, LP III teoretické rozdelenie pravdepodobnosti dávalo najvyššie hodnoty pre Q_{1000} a metóda POT pre Q_{100} (Obr. 2 a, Tab. 2). Pri zimnej sezóne najvyššiu hodnoty v Q_{1000} a Q_{100} dosiahlo LP III teoretické rozdelenie pravdepodobnosti. Rozdiel v odhadoch Q_{1000} medzi týmito metódami (LN, LP III a POT) predstavuje v profile Dunaja v Bratislave pre N-ročné maximálne prietoky max 5,36 % , pre kratšie doby opakovania je rozdiel v odhadoch menší. Napríklad pre Q100, medzi metódami predstavuje rozdiel v Q_N max 3,6 %. V letnej sezóne je rozdiel Q_{1000} 16 % a Q_{100} 9 % (POT metóda dáva vyššiu hodnotu odhadu), pre zimnú sezónu je rozdiel Q_{1000} 12 % a Q_{100} 7,5 %.

Tab. 2: Porovnanie odhadnutých hodnôt Q_{100} a Q_{1000} vo zvolených sezónach

Metóda	Q100 [m^3s^{-1}]	Q1000 [m^3s^{-1}]
POT-rok	10410	12520
POT-leto	9800	12460
POT-zima	8390	10050
LN-leto	8829	10901
LN-zima	7762	9284
LP III-leto	9653	13030
LP III-zima	8293	10592



letná sezóna zimná sezóna

Obr. 2: Odhady N-ročných maximálnych sezónnych prietokov podľa zvolených metód odhadu v stanici Dunaja v Bratislave: a) letná sezóna; b) zimná sezóna.

5. Vplyv dĺžky časového radu na odhad N-ročných prietokov

V ďalšej časti bol rad údajov rozdelený na menšie časové rady 60, 40 a 20 ročné rady údajov, pre analýzu vplyvu dĺžky časového radu na odhad N-ročných prietokov. Hodnoty N-ročných prietokov metódou POT boli následne porovnané s hodnotami N-ročných prietokov určených z radu ročných maxím nami zvolenými teoretickými rozdeleniami pravdepodobnosti (LN rozdelenia a LP rozdelenia III typu). Pri časovom rade 60 rokov bol pri Q_{100} rozdiel medzi metódou POT a Lognormálnom rozdelením 2,5 %, pričom POT dávala vyššiu hodnotu odhadnutého prietoku. Prietok s dobou opakovania 1000 rokov bol vyšší podľa Log-Pearsonového rozdelenia III typu o 1,4 % (179 $m^3.s^{-1}$) ako pri metóde POT. Najvyššie hodnoty odhadu N-ročných prietokov dávalo Lognormálne rozdelenie pri 40 ročnom časovom rade. Pri skrátení dĺžky časového radu na 20 rokov dávala metóda POT najvyšší odhad N-ročných prietokov v porovnaní s hodnotami podľa Log-Pearson III a Lognormalneho rozdelenia. Rozdiely medzi odhadmi hodnôt N-ročných prietokov podľa zvolených metód sú vypísane v tabuľkách 3 až 5.

Tab. 3: Hodnoty prietokov s rôznou dobou opakovania podľa vybraných metód štatistického odhadu pre časový rad 60 rokov (Q [$m^3.s^{-1}$])

N [roky]	1000	100	50	20	10	5	2	1
P [%]	0,1	1	2	5	9,5	18	39	63
Q_{LN}	12263	10130	9462	8542	7799	7171	6291	5336
Q_{LP3}	12570	10357	9547	8629	7828	6973	5999	5283
Q_{POT}	12500	10350	9700	8800	8000	7250	6200	5350

Tab. 4: Hodnoty prietokov s rôznou dobou opakovania podľa vybraných metód štatistického odhadu pre časový rad 40 rokov (Q [$m^3.s^{-1}$])

N [roky]	1000	100	50	20	10	5	2	1
P [%]	0,1	1	2	5	9,5	18	39	63
Q_{LN}	12567	10350	9657	8704	7994	7223	9136	5257
Q_{LP3}	11815	10020	9431	8686	7898	7100	9116	5380
Q_{POT}	11700	9900	9300	8500	7900	7200	6200	5400

Tab. 5: Hodnoty prietokov s rôznou dobou opakovania podľa vybraných metód štatistického odhadu pre časový rad 20 rokov (Q [$m^3.s^{-1}$])

N [roky]	1000	100	50	20	10	5	2	1
P [%]	0,1	1	2	5	9,5	18	39	63
Q_{LN}	13102	10615	9847	8798	8018	7186	6021	5094
Q_{LP3}	12900	10568	9815	8782	7954	7052	6001	5219
Q_{POT}	13550	11100	10100	9000	8200	7300	6200	5200

6. Záver

V príspevku boli porovnané tri vplyvy na odhad N-ročných prietokov metódou POT a nami zvolenými teoretickými rozdeleniami pravdepodobnosti (LN rozdelenie a LP rozdelenie III typu). Ako vstupné údaje pre analýzu metódy POT sme použili priemerné denné prietoky na Dunaji v stanici Bratislava za obdobie 1917–2002. Ako prvé sme vybrali prietokové vlny tak aby boli splnené podmienky nezávislosti jednotlivých hydrologických udalostí. Potom sme testovali vplyv voľby hladiny prahovej hodnoty na odhad N-ročných prietokov. Aby bolo zachované kritérium počtu vrcholov v roku a zaradené do výberu významné udalosti, volili sme veľkosti prahovej hodnoty na hladine 0,7-0,95 percentilu. Výsledky ukázali, že najvhodnejšia prahová hodnota bola na hladine 0,8 percentilu. V druhej časti príspevku boli porovnané odhady maximálnych sezónnych prietokov v profile Dunaj-Bratislava. Z výsledkov porovnania odhadovaných N-ročných prietokov môžeme povedať, že rozdiely v odhadoch metódou POT a LPIII neboli veľké. Pri Q_{100} a Q_{1000}, sa rozdiely pohybovali okolo 1,35 %. Odhady N-ročných prietokov pri LN rozdelení vyšli v oboch sezónach pomerne nízke. V poslednej časti príspevku bol analyzovaný vplyv dĺžky časového radu na odhad N-ročných prietokov. Ako vyplýva z daných výpočtov, výber metódy na zostavenie radu maximálnych sezónnych prietokov a jeho následná štatistická analýza má vplyv na výsledné hodnoty odhadov N-ročných prietokov. Z výsledkov vyplynulo, že dĺžka spracovávaného radu má tiež, okrem výberu teoretického rozdelenia pravdepodobnosti, významný vplyv na odhad N-ročných prietokov. Metóda POT dáva pomerne dobré odhady N-ročných prietokov aj pre krátke časové rady údajov. Výsledky analýzy celkovo ukazujú, že metóda POT je vhodná metóda na odhad N-ročných prietokov a zahrňuje do výpočtu aj vynechané významné povodne pri súboroch zostavených z ročných maxím [9, 1]. Avšak v prípade, že povodie (tok) má pomerne vyrovnaný hydrogram a hodnoty danej veličiny (prietok, vodný stav) sú nad prahovou hodnotou dlhší čas (čím nemožno určiť POT hodnotu), je výhodnejšie použiť na štatistickú analýzu extrémov ročné maximum [2, 13].

Poďakovanie: Výsledky výskumu vznikli v rámci riešenia grantových projektov VEGA 0096 a MVTS projekt „Flood regime of rivers in the Danube River basin“.

Literatúra

[1] CHOW, V. T. – MAIDMENT, D. R. – MAYS, L. W., 1988. Applied hydrology. McGraw-Hill, New York, NY.

[2] BAYLISS, A. C., 1999. Deriving flood peak data. Flood estimation Handbook. Vol.3, pp 273–283.

[3] CUNNANE, C., 1979. A note on Poisson assumption in partial duration series model. Water Resour. Res., 15 (2), pp. 489–494.

[4] LANG, M. – OUARDA, T.B.M.J. – BOBEE, B., 1999. Towards operational quid lines for over threshold modelling. J. Hydrol., 225, pp 103–117.

[5] ROSBJERG, D., 1977. Returns periods of hydrological events. Nordic Hydrol., 8, pp 57–61.

[6] TODAROVIČ, P., 1970. On some problems involving random number of random variables. Ann. Math. Statistics, Vol. 41 (No. 3), pp 1059–1063.

[7] MITKOVÁ, V. – PEKÁROVÁ, P. – KOHNOVÁ, S., 2004. Porovnanie odhadov maximálnych sezónnych prietokov v profile Dunaj - Bratislava. Acta Hydrologica Slovaca. No. 1, pp 34–40.

[8] HALMOVÁ, D., 2003. Vplyv výberu teoretickej čiary prekročenia na dobu opakovania extrémnych prietokov. 11. Posterový deň, CD-ROM, ÚH SAV-GFÚ SAV, Bratislava.

[9] KITE G. W., 1977. Frequency and risk analysis in hydrology. Water Res. Publications, Fort Collins, CO.

[10] KOHNOVÁ, S. – SZOLGAY, J., 2000. Regional estimation of design flood discharges for river restoration in mountainous basins of northern Slovakia. In: *Marsalek, et al. (eds.), Flood Issues in Contemporary Water Management.* NATO Science Series, Vol. 71. Kluwer Academic Publishers, pp 41–47.

[11] LANGBEIN, W. B., 1949. Annual floods and the partial-duration flood series. Transactions, AGU 30 (6), pp 879–881.

[12] MITKOVÁ, V. – PEKAROVÁ, P. – KOHNOVÁ, S. – SZOLGAY, J., 2003. Porovnanie odhadov návrhových maximálnych prietokov pri rôznom spôsobe zostavenia štatistického radu kulminačných prietokov v profile Dunaj Bratislava. Sborník příspěvku z Workshopu „Extrémní hydrologcké jevy v povodích“, Praha, s. 61–70.

[13] RAO, A. R. – HAMED, K. H., 2000. Flood frequency analysis. CRC Press LLC, N. W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida.

[14] SZOLGAY, J. – KOHNOVÁ, S. – HLAVČOVÁ, K., 2003. Ilustrácia neistoty určovania N-ročných maximálnych prietokov Dunaja v Bratislave. Konferencia s medzinárodnou účasťou „Ochrana pred povodňami a bezpečnosť vodných stavieb.“ Bratislava, s. 7–12.

[15] SZOLGAY, J. – KOHNOVÁ, S. – ČUNDERLÍK, J., 1998. Niektoré metodické otázky určovania návrhových maximálnych prietokov metódami regionálnej analýzy. Konferencia, „Povodne a protipovodňová ochrana“. Banská Štiavnica, s. 143–148.

[16] VUKMIROVIČ, V. – PETROVIČ, J., 1995. Flood flow analysis using renewal processes. Grupe AMHY, Seminar annual.

Kontakty na autora

1 Ústav hydrológie SAV Bratislava, e-mail: mitkova@uh.savba.sk

POROVNANIE REGIONALIZAČNÝCH METÓD NA ODHAD MAXIMÁLNYCH PRIETOKOV NA SLOVENSKU

Ladislav Gaál[1], Silvia Kohnová[1], Ján Szolgay[1]

Abstrakt

Predložená štúdia sa zameriava na porovnanie rozdielnych prístupov k štatistickému modelovaniu návrhových hodnôt maximálnych ročných prietokov na Slovensku, ktorými sú:

1) regionálny model Hoskinga a Wallisa (HW), založený na pevne vymedzených regiónoch,
2) regionálny model vplyvného regiónu (ROI), v ktorom sa regióny definujú samostatne pre každé povodie, resp.
3) lokálny model, ktorý je založený iba na základe pozorovaní v danom mieste.

Do analýzy boli vybrané rady ročných kulminačných prietokov zo 174 malých a stredne veľkých povodí zo Slovenska, v ktorých bolo odvodených 20 fyzickogeografických a klimatických atribútov. Desať regiónov v metóde HW sa vyčlenilo pomocou zhlukovej analýzy na základe 4 charakteristík povodia (plocha povodia, hydrogeologický index povodia, lesnatosť povodia a dlhodobý priemerný úhrn zrážok). Flexibilné regióny v metóde ROI sa vytvárali na základe miery podobnosti povodí, do ktorej vstupovali rôzne kombinácie vyššie uvedených atribútov.

Základom porovnania frekvenčných modelov boli stredná kvadratická chyba a vychýlenie odhadov kvantilov, ktoré sme získali na základe Monte Carlo simulácií. Z výsledkov štúdie vyplýva, že lokálna frekvenčná analýza má pre všetky uvažované doby opakovania výrazne horšie štatistické ukazovatele než regionálne prístupy, avšak na základe doposiaľ vykonaných analýz nie je možné jednoznačne určiť, ktorý z dvoch regionálnych modelov je výhodnejšou voľbou na odhad kvantilov maximálnych prietokov na Slovensku.

Kľúčové slová: regionálna frekvenčná analýza, Hosking-Wallisova metóda, metóda vplyvného regiónu, test homogenity, Monte Carlo simulácie

1. Úvod

Slovenskí hydrológovia a vodohospodári sa počas posledných 10-15 rokov intenzívne venovali metódam odhadu návrhových prietokov v regionálnom kontexte. Metóda Hoskinga a Wallisa (skr. HW) založená na pevne vymedzených regiónoch bola adoptovaná [3] a ďalej vyvinutá, avšak skúsenosti poukázali aj na to, že vyčlenenie homogénnych regiónov (ktoré je nevyhnutnou požiadavkou pre korektnú aplikáciu metódy) nie je triviálnou záležitosťou v orograficky komplexnej krajine akou je Slovensko. V tejto práci sme sa vrátili k metóde HW a prehodnocovali sme ju vo svetle ďalšej alternatívy regionálnej frekvenčnej analýzy, ktorou je metóda vplyvného regiónu (skr. ROI, *region of influence*; napr. [1], [2]). Základnou koncepciou metódy ROI je to, že nie je nutné vymedziť pevné hranice medzi regiónmi, namiesto toho sa regióny definujú flexibilným spôsobom: každé analyzované (cieľové) povodie má svoj vlastný, unikátny región.

Cieľom tejto štúdie bolo: 1) porovnať rôzne alternatívy regionálnej frekvenčnej analýzy na základe metódy ROI a metódy HW (resp. lokálnu frekvenčnú analýzu) objektívnym spôsobom (t.j. na základe viacnásobných Monte Carlo simulácií) a 2) aplikovať najvýhodnejšiu metódu na odhad kvantilov maximálnych ročných prietokov a ich intervalov spoľahlivosti na vybraných povodiach Slovenska.

2. Metodika

Dva regionálne prístupy k frekvenčnej analýze maximálnych prietokov, ktoré sme testovali v tejto štúdii (t.j. HW aj ROI) majú veľa spoločného. Obidva prístupy sa zakladajú na metóde indexovej povodne [3], ktorá predpokladá regionálnu homogenitu. Hovoríme, že región alebo regionálny typ je homogénny, ak distribučné funkcie na jednotlivých lokalitách v regióne sú totožné až na škálovací faktor (indexovú hodnotu), ktorý je špecifický pre danú lokalitu (profil). [Poznámka: v tejto práci budeme jednotne používať pojem „región“, aj keď obidva regionálne prístupy v skutočnosti vytvárajú regionálne typy, t.j. množinu povodí „rozhádzané“ v geografickom priestore.]

Metóda HW je založená na homogénnych, pevne vymedzených regiónoch. Regióny sa vyčleňujú väčšinou na základe dobre definovaného súboru charakteristík povodí, najčastejšie (ako aj v tejto štúdii) pomocou zhlukovej analýzy. Homogenita regiónu sa dá preveriť a kvantifikovať prostredníctvom miery homogenity H_1 [3].

Metóda ROI vytvára unikátny (flexibilný) región pre jednotlivé cieľové povodia. V prvom kroku sa definuje miera podobnosti medzi povodiami na základe vopred zvoleného súboru charakteristík (analógia zhlukovej analýzy; používa sa Euklidovská metrika). Flexibilné regióny sa vytvárajú postupným pridávaním najviac podobných povodí k existujúcemu zoskupeniu cieľového povodia na základe dvoch kritérií. Prvou požiadavkou je homogenita regiónu, ktorá sa vyhodnocuje regionálnym testom Lua a Stedingera [5], kým druhou je tzv. pravidlo 5T, ktoré hovorí o tom, že k spoľahlivému odhadu kvantilu s dobou opakovania T je nutné mať údaje v minimálnom rozsahu 5*T staničných rokov [4]. Akonáhle je známy počet podobných povodí pre cieľovú lokalitu, jednotlivým povodiam v regióne sa na základe miery podobnosti priraďujú regionálne váhové koeficienty, ktoré určujú, ako dôležitú úlohu hraje dané povodie pri prenose hydrologickej informácie do cieľovej lokality. Metódu ROI podrobne popisuje napr. [2].

Popri dvoch vyššie uvedených regionálnych prístupov sme do porovnania frekvenčných modelov zaradili aj tradičný spôsob odhadovania návrhových hodnôt, ktorým je *lokálna analýza bez regionálneho prístupu.*

Na odhad bezrozmerných kvantilov v jednotlivých profiloch sme použili zovšeobecnené extremálne rozdelenie (*generalized extreme value*, skr. GEV; pozri napr. [3]).

Základom porovnania frekvenčných modelov boli štatistické charakteristiky strednej kvadratickej chyby a vychýlenia, ktoré sme získali na základe Monte Carlo simulácií s počtom opakovaní 5000 [2].

3. Údaje

Pre analýzy bolo vybraných 174 malých a stredne veľkých povodí (s plochou povodia do 340 km^2) z databázy Slovenského hydrometeorologického ústavu. Dĺžka radov pozorovania ročných kulminačných prietokov sa pohybovala v intervale od 15 do 88 rokov.

Pre každé povodie bolo odvodených približne 20 klimatologických a fyziografických charakteristík povodí. Dodatočné analýzy ukázali, že najvýznamnejšími charakteristikami povodí boli:

- A: plocha povodia [km^2];
- HG: hydrogeologický index povodia [–];
- FA: percentuálny pomer zalesnenia povodia [%];
- q: dlhodobý priemerný špecifický odtok [l.s^{-1}.km^{-2}];
- P: dlhodobý priemerný ročný úhrn zrážok (1931–1980) [mm].

4. Výsledky

V rámci zhlukovej analýzy sme testovali takmer 70 rôznych kombinácií charakteristík, pričom sme sa snažili dodržať požiadavku nízkej hodnoty korelačných koeficientov medzi vybranými atribútmi; na druhej strane, výstupy zo zhlukovej analýzy, t.j. vytvorené regióny museli spĺňať požiadavku regionálnej homogenity. Ukázalo sa, že najvýhodnejšou kombináciou charakteristík povodí je štvorica *A*, *HG*, *FA* and *P*, na základe ktorých sa vyčlenilo 10 homogénnych regiónov. Počet povodí zahrnutých do jednotlivých regiónov bolo v rozmedzí 10 až 33, pričom každý z regiónov mal prijateľnú mieru regionálnej heterogenity $H_1 \leq 2$ [3].

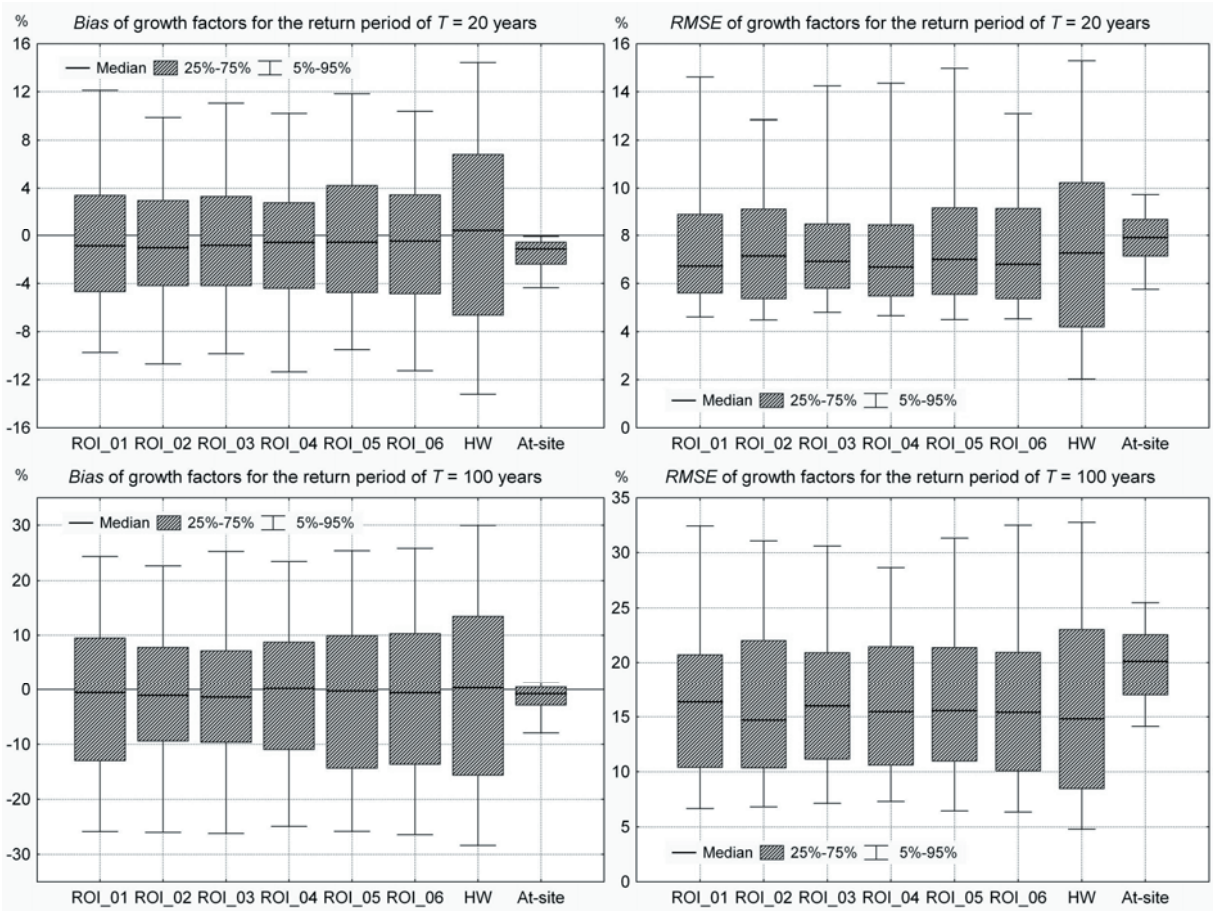
Kombinácie atribútov povodí pre definíciu miery podobnosti povodí v metodike ROI (t.j. zjednodušene: schémy metódy ROI) sme vytvárali na základe štyroch preferovaných atribútov zo zhlukovej analýzy, ku ktorým sme ešte pridali dlhodobý priemerný špecifický odtok *q*. Definovali sme spolu 6 rôznych schém ROI, prehľad ktorých prezentujeme v Tab. 1.

Tab. 1: Schémy metódy ROI použité v tejto štúdii, t.j. rôzne kombinácie vstupných atribútov povodí, na základe ktorých sme definovali podobnosť povodí v metóde ROI. Symbol ✓ (–) znamená, že daný atribút je (nie je) zahrnutý do príslušnej schémy označenej skratkou ROI_01 ... ROI_06.

Použité schémy metódy ROI	*A*	*HG*	*FA*	*q*	*P*
ROI_01	✓	✓	✓	✓	–
ROI_02	✓	✓	✓	–	–
ROI_03	✓	✓	–	✓	–
ROI_04	✓	–	✓	✓	–
ROI_05	–	✓	✓	✓	–
ROI_06	–	✓	✓	–	✓

Tab. 2: Priemerné hodnoty vychýlenia a strednej kvadratickej chyby jednotlivých frekvenčných modelov v % pre rôzne významné doby opakovania *T* (v rokoch). Najnižšie hodnoty štatistických charakteristík (v absolútnom zmysle) pre danú dobu opakovania sú zvýraznené tučným písmom. „At-site“ označuje lokálny odhad.

T [roky]	Priemerné vychýlenie [%]							
	ROI_01	**ROI_02**	**ROI_03**	**ROI_04**	**ROI_05**	**ROI_06**	**HW**	**At-site**
10	-0,177	-0,353	-0,528	-0,278	**-0,135**	-0,280	0,693	-1,016
20	-0,290	-0,712	-0,627	-0,517	**-0,052**	-0,386	0,235	-1,579
50	-0,651	-1,048	-0,851	-0,692	-0,542	-0,354	**-0,210**	-1,843
100	-1,040	-1,120	-1,020	-0,877	-1,183	-1,258	**-0,378**	-1,621
200	-1,015	-1,098	-1,180	-0,591	-1,390	-1,297	**-0,370**	-0,981
T **[roky]**	**Priemerná stredná kvadratická chyba [%]**							
	ROI_01	**ROI_02**	**ROI_03**	**ROI_04**	**ROI_05**	**ROI_06**	**HW**	**At-site**
10	4,233	4,303	4,135	**4,063**	4,233	4,200	4,097	4,339
20	7,792	7,641	7,665	**7,506**	7,842	7,671	7,608	7,896
50	13,047	12,649	12,878	**12,587**	12,740	12,880	12,628	14,337
100	16,806	**16,507**	16,783	16,554	16,540	16,597	16,536	20,013
200	20,992	20,783	21,094	20,968	20,542	20,745	**20,532**	26,457



Obr. 1: „Krabicové grafy“ vychýlenia (*Bias*) a strednej kvadratickej chyby (*RMSE*) jednotlivých frekvenčných modelov (v %) pre doby opakovania T = 20 a 100 rokov.

Súhrnné výsledky Monte Carlo simulácií uvádzame vo forme tabuľky (Tab. 2) a tzv. krabicových grafov (Obr. 1). Tab. 2 prezentuje bodové charakteristiky frekvenčných modelov: priemerné vychýlenie a priemernú strednú kvadratickú chybu simulovaných čiar prekročenia (pre detaily pozri napr. [1]). Krabicové grafy ponúkajú ešte širší pohľad na analyzované štatistické modely v transparentnom prevedení. Popri ďalšej bodovej charakteristike výsledkov (medián – bodkovaná čiara v strede obdĺžnika) sa prostredníctvom krabicových grafov prezentujú aj rozptylové charakteristiky simulácií: interkvartilové rozpätie (obdĺžnik) a 90% rozpätie hodnôt (tzv. antény).

Kým priemerné hodnoty vychýlenia (horná časť Tab. 2) neposkytujú relevantnú informáciu o rozdieloch vo frekvenčných modeloch, z krabicových grafov je možné videť, že regionálny model HW sa vyznačuje najmenej priaznivejším správaním (najširšie rozpätie medzi kvartilmi 25–75 % aj 5–95 %). Treba si poznamenať, že úzke 50% aj 90% intervaly rozpätia hodnôt pre model lokálneho odhadu odrážajú iba skutočnosť, že v tejto metóde nedochádza k prenosu regionálnej informácie.

Na základe priemerných hodnôt strednej kvadratickej chyby (dolná časť Tab. 2) môžeme konštatovať, že model *ROI_04* má pre kratšie doby opakovania najnižšie ukazovatele spomedzi všetkých modelov. Tento fakt potvrdzuje aj krabicový graf pre T = 20 rokov (Obr. 1, vpravo hore), kde je tiež vidieť, že modely ROI sú výhodnejšími v porovnaní s regionálnym modelom HW a neporovnateľne lepšie voči lokálnemu odhadu. Akonáhle sa však približujeme k vyšším dobám opakovania, rozdiely medzi modelmi ROI a HW sa postupne eliminujú (ba prevezme dominanciu model HW čo sa týka priemernej strednej kvadratickej chyby pre T = 200 rokov, Tab. 2).

5. Záver

Z predloženej analýzy vyplýva, že regionálne prístupy sa ukazujú jednoznačne v lepšom svetle než lokálna frekvenčná analýza, a to pre všetky uvažované doby opakovania *T*. Na základe doterajších analýz však nie je možné rozhodnúť, ktorý z regionálnych prístupov dáva prijateľnejšie výsledky, lebo 1) metóda ROI sa zdá byť výhodnejšia pre kratšie doby opakovania (zrejme kvôli tomu, že veľkosť regionálnych typov je prispôsobená cieľovej dobe opakovania, pričom odhady kvantilov na základe metódy HW môžu byť skreslené v dôsledku redundantnej informácie) a 2) metóda HW má vo väčšine prípadov lepšie štatistické ukazovatele (medián a priemer strednej kvadratickej chyby) pre dlhšie doby opakovania.

V blízkej budúcnosti preto plánujeme rozšírenie analýzy v niekoľkých smeroch, napr. zahrnutím ďalších kombinácií charakteristík povodí (t.j. definíciou ďalších alternatív schém ROI) alebo zavedením relatívnych váhových koeficientov pre charakteristiky vstupujúce do vzťahu pre mieru podobnosti.

Poďakovanie

Táto práca bola podporovaná grantmi VEGA 1/0496/08 a 1/0103/10. Článok vznikol tiež vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt „Centrum excelentnosti protipovodňovej ochrany územia“ ITMS 26240120004 spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

[1] BURN, D. H., 1990. Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. Water Resources Research 26 (10), 2257–2265.

[2] GAÁL, L. – KYSELÝ, J., 2009. Comparison of region-of-influence methods for estimating high quantiles of precipitation in a dense dataset in the Czech Republic. Hydrology and Earth System Sciences 13, 2203–2219.

[3] HOSKING, J. R. M. – WALLIS J. R., 1997. Regional frequency analysis: an approach based on L-moments. Cambridge University Press, 224 pp.

[4] JAKOB, D. – REED, D. W. – Robson, A. J., 1999. Selecting a pooling-group: In: *Flood Estimation Handbook*, Vol. 3. Institute of Hydrology, Wallingford, UK.

[5] LU, L. H. – STEDINGER, J. R., 1992. Sampling variance of normalized GEV/PWM quantile estimators and a regional homogeneity test. Journal of Hydrology 138 (1-2), 223–245.

Kontakty na autora

1 Katedra vodného hospodárstva krajiny, Stavebná fakulta Slovenskej technickej univerzity v Bratislave; e-mail: ladislav.gaal@stuba.sk

MODELOVANIE ZÁVISLOSTÍ MEDZI OBJEMOM A KULMINAČNÝM PRIETOKOM POVODŇOVÝCH VĺN POMOCOU KOPULÍ S VYUŽITÍM INFORMÁCIÍ O HISTORICKÝCH UDALOSTIACH V RÁMCI METODIKY MCMC

Ladislav Gaál[1], Ján Szolgay[1], Tomáš Bacigál [2], Silvia Kohnová[1]

Abstrakt

Predložená práca je prípadovou štúdiou, ktorá sa zameriava na odhad návrhových hydrologických veličín na stanici Vltava-Kamýk v Českej republike. Cieľom práce je stanoviť odhad objemu povodňovej vlny na základe pravdepodobnosti podmieneným výskytom 10 000ročného kulminačného prietoku pre vodnú nádrž Orlík.

V prvej časti štúdie sme sa zamerali na lokálnu frekvenčnú analýzu kulminačných prietokov, resp. povodňových vĺn. Nakoľko na danej stanici sa v roku 2002 vyskytla mimoriadna povodňová udalosť, ktorej kulminačný prietok dosiahol viac než dvojnásobok maxima za celé predchádzajúce obdobie (1877–2001), túto udalosť sme považovali za „historickú“ a na jej zahrnutie do radu systematických pozorovaní a následnej frekvenčnej analýzy sme aplikovali metodiku Bayesových MCMC simulácií (Monte Carlo Markovove reťazce). Výsledky MCMC odhadov sme porovnali s lokálnymi štatistickými odhadmi podľa klasických metód. V druhej časti sme sa zamerali na analýzu závislosti medzi kulminačnými prietokmi a povodňovými vlnami prostredníctvom kopúl. Testovali sme viacero rodín kopúl a následne sme odhadli podmienené objemy povodňových vĺn. Získané výsledky návrhových prietokov a objemov sme porovnali s odhadmi používanými v súčasnej inžinierskej praxi.

Kľúčové slová: frekvenčná analýza, maximálne prietoky, objemy povodňových vĺn, kopule, Vltava-Kamýk

1. Úvod

Kopule sú matematickými štruktúrami, ktoré umožňujú modelovať združené rozdelenie pravdepodobnosti dvoch alebo viacerých veličín, medzi ktorými existuje vzájomná závislosť, napr. maximálne prietoky a objemy povodňových vĺn, intenzita a trvanie zrážok atď. Ich výhodou je napr. aj to, že k odhadu návrhových hodnôt združených extrémov nie je potrebné klásť prísne predpoklady na marginálne rozdelenie jednotlivých veličín [7].

Štruktúra závislosti, resp. spoľahlivosť odhadov návrhových hodnôt združených veličín – predovšetkým v oblasti maximálnych hodnôt, t.j. na tzv. “hornom chvoste” – závisí nielen od zvoleného matematického modelu (kopule), ale aj od množstva dostupných údajov pre modelovanie marginálnych rozdelení jednotlivých veličín. Výberové súbory ročných (sezónnych) maxím majú väčšinou obmedzený rozsah, čo je výrazným limitujúcim faktorom vo frekvenčnej analýze. Nedostatku údajov sa však dá vyhnúť, napr. použitím väčšieho množstva simulovaných údajov zo zrážko-odtokových modelov alebo zahrnutím tzv. historických informácií do analýzy. Práve druhá z metodík je aplikovaná v tejto štúdii.

Ciele predloženej práce sú nasledovné: 1) využiť historické informácie vo frekvenčnej analýze marginálnych rozdelení maximálnych prietokov, resp. objemov povodňových vĺn, a to v rámci simulácií MCMC (Monte Carlo Markovove reťazce); 2) odhadnúť združené pravdepodobnosti prietokov a objemov povodňových vĺn pomocou kopúl a testom dobrej zhody posúdiť ich vhodnosť a 3) určiť vybrané kvantily povodňových vĺn za podmienky nastatia 10 000ročného prietoku na stanici Vltava-Kamýk (vodné dielo Orlík) a porovnať ich s odhadmi odborníkov doposiaľ použitými v hydrologickej praxi.

2. Metodika

2.1 Bayesove MCMC simulácie v jednorozmernej frekvenčnej analýze

V [9] prezentovali odhad parametrov distribučnej funkcie, v ktorej sa dajú zohľadniť aj informácie o historických hydrologických udalostiach prostredníctvom funkcie vierohodnosti. Nech $x_1,\ldots,x_i,\ldots,x_s$ označujú prvky systematického pozorovania o dĺžke s a $y_1,\ldots,y_j,\ldots,y_m$ označuje m historických udalostí, ktoré sa vyskytli počas historického obdobia o dĺžke h a nech X_0 je prahová hodnota, pod ktorou leží všetkých h-m (neznámych) udalostí z historického obdobia. Potom

$$\ell(\theta) = \prod_{j=1}^{m} f_X(y_j)\left[F_X(X_0)\right]^{h-m} \prod_{i=1}^{s} f_X(x_i) \qquad (1)$$

je *združenou funkciou vierohodnosti*, kde $f_X(F_X)$ označuje rozdelenie pravdepodobnosti (kumulatívnu distribučnú funkciu, skr. DF) premennej X a θ sú parametre F, resp. f.

Odhady parametrov θ sa získajú *metódou maximálnej vierohodnosti* po logaritmickej transformácii vzťahu (1) a jej následnej maximalizácie. Procedúra odhadu je založená na využití Bayesovej vety [8]. Výhodou Bayesovho prístupu je hlavne to, že výsledkom analýzy je úplné aposteriórne rozdelenie pravdepodobnosti parametrov, vrátane ich intervalov spoľahlivosti alebo ľubovoľných funkcií parametrov θ. *Monte Carlo Markovove reťazce* (MCMC) sú potom iba technickou pomôckou pre aplikáciu Bayesovej vety: metodika MCMC „vzorkuje“ aposteriórne rozdelenie bez nutnosti numerického výpočtu zložitých integrálov, ktoré sa objavia po dosadení vzťahu (1) do Bayesovej vety [8]. Ďalšie detaily o metodike MCMC v lokálnej alebo regionálnej frekvenčnej analýze uvádza napr. [8] alebo [3].

2.2 Združená frekvenčná analýza pomocou kopúl

Združená distribučná funkcia obsahuje informáciu o individuálnych vlastnostiach náhodných vektorov X a Y uloženej v marginálnych DF $F(x)$ a $G(y)$, a zároveň o ich vzťahu. Pre marginálne DF (ďalej len „marginálie“) platí $F(x) = H(x,\infty)$ a $G(y) = H(\infty,y)$, pre $x,y \in \Re$. Pripomeňme, že $H(x,y) = P(X < x \wedge Y < y)$, kde P označuje pravdepodobnosť a $\wedge$ logický súčin. Modelovanie oboch typov informácií združených v jednej funkcii má hlavnú nevýhodu spočívajúcu v obmedzení voľby marginálií na rovnaký typ rozdelenia. Riešením tohto problému je prístup založený na rozklade pravdepodobnostnej štruktúry a oddelenej analýze jednotlivých zložiek. Podľa Sklarovej vety (napr. [4], [7]), združenú DF možno prepísať do tvaru $H(x,y) = C(F(x),G(y))$, kde funkcia C: $[0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ sa nazýva kopula. Jej vlastnosti sú

- $C(u,0) = C(0,v) = 0$,
- $C(u,1) = u$, $C(1,v) = v$,
- C je dvojrastúca, t.j. $C(u',v') - C(u',v) - C(u,v') + C(u,v) \geq 0$, pre všetky u, v, u', $v' \in [0,1]$ také, že $u < u'$, $v < v'$.

Takáto distribučná funkcia (*kopula* C) obsahuje informáciu výhradne o závislosti medzi X a Y, a spája marginálie F a G do združenej distribučnej funkcie H. Existuje niekoľko tried kopúl, z ktorých každá sa vyznačuje špecifickými vlastnosťami [7].

3. Údaje

Štúdia sa zamerala na stanicu Vltava-Kamýk, ktorá na nachádza na hornom toku rieky Vltava, v blízkosti vodného diela Orlík v južných Čechách. Vstupné údaje tvorili rady letných kulminačných prietokov (máj až október) za obdobie 1877–2002, resp. odpovedajúce rady objemov povodňových vĺn, ktoré sme v práci určovali dvoma spôsobmi: 1) *metódou konštantnej dĺžky trvania povodňovej vlny*, t.j. 3 dni trvania vzostupnej vetvy povodňovej vlny, 1 deň trvania kulminácie povodne a 5 dní trvania zostupnej vetvy povodňovej vlny, resp. 2) tzv. *subjektívnou metódou*, t.j. vizuálnou separáciou každej povodňovej vlny.

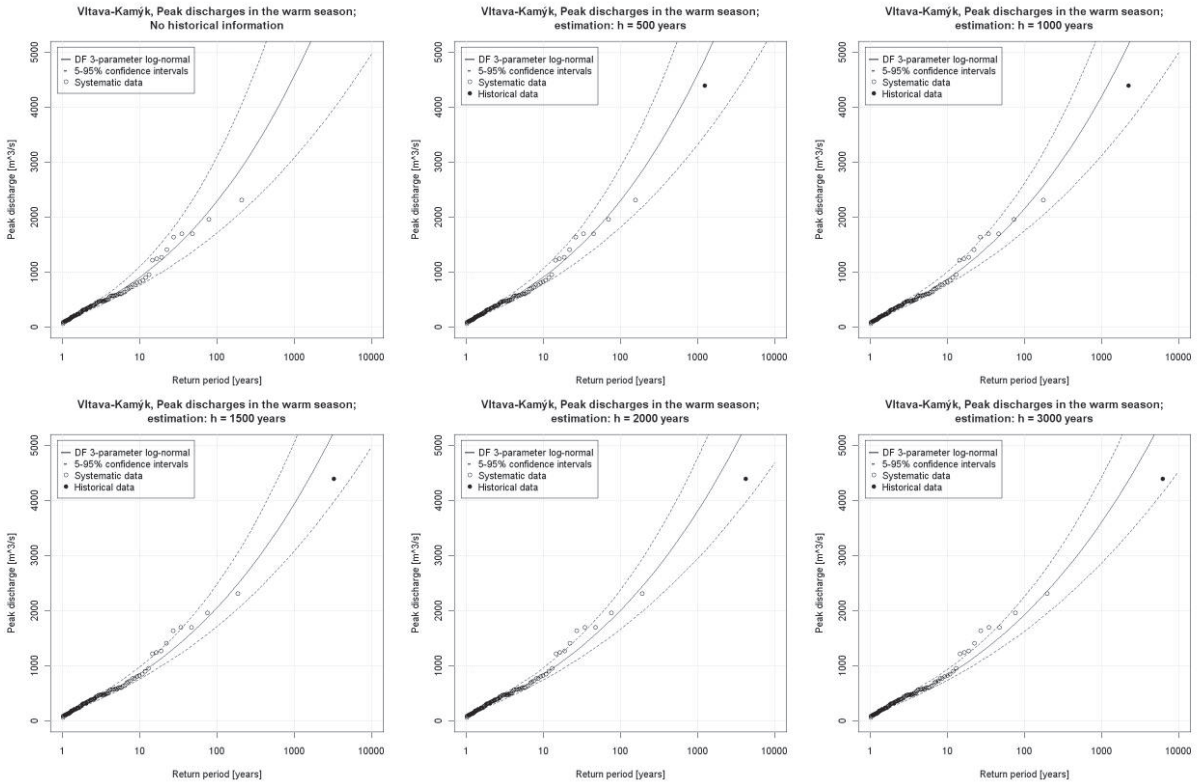
Rad kulminačných prietokov je výnimočný tým, že zahŕňa aj mimoriadnu povodeň z roku 2002: hodnota tohto maxima (4390 $m^3.s^{-1}$) takmer dvojnásobne prevyšuje maximum z ostatnej časti radu (2309 $m^3.s^{-1}$) z obdobia 1877–2001. V dôsledku tohto faktu sme udalosť z roku 2002 definovali ako „historickú“ (aj napriek tomu, že sa vyskytla v súčasnosti) s cieľom ilustrovať výhodné aspekty zahrnutia informácie o mimoriadnych historických udalostiach do lokálnej frekvenčnej analýzy.

4. Výsledky

4.1 Frekvenčná analýza maximálnych prietokov, resp. povodňových vĺn

Návrhové hodnoty analyzovaných veličín, odhadovaných na základe vzťahu (1) závisia predovšetkým od voľby teoretickej DF $F(x)$, od prahovej hodnoty X_0 a od dĺžky historického obdobia h. Z tohto dôvodu sme vykonali niekoľko sérií citlivostných analýz, v ktorých sme skúmali efekt jednotlivých faktorov na finálne odhady návrhových hodnôt a ich neurčitosti.

V analýze kulminačných prietokov, resp. povodňových vĺn sme skúmali vhodnosť nasledujúcich DF ([6], [5]): 4-parametrické Johnsonovo rozdelenie (JOH), 2-parametrické log-normálne rozdelenie (LN2), resp. 3-parametrické rozdelenia, a to zovšeobecnené extremálne (GEV), zovšeobecnené logistické (GLO), log-normálne (LN3), Pearsonovo rozdelenie III. typu (P3) a logaritmické Pearsonovo rozdelenie III. typu (LP3). Dobrú zhodu pozorovaných údajov s preloženými teoretickými DF sme posudzovali subjektívnym spôsobom, a to na základe toho, či 90 % pozorovaných údajov znázornených pomocou empirického vzťahu pre polohu kvantilov [1] ležia v 90percentnom intervale spoľahlivosti (5 % – 95 %) určeným simuláciou MCMC [10].



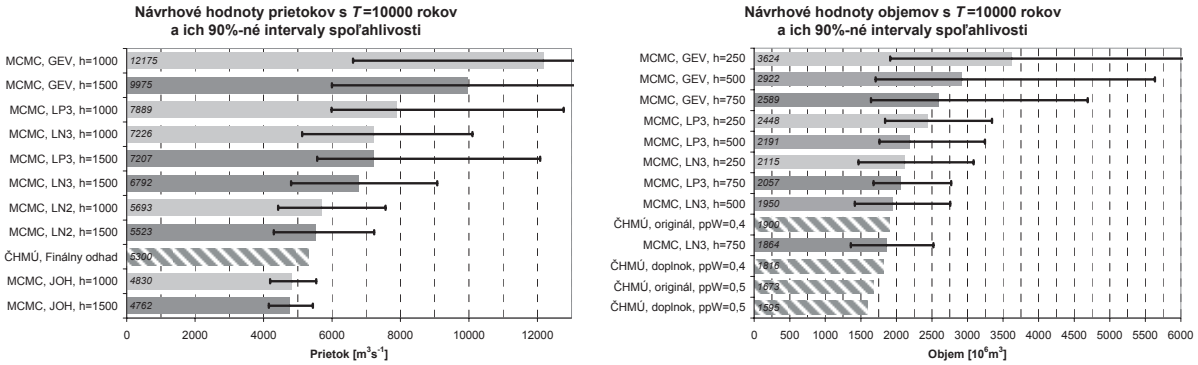
Obr. 1: Letné kulminačné prietoky preložené 3-parametrickým log-normálnym rozdelením.

Citlivostná analýza vzhľadom na dĺžku historického obdobia h. Pri konštantnej prahovej hodnote X_0 = 4000 $m^3.s^{-1}$ sme uvažovali 5 rôznych hodnôt h od 500 po 3000 rokov. Grafy na Obr. 1 znázorňujú výsledky citlivostnej analýzy pre DF LN3, pričom v pravom hornom rohu

sa nachádza aj prípad bez zahrnutia historickej informácie. Môžeme konštatovať, že zahrnutie historickej informácie evidentne zužuje neurčitosť odhadov kvantilov v porovnaní so situáciou, kedy sa analyzujú iba systematické údaje. Ďalej sme usúdili, že najprijateľnejším odhadom dĺžky historického obdobia *h* je 1000, prípadne 1500 rokov.

Citlivostná analýza vzhľadom na prahovú hodnotu X_0. Pre konštantnú hodnotu dĺžky historického obdobia h = 1000 (aj 1500) rokov sme si zvolili rôzne prahové hodnoty v rozmedzí od absolútneho maxima až po sekundárne maximum. Z analýzy sme usúdili (tu bez ilustrácií), že hraničná hodnota X_0 = 4000 $m^3.s^{-1}$, ktorá je iba o niečo nižšia než hodnota historickej kulminácie, je adekvátna pre danú analýzu MCMC. Pri nižších hodnotách X_0 síce pozorujeme zužovanie intervalu spoľahlivosti návrhových hodnôt, avšak tento kladný aspekt je výrazne znehodnotený záporným dôsledkom, ktorým je fakt, že extrémy v strednej časti spektra (pre doby opakovania T = 10 až 100 rokov) sa postupne dostávajú von z konfidenčného pásu.

Po sériách citlivostných analýz sme si zúžili množinu prijateľných DF, resp. možných kombinácií hodnôt h a X_0. Obr. 2 (vľavo) prezentuje návrhové hodnoty letných kulminačných prietokov s dobou opakovania T = 10 000 rokov pre 5 najpriaznivejších DF (GEV, LP3, LN3, LN2 a JOH), resp. dve hodnoty h (1000 a 1500 rokov) a X_0 = 4000 $m^3.s^{-1}$. Naše odhady na základe metodiky MCMC sú ďalej porovnané aj s odhadom odborníkov ČHMÚ [2]. Z Obr. 2 je zrejmé, že spektrum odhadov $Q_{10\,000}$ je relatívne široké, aj keď sa obmedzíme iba na konkrétnu hodnotu h. Odhad ČHMÚ sa nachádza v spodnej časti tohto spektra.



Obr. 2: Porovnanie návrhových hodnôt kulminačných prietokov (vľavo), resp. objemov povodňových vĺn (vpravo) s dobou opakovania T = 10 000 rokov, resp. ich 90% intervalom spoľahlivosti s podobnými odhadmi ČHMÚ [2].

V prípade objemov povodňových vĺn sme postupovali analogicky: vykonali sme série citlivostných analýz tak pre objemy odpovedajúce konštantnej dĺžke povodňovej vlny ako aj objemy určené subjektívnou metódou. Udalosť z roku 2002 sme taktiež považovali za „historickú“, avšak odhad dĺžky historickej periódy sme mali o niečo menší: uvažovali sme hodnoty v rozmedzí h = 250 až 750 rokov. Porovnanie návrhových hodnôt objemov povodňových vĺn s T = 10 000 rokov s odhadmi ČHMÚ sa nachádza na Obr. 2 (vpravo).

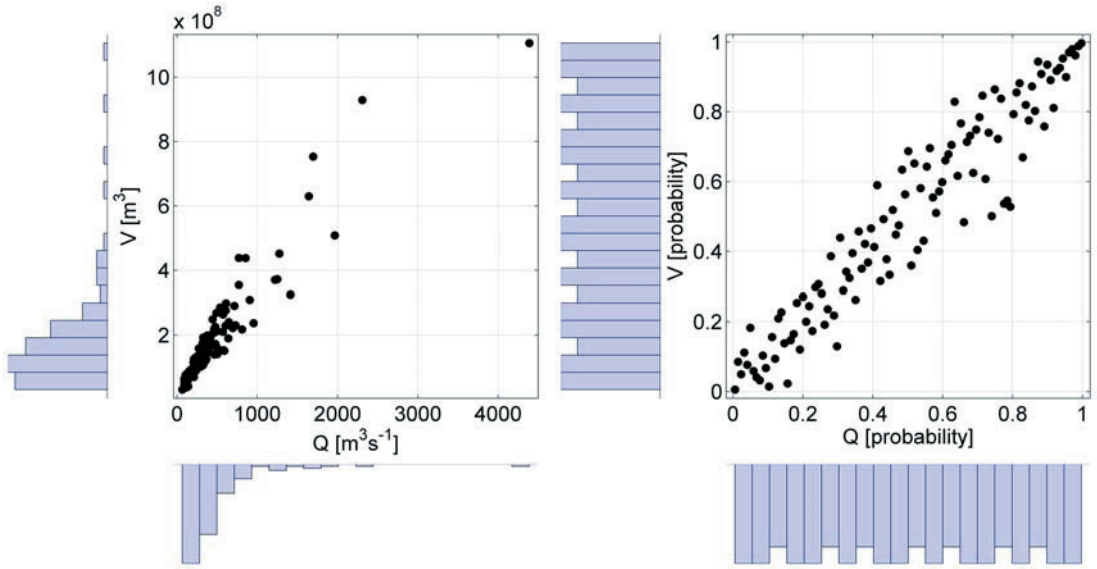
4.2 Združená frekvenčná analýza dvojíc maximálnych prietokov a objemov vĺn

Naším cieľom v združenej frekvenčnej analýze bolo vypočítať odhad objemu povodňovej vlny za podmienenej pravdepodobnosti výskytu kulminačného prietoku $p = 10^{-4}$, t.j. pre dobu opakovania T = 10 000 rokov. K tomuto účelu sme si zvolili matematický aparát kopúl.

Parciálne výsledky jednorozmernej frekvenčnej analýzy pomocou simulácií MCMC, resp. procedúra fitovania kopúl ponúkajú rôzne alternatívne voľby parametrov a metód k získaniu finálnych odhadov návrhových hodnôt. Výsledky výpočtov sumarizované v nasledujúcich častiach štúdia sú triedené podľa:

- *spôsobu výpočtu zodpovedajúcich objemov povodňových vĺn*: okno konštantnej (3 + 1 + 5 dní) a premenlivej (subjektívnej) dĺžky;
- *predpokladanej doby opakovania extrémov*: T = 500 rokov pre objemy povodňových vĺn, resp. 1000 alebo 1500 rokov pre kulminačné prietoky;
- *parametrickej triedy marginálií*: LN3, GEV, LP3, JOH a LN2;
- *rodiny kopúl*: Gumbel, Clayton, Frank, Normal (Gauss), Plackett, t.j. najpoužívanejšie jednoparametrické rodiny kopúl;
- *metódy fitovania kopule*: parametrická (metóda maximalizácie pseudo-vierohodnostnej funkcie) a neparametrická (dve metódy, založené na mierach asociácie Kendallovo τ či Spearmanovo ρ; [7]);
- *pravdepodobnostnej hodnoty kvantilu*: medián (0,5) a 0,6 kvantil.

Na Obr. 3 (vľavo) je zobrazený graf hodnôt maximálneho prietoku Q a k nim vypočítaných hodnôt objemu vlny V (metóda konštantnej dĺžky povodňovej vlny), pričom na Obr. 3 (vpravo) sú rovnaké veličiny po transformácii zodpovedajúcou marginálnou DF na dvojice pravdepodobností.



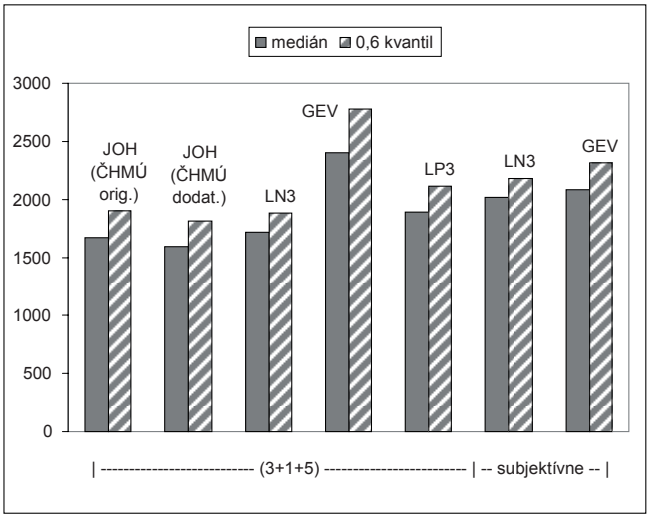
Obr. 3: Pozorované dvojice kulminačných prietokov a odpovedajúcich objemov povodňových vĺn (vľavo) a ich marginálne pravdepodobnosti (vpravo) pri konštrukcii objemov na základe metódy konštantnej dĺžky povodňovej vlny.

Tab. 1: Maximálne hodnoty vierohodnostnej funkcie v procese fitovania a p-hodnoty GoF testov (*goodness-of-fit, testov dobrej zhody*) pre kopule s parametrom odhadnutým troma rôznymi spôsobmi.

Metóda odhadu \ Kopula	Gumbel	Clayton	Frank	Normal	Plackett
okno konštantnej dĺžky (3+1+5)					
Max. vierohodnosť	126,4	96,5	128,1	**135,8**	125,7
GoF test, max. vierohodnosť	0,0235	0,0005	0,0904	**0,1054**	0,0305
GoF test, Kendallovo τ	0,0664	0,0005	0,1004	0,1723	**0,2063**
GoF test, Spearmanovo ρ	——	0,0025	0,1204	0,1773	**0,4151**
okno subjektívnej dĺžky					
Max. vierohodnosť	73,7	59,2	66,7	**77,3**	68,6
GoF test, max. vierohodnosť	0,0165	0,0035	0,0205	**0,1983**	0,0624
GoF test, Kendallovo τ	0,0145	0,0025	0,0275	**0,1613**	0,0884
GoF test, Spearmanovo ρ	0,0125	0,0065	0,0285	**0,1304**	0,1216

Výber najlepšieho odhadu kopule podľa hodnoty vierohodnostnej funkcie a *p*-hodnoty testu dobrej zhody dokumentuje Tab. 1. Väčšie hodnoty znamenajú vyššiu preferenciu (najväčšie sú zvýraznené), pričom stabilne najvyššie preferencie dosiahla *normálna* kopula.

Na Obr. 4 je vizuálne porovnanie návrhových hodnôt podmienených objemov pre 10 000ročný kulminačný prietok podľa metódy výpočtu objemov, aj podľa použitých marginálií. Výška prvého stĺpca zodpovedá mediánu (0,5 kvantilu) a výška druhého stĺpca 0,6 kvantilu. Odhady podľa ČHMÚ sú 1673 mil. m^3, resp. 1900 mil. m^3 z originálnej štúdie a 1595 mil. m^3, resp. 1816 mil. m^3 z jej dodatku [2]. Z uvedených výsledkov je zjavná najmä variabilita medzi metódami, zvýraznená požiadavkou poznať rozdelenie pravdepodobnosti náhodných veličín za hranicou, kde nie sú dostupné pozorovania.



Obr. 4: Porovnanie podmienených objemov letných povodňových vĺn podľa metodiky definície vlny a použitých marginálií s výsledkom analýzy ČHMÚ [2].

5. Záver

Napriek tomu, že frekvenčná analýza systematických a historických údajov prostredníctvom MCMC simulácií vyžaduje subjektívnu voľbu niekoľkých parametrov, táto metodika je transparentná: hypotézy sa dajú explicitne formulovať vo funkcii vierohodnosti, zvolené parametre majú hydrologický význam a ich vplyv na výsledky sa dá overiť na základe citlivostných analýz. Ukázalo sa, že najvýznamnejší vplyv na výsledné intervaly spoľahlivosti odhadov kvantilov majú dva parametre: dĺžka historického obdobia h a hodnota X_0, ktorá definuje hranicu pre zahrnutie „neznámych“ hydrologických udalostí z historického obdobia.

Ako sme predpokladali, rôzne marginálne distribučné funkcie, resp. rodiny kopúl vedú k rozdielnym odhadom návrhových hodnôt objemov povodňových vĺn podmienených návrhovou hodnotou maximálneho prietoku. Na druhej strane môžeme konštatovať, že odhady ČHMÚ sú konzistentné našimi výsledkami aj v prípade ich nezávislého posúdenia pomocou kopúl.

Ďalším zistením štúdie je, že aj keď rozšírenie systematických pozorovaní o jedinú historickú udalosť prináša jednoznačné zlepšenie odhadov v jednorozmernej frekvenčnej analýze, tento krok je takmer nedetekovateľný v združenej frekvenčnej analýze založenej na kopuliach (t.j. návrhové hodnoty objemov povodňových vĺn sú takmer nezávislé od zvolenej hodnoty h; bez ilustrácií). Toto zistenie nie je prekvapením ak si vezmeme do úvahy, že aplikácia kopúl je sprevádzaná nevyhnutnou transformáciou pozorovaných dvojíc údajov do intervalu [0;1] x [0;1], čo spôsobuje citeľnú “stratu informácie“, ktorá je zahrnutá v magnitúde pridanej historickej udalosti.

Poďakovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0443-07 a grantom VEGA 1/0103/10. Článok vznikol tiež vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt „Centrum excelentnosti protipovodňovej ochrany územia“ ITMS 26240120004 spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

[1] BAYLISS, A. C. – REED, D. W., 2001. The use of historical data in flood frequency estimation. Report to MAFF. CEH Wallingford, 87 pp.

[2] BOHÁČ M. – KULASOVÁ, B., 2005. Hydrologická studie pro VD Orlík: Průběhy teoretických povodňových vln s kulminačním průtokem s pravděpodobnosti překročení pQ = 0.0001 s podmíněnými pravděpodobnostmi překročení objemu. Český hydrometeorologický ústav., 14 s.

[3] GAUME, E. – GAÁL, L. – VIGLIONE, A. – SZOLGAY, J. – KOHNOVÁ, S. – BLÖSCHL., G., 2010. Bayesian MCMC approach to regional flood frequency analyses involving extraordinary flood events on ungauged sites. Journal of Hydrology [in press], doi: 10.1016 / j. jhydrol. 2010.01.08.

[4] GENEST, C. – FAVRE, A.C., 2007. Everything you always wanted to know about copula modeling but were afraid to ask. Journal of Hydrologic Engineering 12 (4), 347-368.

[5] HILL, I. D. – HILL, R. – HOLDER, R. L., 1976. Algorithm AS 99: Fitting Johnson curves by moments. Applied Statistics 25 (2), 180-189.

[6] HOSKING, J. R. M. – WALLIS, J. R., 1997. Regional frequency analysis: an approach based on L-moments. Cambridge University Press, Cambridge, 224 pp.

[7] NELSEN, R. B., 2006. An Introduction to Copulas. Springer-Verlag, New York, 2nd edition.

[8] REIS, D. S. – STEDINGER, J. R., 2005. Bayesian MCMC flood frequency analysis with historical information. Journal of Hydrology 313: 97-116.

[9] STEDINGER, J. R. – COHN, T. A., 1986. Flood frequency analysis with historical and paleoflood information. Water Resources Research 22(5): 785-793.

[10] VIGLIONE, A., 2008. The nsRFA Package (Non-supervised Regional Frequency Analysis). Version 0.6-2. Last modified 19-09-2008. Available at: http://cran.r-project.org/ web/packages/ nsRFA/index.html.

Kontakty na autora

1 Katedra vodného hospodárstva krajiny, Stavebná fakulta Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, e-mail: ladislav.gaal@stuba.sk

2 Katedra matematiky a deskriptívnej geometrie, Stavebná fakulta Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

VYUŽITÍ GENERÁTORU SRÁŽEK PRO VÍCEROZMĚRNOU PRAVDĚPODOBNOSTNÍ ANALÝZU POVRCHOVÉHO ODTOKU

***Pavel Fošumpaur*[1]**

Abstrakt

V teorii nádrží a vodohospodářských soustav u nás dosud převažuje deterministický přístup, kdy vodní zdroje jsou většinou navrhovány a řízeny s využitím tzv. návrhových událostí, které vycházejí z historických pozorování. Kvalitativně vyšším přístupem je využití stochastických simulačních modelů za využití metody Monte-Carlo, které umožňují kvantifikaci spolehlivosti vodních zdrojů a rizik spojených s jejich poruchami. Zatímco tento přístup je dobře propracován pro případ strategického řízení zásobní funkce nádrží, v oblasti povodňového řízení odtoku není dosud uspokojivě vyřešen. Příspěvek přináší metodický postup pro přípravu stochasticky generovaných meteorologických a hydrologických dat pro potřeby navrhování a řízení retenční funkce nádrží a vodohospodářských soustav a posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních.

Klíčová slova: generátor srážek, kontinuální simulace, vícerozměrná frekvenční analýza

1. Úvod

Dosavadní aplikace kontinuálních simulací ve vodním hospodářství se většinou zaměřovaly pouze na jednorozměrnou frekvenční analýzu ročních kulminačních průtoků. Navrhování nádrží a vodohospodářských soustav na návrhové události dané kvantily pouze jediné charakteristiky povodňového režimu může však být nespolehlivé. Ve skutečnosti jsou nároky na retenční funkci nádrží během povodní dány souborem více charakteristik povodňového režimu a jejich nejrůznějších kombinací. Jedná se zejména o kulminační průtok povodně, objem povodňové vlny a dobu trvání povodně. V příspěvku je popsán metodický postup pro zpracování vícerozměrné frekvenční analýzy povodňového režimu za využití kontinuální simulace. Výhodou postupu je skutečnost, že nevyžaduje rozsáhlé historické pozorování průtoků v zájmovém profilu. Pro potřeby odhadu sdružených distribučních funkcí je využita progresivní metoda Copulí. Kvantifikovány jsou rovněž podmíněné pravděpodobnosti objemů povodňových vln v závislosti na velikosti kulminace povodně. Podrobně je problematika pojednána v [2].

2. Generátor srážek

Ačkoliv historický vývoj stochastických generátorů srážek počíná přibližně již od padesátých let minulého století, v poslední době se značně urychluje, což je dáno rostoucí motivací uživatelů z různých aplikačních oblastí. Ucelený přehled historie stochastických generátorů srážek podává Wilks a Wilby [6]. Většina generátorů umožňuje simulaci denních srážkových úhrnů, které lze následně desagregovat do menších, např. hodinových úhrnů pomocí speciálních postupů popsaných dále.

Technologie modelování denních srážkových úhrnů je zpravidla rozdělena do dvou nezávislých etap, z nichž první představuje tzv. model výskytu srážky (Precipitation Occurrence Model). Jeho úkolem je generování sekvence bezesrážkových dnů a dnů se srážkou. Princip metod vychází z Markovových řetězců.

Pro sestavení modelu je třeba odvodit systém podmíněných pravděpodobností výskytu srážkového dne v závislosti na sekvenci srážkových, resp. bezesrážkových dnů v předchozím období. Délka předchozího období reprezentuje řád Markovova řetězce a může být různá pro dny v různých kalendářních měsících, stejně jako hledané podmíněné

pravděpodobnosti (pravděpodobnosti přechodu). Pro optimalizaci řádu Markovova řetězce pro dny v jednotlivých kalendářních měsících lze využít věrohodnostní ukazatele AIC nebo BIC [2].

V následujícím kroku jsou generovány srážkové úhrny ve dnech, které předchozí model označil jako srážkové (Precipitation Amount Model). Z literatury vyplývá, že patrně nejoblíbenějším typem rozdělení pravděpodobnosti pro denní srážkové úhrny je dvouparametrické gamma rozdělení. V minulosti se pro tyto účely rovněž osvědčilo Pareto rozdělení pravděpodobnosti, popř. dvouparametrické exponenciální rozdělení.

Srážkové výšky se generují pomocí generátoru náhodných čísel daného typu rozdělení pravděpodobnosti. Většina generátorů srážek přitom vychází z předpokladu, že srážkové úhrny jsou v sérii po sobě jdoucích dnů se srážkou vzájemně nezávislé. Srážkové úhrny jsou potom generovány naprosto náhodně a nezahrnuje se tak možná korelační vazba sousedních srážkových úhrnů. Tato skutečnost vychází z poznatku, že autokorelační vazby v řadách po sobě následujících nenulových srážkových úhrnů jsou na úrovni denního kroku statisticky často nevýznamné. Naopak při jemnějším časovém kroku, což je případ hodinových srážkových úhrnů, nelze již autokorelační vazby nenulových srážkových úhrnů zanedbat.

Generování denních teplot vzduchu vychází z postupu podle Richardsona [4], který vytvořil model pro potřeby optimalizace zemědělské produkce. Jeho model umožňuje simulaci dalších klíčových faktorů kromě srážek, které mají vazbu na zemědělskou produkci. Jedná se o denní maximální a minimální teploty a sluneční záření. Model využívá pro genezi ostatních meteorologických veličin (kromě srážek) technologii vícerozměrných regresních modelů s uvážením vlivu výskytu srážky. Pro desagregaci denních srážkových úhrnů na kratší (např. hodinové) úhrny je využita metoda multiplikativní kaskády [3].

3. Kontinuální simulace srážko-odtokového procesu

Simulace srážko-odtokového procesu využívá jako vstupy předem namodelované synchronní řady srážek a teplot. Výstupem je kontinuální simulace průtoků v uzávěrovém profilu povodí, popř. v předem definovaných profilech říční sítě. Simulace průtoků je realizována v hodinovém kroku, aby bylo možné její výsledky využít pro frekvenční analýzu a pro potřeby výše formulovaných úloh návrhu a řízení nádrží a vodohospodářských soustav.

Simulace průtoků je realizována pomocí hydrologického deterministického modelu, který umožňuje kontinuální simulaci. Nelze tedy použít epizodní hydrologické modely. Vhodný hydrologický model by měl obsahovat moduly pro následující procesy:

- řešení srážko-odtokového vztahu (výpočet povrchového a podzemního odtoku),
- řešení transformace průtoků v říční síti,
- simulace tání sněhu.

V rámci případové studie byl využit hydrologický model AQUALOG firmy Aqualogic, jehož podrobný popis je uveden např. v [7]. Při testování syntetických řad dlouhých srážko-odtokových simulací je důležité vycházet z hlavního cíle a charakteru zadané vodohospodářské úlohy. Zde platí, že možnosti využití kontinuálních simulací podle výše popsaného modelu jsou ve vodním hospodářství i v teorii nádrží a vodohospodářských soustav velmi široké. Přitom konkrétní charakter úlohy vždy předurčuje požadavek na shodu vybraných charakteristik vstupních a výstupních řad. Různé mohou být požadavky na shodu charakteristik v případě využití kontinuální simulace pro návrh systémů a řízení systémů, pro řešení zásobní funkce nádrží a retenční funkce, pro posuzování dopadů klimatické změny, atd. Dále u některých úloh je požadována shoda většího množství charakteristik, popř. dokonce všech a u jiného typu úloh postačí shoda pouze několika málo vlastností.

4. Frekvenční analýza povrchového odtoku

Technika využití srážkového generátoru ve spojení s hydrologickým modelem umožňuje odvození dlouhých kontinuálních simulací, které mohou být následně využity pro analýzu frekvenčních charakteristik povodňového režimu. Nejčastějším případem je dle literatury využití technologie kontinuální simulace pro analýzu frekvenčních vlastností kulminačních průtoků a pro odvození maximálních průtoků s malými pravděpodobnostmi překročení. Tomuto tématu se v minulosti systematicky věnovalo mnoho autorů, např. Blažková a Beven [1]. Autoři většinou kalibrují parametry srážkového generátoru a hydrologického modelu pomocí výsledků mnoha kontinuálních simulací, kdy kritériem pro přijetí modelu je míra shody s čárou překročení maximálních průtoků stanovenou z pozorovaných průtokových dat.

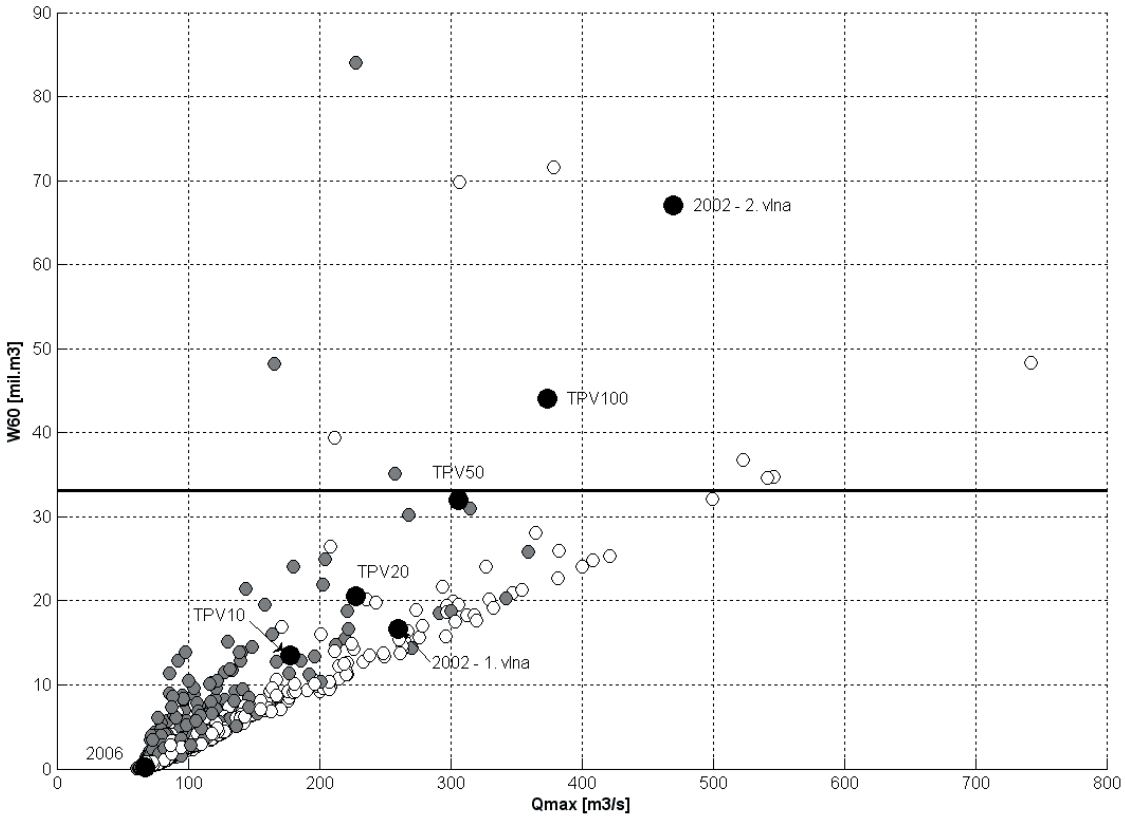
Současný trend v oblasti povodňového řízení odtoku se ubírá cestou kvantifikace sdružených pravděpodobností různých charakteristik povodní. Bylo prokázáno, že navrhování nádrží a vodohospodářských soustav na návrhové události dané kvantily pouze jediné charakteristiky povodňového režimu (zpravidla kulminačního průtoku) může být nespolehlivé a ve svém důsledku může vést k podhodnocení nebo naopak nadhodnocení parametrů nádrží (retenční objem, kapacita přelivů, atd.). Ve skutečnosti jsou nároky na retenční funkci nádrží během povodní dány souborem více charakteristik povodňového režimu a jejich nejrůznějších kombinací. Jedná se zejména o kulminační průtok povodně, objem povodňové vlny a dobu trvání povodně. Teorie vícerozměrných rozdělení pravděpodobnosti je známá řadu let. Její aplikace ve stochastické hydrologii pro kvantifikaci pravděpodobnostních vlastností povodňového režimu začaly být systematicky propracovávány teprve nedávno a v podstatě dosud převažují jednorozměrné postupy pro kulminační průtoky povodní. Tato skutečnost je dána jednak nedostatkem historických pozorování pro spolehlivý odhad parametrů vícerozměrných rozdělení pravděpodobnosti a jednak dalšími výpočetními obtížemi. Mezi ty se řadí zejména skutečnost, že marginální rozdělení pravděpodobnosti jednotlivých povodňových charakteristik jsou zpravidla silně asymetrická a dále skutečnost, že by měla být pro jednotlivé charakteristiky povodní stejného typu.

Nejvýznamnější vazba pro potřeby navrhování a řízení nádrží a vodohospodářských soustav je bezesporu mezi kulminačním průtokem povodně a jejím objemem. Tradiční přístup aproximace těchto dvou charakteristik pomocí asymetrického dvourozměrného rozdělení pravděpodobnosti doporučuje často různé typy dvourozměrného Gumbelova extremálního rozdělení.

Pro účely vícerozměrných frekvenčních analýz je v posledních letech s úspěchem využívána teorie Copulí, kterou formuloval Sklar [5]. Jedná se o postup, kdy pro aproximaci pravděpodobnostních vlastností vícerozměrného vztahu jsou využívány marginální rozdělení pravděpodobnosti jednotlivých veličin. Výhodou metody Copule je možnost jejího nasazení na případy, kdy jednotlivé marginální veličiny mají různé typy rozdělení pravděpodobnosti. Metoda je z tohoto pohledu velmi univerzální a je v současnosti využívána pro aproximaci asymetrických vícerozměrných problémů v hydrologii.

Význam vícerozměrné frekvenční analýzy spočívá zejména ve skutečnosti, že poskytuje oproti standardnímu jednorozměrnému postupu kvalitativně vyšší míru informace o pravděpodobnostních vlastnostech povodňového režimu v daném profilu. Jako velmi nadějná se jeví její kombinace s technologií kontinuální simulace. Celý postup nyní demonstrujme na případové studii povodí nádrže Lipno I.

Nejprve byly v 1000leté kontinuální simulaci přítoků do nádrže Lipno I vyhledány všechny povodňové vlny, jejichž kulminace Q_{max} překročila hodnotu jednoletého průtoku Q_1. Současně byly určeny objemy jednotlivých povodní W_{60} nad zvolenou hodnotou neškodného odtoku $O_{ne,1}$ = 60 $m^3.s^{-1}$. Povodně tak byly popsány dvěma základními charakteristikami Q_{max} (kulminace) a W_{60} (objem) a jsou vyneseny do grafu na Obr. 1, ve kterém jsou dále rozlišeny zimní povodně za kalendářní měsíce XII-IV (šedou barvou) a letní povodně za měsíce V-XI (bílou barvou).

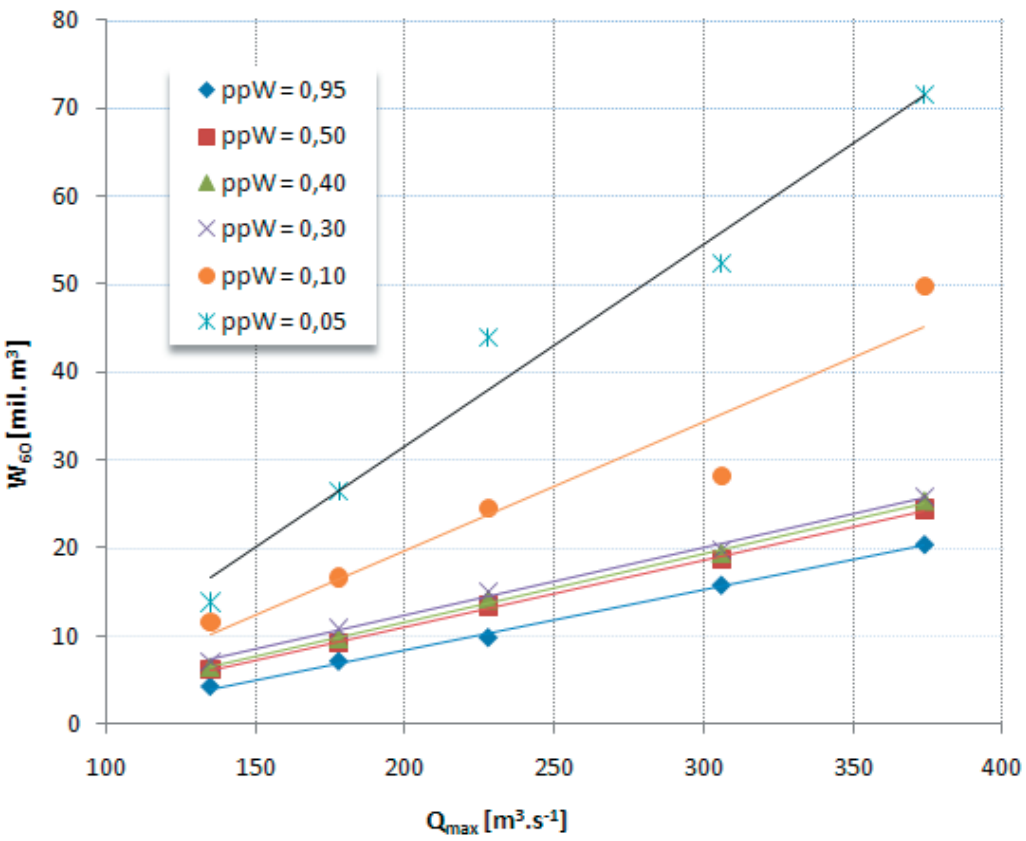


Obr. 1: Syntetické povodně za simulované období 1000 let – zimní (šedá), letní (bílá), historické a teoretické dle ČHMÚ (černá).

Z grafu na Obr. 1 zřejmě vyplývá rozdílný charakter zimních a letních povodní, kdy letní povodně se vyznačují menším objemem. Zimní povodně způsobené často táním sněhových zásob jsou naopak typické většími objemy. Do grafu jsou dále zaznačeny historické povodně z roku 2002 a 2006. Povodeň v srpnu roku 2002 měla dvě vlny. První vlna byla způsobena vydatnými srážkami, které vypadly na relativně suché povodí, a její objem odpovídá typické letní povodni při dané kulminaci. Naopak druhá vlna povodně 2002 byla způsobena opakovanými vydatnými srážkami, které však tentokrát vypadly na nasycené povodí po průchodu první vlny. Objem druhé vlny 2002 je z tohoto důvodu v kontextu letních povodní silně nadprůměrný. V grafu jsou zároveň vyznačeny teoretické povodňové vlny (TPV) zpracované ČHMÚ, které byly využity v rámci studie zvýšení retence VD Lipno (VD TBD, 2004). Z grafu vizuálně vyplývá, že uvedené TPV dobře reprezentují celkovou variabilitu všech pravděpodobných povodní. Alternativně by bylo možné vyhodnotit zvláštní TPV pro zimní a letní období.

Pro odvozování hydrogramů teoretických povodňových vln je velmi užitečný koncept podmíněných pravděpodobností kulminačních průtoků a objemů povodňových vln. Analýza byla nejprve odvozena zpracováním empirických podmíněných pravděpodobností na podkladě 1000leté kontinuální simulace. Objemy povodňových vln byly variantně voleny nad neškodným odtokem 60, resp. 90 $m^3.s^{-1}$ (soubor W_{60}, resp. W_{90}). Postup byl založen na myšlence vytvoření pěti dílčích souborů objemů povodní s kulminacemi Q_5, Q_{10}, Q_{20},Q_{50} a Q_{100} s tolerancí ±10 %. Tyto soubory byly následně proloženy vhodným typem rozdělení pravděpodobnosti (GEV) a byly odhadnuty jejich charakteristické kvantily.

Výsledek analýzy pro soubor W_{60} je znázorněn v Obr. 2. Hodnoty podmíněných pravděpodobností překročení objemů *ppW* byly voleny od 0,95 do 0,05. Z grafů vyplývá, že jednotlivé charakteristické kvantily je možné proložit lineární závislostí. Dále je zřejmé, že rozptyl pravděpodobných objemů povodňových vln pro dané hodnoty kulminačních průtoků je poměrně značný.



Obr. 2: Podmíněné pravděpodobnosti překročení objemů povodňových vln *ppW* (nad $O_{ne,1}$ = 60 $m^3.s^{-1}$) v závislosti na době opakování kulminace.

5. Závěr

Využití stochastického generátoru srážek v teorii nádrží a vodohospodářských soustav nabízí ve srovnání se současným stavem řešení problematiky tyto nové poznatky:

1. Nároky na retenční funkci nádrží,během povodní jsou dány dány souborem více charakteristik povodňového režimu a jejich nejrůznějších kombinací. Jedná se zejména o kulminační průtok povodně, objem povodňové vlny a dobu trvání povodně. V práci je popsán původní metodický postup pro zpracování vícerozměrné frekvenční analýzy povodňového režimu za využití kontinuální simulace. Výhodou postupu je skutečnost, že nevyžaduje rozsáhlé historické pozorování průtoků v zájmovém profilu. Pro potřeby odhadu sdružených distribučních funkcí je využita progresivní metoda Copulí.
2. Aplikace generátoru srážek ve spojení s kontinuální simulací srážko-odtokového procesu může sloužit pro hodnocení spolehlivosti retenční funkce nádrží.
3. Metodika může dále sloužit pro konstrukci předpovědních a varovných systémů, popř. pro potřeby optimalizace řízení vodohospodářských soustav za povodní.

Poděkování

Příspěvek byl zpracován za podpory grantového projektu GA ČR reg. č.: 103/07/1620 s názvem „Predikční a simulační modely v teorii operativního řízení vodohospodářských soustav“.

Literatura

[1] BLAŽKOVÁ, Š. – BEVEN, K. J., 1997. Flood Frequency Prediction for data limited catchments in Czech Republic using stochastic rainfall model and TOPMODEL. Journal of Hydrology 195, s. 256-278. ISSN 0022-1694.

[2] FOŠUMPAUR, P., 2009. Využití generátoru srážek v teorii nádrží a vodohospodářských soustav. [Habilitační práce]. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. 92 s.

[3] OLSSON, J., 1998. Evaluation of a scaling cascade model for temporal rainfall disaggregation. Hydrology and Earth System Sciences, 2(1), s. 19-30. ISSN: 1027-5606.

[4] RICHARDSON, C.W., 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. Water Resources Research 17, pp 182-190. ISSN 0043–1397.

[5] SKLAR, A., 1959. Fonction de re´partition a` n dimensions et leurs marges. Publications de L´Institute de Statistique, Universite´ de Paris 8, p. 229-231.

[6] WILKS, D. S., – WILBY, R. L., 1999. The weather generation game: a review of stochastic weather model. Progress in Physical Geography 23, 3. ISSN: 0309-1333.

[7] ZEZULÁK, J., – KREJČÍ, J., 2005. AQUALOG, Hydrologický model. Aqualogic Consulting, s.r.o., Praha.

Kontakty na autora

1 ČVUT v Praze, Fakulta stavební, e-mail: fosumpaur@fsv.cvut.cz

MODELOVÁNÍ POVRCHOVÉHO ODTOKU V EXTRÉMNÍM RELIÉFU

Vladimír Fárek[1]

Abstrakt

Význam modelování povrchového odtoku spočívá zejména v nalezení míst ohrožených lokálními záplavami z přívalových dešťů (flash floods) a erozí. K určování míst se zvýšenými hodnotami akumulace povrchového odtoku se používá celá řada rozdílných algoritmů dělitelných do řady skupin, dle různých kritérií. V reliéfu s rychlým střídáním konvergentních a divergentních tvarů, značnými výškovými rozdíly, zlomy, narušenými údolnicemi apod. může na jednu stranu docházet ke značně vysokým lokálním hodnotám akumulace povrchového odtoku a zároveň je zde modelování povrchového odtoku složitější, než v mírně zvlněné krajině. Za použití postupů implementovaných v geografickém informačním systému GIS jsou v příspěvku demonstrovány vlastnosti jednotlivých algoritmů v extrémním reliéfu a jejich případná použitelnost pro analýzu území z hlediska ohrožení erozí či lokálními záplavami, prostřednictvím DEM (Digital Elevation Model).

Klíčová slova: povrchový odtok, modelování, DEM, GIS GRASS

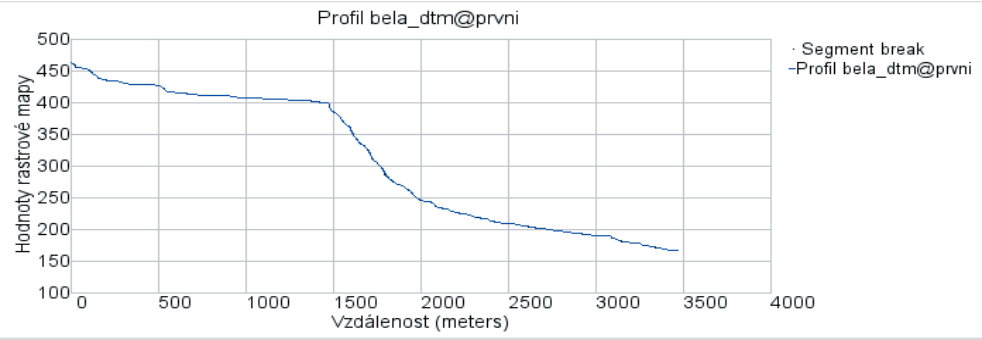
1. Úvod

Povrchový odtok vzniká překročením infiltrační kapacity půdy (infiltration excess – Hortonův odtok), překročením retenční kapacity - odtok ze saturace (saturation excess – Dunneho odtok) a opětovnou exfiltrací vody v nižších částech svahu (return flow). Jednotlivé podtypy povrchového odtoku jsou ovlivněny předchozí a aktuální srážkovou činností, infiltračními schopnostmi půdy, vegetačním krytem a dalšími faktory, jejichž exaktní stanovení a kvantifikace jsou v praxi obtížné. Pohyb vody po povrchu reliéfu je mj. determinován morfologickými parametry terénu. V případě extrémního reliéfu se v pohybu vody po reliéfu uplatňují reliéfní prvky jako hrany, ostré zlomy, údolnice s nejasným průběhem, či porušené sesuvy balvanů atd. Je zřejmé, že správné určení směrů proudění – flow direction a akumulace povrchového odtoku - flow accumulation je v takovémto typu terénu podstatně obtížnější, než v mírně zvlněné krajině. Ve vertikálně výrazně členěném reliéfu může i u malých povodí docházek k vyšší koncentraci povrchového odtoku s řadou negativních jevů. Jde zejména o erozní procesy, poškozování místních komunikací, lokální záplavy s rychlým průběhem (flash floods). Je tedy účelné disponovat nástroji, kterými je možno určit kritická místa v povodí a to bez nutnosti mít aktuální data o složení a stavu vegetačního krytu, infiltračních schopnostech půdy a její saturaci a drsnosti reliéfu. V geografickém systému GIS GRASS se nachází několik nástrojů (modulů), jež umožňují zkoumat digitální výškový model terénu (DEM) z hlediska směrů proudění a akumulace povrchového odtoku. Tyto nástroje se liší použitými algoritmy, požadavky na vstupní data i použitelností výstupů v extrémním reliéfu. Cílem práce bylo stanovit, zda a které tyto nástroje jsou v extrémním reliéfu použitelné a jak jejich výstupy korespondují s realitou. Jako modelový region bylo vybráno povodí Suché Bělé v Národním parku České Švýcarsko.

2. Popis modelového území

Povodí Suché Bělé je na hranicích se SRN cca 2 km SV od Hřenska. Je součástí hydrogeologického rajonu 4660 – Křída dolní Kamenice a Křinice. Je součástí povodí s číslem hydrologického pořadí 1-14-05 Kamenice a Labe pod Kamenicí. Zdrojnicí Suché Bělé je mokřina v pískovcových soutěskách v nadmořské výšce mezi 400 – 450 m n. m. Ve střední části na vzdálenosti cca 500 m tok klesá o 150 m – viz Obr. 1. V dolní části toku se

nachází dva retenční rybníky, pod nimi je tok místy zpevněn kamenným opevněním. Suchá Bělá se vlévá do Dlouhé Bělé a po cca 800 m do Kamenice. Délka toku je přibližně 3500 m. Plocha povodí po soutok se Suchou Bělou odvozená modulem r.watershed činí 253,48 ha.



Obr. 1: Podélný výškový profil toku Suché Bělé

3. Základní principy modelování povrchového odtoku z hodnot DEM

Pomocí různých algoritmů se z digitálního výškového modelu území (dále DEM) získávají parametry Flow direction (dále FD) - směr odtoku a následně Flow accumulation (dále FA) – akumulace odtoku. FD určuje způsob, směr jakým je uskutečněn odtok z buňky do další/dalších níže položených buněk a globálně tak modeluje tok materiálu terénem. Takto lze hovořit o cestě, dráze odtoku – flow path. FA potom určuje, kolik materiálu (vody) proteče každou buňkou. Čili kolik buněk je odvodňováno přes konkrétní buňku. Protože jsou buňky navzájem spojené, lze určit kumulativní množství materiálu, který projde každou buňkou. Je-li hodnota každé buňky rovna jedné, lze hovořit o upstream element map. Po vynásobení každé buňky patřičným akumulačním operátorem lze určit množství materiálu, který projde buňkou v (kvazi)reálném prostředí. V principu se FD určuje dvěma skupinami metod:

SFD – Single flow direction – každá buňka má odtok pouze do jedné sousední, níže umístěné buňky.

MFD – Multiple flow direction – odtok z buňky je umožněn do více níže položených buněk, disperzní odtok.

FD je řešen v rastru 3x3 buňky a oba principy (MFD a SFD) jsou řešeny řadou algoritmů. Nejjednodušším je SFD algoritmus D8, kdy je odtok realizován do jedné z 8 sousedních buněk s nejvyšším rozdílem výšek (∂z). Diagonální buňky jsou násobeny $\sqrt{2}$, aby byla kompenzována jejich nižší ∂z. U varianty RhoD8 je diagonálním buňkám přiřazována pseudonáhodná hodnota (s průměrem $\sqrt{2}$) , u varianty D∞ je pak odtok umožněn do jedné buňky, ale v (relativně) jakémkoliv úhlu (0-360°). U MFD je odtok pomocí různých algoritmů realizován do více buněk, zpravidla dle váhy vycházející z míry jejich ∂z vůči středové buňce. Od těchto základních principů je odvozena řada algoritmů i teoretických prací, implementovaných v různých SW (HEC, GIS GRASS, SAGA GIS, uDig, ArcInfo, MIKE-SHE, aj.). V momentě, kdy je uspokojivě realizován rastr se směry a akumulacemi odtoků, local drain direction map, je možné pro získání reálného odtoku vynásobit buňky příslušnými akumulačními operátory. Ty podle použitého SW různými postupy a za použití řady rovnic (Saint Venant, Manning, Green-Ampt, aj.) popisují a vyčíslují zbylé skupiny dat.

4. Analýza v prostředí GIS GRASS

Základním materiálem pro práci je DEM pořízený leteckým snímkováním v rámci projektu Interreg IIIA: Geoinformation Networks For The Cross-Border National Park Region Saxon-Bohemian Switzerland. Snímky byly pořízeny v režii Technické Univerzity Drážďany v roce 2005. Tento DEM se vyznačuje vysokou přesností (rozlišení 1m ve všech osách) i kvalitně provedeným postprocesingem. Z důvodů značné velikosti zdrojových dat (v řádech GB) je DEM rozdělen do několika souborů. Vhodné povodí pro modelování je třeba vytipovat tak, aby splňovalo několik hlavních požadavků: přiměřená velikost z důvodů výpočetní

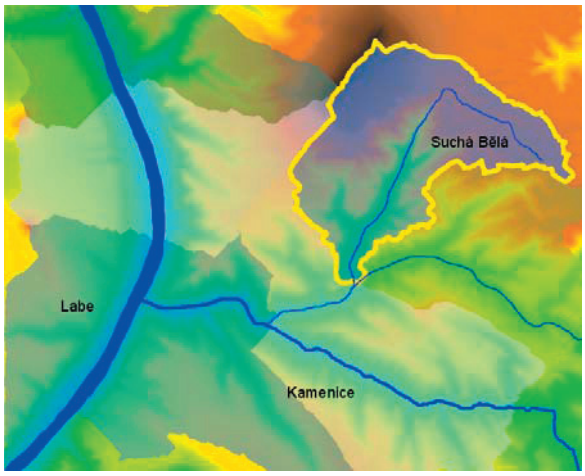
náročnosti, co nejnižší míra antropogenního ovlivnění, extrémní reliéf, DEM pro kompletní povodí. Na základě těchto požadavků byla vybrána Suchá Bělá po soutok s Dlouhou Bělou.

Dalším krokem je spojení mapových listů (souborů) daného regionu pomocí modulu r.patch. Následuje určení hranic zkoumaného povodí. V několika krocích je třeba nalézt vhodnou hodnotu parametru „threshold“ (viz dále) v modulu r.watershed a s jeho pomocí určit rozvodnice. Následně došlo k oříznutí základního DEM v modulu r.mapcalc tak, aby byl tvořen pouze povodím Suché Bělé a ostatní hodnoty byly NULL (no data). Kontrola kvality rastru byla provedena pomocí modulů r.fill.null a r.fill.dir. Zde se projevila kvalita rastru i jeho následných úprav, ale i značná extremita terénu s balvany v údolnici. Modul r.fill.dir nalezl 3803 problémových oblastí (depresí) u nichž lze vzhledem k jejich poloze a reliéfu očekávat, že odpovídají realitě. Některé deprese byly ověřeny rekognoskací in situ. Pro porovnání vypočtených rastrů drah odtoku a akumulace odtoku bylo třeba zvolit vhodný způsob podkladového rastru, odvozeného z DEM, který by vizuálně dobře vystihoval význačné morfologické prvky reliéfu (hřbetnice, údolnice, zlomy, hrany). Jako ideální se ukázalo prosté provedení parciálních derivací DEM ve směru osy x nebo y (z vizuálního hlediska rovnocenné výsledky). K tomuto účelu byl použit modul r.slope.aspect.Na takto připravených datech je možno zahájit vlastní analýzy pomocí jednotlivých modulů. Jako první se použije modul r.watershed.

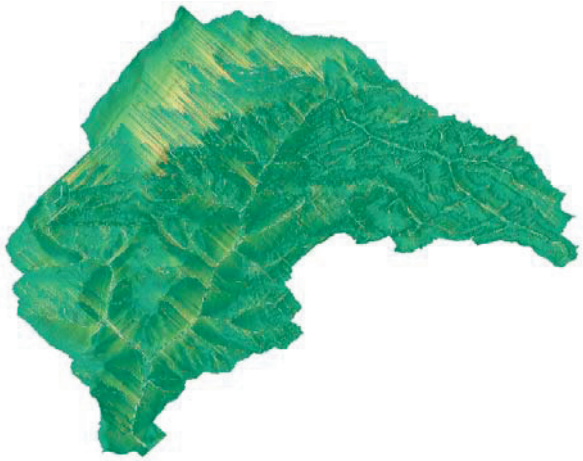
R.watershed je analytický nástroj pro vyhodnocování velkých povodí, výpočetně náročnější, než r.terraflow. Je méně citlivý na chyby v DEM. Používá obdobný algoritmus jako r.drain – jde o variantu least-cost algoritmu označovanou jako A^T (v původní formě šlo jen o hledání nejkratší cesty mezi body). Výstupem jsou hranice povodí, FD/FA v jednotlivých buňkách a faktory sklonu a délky svahu, které slouží mj. jako vstup pro erozní model RUSLE (L a S faktory). Celkový výstup rastrů pro schematizaci povodí je silně ovlivňován parametrem threshold. Ten určuje minimální velikost odvodňovaných povodí, ale projevuje se i na rastru toků (streams). Obecně lze říci, že malé hodnoty parametru threshold vedou k roztříštěnosti a fragmentizaci povodí, ale tvoří relativně spojité linie toků. Kromě morfologie území je jeho hodnota závislá i na rozlišení zkoumaného rastru. Je třeba počítat s tím, že optimální hodnotu parametru threshold je třeba najít kombinací odhadu a metody pokus-omyl pro každý zkoumaný region.

Při použití na povodí Suché Bělé se negativně projevilo použití SFD algoritmu. Došlo ke vzniku uměle působících fragmentů. V místech s malou změnou expozice či tangenciální křivosti svahu došlo ke vzniku paralelních linií – drah odtoku a následné akumulace odtoku, viz Obr. 3. Zde se projevila tendence SFD algoritmů k diskretizaci linií odtoku v plochém reliéfu. Rovněž se (byť v mnohem nižší míře než u r.flow) projevila mírně omezená schopnost překonávat deprese či plochy bez výrazného spádu.

Jako další byl použit modul r.flow. R.flow je modul s kombinovaným výstupem – vektorově jsou prezentovány dráhy odtoku, rastrově potom délky drah a hustota drah odtoku. Flow routing je v principu řešen algoritmem DInf. (D∞), jedná se tedy o SFD metody výpočtu, bez možnosti disperzního toku, nicméně nevytváří nepřirozené cik-cak linie, běžné u D8 modulů. Je navržen zejm. pro získávání hodnot pro modelování eroze. K určování sítě toků je vhodný pouze při použití kvalitních (postrádajících deprese) rastrů s vysoký rozlišením. Hodnota „flowlines downhill“ metodou dešťových kapek simuluje aktuální tok – je vhodná k určování oblastí potenciálních vodních přívalů. Použití D∞ algoritmu dávalo dobré předpoklady pro kvalitní výstupy ve složitém terénu. Bohužel toto se zcela nepotvrdilo. Modul r. flow je primárně určen pro analýzu svahů z hlediska eroze, ale bohužel má velmi přísné parametry pro ukončování linií drah odtoku. Dochází tak ke generování nereálných míst, bez odtoku. Přestože ve strmých svazích tento modul dává velmi dobré výsledky, v důsledku předčasného ukončování drah odtoku modul velmi výrazně podhodnocuje akumulaci povrchového odtoku – viz Tab. 1.



Obr. 2: Rozdělení zájmové oblasti na povodí pomocí modulu r. watershed, zobrazeno na pozadí DEM. Povodí Suché Bělé zvýrazněno. Vlevo kaňon Labe, v dolní části Kamenice.



Obr. 3: Akumulace povrchového odtoku dle modulu r.watershed na pozadí reliéfu získaného derivací DEM. V levém horním okraji patrné umělé struktury SFD algoritmu D 8.

Jako třetí byl testován modul r.terraflow. R.terraflow je navržen zejm. pro vyhodnocování velkých rastrů. Používá MFD (defaultně) i SFD (D8) algoritmy pro určování FD a následně FA. Na rovinách počítá s globálním tokem, single-cell pits jsou nejprve zaplaveny (generuje i depressionless mapu), potom je na nich aplikován globální tok. V případě analýzy Suché Bělé byla použita varianta s MFD algoritmem. Výsledné rastry FD a FA, ale i rastry vlhkostního indexu tci a rastr DEM s vyhlazenými depresemi jsou dobře použitelné. Následně bylo vybráno několik prvků z mapy FA a byly ověřeny v terénu. V místech s vysokou akumulací povrchového odtoku byly potvrzeny erozní či ronové rýhy, či eroze hrabanky – viz Obr. 4. V údolnicích, kde některé fragmenty budily dojem chyb výpočtu či chyb v původním DEM, se nalezly kamenné bloky zřícené na dno údolí.

5. Diskuze

Ukazuje se, že jednotlivé moduly mohou poskytovat velmi dobré dílčí výsledky (použitelné pro další analýzu) a zároveň v jiných oblastech analýz částečně, či zcela selhávat. Je proto nezbytné kombinovat více modulů a využívat jejich dílčích schopností k získání komplexního obrazu území. Modul r.watershed i v obtížném terénu plném zlomů velmi dobře detekuje hranice povodí a při použití kvalitního DEM je výborným nástrojem pro rychlé určování rozvodnic v terénu. Pro ověření lze využít faktu, že u modulů počítajících akumulaci povrchového odtoku musí být hodnota buněk přiléhajících k rozvodnici rovna 1. Při porovnání s rozvodnicemi používanými v rámci ČHMÚ a odvozenými pomocí GIS platformy ESRI se r.watershed v daném území ukázal jako přesnější. Otázkou zůstává, nakolik je toto dáno použitým algoritmem a nakolik vysokou kvalitou rastru DEM, se kterým pracoval. Naopak v oblasti určování směrů a akumulace povrchového odtoku modul díky svému SFD D8 algoritmu v obtížném terénu nedává zcela dobré výsledky. Modul r.flow dává výborné výsledky na nepřerušených prudkých svazích. V místech zpomalení toku, ale i na hřbetnicích, dochází k ukončování flow lines a modul počítá akumulaci povrchového odtoku „od začátku“. Tento fakt je zjevný i z tabulky č. 1, kde jsou zřejmé podstatně nižší hodnoty maxima, aritmetického průměru a kumulativního součtu hodnot povrchové akumulace ve srovnání s moduly r.terraflow a r.watershed. Nejlepší výsledky v modelování FD i FA v extrémním reliéfu dává modul r.terraflow. Dráhy odtoku nejsou náchylné na přerušení a postrádají „umělý“ vzhled generovaný SFD algoritmy. Při ověřování míst, kde modul generuje vysokou akumulaci povrchového odtoku, lze v terénu skutečně nalézt stopy, že k ní dochází – viz Obr. 4. Modul si poradí i lesními cestami, popř. umožňuje vložit mapu bariér odtoku.

Tab. 1: Základní statistiky hodnot akumulace povrchového odtoku pro jednotlivé moduly; celkový počet buněk 2534825

Název modulu	Minimum	Maximum	Aritmetický průměr	Kumulativní součet hodnot
r.flow	0	116690	115,69	293230155
r.watershed	1	2473320	1456,00	3691995602
r.terraflow	1	2476290	1750,69	4437680870

6. Závěr

Z výše uvedených analýz vyplývá několik zajímavých faktů, týkajících se obecně modelování povrchového odtoku v extrémním reliéfu i jednotlivých algoritmů. Zcela fundamentálním problémem je existence dostatečně kvalitního rastru. Kvalitu lze zejména chápat ve smyslu vysokého rozlišení, absence depresí, vzniklých při tvorbě rastru a nepřerušených údolnic. Zásadní je zejména přesnost ve vertikálním směru. Z tohoto důvodu je např. běžně používaný DEM v DMU25 prakticky nepoužitelný. Kvalitní mapa FD a FA může být po získání dalších údajů o území (land cover, infiltrační schopnosti půd, drsnost reliéfu...) dále precizována za pomocí mapové algebry či specializovaných SW nástrojů. V prostředí GIS GRASS by se jednalo zejména o moduly r.sim.water a r.topmodel. Obecný postup pro modelování FA a FD povodí v extrémním reliéfu lze shrnout do série kroků (v závorkách moduly GIS GRASS pro uvedené činnosti):

1) Získání kvalitního rastru, vč. spojení, oříznutí, zaplnění neexistujících depresí a kontrola v terénu (r.patch, r.watershed, r.mapcalc, r.fill.dir, r.fill.null).
2) Vizuální zvýraznění význačných terénních prvků. Stačí derivace DEM v osách x či y (r.color, a r.slope.aspect).
3) Vlastní analýza FA a FD a porovnání s vhodně upraveným rastrem DEM (r.terraflow, r.watershed, r.flow, popřípadě spolu s dalšími vstupy i moduly r.sim.water, r.topmodel)
4) Základní vyhodnocení hodnot FA (r.univar, r.stat atd.)
5) Ověření modelovaných hodnot v terénu.

V extrémním reliéfu se projevila převaha MFD algoritmů. Dalším důležitým parametrem je schopnost algoritmu překonávat místa s minimálním či žádným spádem a udržet tak linie toku (flow path). Velmi dobré výsledky lze očekávat i u aplikace D∞ MFD algoritmu. Závěrem je třeba zmínit slibně se vyvíjející projekt SAGA GIS (Univerzita v Göttingenu a Hamburgu), který disponuje celou řadou variant výše zmíněných algoritmů (např. Braunschweiger Reliefmodell, Kinematic Routing Algorythm, Digital Elevation Model Network - DEMON).

Literatura

[1] HRÁDEK, F. – KUŘÍK, P., 2004. Hydrologie, Fakulta lesnická a enviromentální, Česká zemědělská univerzita v Praze.

[2] JUŘÍKOVSKÁ, L.,2005. Modelování hydrologických a hydrogeologických procesů v systému Grass GIS, VŠB Ostrava.

[3] KONEČNÝ, D., 2006. Srovnání SFD/MFD algoritmů a jejich využití při modelování geomorfologických procesů, Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci.

[4] LANGHAMMER, J., et al., 2007. Změny v krajině a povodňové riziko“. Sborník semináře “Povodně a změny v krajině”. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Praha.

[5] MITASOVA, H.,1999. Multiscale simulation od landuse impact on soil erosion and deposition patterns. Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organisation Meeting. Purdue University.



Obr. 4: Místo se zvýšenou akumulací povrchového odtoku (r.terraflow) - ověření v terénu. Patrná erozní rýha

[6] MITASOVA, H., et al., 2005. Path sampling metod for modeling overland waterflow, sediment, transport, and short term terrain evolution in Open Source GIS , Department of Marine, Earth and Atmospheric Sciences, North Carolina State University. http://skagit.meas.ncsu.edu

[7] NETELER, M. – MITASOVA, H., 2008. Open Source GIS; A Grass GIS Approach – Third Edition“. Springer Science.

[8] PACINA, J., Prostorové analýzy nad oblastí Šumavských jezer. Západočeská univerzita, Plzeň.

[9] THAXTON, C. – MITASOVA, H., 2004. Simulations of Disturbed Watershed, Erosion, Deposition and Terrain Evolution Using Path Sampling Monte Carlo Method. Sborník Proceedings ASAE/CSAE, Meeting 2004, Ottawa.

[10] Manuálové stránky GIS Grass verzí 6.3 a 6.4 <http:/www.grass.itc.it/gdp/manuals.php>

Kontakty na autora

1 Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie, e-mail: farek@chmi.cz

NOVÁ GENERACE METODOLOGIE GLUE (ODHADU NEJISTOT NA ZÁKLADĚ GENERALIZOVANÉ VĚROHODNOSTI)

Šárka D. Blažková[1], Keith J. Beven[2]

Abstrakt

Příspěvek se zabývá predikcemi průtoků a případně dalších hydrologických veličin s odhadem nejistot pro případ, že existují (alespoň nějaká) data, v úvodu je však uveden postup výběru metody predikcí a odhadu nejistot i pro jiné hydrologické úlohy (předpověď v reálném čase, předpovědi na povodích bez pozorování).

V řadě článků o práci s nejistotami v environmentálním modelování byla již použita nová generace metodologie GLUE (Generalised Likelihood Uncertainty Estimation). V této verzi jsou limity pro přijatelné simulace stanoveny předem, tj. před začátkem modelování. Může se stát, že žádná simulace nebude splňovat tyto podmínky, popř. vyhovujících simulací je tak málo, že z nich není možno sestrojit predikční meze. Potom existuje několik cest, jak postupovat při takové úloze, od zařazení dalších procesů do simulačního modelu, až po zmírnění našich požadavků na shodu modelu s měřenými daty. Jestliže se rozhodneme pro tuto cestu, můžeme z výhodou použít tzv. Pareto optimalizaci, kde všechna kriteria jsou normalizována a mohou být současně zmírňována ve stejné míře.

Klíčová slova: nejistoty, GLUE, hydrologické predikce, Pareto optimalizace

1. Úvod

V evropské a světové odborné hydrologické literatuře se v současné době vedou spory o výběr metody odhadu nejistot. V rámci projektu Risk and Uncertainty (viz informaci ve formě Wiki stránek), kterého se účastní konsorcium výzkumných a aplikačních hydrologických pracovišť ve Velké Británii (UK Flood Risk Management Research Consortium), byl sestaven postup rozhodování o vhodné metodě predikcí s odhadem nejistot v závislosti na typu úlohy, důležitosti zamýšleného projektu a množství dat (včetně jejich neexistence). V úvodu internetové stránky projektu [1] je tento postup přehledně znázorněn v blokovém schématu (Obr.1), přičemž jak celý úvod, tak schéma odkazuje na vysvětlení postupů a termínů a na další prameny.

Toto schéma je rovněž využito v první kapitole nové knihy prof. Bevena Environmental Modelling: An Uncertain Future [2] nedávno vydané v nakladatelství Routledge. V knize je velký prostor věnován přístupům k důležitým rozhodnutím (typu bezpečnosti přehrad nebo úložišť radioaktivních odpadů), jak ze strany výzkumníků, tak ze strany rozhodovatelů (decision-makerů). Beven konstatuje, že environmentální modeláři nebyli zatím příliš dobří v odhadu nejistot svých predikcí a rozhodovatelé moc nevěděli, co si počít s vědeckými nejistotami, pokud je modeláři předložili. Beven považuje představu, že rozhodovatelé nechtějí slyšet o vědeckých nejistotách, za mýtus a je toho názoru, že oni pouze chtějí dostat nejlepší možný vědecký odhad jako základ pro své rozhodnutí. Poskytovat takové podklady je jistě naší povinností (povinností výzkumníků). Myslím, že obě strany cítí, že je tu řada nedorozumění (jak již zmíněné rozdílné názory mezi samotnými výzkumníky), tak mezi výzkumníky a rozhodovateli, tak v komunikaci s dalšími partnery – žádné závažné rozhodnutí nezávisí pouze na výsledcích výzkumu.

Doména rozhodovatelů – analýza rizik, je, jak známo, také předmětem vědeckého bádání. Obtížné případy těžko kvantifikovatelných gnoseologických (epistémických, Knightovských) nejistot jsou v Bevenově knize také zmíněny s odvoláním zejména na knihu Ben-Heima [3].

2. Typy (zdroje) chyb

Aby si čtenář uvědomil, v čem vlastně problém výzkumníka při odhadu nejistot spočívá, je nutno dokreslit situaci presentací zdrojů chyb a nejistot v procesu modelování (e.g. [4]). V libovolném bodě v prostoru nebo čase (x,t) je

$$O(x,t) + \varepsilon_O(x,t) + \varepsilon_C(\Delta x,\Delta t,x,t) = M(\theta,\varepsilon_\theta,I,\varepsilon_I,x,t) + \varepsilon_M(\theta,\varepsilon_\theta,I,\varepsilon_I,x,t) + \varepsilon_r \quad (1)$$

kde O je a vektor pozorování, M je vektor modelovaných hodnot, θ je vektor parametrů modelu, I je vektor vstupů a okrajových podmínek, ε_O je chyba pozorování, $\varepsilon_C(\Delta x,\Delta t,x,t)$ je chyba z nesouměřitelnosti pozorovaných proměnných ve vztahu k modelovaným proměnným závislá na časových a prostorových měřítcích ($\Delta x,\Delta t$), ε_θ je matice chyb v parametrech, ε_I je matice chyb ve vstupech a okrajových podmínkách, $\varepsilon_M(\theta,\varepsilon_\theta,I,\varepsilon_I,x,t)$ je chyba modelu, ε_r je náhodná chyba.

Při praktické aplikaci jediné, co je k disposici, jsou residua:

$$\varepsilon(x,t) = O(x,t) - M(\theta, \varepsilon_\theta, I, \varepsilon_I, x, t) \quad (2)$$

Z (1) a (2) vyplývá, že residua ε(x,t) mohou být vyjádřena jako

$$\varepsilon(x,t) = \varepsilon_M(\theta,\varepsilon_\theta,I,\varepsilon_I,x,t) - \varepsilon_C(\Delta x,\Delta t,x,t) - \varepsilon_O(x,t) + \varepsilon_r \quad (3)$$

Je nepravděpodobné, že první tři členy na pravé straně rovnice (3) by byly svou podstatou náhodné. Budou zahrnovat různé gnoseologické chyby. Je zřejmé, že tyto různé členy na pravé straně nemohou být desagregovány z jediné pozorované řady residuí ε(x,t), neučiníme-li velmi silné předpoklady (např. předpoklad aditivity a Gaussovského rozdělení).

3. Metoda GLUE

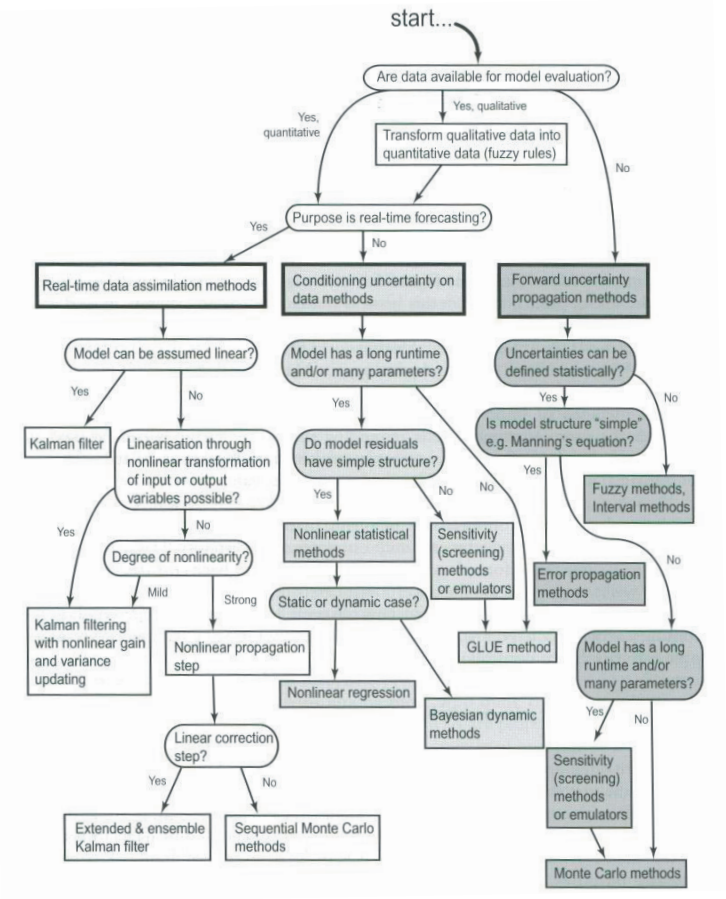
Metoda odhadu nejistot na základě generalizované věrohodnosti (např. [5], [6]) je, jak je zřejmé z Obr.1, vhodná pro případy, kdy výše zmíněné silné předpoklady o chybách při modelování neplatí, naším cílem je poznání fungování hydrologických procesů (základní výzkum) nebo se jedná o projekt pro praxi s případnými dalekosáhlými důsledky a kdy je k disposici výpočetní technika, která tento přístup umožňuje (tj. např. paralelní systém PC VÚV TGM nebo University v Lancasteru s desítkami procesorů).

Parametry modelu jsou vzorkovány z fyzikálně rozumných rozmezí, nepředpokládá se existence jediného optima každého parametru, důležitá je sada parametrů jako celek. Prozkoumává se tedy co nejpodrobněji (v závislosti na možnostech výpočetní techniky) parametrický prostor – hledají se pokud možno všechny simulace, které jsou v rozumné shodě s pozorovanými daty (v Obr.1 termín *conditioning uncertainty on data*). Neshodující se simulace jsou odmítnuty – dále se s nimi nepracuje. V současné době úlohy GLUE ve vědecké hydrologické literatuře mají tisíce až milióny simulací.

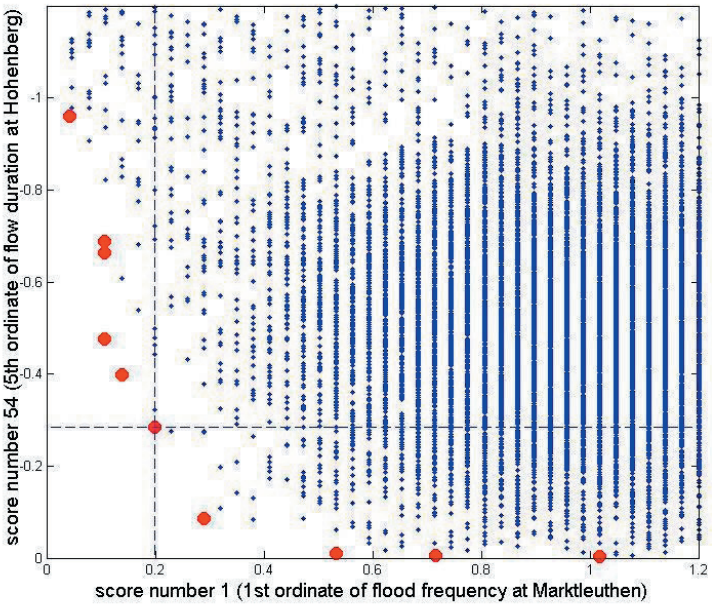
V nové generaci metodologie GLUE [7] jsou limity pro přijatelné simulace stanoveny předem, tj. před začátkem modelování. Za vyhovující simulace považujeme takové, které jsou v rámci mezí chyby pozorování. V případě průtoků jsme pracovali s chybou stanovení konsumpční křivky [8] v několika profilech, s chybou stanovení maximální roční vodní hodnoty sněhu a s odhadem chyb výskytu ročního maxima průtoků v určité sezóně. Celkem jsme pracovali se 114 kriterii (sledovali jsme zvlášť horní a dolní meze jednotlivých kvantilů čáry překročení maximálních průtoků a čar trvání průtoků). Vyhovujících simulací bylo tak málo (39), že z nich nebylo možno sestrojit predikční meze.

V takovém případě existuje několik cest, jak postupovat od zařazení dalších procesů do simulačního modelu (to jsme činili několikrát), přes hustší vzorkování parametrického prostoru (tato cesta již byla rovněž použita), přes definování a použití modelu chyb (error model – což v tomto případě jsme nepovažovali za schůdné vzhledem ke složitosti úlohy) až po zmírnění našich požadavků na shodu modelu s měřenými daty. Tato cesta byla použita ve spojení s optimalizací typu Pareto, kde všechna kriteria jsou normalizována a mohou být

současně zmírňována ve stejné míře (Obr. 2). Nakonec jsme pracovali s 4192 simulacemi, z nichž byly vypočteny predikční meze.



Obr.1: Blokové schéma (decision tree) výběru metody odhadu nejistot.
Podle http://www.floodrisknet.org.uk/methods/Introduction; převzato z publikace [2]



Obr. 2: Zjednodušený případ Pareto fronty konstruované ze dvou kriterií, která jsou v rozporu. Tečky jsou jednotlivé simulace, velké kroužky jsou simulace ležící na Pareto frontě. Dřívější verse obrázku z článku [8]

4. Závěr

Nová verze metody GLUE byla použita v rámci základního výzkumu postupu pro důležité případy odvození povodní dlouhé doby opakování (1000 nebo 10 tisíc let na důležitých vodních dílech). Délka simulací v článku [8] byla 10 tisíc let, což považujeme za vyhovující pro dobu opakování 1000 let. V současné době ve výzkumu pokračujeme modelováním řad o délce 100 tisíc let a vývojem metody výběru návrhových hydrogramů z dlouhých simulací.

Poděkování

Výzkum byl podpořen z projektu Labe V (SP/2e7/229/07) a z předcházejících grantů MŽP.

Literatura

[1] Floodrisknet, 2008. http://www.floodrisknet.org.uk/methods/Introduction

[2] BEVEN, K. J., 2009. Environmental Modelling: An Uncertain Future?, Routledge: London.

[3] BEN-HAIM, Y., 2006. Info-Gap Decision Theory. 2nd Edition, Academic Press: Amsterdam.

[4] BEVEN, K. J., 2005. On the concept of model structural error. Water Science & Technology, 52, pp165–175.

[5] BEVEN, K. J. – BINLEY, A. M., 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction, Hydrol. Process., 6: pp 279–298.

[6] BEVEN, K. J., 1993. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling, Adv. Water Resource :16, pp 41–51.

[7] BEVEN, K. J., 2006. A manifesto for the equifinality thesis. J. Hydrology, 320, pp 18–36.

[8] BLAZKOVA, S. –BEVEN, K., 2009. A limits of acceptability approach to model evaluation and uncertainty estimation in flood frequency estimation by continuous simulation: Skalka catchment, Czech Republic, Water Resour. Res., 45, W00B16, doi: 10.1029/2007WR006726

Kontakty na autora

1 Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka v.v.i., e-mail: sarka_blazkova@vuv.cz

2 The Lancaster Environment Centre, Lancaster University, Uppsala University, e-mail: k.beven@lancaster.ac.uk

SEKCE 5

HYDROLOGICKÉ PŘEDPOVĚDI A VÝSTRAHY

VÝVOJOVÉ TRENDY A NÁSTROJE V OPERATIVNÍ HYDROLOGII

Jan Daňhelka[1], Radek Čekal[1]

Abstrakt

Dle vodního zákona předpovědní povodňovou službu v ČR zabezpečuje ČHMÚ ve spolupráci se správci povodí. Pro zabezpečení předpovědní povodňové služby je nezbytná úzká spolupráce meteorologů, hydrologů a vodohospodářů a rozvoj předpovědních metod a nástrojů. Příspěvek rekapituluje vývoj metod, postupů a nástrojů (hydrologické modely, zpracování dat aj.) v posledním období a jeho cílem je přinést komplexní přehled o současném stavu předpovědní služby v ČR.

Příspěvek dále popisuje současný stav automatizace sítí a operativní dostupnosti dat. Dále jsou představeny používané předpovědní systémy AquaLog (pro povodí Labe) a HYDROG (povodí Moravy a Odry). Jsou rovněž prezentovány nástroje ve stádiu vývoje, nebo zkušebního provozu (predikce přívalových povodní, pravděpodobnostní předpovědi, vyhodnocování sněhových zásob aj.).

Na závěr jsou krátce diskutovány formy a způsoby distribuce výstupů předpovědní povodňové služby, její legislativní rámec a také využití předpovědí při zvládání povodní.

Klíčová slova: povodně, operativní hydrologie, předpovědi, hydrologické modely

1. Úvod

V České republice se vyskytují různé typy povodní, což přináší rozdílné nároky na předpovědní nástroje a postupy v hydroprognózní službě. Přívalové povodně, které se v ČR ve velkém množství vyskytly v červnu a červenci 2009, jsou specifické svým velmi rychlým vývojem a velmi nízkou prediktabilitou příčinných konvektivních srážek, kde je problémem nejen předpověď jejich intenzity, ale i časového a především prostorového výskytu. Přitom právě přesné místo výskytu extrémních srážek může rozhodovat o tom, zda přívalová povodeň vůbec vznikne. Od uživatelů předpovědí pak často zaznívá požadavek na konkrétní cílení výstrah před vznikem přívalové povodně pouze do postižených povodní.

Povodně z tání sněhu pak naráží na problém vyhodnocení množství sněhu a jeho vlastností, které ovlivňují intenzitu tání při oblevě. Rozdílné podmínky v období tání, zejména výskyt dešťových srážek, intenzita přímého slunečního záření aj., ovlivňují intenzitu tání, která se může mezi jednotlivými roky velmi výrazně lišit.

Praxe pak klade na hydroprognózní službu zejména požadavky na včasnost a přesnost předpovědí. Důležitým aspektem je vnímání výstupů předpovědí jako celkového produktu bez rozlišování jednotlivých zdrojů nejistoty celkové předpovědi a různých typů povodní.

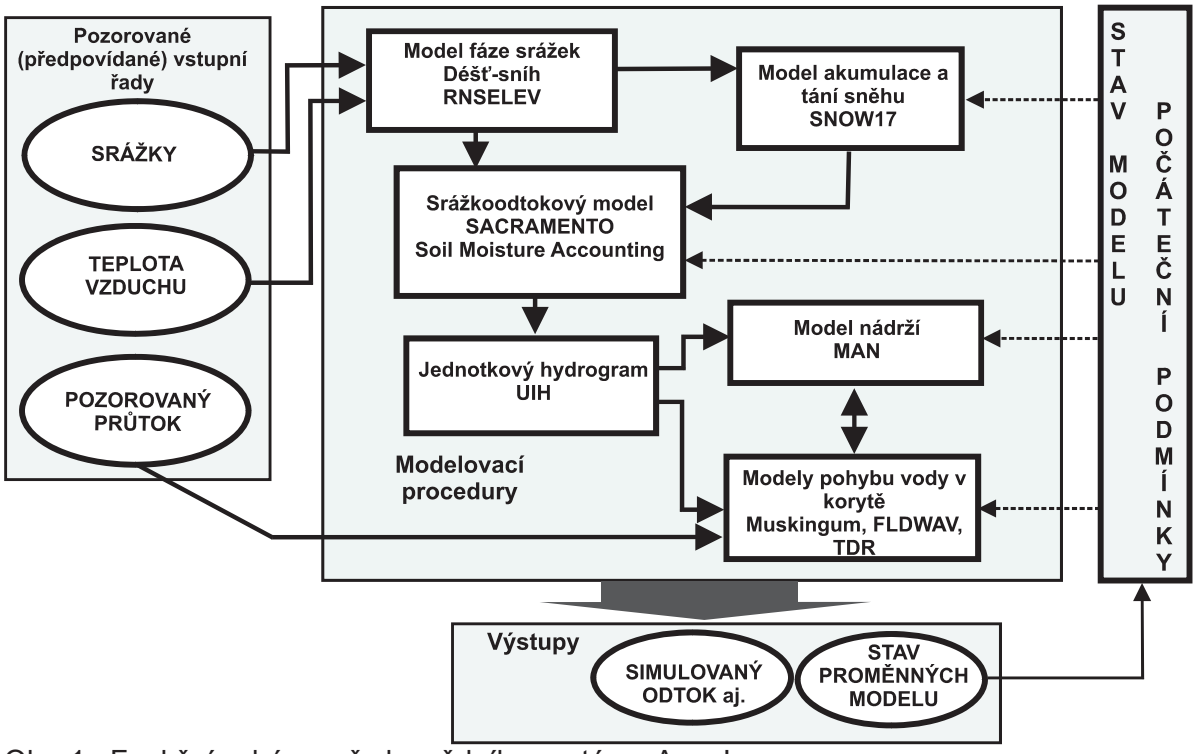
2. Současný stav předpovědní povodňové služby ČHMÚ

Předpovědní povodňová služba ČHMÚ je komplexní systém nástrojů a postupů poskytujících informace pro povodňové orgány a další účastníky systému ochrany před povodněmi v ČR i pro širokou veřejnost. Popsání celého jejího systému není v rámci jednoho systému možné, v následujícím textu jsou proto uvedeny jen její vybrané části a aktivity.

Významnou aktivitou ČHMÚ je podíl na zabezpečení hlásné povodňové služby, kdy provozuje síť automatických vodoměrných stanic (v současnosti je v provozu 318 stanic, jejichž údaje jsou k dispozici na internetových stránkách https://hydro.chmi.cz). Při provozu automatických stanic ČHMÚ úzce spolupracuje se státními podniky Povodí a také s některými obcemi. Dalším příspěvkem ČHMÚ k hlásné povodňové službě je provoz srážkoměrů a meteorologických radarů aj. ČHMÚ rovněž vede evidenci hlásných profilů kategorie A a B na uvedených internetových stránkách.

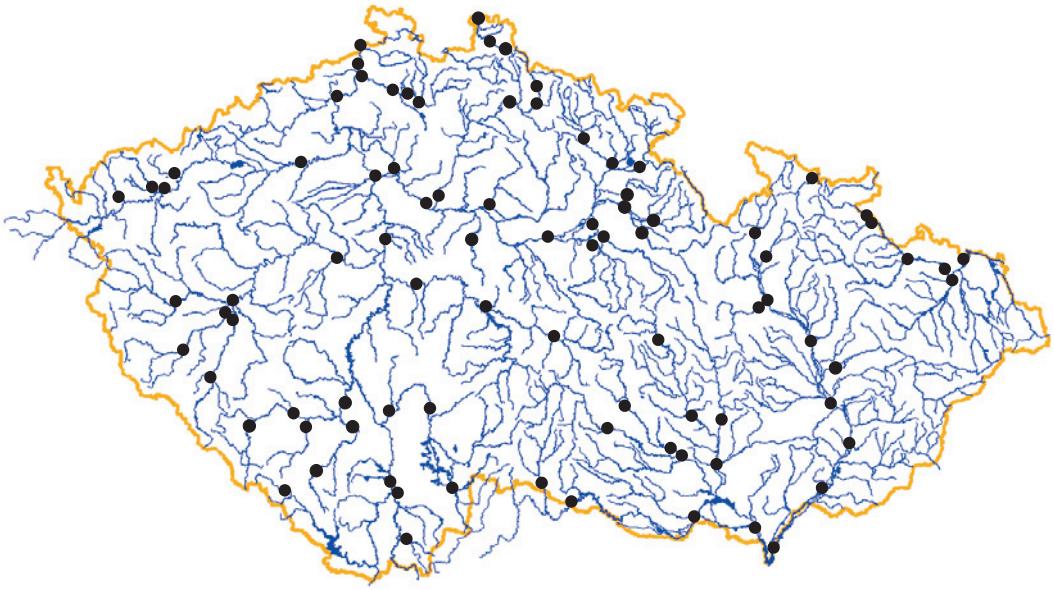
Hydrologické předpovědní modely jsou v ČR rozvíjeny zejména od povodní v roce 1997. Na povodí Labe byl implementován předpovědní systém AquaLog, který je inspirován americkým NWSRFS (NWS, 2010) a využívá sněhový model SNOW17 a srážkoodtokový model SAC-SMA (Obr. 1). Na povodích Odry a Moravy je provozován systém HYDROG vyvinutý v ČR. Předpovědními systémy je aktuálně pokryta naprostá většina území ČR (výjimkou jsou například povodí Bíliny, Lužické Nisy a malých hraničních toků), přitom výstupy jsou pro hydrologickou službu k dispozici v přibližně 200 profilech, z nichž 89 jich je volně zobrazováno na internetových stránkách http://hydro.chmi.cz (Obr. 2). Modely jsou provozovány v hodinovém kroku s předstihem 48 hodin. Výpočet je prováděn jednou denně ráno, v případě povodní se frekvence zpracování předpovědí zvyšuje dle aktuálních potřeb. Podrobněji o provozu a stavu implementace předpovědních modelů pojednává Daňhelka (2007).

V nedávné době došlo k významné úpravě systému zpracování vstupních dat (AquaBase, SOMDATA), která směřovala zejména k automatizaci načítání dat a ke změně charakteru vstupů z bodových hodnot (respektive Thiessenových polygonů) k plně distribuovaným vstupům odvozovaným variabilními interpolačními metodami (IDW, krigging, co-krigging) s možností zohlednění vlivu nadmořské výšky, nebo interaktivní práci s gridovým polem vstupujících meteorologických prvků (Vlasák a kol. 2009).



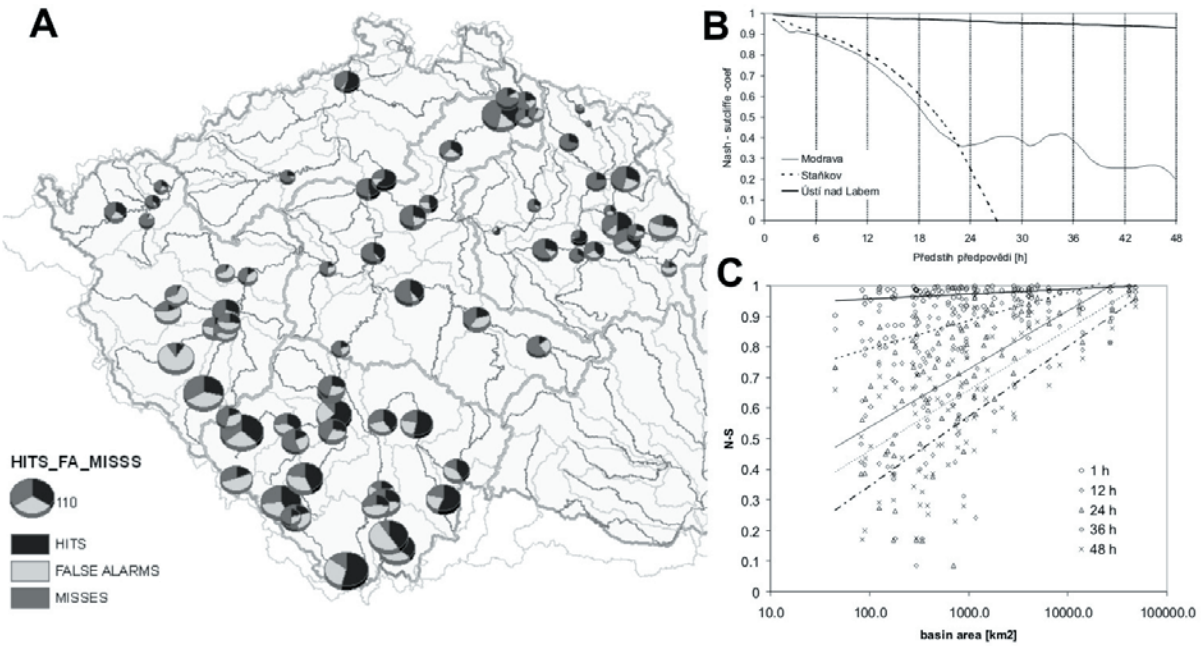
Obr. 1: Funkční schéma předpovědního systému AquaLog.

Významným nástrojem pro další rozvoj a zlepšování předpovědních nástrojů je *vyhodnocení předpovědí.* To je součástí vyhodnocení všech povodňových událostí, kdy je podrobně hodnocen vliv jednotlivých faktorů, jako je zejména vstupující předpověď srážek a teploty vzduchu, či manipulace na vodních dílech, na celkovou úspěšnost předpovědi. Z pohledu uživatelů je však důležitý komplexní pohled na schopnost modelu vystihnout riziko vzniku povodně v reálném čase. Proto bylo provedeno dlouhodobé (2000 až 2009) vyhodnocení úspěšnosti předpovědí modelů v situacích překročení úrovní stupňů povodňové aktivity (SPA) a to pomocí kritérií hit rate, miss rate, false alarm ratio, průměrné chyby kulminace a objemu povodně a hodnoty Nash-Sutcliffe v závislosti na délce předstihu předpovědi. Metodika i výsledky jsou podrobněji prezentovány zejména v práci Vlasáka a Daňhelky (2010).



Obr. 2: Mapa předpovědních profilů uveřejňovaných na internetových stránkách ČHMÚ.

Závěry vyhodnocení prokázaly, že existují rozdíly v poměru kategorií hit – miss a false alarm v prostoru v závislosti na příslušné pobočce ČHMÚ sestavující předpovědi (Obr. 3A), což lze pravděpodobně z velké části přičíst interaktivnímu provozu modelu, kdy zvolená předpovědní strategie (například akceptace vyššího množství falešných alarmů s cílem minimalizace nepředpovězených událostí, tedy kategorie miss) může podvědomě směřovat prognostika k nadhodnocování či podhodnocování. Dalším závěrem je výrazná rozdílnost intenzity poklesu hodnoty Nash-Sutcliffe kritéria s dobou předstihu, která je velmi rychlá u malých zdrojových povodí a naopak jen velmi pozvolná u větších toků, což dobře dokumentuje zásadní vliv přesnosti QPF a zároveň stanovuje časovou mez smysluplné prediktability pro jednotlivá povodí (Obr. 3B).



Obr. 3: Poměr vyhodnocených Hit-Miss-False Alarm rate v povodí Labe (A), graf poklesu hodnoty Nash-Sutcliffe v závislosti na předstihu předpovědi pro vybraná povodí (B) a závislost hodnoty Nash-Sutcliffe na velikosti povodí (C) pro případy překročení úrovně 1. SPA.

Vyhodnocování sněhových zásob zejména v období před jarním táním je nezbytná pro účely řízení vodních nádrží, ale i pro vlastní předpovědi hydrologickými modely, které vyžadují znalost přesného počátečního stavu sněhové pokrývky. Data o vodní hodnotě sněhu jsou pravidelně v zimním období měřena v pondělí ráno v síti cca 300 měrných profilů (profesionální stanice i dobrovolní pozorovatelé), z nichž jsou data operativně zasílána na předpovědní pracoviště ČHMÚ. Od roku 2008 jsou pak data nově zpracovávána v prostředí GIS. Tento přístup umožňuje získat plošně spojitý odhad výšky sněhové pokrývky a její vodní hodnoty. Při interpolaci je použita orograficky podmíněná interpolace s doplněním virtuálních stanic v pravidelném gridu, zejména pro přesnější určení hranice sněhové pokrývky. Ta je dosud odhadována na základě nadmořské výšky, avšak probíhá výzkum možnosti využití analýzy družicových dat pro přesnou identifikaci ploch pokrytých sněhem (více odkazujeme na příspěvek Čekala a Schnebergerové v tomto sborníku).

3. Vývoj nových nástrojů a postupů

Zkušenosti z povodní i každodenního provozu modelu prokázaly nezbytnost vývoje nových předpovědních nástrojů. Za tímto účelem ČHMÚ řeší grant SP/1c4/16/07. Jeho cílem je zejména vyvinutí systému pravděpodobnostních hydrologických předpovědí a vývoj nástroje pro indikaci míry rizika vzniku přívalových povodní v ČR.

Krátkodobá *pravděpodobnostní hydrologická předpověď* je v podmínkách střední Evropy obecně dobře zpracovatelná na základě variantních vstupů kvantitativní předpovědi srážek (QPF), tedy na základě meteorologického ansámblu. Aktuálně ČHMÚ pracuje na vytvoření interface mezi výstupy systému ALADIN-LAEF (16 členů ansámblu) a používanými hydrologickými modely.

Z hlediska střednědobé a dlouhodobé predikce odtoku jsou hydrologické simulace většinou založeny na ansámblu historických realizací průběhu meteorologických prvků v dané části roku (viz například systém ESP provozovaný NWS v USA). V rámci zmiňovaného projektu byl navržen postup statistické analýzy historických klimatických řad, na jejímž podkladě je vygenerována syntetická 1000letá řada teploty vzduchu a srážek (respektive jsou generovány různé řady reprezentující teplotně a srážkově nad-, pod-, normální podmínky). Poté je na základě dostupných měsíčních předpovědí ECMWF, pro něž byla ověřena dostatečná schopnost vystihnout budoucí měsíční srážkové úhrny ve smyslu příslušnosti k jednotlivým třetinám pravděpodobnostního rozložení, učiněn podmíněný výběr 20 až 50 let, které jsou dále v simulacích použity jako členy ansámblu. Pro podrobnější popis metodiky zájemce odkazujeme na zprávy o řešení grantového projektu (ČHMÚ, 2007, ČHMÚ 2008, ČHMÚ 2009), kde je mimo jiné řešena i problematika časoprostorové distribuce vstupujících meteorologických prvků a otázka způsobu prezentace pravděpodobnostních předpovědí.

Predikce přívalových povodní s dostatečnou prostorovou přesností a s dostatečným časovým předstihem není současnými prostředky možná tak, aby bylo možné výsledky účelně distribuovat do ohrožených oblastí, kde v podmínkách střední Evropy přívalová povodeň vzniká již v desítkách minut po příčinné srážce. Přesto je možné indikovat potenciál jednotlivých povodí k tvorbě rychlého povrchového odtoku a tedy k nebezpečí vzniku přívalové povodně, a to na základě fyzickogeografických charakteristik povodí a jeho aktuální nasycenosti,která je velmi významným faktorem i v případě přívalových povodní (Daňhelka a Kubát 2009). Na základě inspirace americkým systémem Flash Flood Guidance je v ČHMÚ od roku 2008 vyvíjena aplikace FFG-CZ, která na základě vyhodnocení CN hodnot a jejich operativního updatingu na základě předchozích srážek identifikuje pro malá povodí (respektive grid 3 km) intenzitu srážek při níž by došlo k intenzivnímu odtoku s dosažení alespoň 0,4 násobku teoretické hodnoty Q_{100}.

Další součástí systému je pak operativní vstup radarových odhadů srážek a odhad konkrétní odtokové odezvy na základě schematizace modelem HEC-HMS. Systém je od května 2010 nasazen ve zkušebním provozu. Pro podrobnější popis systému odkazujeme opět na zprávy

o řešení projektu SP/1c4/16/07 (zejména ČHMÚ 2009) a na příspěvek Šercla a kol. v tomto sborníku.

4. Předpovědní služba ČHMÚ v systému ochrany před povodněmi

Předpovědní pracoviště ČHMÚ se skládají vždy z meteorologické a hydrologické části, což zabezpečuje velmi úzkou a nepřetržitou spolupráci meteorologů a hydrologů na přípravě informací v rámci předpovědní povodňové služby. To je ještě podpořeno používáním jednotného systému vydávání výstrah na meteorologické a hydrologické jevy (systém SIVS), kdy jsou meteorology a hydrology vydávány společné informace (výstrahy).

Předpovědní pracoviště ČHMÚ velmi úzce spolupracují zejména s dispečinky státních podniků Povodí, které pro své potřeby řízení vodních nádrží provozují vlastní srážkoodtokové modely. Kromě již zmiňované široké výměny hydrologických a meteorologických dat, poskytuje ČHMÚ podnikům Povodí také meteorologické předpovědi a vzájemně jsou vyměňovány výsledky hydrologických modelů, případně jsou připravovány jednotné předpovědní výstupy pro informování povodňových orgánů.

Nově se v průběhu povodní osvědčila I přímá komunikace s operačními středisky Hasičského záchranného sboru a s krizovými štáby krajů, které se odehrává prostřednictvím videokonferencí.

Zkušenosti z povodní 2009 ukázaly na problémy stávajícího metodického pokynu MŽP (15/2005) pro zabezpečení hlásné a předpovědní povodňové služby a to zejména v zabezpečení hlásné služby povodňovými orgány a předávání informace po toku, ale také v oblasti účelnosti a systému vydávání a distribuce výstrah zejména s ohledem na přívalové povodně, kdy krátký časový průběh neumožňuje včas a cíleně doručit výstrahu do postižené oblasti. Za tímto účelem bude nezbytná úprava metodického pokynu a ČHMÚ již realizoval některé kroky pro rychlejší a adresnější výstražnou službu. Jde zejména o zkrácení intervalu detekce intenzivních srážek a překročení limitů jejich úhrnů na základě meteorologických radarů a srážkoměrných stanic a s přímým zahrnutím nowcastingových produktů do vyhodnocování. Druhým krokem pak byla změna rozlišení při lokalizaci výstrahy z měřítka krajů na úroveň okresů.

Pro dokreslení celkového obrazu činností předpovědní služby ČHMÚ je nezbytné zmínit i některé významné činnosti v rámci *mezinárodní spolupráce*. ČHMÚ je aktivně zapojen v systému Meteoalarm, který by v nejbližší době měl být rozšířen i na výstrahy před povodňovými jevy. ČHMÚ dále spolupracuje s JRC v Ispře na provozu systému evropského systému včasného varování před povodněmi EFAS, pro nějž dodává přímo hydrometeorologická data a spolupracuje poskytováním uživatelské expertizy.

Z příkladů bilaterální spolupráce je nezbytné připomenout jednotný předpovědní systém pro povodí Labe provozovaný ČHMÚ a německými kolegy, kdy data a předpovědi zpracované pro tok Labe modely na území ČR automaticky vstupují do navazujícího německého modelu povodí Labe. V uplynulých letech se přitom podařilo založit přímou komunikaci mezi předpovědními pracovišti ČHMÚ v Praze a LUfG v Drážďanech v době povodní poskytující z české strany ústní komentář a konzultace k aktuálnímu vývoji (včetně odhadu funkce Vltavské kaskády) a vydané předpovědi a její nejistotě.

V povodí Dunaje je rozvíjena trilaterální spolupráce na vybudování jednotného předpovědního systému (HYDROG) pro dolní Moravu a Dyji ve spolupráci ČHMÚ, SHMÚ a spolkového úřadu Dolního Rakouska. ČHMÚ dále rakouským kolegům poskytuje i vydané předpovědi systémem HYDROG pro profily v rakouské části povodí Dyje.

Předávání předpovědí probíhá i v povodí Odry mezi ČHMÚ a IMGW.

5. Závěr

Předpovědní služba ČHMÚ prochází kontinuálním vývojem směrem k dokonalejším předpovědním nástrojům. Aktuálně jsou již dlouhodobě provozovány předpovědní systémy a výsledky vyhodnocení jejich výstupů potvrzují jejich přínos v protipovodňové ochraně. Další probíhající vývoj pak směřuje k pravděpodobnostním předpovědím odtoku v krátkodobém i střednědobém horizontu, širšímu uplatnění metod GIS při zpracování dat a také k vytvoření nástrojů pro predikci nebezpečí vzniku přívalových povodní.

Velmi významnou, respektive naprosto zásadní součástí předpovědní služby však je schopnost vytvářet produkty pro potřeby uživatelů a tyto produkty uživatelům doručit, čili zejména vzájemná komunikace mezi jednotlivými účastníky systému ochrany před povodněmi.

Literatura

[1] ČHMÚ, 2007. Výzkum a implementace nových nástrojů pro předpovědi povodní a odtoku v rámci zabezpečení hlásné a předpovědní povodňové služby v ČR. Závěrečná zpráva o řešení projektu v roce 2007, SP/1c4/16/07, ČHMÚ, Praha.

[2] ČHMÚ, 2008. Výzkum a implementace nových nástrojů pro předpovědi povodní a odtoku v rámci zabezpečení hlásné a předpovědní povodňové služby v ČR. Závěrečná zpráva o řešení projektu v roce 2008, SP/1c4/16/07, ČHMÚ, Praha.

[3] ČHMÚ, 2009. Výzkum a implementace nových nástrojů pro předpovědi povodní a odtoku v rámci zabezpečení hlásné a předpovědní povodňové služby v ČR. Závěrečná zpráva o řešení projektu v roce 2009, SP/1c4/16/07, ČHMÚ, Praha.

[4] DAŇHELKA, J., 2007. Operativní hydrologie: hydrologické modely a nejistota předpovědí, Sborník prací ČHMÚ, sv. 51, ČHMÚ, Praha. 104 s. ISBN 978-80-86690-48-3

[5] DAŇHELKA, J. – KUBÁT, J. (eds.), 2009. Přívalové povodně na území České republiky v červnu a červenci 2009. ČHMÚ, Praha. 2009. 71 s. ISBN 978-80-86690-76-6

[6] NWS, 2010. NWSRFS User Manual Documentation. <http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/nwsrfs/users_manual/htm/xrfsdocpdf.php>

[7 VLASÁK, T. – DAŇHELKA, J., 2010. Vyhodnocení hydrologických předpovědí povodní v povodí Labe. Meteorologické Zprávy, roč. 63, č. 1, s. 5–12. ISSN 0026-1173

[8] VLASÁK, T. – KREJČÍ, J. – DAŇHELKA, J., 2009. Going to space: Implementation of spatial input data processing in real-time flood forecasting in the Czech Republic. EGU General Assembly, Vienna 2009, 1

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, Praha, e-mail: danhelka@chmi.cz, cekal@chmi.cz

OPERATIVNÍ STOCHASTICKÁ PŘEDPOVĚĎ PRŮTOKŮ PŘI POVODNÍCH

Lucie Březková[1, 2], Miloš Starý[1], Petr Doležal[1]

Abstrakt

Deterministická předpověď průtoků počítaná srážko-odtokovými modely je dnes běžnou součástí hydrologické předpovědní služby v rámci České republiky. Předpověď průtoků slouží během povodní jako podklad při rozhodovacím procesu o realizaci některých protipovodňových opatřeních, jakými jsou například mimořádné manipulace na vodních nádržích.

Příčinou srážku nad povodím lze považovat za náhodnou veličinu, deterministická předpověď průtoků vycházející z jednoho scénáře předpovídaných srážek je proto značným zjednodušením reality. Při tvorbě předpovědi průtoků je třeba postihnout nejistotu vstupních meteorologických veličin, která má podle zkušeností z praxe zpravidla největší podíl na nepřesnosti výsledné předpovědi průtoků při nástupu povodňové vlny.

Příspěvek se zabývá vyjádřením nejistoty předpovědi průtoků v závislosti na nejistotě vstupních meteorologických veličin do hydrologického modelu pomocí metody Monte Carlo, kdy je stochastickým generátorem vytvořen soubor náhodných polí meteorologických veličin (např. srážek) podle předem stanovených parametrů a požadavků. Na základě takové množiny vstupních dat je opakovaně provedena simulace srážko-odtokového procesu. Výsledný soubor scénářů vývoje průtoků je statisticky vyhodnocen. V rámci navrhovaného postupu byl kladen důraz na rychlost výpočtu a možnost operativního využití popsané metody v praxi.

Klíčová slova: stochastické předpovědi průtoků, Monte Carlo, hydrologický model

1. Úvod

Deterministická předpověď odtoku vody z povodí velikosti řádově stovek až tisíců čtverečních kilometrů pomocí srážko-odtokových modelů je dnes v rámci České republiky nedílnou součástí operativní hydrologické služby. Český hydrometeorologický ústav denně vydává hydrologické prognózy délky 48 h pro více než 100 stanic. Základním podkladem pro výpočet hydrologické předpovědi je předpověď srážek (teplot), kterou stanovuje na základě synoptické situace meteorolog. Často je určující meteorologickou předpovědí výstup z numerického předpovědního modelu ALADIN (ALADIN International Team,1997).

Deterministická předpověď průtoků založená na jednom scénáři předpovězených srážek je značným zjednodušením skutečné situace. V prvé řadě nijak nepostihuje neurčitosti, které je nutno nejen při tvorbě – a také při následné interpretaci předpovědi průtoků brát v úvahu. Tato skutečnost má zásadní význam v praxi, kdy je třeba při povodňové situaci činit na základě prognózy průtoků závažná rozhodnutí (např. o stavbě protipovodňových opatření, evakuaci obyvatel aj.).

K tvorbě stochastické hydrologické předpovědi lze přistupovat různým zjednodušeným způsobem. Pro krátkodobou předpověď průtoků délky 48 h lze např. použít více scénářů z různých meteorologických modelů (ALADIN, COSMO, ECMWF aj.). Nedostatek této metody spočívá jednak v nedostatečném počtu scénářů, které by byly operativně přístupné hydrologickým službám, dále pak v neschopnosti postihnout časoprostorovou neurčitost předpovídané veličiny (tzv. problém měřítek, např. 51 scénářů z modelu ECMWF má prostorový krok cca 50x50 km), která hraje v podmínkách ČR značnou roli, neboť povodně vznikají převážně v důsledku intenzivní srážkové činnosti či tání sněhové pokrývky přímo na našem území.

2. Metoda

2.1 Nejistoty při tvorbě hydrologických předpovědí

Při tvorbě operativní hydrologické předpovědi pomocí srážko-odtokového modelu je třeba si uvědomovat, že tvorba předpovědi průtoků probíhá za značně neurčitých podmínek, kterými jsou:

1. *Volba hydrologického modelu* – tzn. použití hydrologických a hydraulických rovnic, parametrizace a koncepčních modelů, které vždy realitu zjednodušují. Tato zjednodušení vyjadřují kromě jiného naši neznalost detailních přírodních podmínek (např. typ půdy, členitost terénu aj.). Především jsou však nutná pro použitelnost hydrologického modelu v reálném čase, kdy je rychlost výpočtu jedním ze směrodatných ukazatelů.
2. *Nejistota vstupních měřených a předpovídaných veličin* daná jednak nejistotou měřených a předpovídaných hodnot, dále zjednodušením vstupní veličiny pro potřeby hydrologického modelování v prostoru, příp. v čase (uvažují se plošně, v případě srážek i časově zprůměrované hodnoty).

V další části se budeme zabývat nejistotou měřených a předpovídaných dat. Tuto nejistotu, zvláště nejistotu předpovídaných dat, nelze přesně kvantifikovat. Pro její vyjádření je možné použít alternativní metody, např. navrhovaný generátor náhodných polí popsaný dále.

2.2 Generátor náhodných polí

Měřená či předpovídaná veličina může být považována za náhodnou veličinu s normálním rozdělením. Protože k dispozici je zpravidla omezená množina měřených dat či předpovídaných scénářů, lze nejistotu takové veličiny vyjádřit pomocí rozšířené standardní nejistoty (±3σ) odhadnuté z rozsahu dostupných dat. (Pozn. Při určování parametru σ lze v případě měřených dat vycházet z historických měření.)

Uvažujme příčinnou srážku nad povodím měřenou v několika srážkoměrných stanicích. Intenzitu srážky měřenou v jedné srážkoměrné stanici lze považovat za náhodnou veličinu s určitým rozdělením. Protože srážka se mění v čase, lze hovořit o náhodném procesu. V rámci srážkoměrné sítě (pole) tvoří jednotlivé stanice s naměřenými údaji náhodné veličiny, které jsou vzájemně korelované (mluvíme o náhodném poli). Nejistotu srážky lze pak vyjádřit pomocí generátoru náhodných polí, který je definován určitými statistickými parametry.

Navrhovaný generátor vychází z těchto předpokladů:

1. Měřená a předpovídaná veličina (reprezentována náhodným vektorem) má normální rozdělení.
2. Nejistota měřené či předpovídané veličiny je vyjádřena pomocí rozšířené standardní nejistoty (±3σ).

Matematický model generátoru vychází z práce (Smith et al., 1979), modifikovaná verze byla použita pro řešení spolehlivosti sypaných hrází (Starý, 1983; Starý, 1985).

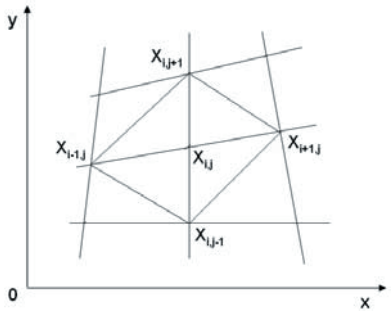
Matematický popis generátoru

Uvažujme rovinnou oblast Ω rozdělenou na trojúhelníky s vrcholy P_1, P_2,...P_n (viz Obr. 1). Podle autokorelační teorie lze psát rovnici:

$$X_{i,j} = a_{i-1,j} \cdot X_{i-1,j} + a_{i+1,j} \cdot X_{i+1,j} + a_{i,j-1} \cdot X_{i,j-1} + a_{i,j+1} \cdot X_{i,j+1} + \varepsilon_{i,j}\,, \qquad (1)$$

Kde značí:

$X_{i,j}$ hodnotu náhodné proměnné ve vrcholech $P_1...P_n$;
$\varepsilon_{i,j}$ normální náhodnou proměnnou;
$a_{i-1,j}$ to $a_{i,j+1}$ autoregresní parametry vyjadřující míru závislosti hodnoty $X_{i,j}$ na okolních hodnotách $X_{i-1,j}$ až $X_{i,j+1}$.



Obr. 1: Schéma oblasti Ω

Rovnici (1) lze psát pro celkový počet n vrcholů jako soustavu n lineárních rovnic:

$$\mathbf{X} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{X} + \boldsymbol{\varepsilon}, \tag{2}$$

kde značí:
X generovaný vektor náhodné proměnné;
ε normální náhodný vektor;
W matici, která definuje lineární závislost X ve vrcholech $P_1,...P_n$; autoregresní parametry $a_{i,j}$ jsou členy matice W.

Rovnici (2) lze transformovat na následující vztah (viz Starý, 1985):

$$\mathbf{X} = \mu_X + \mathbf{W} \cdot \mathbf{X} + \alpha \cdot \boldsymbol{\varepsilon}, \tag{3}$$

Kde značí α faktor, který zajišťuje požadovanou hodnotu σ[X].

Rovnice (3) může být řešena následovně:

1. Náhodný vektor je generován z normalizovaného normálního rozdělení N(0,1).
2. Podle rovnice (3) dostaneme pak autokorelovaný vektor X s rozdělením $N(\mu_X,\sigma^2_X)$.

Generátor vytvoří autokorelovaný vektor X pro každý časový krok. Vstupní data (časové řady srážek) pro hydrologický model však nejsou korelované pouze v prostoru, ale i v čase. To je možné zajistit např. tím, že se pro všechny časové okamžiky použije stejný náhodný vektor ε, nebo bude tento náhodný vektor v čase měněn jen s malou povolenou odchylkou. Časová korelace vektoru X je pak přibližně zajištěna časově korelovanou řadou středních hodnot μ_X.

Rovnici (1) můžeme psát pro každou stanici *i* v následujícím tvaru:

$$X_i = a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + ... + a_k \cdot X_k + \varepsilon_{i,j}, \tag{4}$$

Kde značí *k* počet okolních bodů vztažených k bodu *i*.

Pokud máme k dispozici dostatečně dlouhou řadu pozorování ve stanicích, lze autoregresivní parametry a_1 až a_k z rovnice (4) určit pomocí *Yule-Walkerových* rovnic:

$$\begin{pmatrix} 1 & r(1) & ... & r(k-2) & r(k-1) \\ r(1) & 1 & r(1) & ... & r(k-2) \\ ... & ... & ... & ... & ... \\ r(k-2) & ... & r(1) & 1 & r(1) \\ r(k-1) & r(k-2) & ... & r(1) & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ ... \\ a_{k-1} \\ a_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r(1) \\ r(2) \\ ... \\ r(k-1) \\ r(k) \end{pmatrix} \tag{5}$$

kde značí:

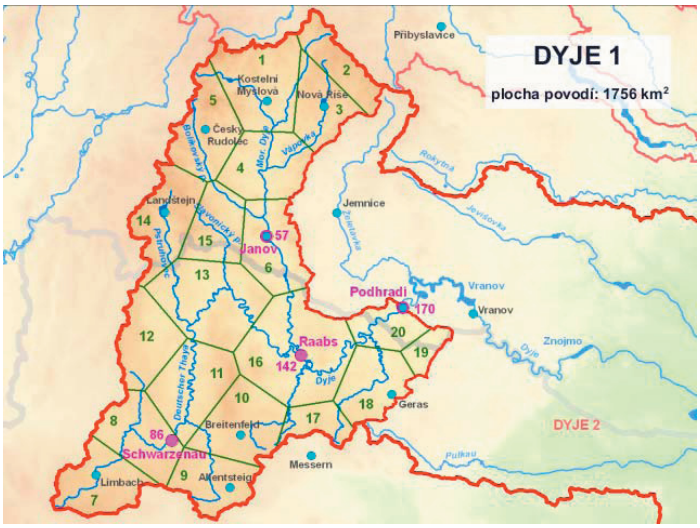
r(1) korelační koeficient stanice *i* a okolní stanice 1,

r(k-1) korelační koeficient stanice *i* a okolní stanice *(k-1)*, atd.

Tímto způsobem získáme *i*-tý řádek matice W. Pokud použijeme rovnici (5) pro výpočet autoregresních parametrů všech srážkoměrných stanic, dostaneme celou matici W. Autoregresní parametry se rovnají nule v případě, že mezi stanicemi není žádná korelace.

Matice W je různá pro různé typy meteorologických situací. V případě stratiformních srážek budou i vzdálenější stanice spolu vzájemně korelovat více, než v případě konvektivních situací. Na základě historických dat mohou být vypočítány různé typy korelačních matic, které se pak použijí pro generování náhodných polí na základě předpovídaného typu situace.

Navrhovaný generátor byl naprogramován v prostředí Delphi. Byl testován na horní části povodí Dyje po profil Podhradí (viz Obr. 2), kde je od roku 2003 v operativním provozu předpovědní hydrologický model HYDROG.



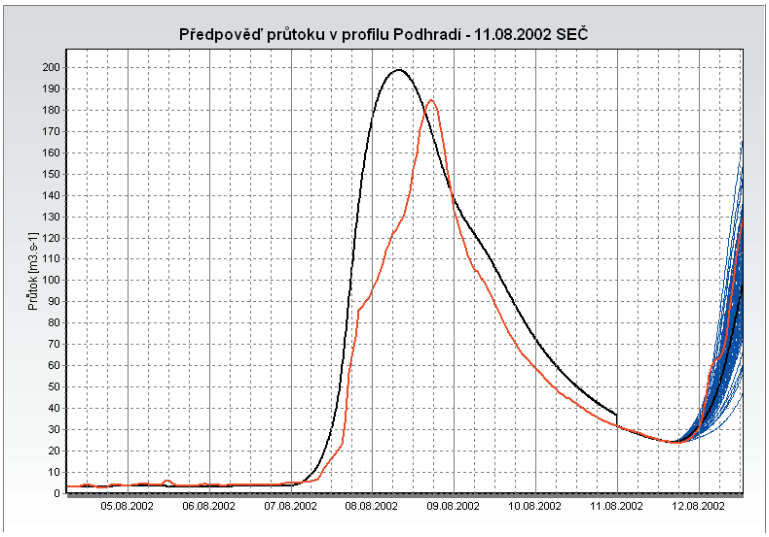
Obr. 2: Schéma povodí Dyje po profil Podhradí. Plocha povodí činí 1756 km^2.

3. Aplikace

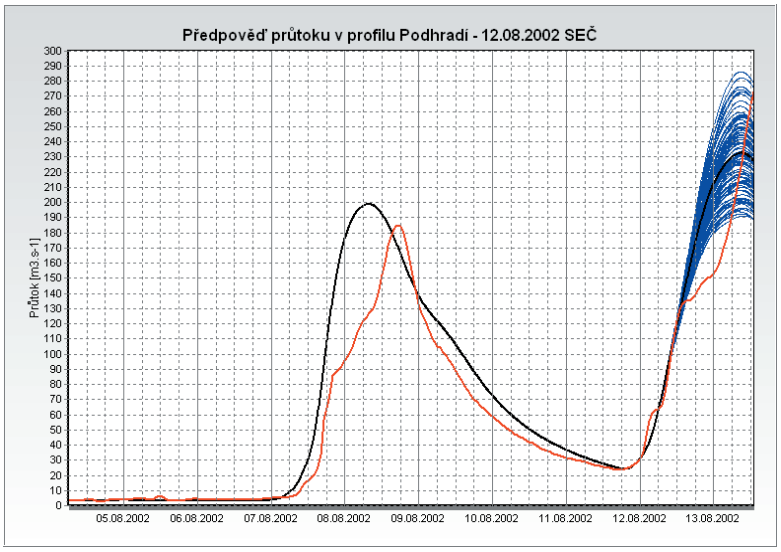
Pro potřeby hydrologického modelu je povodí Dyje rozděleno na 20 polygonů, pro které jsou vstupní meteorologické veličiny (např. srážky) uvažovány jako plošně konstantní. Pro testované povodí byla vypočítána na základě historických dat za období 2002-2009 (kvantitativních odhadů srážek získaných pro jednotlivé polygony kombinací radarového a srážkoměrného měření – viz Šálek et al., 2004) korelační matice W.

Pro testování generátoru byla použita data z povodně ze srpna 2002, kdy kulminační vrchol druhé povodňové vlny překročil v profilu Podhradí 50tiletý průtok. Jako vstupní předpověď srážek byla použita tehdy dostupná operativní předpověď srážek počítána modelem ALADIN, která byla upravena podle předpovědi srážek vydané meteorologem ve službě. Rozšířená standardní nejistota pak byla odvozena z předpovídaného rozpětí srážek.

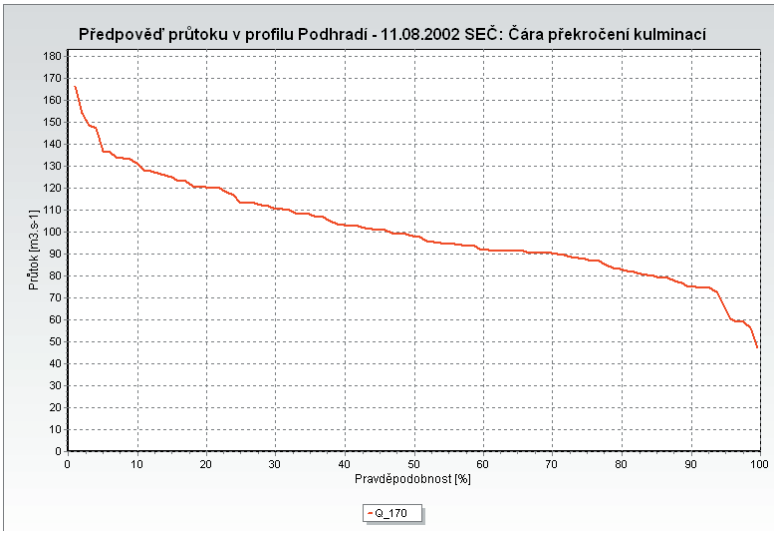
Na základě výše uvedeného byla generátorem vytvořena množina 100 scénářů srážek. Opakovanou hydrologickou simulací modelem HYDROG pak byla získána množina předpovídaných průtoků (viz Obr. 3 a 4). Z této množiny je pak možné vypočítat např. čáru překročení kulminačních průtoků za předpovídané období (viz Obr. 5) či čáru překročení předpovídaných objemů odtoku.



Obr. 3: Simulace operativní stochastické předpovědi průtoků. Rozšířená standardní nejistota činila 48 % z průměrné střední hodnoty předpovídané srážky.



Obr. 4: Simulace operativní stochastické předpovědi průtoků. Rozšířená standardní nejistota činila 40 % z průměrné střední hodnoty předpovídané srážky.



Obr. 5: Ukázka vyhodnocení stochastické předpovědi průtoků – čára překročení předpovídaných kulminačních průtoků.

4. Závěr

Navrhovaný generátor umožňuje podle zadaných parametrů výpočet stochastické předpovědi meteorologických veličin, na základě které je pak možné vypočítat s použitím hydrologického modelu stochastickou předpověď průtoků. Metoda je rychlá a v praxi snadno aplikovatelná.

Nepřesnosti v předpovědi průtoků jsou kromě jiného způsobeny z velké části nepřesnou předpovědí časového rozložení dané veličiny (srážky).

Přesto tato metoda umožňuje podat mnohem pravdivější odhad vývoje průtoků než současně používaný deterministický přístup zohledňující pouze jeden (nejpravděpodobnější) scénář předpovídaných meteorologických veličin.

Další práce bude zaměřena na výpočet stochastické předpovědi průtoků v případě tání sněhové pokrývky.

Poděkování

Práce byla vytvořena v rámci projektu 103/07/1620 Grantové agentury České republiky.

Literatura

[1] ALADIN INTERNATIONAL TEAM,1997. The ALADIN project: Mesoscale modelling seen as a basic tool for weather forecasting and atmospheric research. WMO Bulletin, 46, 317-324.

[2] SMITH, L. – FREEZE, R. A.,1979. Stochastic analysis of steady state groundwater flow in a bounded domain. Two-dimensional simulations. Water Resources Research, Vol 15, No 6, pp 1543-1559.

[3] STARÝ, M.,1983. Spolehlivost hlinitého těsnění sypaných zemních a kamenitých hrází. [Kandidátská disertační práce]. University of Technology, Brno.

[4] STARÝ, M., 1985. Autocorrelation theory application for the generation of random parameters in discreet points of a plane area. In: *Sborník VUT.* University of Technology, Brno, pp 800-805.

[5] STARÝ, M. – TUREČEK, B. Operative control and prediction of floods in the River Odra basin. In: *Flood Issues in Contemporary Water Management*. NATO Science Series, 2. Enviromental Security - Vol.71, Kluwer Academic Publishers, 2000, pp 229-236, ISBN 0-7923-6452-X

[6] ŠÁLEK, M. – NOVÁK, P. – SEO, D. J., 2004. Operational application of combined radar and raingauges precipitation estimation at the CHMI. ERAD 2004 proceedings, ERAD publication series, Vol. 2, pp 16-20.

Kontakty na autora

1 Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, Veveří 95, 602 00 Brno, e-mail: stary.m@fce.vutbr.cz, dolezal.p@ fce.vutbr.cz

2 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, e-mail: lucie.brezkova@chmi.cz

DATABANKA POVODNÍ OTAVY A JEJÍ MOŽNÉ VYUŽITÍ V PROTIPOVODŇOVÉ OCHRANĚ

Tomáš Vlasák[1]

Abstrakt

Příspěvek se zabývá návrhem a realizací databanky povodní v povodí Otavy po Písek a jejím využitím pro potřeby protipovodňové ochrany. Databanka, zpracovaná do formy Katalogu povodní, obsahuje informace o povětrnostních podmínkách, meteorologických příčinách (srážky, teploty) a o odtokové odezvě. Pomocí shromážděných informací byl popsán mechanismus vzniku povodní v povodí Otavy a byla navržena metoda předpovědního analogu, která na základě podobnosti mezi příčinami povodní vyhledává v historických záznamech epizody, podle které by bylo možné zhruba odhadnout vývoj odtokové situace. Pro databanku povodní bylo vybráno 72 povodňových epizod z období let 1890 – 2006, které v Písku překročily hodnotu průtoku 1leté, respektive 10leté povodně.

Klíčová slova: povodeň, historické povodně, Otava, metoda předpovědního analogu

1. Úvod

Povodeň je výsledkem střetu ojedinělých jevů jak v atmosféře tak v povodí. Tyto jevy jsou determinovány fyzicko-geografickým prostředím vně i uvnitř povodí. Působení faktorů jako je reliéf, charakter říční sítě, půd je v čase relativně stabilní, a proto tyto faktory zanechávají v procesu vzniku každé povodně „stopy“, které utvářejí specifičnost povodňového mechanismu každého povodí. Jsou to například různé sezonální složky ve výskytu povodní, typické zdrojové oblasti povodní, srážko-odtokové charakteristiky jednotlivých částí povodí nebo typická interference průtokových vln v soutokovém uzlu.

Všeobecně diskutované moderní trendy v protipovodňové ochraně zdůrazňují potřebu komplexního řešení v celém povodí na úkor lokálních opatření. Antropogenní zásahy do krajiny za účelem snížení povodňových škod jsou plošné a netýkají se pouze bezprostředního okolí toků. Je zřejmé, že přínos těchto opatření může být zvýšen, pokud se při jejich plánování vezmou do úvahy faktory vyplývající ze studia mechanismu vzniku povodní. Znalosti procesu vzniku povodní v konkrétním povodí navíc mohou být nápomocné při odhadu aktuálního vývoje hydrologické situace, protože rozšiřují povědomí hydrologa o možných dopadech aktuální meteorologické situace na vývoj povodně.

Protože variabilita krajiny a přírodních procesů neumožňuje ani při současných znalostech fyzikálně popsat proces vzniku a formování povodně, neobejde se studium povodňového mechanismu bez rozboru historických povodní. Předchozí práce, zabývající se analýzou povodní využívaly údajů o historických povodní zpravidla jednorázově, což vedlo k jejich opakovanému shromažďování a rozboru již dříve zpracovaných podkladových materiálů. Proto bylo primárním úkolem navrhnout funkční platformu pro databanku povodní, která by mohla být základním zdrojem informací pro budoucí práce zabývající se povodněmi ve sledovaném území a zároveň databanku vyplnit pro nejvýznamnější povodně, které se na Otavě vyskytly.

Tato databanka pak byla podkladem pro popis povodňového mechanismu, definování povodňových rizik a pro testování metody předpovědního analogu. Podrobně byla práce publikována jako disertační na Přírodovědecké fakultě UK v Praze [7].

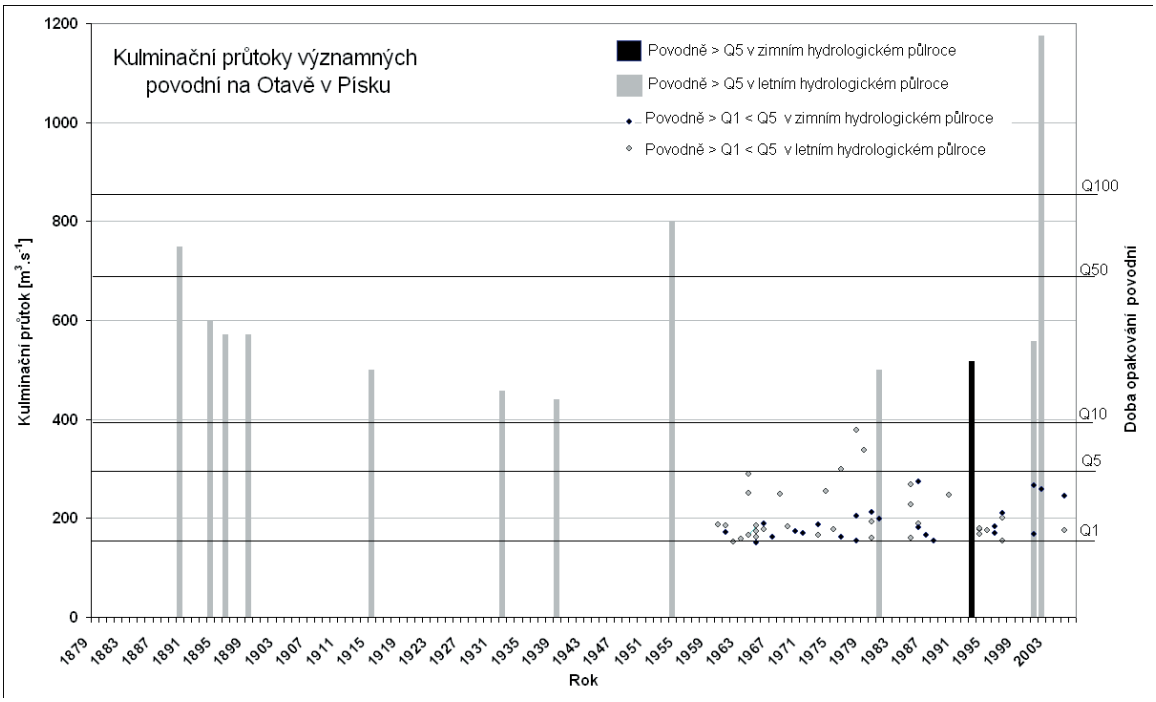
2. Návrh databanky povodní

Pro naplnění databanky povodní byly použity všechny povodňové epizody, při kterých mezi lety 1890 – 2006 překročil kulminační průtok na Otavě v Písku hodnotu desetileté vody tedy 395 $m^3.s^{-1}$ a všechny povodně, které mezi lety 1961 – 2006 překročily hodnotu jednoleté vody (146 $m^3.s^{-1}$). Tímto způsobem bylo vybráno 72 epizod.

Předložená databanka povodní byla zpracována do grafické podoby (viz Obr. 1) a obsahuje následující skupiny komponent:

1) meteorologické symptomy – typy povětrnostních situací, snímky tlakového pole,
2) údaje o časoprostorovém rozložení srážek, jejich průměrných úhrnech na povodí a o průběhu teplot vzduchu,
3) ukazatel nasycenosti povodí a zásoby sněhové pokrývky,
4) průběhy průtokových vln na nejvýznamnějších vodoměrných profilech .

Takto zpracovaná databanka povodní Otavy je dostupná na internetových stránkách http://old.chmi.cz/cb/povodne



Obr. 1: Přehled zpracovaných povodní, výskyt podle roku a podle sezóny a kulminační průtoky Otavy ve stanici Písek.

3. Analýza mechanismu vzniku povodní

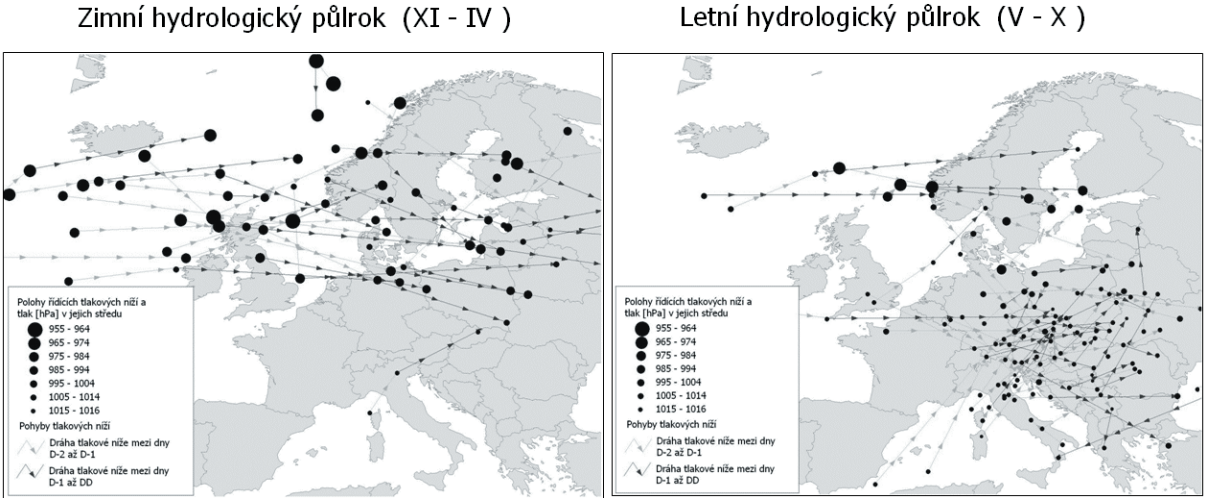
Na podkladě shromážděných materiálů byly studovány a popsány specifické aspekty v procesu vzniku povodní v souvislosti s vlivem fyzicko-geografického prostředí povodí Otavy. Příčiny vzniku povodní by vyhodnoceny pomocí několika metod mezi něž patří například:

- kvantifikace podílu tání sněhu na jejich vzniku [5],
- sezonální analýza [3],
- hydrosynoptická analýza četnosti výskytu příčinných povětrnostních typů a popis drah řídících tlakových útvarů [2], [4],
- identifikace polohy a velikosti jádra srážkové činnosti.

Z výsledků vyplývá, že u otavských povodní existuje především v mnoha aspektech výrazná diferenciace mezi povodněmi vzniklými v teplé a chladné části roku. Tato odlišnost je kromě různých klimatických charakteristik těchto období způsobena různým vlivem reliéfu povodí na vznik srážek, které se geneticky v zimní a letní části roku v povodí Otavy významně liší.

Z nejzřetelnějších vlastností povodňového mechanismu Otavy, lze jmenovat například tyto faktory:

- Naprostá většina velkých povodní na Otavě s kulminací v Písku nad desetiletou vodou (11 případů z 12 mezi lety 1890 - 2006) se vyskytla v letním hydrologickém půlroce (květen – říjen).
- Zimní povodně vyvolávají povětrnostní situace klasifikované typy Wc, Wcs, SWc2,3 a NWc, [1], které jsou spojené s přesunem často velmi hlubokých tlakových níží západovýchodním směrem v sektoru mezi 50. a 65. rovnoběžkou. Srážky jsou vázané na výrazné frontální systémy, které v silném západním proudění přecházejí přes povodí Otavy často v krátkém sledu po sobě (viz Obr. 2).
- U letních povodní převažují situace typu C, B, Ec, SEc, NEc s polohou tlakové níže nebo brázdy nízkého tlaku v oblasti střední Evropy. Tyto tlakové útvary mají často svůj původ v severním Středomoří a do střední Evropy se dostávají pro dráze Vb.

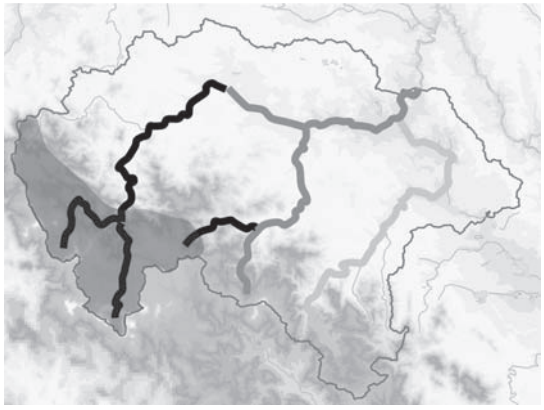


Obr. 2: Dráhy a hloubka řídících tlakových níží ve dnech, které předcházely vzniku povodní v povodí Otavy rozdělené podle letního a zimního hydrologického půlroku

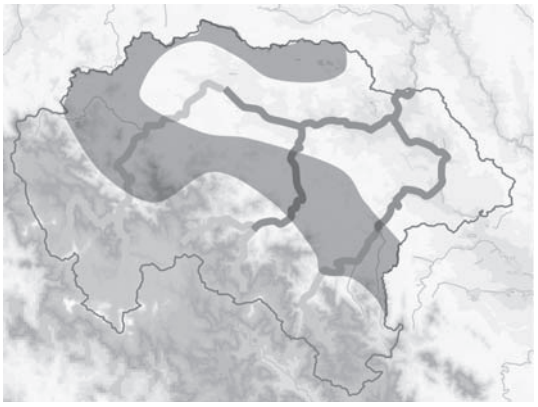
- U zimních povodní, na jejichž vzniku se významněji podílelo tání sněhu, bylo identifikováno pouze 8 a z hlediska kulminačního průtoku patří mezi menší povodně. Hlavním důvodem malé citlivosti povodí Otavy na tento typ povodní je velká výšková členitost povodí, která způsobuje postupné odtávání sněhu.
- Většina zimních povodní byla způsobena dešťovými srážkami, které byly díky silnému západnímu proudění výrazně orograficky zesílené v nejvyšších partiích Šumavy. Nejvyšší úhrny srážek se u těchto povodní vyskytují výlučně v povodí horní Otavy po Sušici. Z tohoto důvodu také prakticky u všech zimních epizod je podíl dolní a východní části povodí Otavy na kulminaci Otavy velmi malý. Tyto povodně se vyskytují mnohem častěji v měsících listopad a prosinec než ve zbytku zimy.
- U letních povodní je škála příčin pestřejší, vyskytují se mezi nimi epizody, které se svým mechanismem vzniku podobají zimním povodním. Převládají však situace způsobené přechodem oblasti nízkého tlaku přes střední Evropu, při kterém se povodí Otavy dostává do severovýchodního až severního proudění a vytváří se méně výrazné návětří na severním úpatí Šumavy. Vydatné srážky zpravidla zasahují celé povodí, nejvyšší úhrny se vyskytují v horní části rozvodí mezi Volyňkou a Otavou a u extrémních povodí často i na

horní Blanici. Blanice se svým průtokem významně podílí na kulminaci Otavy v Písku a také často dochází ke střetávání povodňových vln v soutokovém uzlu Otavy a Blanice.

Syntézou dílčích poznatků z těchto analýz byla vytvořena kategorizace povodní, která pro povodí Otavy vyčleňuje 9 typů povodní, u nichž se společné znaky v meteorologických příčinách promítají do typických vlastností odtokové odezvy jako je tvar průtokové vlny Otavy v Písku nebo střetávaní se průtokových vln Otavy s jejím největším přítokem Blanicí. Výsledky rozboru povodňového mechanismu umožnily odhad potenciálního povodňového rizika v základní říční síti povodí Otavy. Riziko je rozděleno podle příčiny povodní, sezóny a povětrnostní situace (viz Obr. 3).



1. Zimní dešťové povodně



2. Jarní povodně z tání sněhu





3. Letní povodně při západním proudění



4. Letní povodně při SV proudění

Obr. 3: Potenciální povodňová rizika v povodí Otavy podle typu povodně

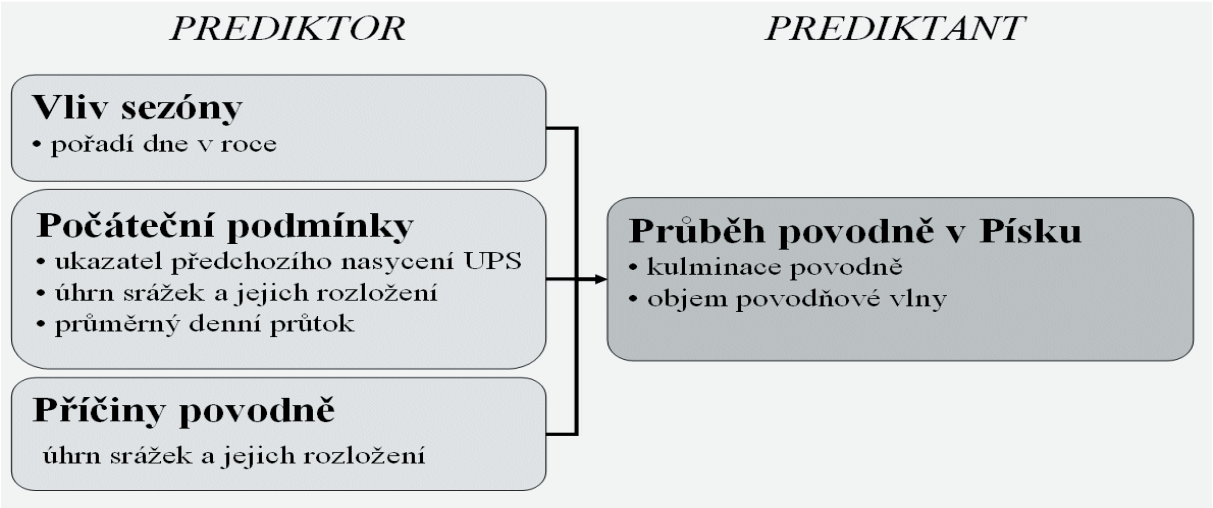
4. Návrh metody předpovědního analogu

Metoda předpovědního analogu patří mezi klasické předpovědní techniky a používá se tam, kde se z různých důvodů nedaří matematicky modelovat přírodní procesy. Princip metody analogu jako předpovědního nástroje spočívá v nalezení analogické situace z hlediska příčin a předpokládá se, že podobné budou i následky [6]. Je zřejmé, že u přírodních procesů, které jsou velmi složité a komplexní, není možné najít absolutně identický analog, a proto se hledá analog nikoliv na základě shody, ale podobnosti. Kvantifikace podobnosti mezi prediktory a stanovení jejich limit je hlavním předmětem různých metodických přístupů a diskuzí pro použití této metody.

Aplikace této metody pro srážko-odtokový vztah, tak jak byla navržena, není v moderní hydrologii obvyklá zejména z důvodu převládajícího použití matematických modelů. I tak jsou

zřejmé výhody toho přístupu mezi něž patří především „průhlednost“ metody, která umožňuje větší zapojení osoby hydrologa do procesu přípravy hydrologické předpovědi. Mezi nevýhody tohoto přístupu patří velká náročnost na množství zpracovaných dat, nutnost omezit se zejména u srážek na jevy, které lze popsat pouze v denních kroku a relativně malý soubor povodní, který neumožňuje použít sofistikovanějších vyhledávácích metod jako je například neuronový systém.

Metoda byla navržena pro předpověď maximálního okamžitého průtoku a objemu odtoku v následujících čtyřech dnech na základě aktuálního stavu povodí a známé předpovědi srážek pro následující 3 dny. Nejpodobnější povodňová epizoda se známým průběhem odtokové odezvy byla hledána v historických záznamech podle podobnosti mezi příčinami, které v tomto případě reprezentují sezóna výskytu povodně, nasycenost povodí, množství a rozložení srážek v různém vztahu ke dni, ke kterému je hledán předpovědní analog (viz Obr. 4). Pro vyjádření podobnosti jednotlivých příčinných faktorů byly navrženy rovnice, které matematicky standardizují míru podobnosti do intervalu o velikosti (0-1), kde 0 znamená nejmenší podobnost a 1 úplnou shodu. Souhrnný index podobnosti (*Ipo*) dvou povodňových epizod, zahrnující všechny porovnávané příčinné faktory, byl získán váženým součtem všech standardizovaných měr podobností. Stanovení vah v této sumační rovnici bylo předmětem kalibrace metody, která byla provedena na základě maximalizace korelačního koeficientu mezi velikostí souhrnného indexu podobnosti a podobností kulminačních průtoků a objemů vln.

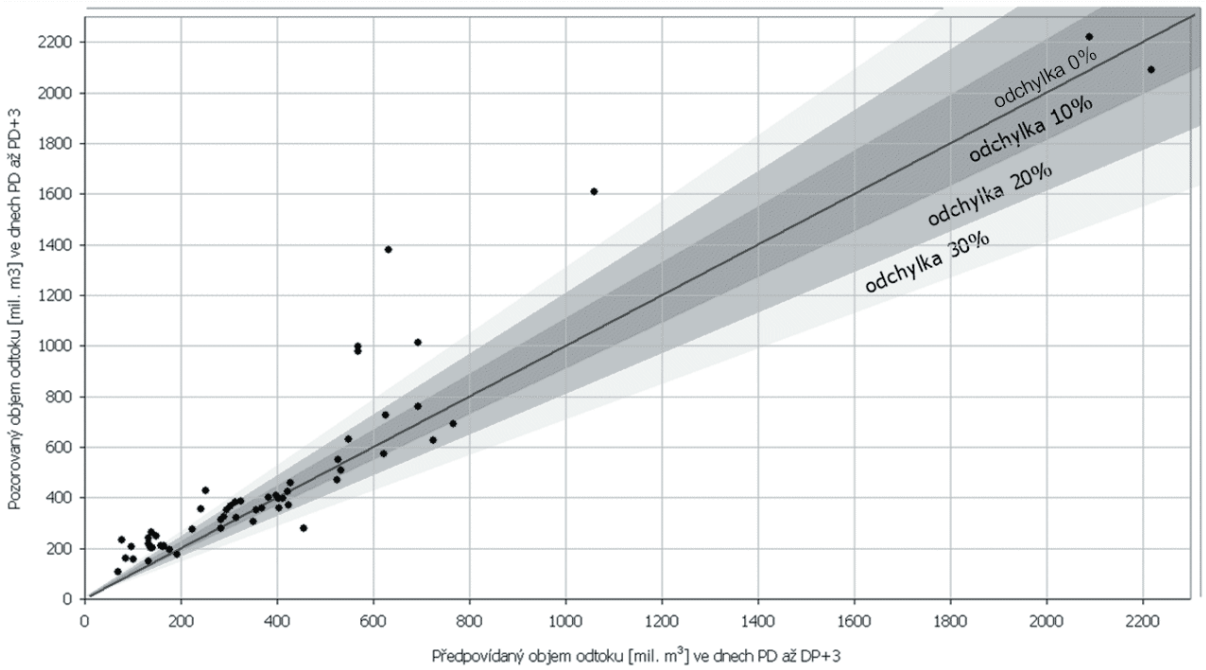


Obr. 4: Základní schéma příčin (prediktorů) a následků (prediktantů) použitých při aplikaci metody předpovědního analogu

Navržená metoda předpovědního analogu je tedy založená na syntéze charakteristik příčin povodně do jednoho indexu (*Ipo*), jehož výpočet byl optimalizován tak, aby na jeho velikosti byla závislá také míra podobnosti kulminačního průtoku a objemu odtoku v následujících čtyřech dnech. Při porovnání uvedených charakteristik příčin povodní dosahuje vyšší závislosti na indexu *Ipo* podobnost předpovídaných a skutečných objemů odtoku. Pro nalezení optimálního předpovědního analogu pro odhad objemu odtoku má největší vliv podobnost mezi průtoky Otavy v Písku v předpovědní den a mezi dvoudenními a třídenními srážkovými úhrny ve dnech následujících.

Z porovnání nejvhodnějších předpovědních analogů (s nejvyšší hodnotou indexu *Ipo* k 56 testovaným povodním) vyplývá, že i navržená metoda pro předpověď kulminačním průtoků má poměrně dobré výsledky. Předpovězený kulminační průtok se u 56 testovaných povodní odchyloval od skutečnosti v 16 případech o méně než 10 %, u 14 předpovědí o méně než 20 %, u 14 předpovědí o méně než 30 % a 12 předpovědí se lišilo o více než 30 %. U předpovědí objemu odtoku se u 56 testovacích povodní 15 předpovědí lišilo od skutečnosti

o méně než 10 %, 13 předpovědí o méně než 20 % , 10 předpovědí o méně než 30 % a 10 předpovědí o více než 30 % (viz Obr. 5). Například objem druhé vlny povodně ze srpna 2002 by se od předpovědního analogu, kterým je povodeň ze září 1890, lišil pouze o 8 % !



Obr. 5: Porovnání předpovídaných a pozorovaných objemů odtoku u 56 povodní Otavy Písku, jejichž charakteristiky byly použity pro testování metody předpovědního analogu

Literatura

[1] BRÁDKA, J. – DŘEVIKOVSKÝ, A. – GREGOR, Z. – KOLESÁM, J., 1961. Počasí na území Čech a Moravy v typických povětrnostních situacích. Praha, HMÚ, s. 126.

[2] ČEKAL, R., 2000. Hydrosynoptická analýza povodňových situací v povodí Horní Ohře, [Disertační práce], Přírodovědecká fakulta UK, Praha, s. 208.

[3] HLADNÝ, J. a kol., 1995. Odhad vývoje povodňových situací analýzou historických případů - 3. Část Meteorologické symptomy. Praha. SPIS s.r.o., s. 1–37.

[4] KAKOS, V., 1985. Hydrometeorologická analýza povodňových situací v povodí Labe, Meteorologické zprávy, 38, č. 5, s. 148 – 151.

[5] LOUKAS, A. – VASILIADES, L. – DALEZIOS. R. N., 2000. Flood producing mechanisms identification in southern British Columbia, Canada. Journal of hydrology, Volume 35, Issues 3 – 4, 31 pp 299 – 311.

[6] MARTIN, D. E., 1972. Climatic presentation for short-range forecasting based on event occurrence and reoccurrence profiles. Journal of Applied Meteorology.

[7] VLASÁK, T., 2008. Návrh databanky povodní Otavy a její využití v protipovodňové ochraně, [Disertační práce] Přírodovědecká fakulta UK, Praha. 98 s.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka České Budějovice, e-mail: tomas.vlasak@chmi.cz

SYNERGIE DAT DÁLKOVÉHO PRŮZKUMU ZEMĚ A IN-SITU DAT PRO SYSTÉM MONITORINGU A PŘEDPOVĚDI VZNIKU POVODŇOVÉHO JEVU

Lukáš Brodský[1], Radka Kodešová[2], Kateřina Spazierová[1]

Abstrakt

Předkládaná studie je ukázkou možnosti využití dat dálkového průzkumu Země (DPZ) v kombinaci s in-situ daty meteorologických stanic pro účely vybudování systému monitoringu stavu krajiny a předpověď vzniku povodňového jevu řešeného v rámci projektu FLOREO programu PECS ESA. Vývoj systému spojujícího oba zdroje dat je zaměřen na podporu stávajících monitorovacích činností, zejména tání sněhu a povrchového odtoku vody v krajině. Systém tvoří dvě hlavní částí, první je zaměřena na monitoring sněhové pokrývky a tání sněhu z dat DPZ a druhá na modelování a monitorování povrchového odtoku vody prostřednictvím družicových dat a in-situ dat.

Klíčová slova: dálkový průzkum Země, povodně, FLOREO, tání sněhu, povrchový odtok

1. Úvod

Současné předpovědní a monitorovací systémy povodňových jevů jsou většinou založeny na meteorologických měřeních ze stanic a bodových měřeních průtoku vody. Tyto systémy však vykazují jistou míru neurčitosti, způsobenou předpovědí množství srážek a nedostatečností vstupních dat využívaných v modelech. Na území České republiky o rozloze 78 000 km^2 se nachází okolo 300 meteorologických stanic. Na druhou stranu data dálkového průzkumu Země (DPZ) přináší detailní informaci z celého našeho území. Například stejná oblast monitorovaná satelitními snímky Terra MODIS sestává z 1 248 000 obrazových bodů obsahujících spektrální informaci povrchu Země. Cílem předkládaného systému FLOREO je podpora stávajících monitorovacích činností prostřednictvím relevantních dat DPZ na území České republiky, zejména tání sněhu a povrchového odtoku vody, jež významně přispívají ke vzniku povodní. Uživatelem systému je Český hydrometeorologický ústav, jakožto přední národní organizace pověřená monitoringem a prevencí hrozby povodní.

2. Koncept monitorovacího systému

Systém FLOREO je založen na synergii dat dálkového průzkumu Země a in-situ dat. Implementovaný hydrologický proces je schematizován v následujícím Obr. 1. Skládá se z hlavních krajinných procesů sněhu a oběhu vody sledovaných jak z denních dat DPZ, tak také meteorologických dat z 80 stanic.

Využitý koncept je založen na denních datech DPZ, GIS produktech (Corine Land Cover, FTS Soil Sealing, SRTM DEM atd.), denních in-situ datech (z meteorologických stanic), existujících zpracovatelských nástrojích dat DPZ, geostatistických procedůrách a řadě hydrologických modelů. Realizace celého systému také vyžaduje značné informační technologie potřebné pro jeho provozování, jako např. vysoce výkonný výpočetní systém, infrastrukturu prostorových dat a internetové služby (WS, WMS atd.).

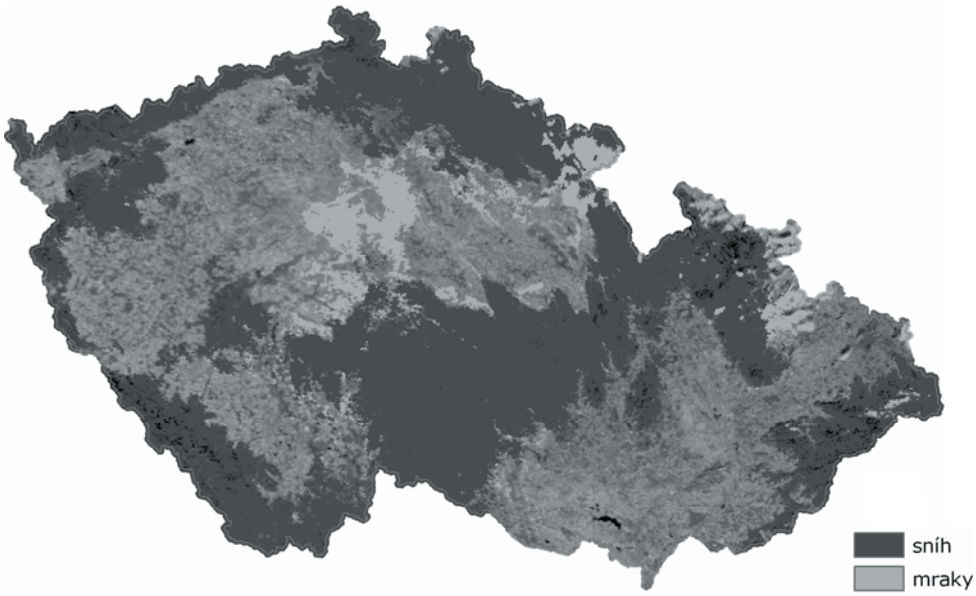


Obr. 1: Koncept oběhu vody v projektu FLOREO

2.1 Monitoring sněhové pokrývky a tání sněhu

Existuje řada družicových systémů které je možné využít pro monitorování sněhové pokrývky. Systém monitorování sněhové pokrývky ve FLOREO představuje hybridní model založený na kombinaci snímků Terra MODIS (Obr. 2), Envisat ASAR a in-situ dat. Postup zpracování zahrnuje klasifikační nástroje, degree day factor model a geostatistické soubory. Výběr družicových systémů MODIS a ASAR byl založen na definici uživatelských požadavků: vysoké časové rozlišení, střední až vysoké prostorové rozlišení a a široký záběr pořizovaných scén, tady získání informací pro celé území České republiky. Známé družice Meteosat a NOAA splňují podmínku časového rozlišení, ovšem prostorové rozlišení 3 a 1 km je nedostatečné. Na druhé straně existuje řada družicových systémů vysokého prostorového rozlišení jako je SPOT nebo IRS, které mají ovšem nižší periodu snímání a scény zpravidla nepokrývají celé území. Vhodnými družicemi splňující zadané podmínky jsou Terra MODIS a Envisat MERIS. Systém je též plně připraven na novou řadu družic Sentuinel -1 a 2.

Mapy sněhové pokrývky jsou primárně získávány z optických dat (MODIS). V případě dlouhotrvajícího období oblačné oblohy jsou zpracovávána [11] radarová data Envisat ASAR WSM [5]. Informace z území celé České republiky jsou poskytovány buď denně nebo jednou týdně v prostorovém rozlišení 250 m.



Obr. 2: Příklad mapy sněhové pokrývky z Terra MODIS

V následujícím kroku je vypočítávána vodní hodnota sněhu. V současné době je tato hodnota stanovována pouze interpolací in-situ dat (kriging metoda). Testována je také metoda regresního krigingu s environmentální proměnou (výškou), nicméně ta znamená zlepšení pouze ve specifických sněhových podmínkách.

Tání sněhové pokrývky je založeno na výpočtu „degree-day factor" modelu dle [21]. Indikátory tání sněhu, tedy míra akumulace a tání, jsou poskytovány denně ve formě mapy (Obr. 3).



Obr. 3: Příklad indikátoru tání sněhu založeném na „degree-day factor" modelu

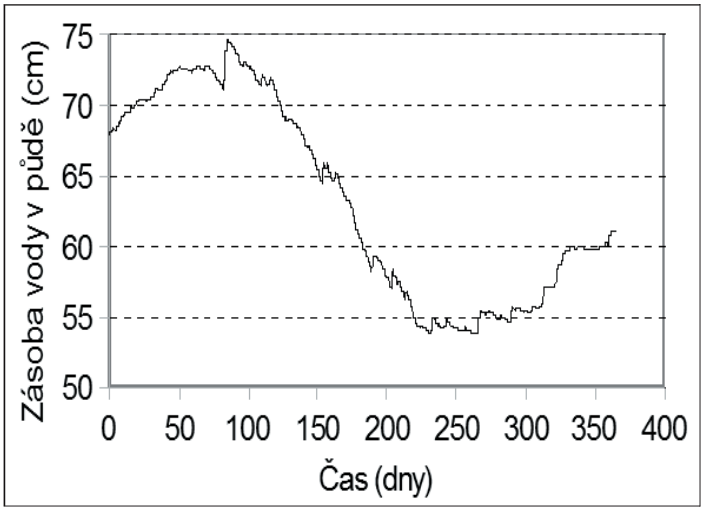
2.2 Monitoring povrchového odtoku vody

Povrchový odtok vody je každý den vypočítáván pomocí metody SCS CN křivek [18]. Obecně platí, že povrchový odtok (pravděpodobnost výskytu povrchového odtoku a jeho velikost) se zvyšuje s rostoucí hodnotou CN. Hodnota CN závisí na typu tzv. „land use", hydrologické půdní skupině a způsobu obhospodařování zemědělských pozemků. Hodnoty CN souvisí také se svažitostí. Se zvyšujícím se sklonem se zvyšuje jejich hodnota. Hodnoty CN mohou být rovněž upraveny v závislosti na aktuálního půdní vlhkosti v půdním profilu. S rostoucí půdní vlhkostí roste hodnota CN. Variabilita modifikovaných hodnot CN roste s klesající průměrnou hodnotou CN (která je charakterizována pro danou lokalitu). Hodnoty CN jsou v naší aplikaci modifikovány podobně jako v [7].

Pro výpočet denního režimu vody v půdním profilu je však použit jiný model a to jednorozměrný numerický model HYDRUS [15, 16]. Vstupy do modelu jsou potenciální infiltrace (tání sněhu, denní srážky minus povrchový odtok vypočtený pomocí CN z předchozího dne) a potenciální evapotranspirace (vypočtené na základě klimatických a vegetačních dat – pokryv a LAI) [1]. Půdní vlhkost vypočtená na konci dne je pak využita pro úpravu hodnot CN pro příští den. Model také simuluje doplňkový povrchový odtok.

Obrázek 4 uvádí příklad simulovaného vývoje zásoby vody v půdním profilu pro vybranou půdu. Je zřejmé, že obsah půdní vody je relativně vysoký během zimního a jarního období. Odpovídající upravené hodnoty CN jsou tedy vysoké a povrchový odtok se může během

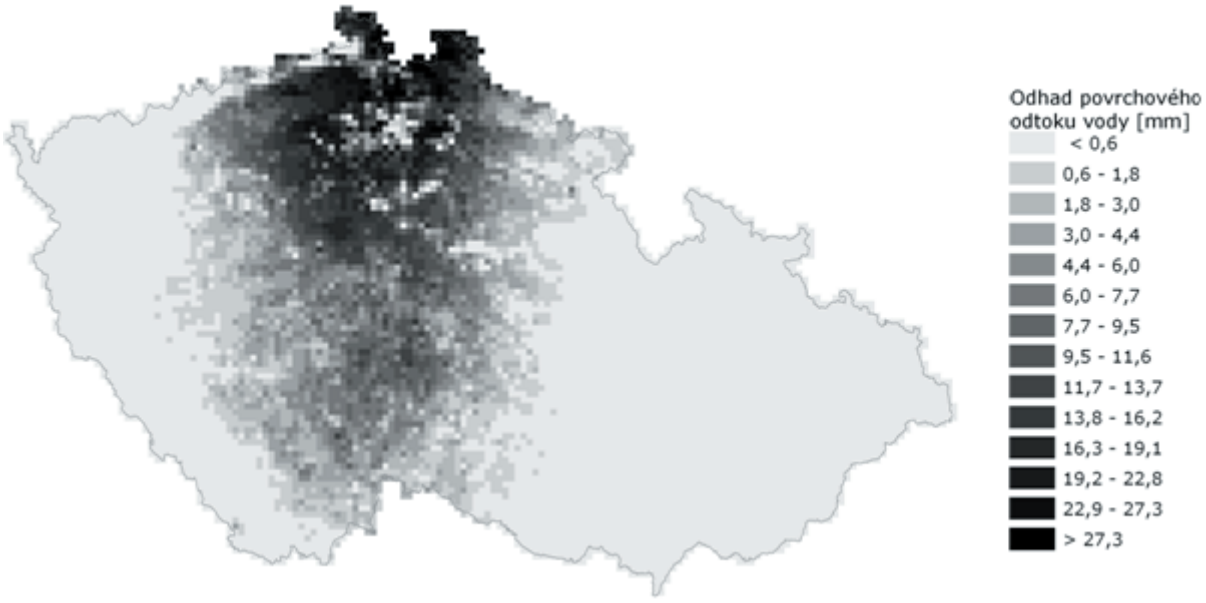
tohoto období objevit častěji než během léta a jara (když je zásoba vody nízká a tudíž jsou vypočteny i nižší hodnoty CN).



Obr. 4: Příklad výsledku simulace z HYDRUS-1D pro Hnědozem modální

Statická prostorová vstupní data pro modely představují například: mapa krajinného pokryvu, digitální model terénu, mapa hustoty zastavěnosti, fyzikální vlastnosti půdy atd. Kromě toho jsou použita také dynamická vstupní data jako jsou prostorové interpolace in-situ dat, vlastnosti zemského povrchu stanovené z dat DPZ nebo vývoj vegetace v zemědělské krajině. Družicová dat Envisat ASAR a Terra MODIS jsou rovněž využívána k monitorování stavu a vývoje krajiny, především z pohledu vývoj vegetace.

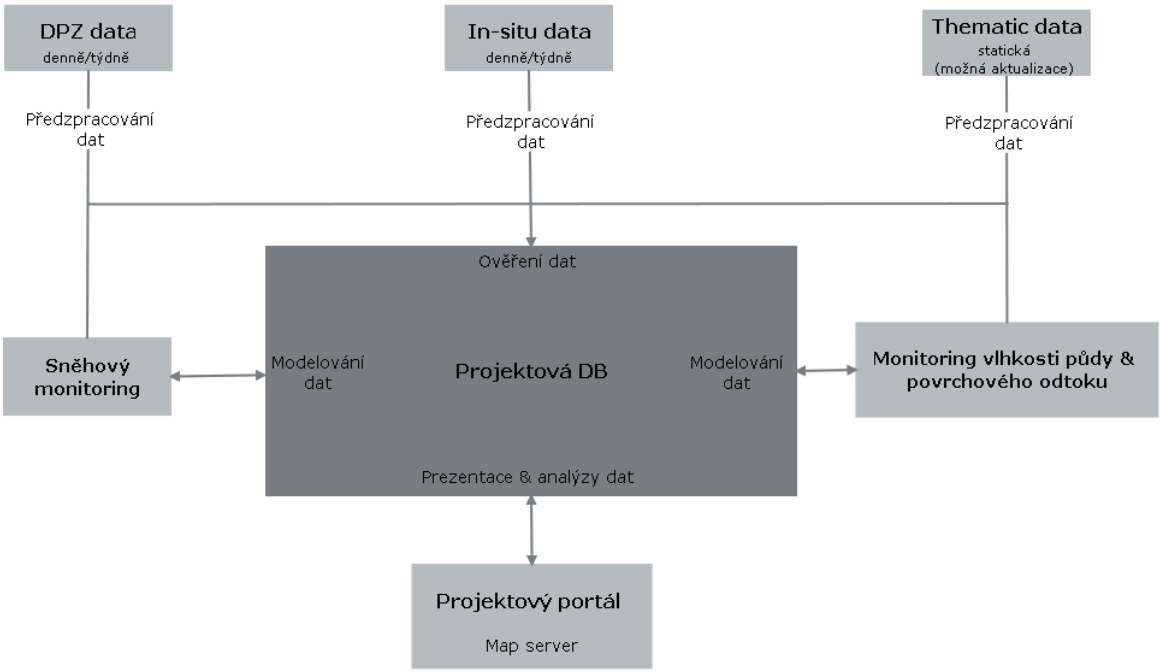
FLOREO koncept je založen na podrobné hydrologické vodní bilanci. Jedním z modelovaných procesů je i intercepce dešťových srážek na vegetaci. Pro tyto účely je využíván index listové plochy (LAI) odvozený ze snímků Terra MODIS.



Obr. 5: Odhad povrchového odtoku vody 7. 8. 2010 v mm

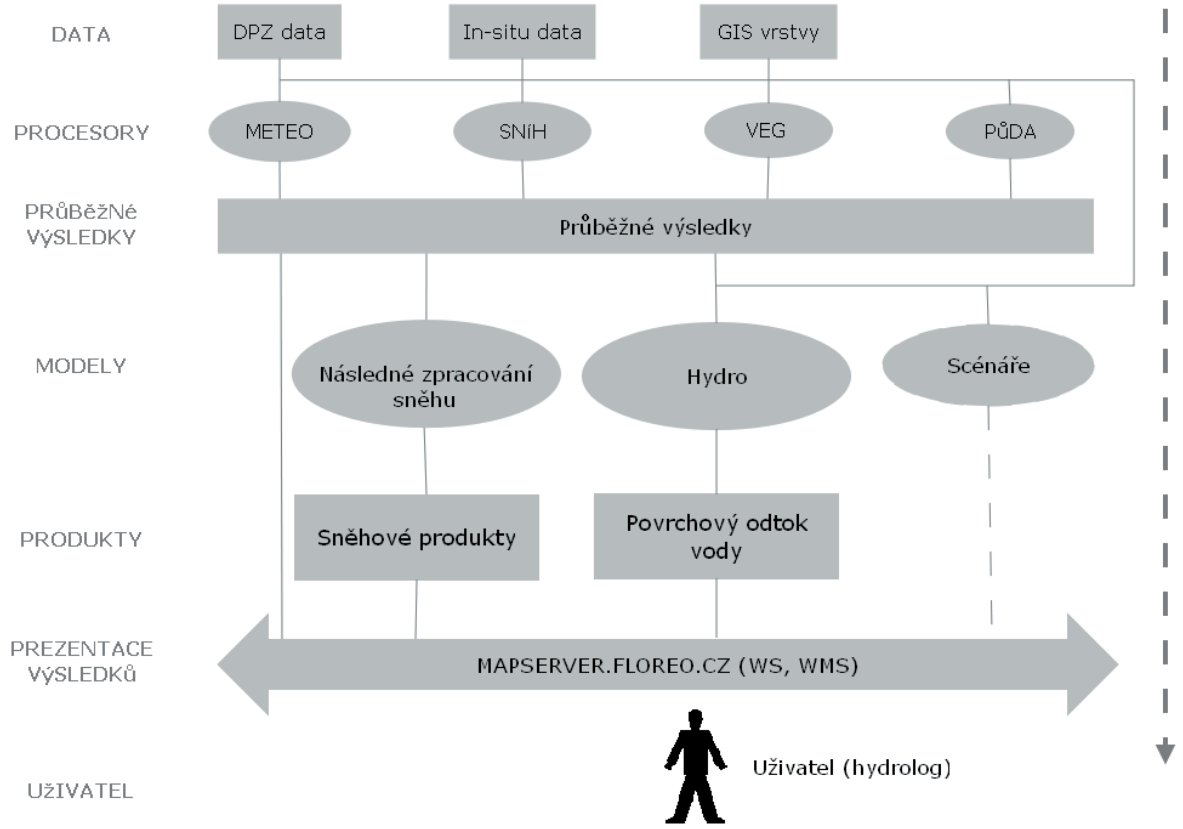
3. Implementace monitorovacího systému

Systém zpracovává data v denním režimu pomocí hydrologických modelů v diskrétních jednotkách gridu 3 km (viz Obr. 5). Celý koncept byl realizován jako nezávislý systém, který automaticky přijímá vstupní data z různých zdrojů, spouští procesory a modely a poskytuje výsledky jako produkty, které jsou ukládány do společné databáze.



Obr. 6: Celkový (obecný) databázový koncept

Kombinaci DPZ a in-situ dat v systém umožňuje technický koncept centrální databáze, do které jsou ukládána předzpracovaná data a průběžné výsledky (Obr. 6). Databáze uchovává prostorovou informaci na úrovni gridu (3 km grid) nebo na úrovni tzv. základních mapovacích jednotek (EMU), což jsou definované homogenní oblasti krajiny. Hydrologické modely načítají vstupní data z centrální databáze a výstupy modelování opět zapisují do této databáze.



Obr. 7: Koncept dat, procesů a produktů v systému

Návrh a provoz celého systému je založen na distribuované infrastruktuře. Celý systémový koncept sestává z různých vstupních dat, která jsou předzpracovávána řadou procesorů, produkujících průběžné výsledky ukládané v databázi (Obr. 7). Tyto výsledky představují vstupní data do kaskády hydrologických modelů a následného zpracování mezivýsledků o sněhu do finálních produktů. Na konec jsou sněhové produkty a produkty povrchového odtoku vody čteny z databáze a vizualizovaný na map serveru (http://mapserver.floreo.cz) nebo prostřednictvím WMS služby. Kromě realizace národního serveru pro Český hydrometeorologický ústav je tato služba dostupná také na ESA SSE (Service Support Environment).

4. Závěr

Implementace celého konceptu do monitorovacího systému demonstruje operační využití DPZ a in-situ dat pro včasné varování před hrozbou vzniku povodňového jevu. Optická data a SAR družicové technologie s vysokou frekvencí pořízení (v nejlepším případě denně) a širokým záběrem jsou důležitým prvkem takovéhoto systému. FLOREO systém je v zásadě připraven pro novou generaci misí ESA GMES Sentinel [6, 17].

Výpočet vodní bilance je realizován jako kaskáda modelů, které vyžadují doplňkové informace jak z DPZ tak také in-situ měření. V této fázi je systém implementován jako analytický nástroj pro sledování aktuálního stavu krajiny (povodí) a předpověď se provádí prostřednictvím analýz scénářů, které mohou představovat informaci o předpovědi počasí nebo informaci založenou na znalostech experta zahrnující i extrémy. Budoucí vývoj se zaměří na odhad kritických srážek. Dalším důležitým úkolem by měla být implementace analýzy neurčitostí.

Poděkování

Studie byla provedena v rámci projektu ESA PECS FLOREO, Demonstration of ESA Environments in support to "Flood Risk Earth Observation monitoring" and ESA Category-1 (ref. 4358) – MERIS.

Literatura

[1] ALLEN, R. G. – PEREIRA, L. S. – RAES, D. – SMITH, M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper. Rome: FAO. 56 pp. ISBN 92-5-104219-5.

[2] ARNOLD, J. G. – WILLIAMS, J. R. – NICKS, A. D. – SAMMONS, N. B., 1990. SWRRB – A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Management, Texas A&M University Press College Station. 255 pp.

[3] ARNOLD, J. G. – WILLIAMS, J. R. – SRINIVASAN, R. – KING, K .W. – GRIGGS, R .H., 1994. SWAT, Soil and Water Assessment Tool, USDA. Agriculture Research Service, Grassland. Soil & Water Research Laboratory, 808 East Blackland Road, Temple, TX 76502.

[4] BARTSCH, A. et al., 2007. Monitoring of Spring Snowmelt with ENVISAT ASAR WS in the Eastern Alps by combination of ascending and descending orbits. In*: Proceedings "ENVISAT Symposium 2007".* Montreux, Switzerland, pp 23–27. ISBN 92-9291-200-1 , ISSN 1609-042X.

[5] DESNOS, Y. et al., 2000. ASAR - Envisat's Advanced Synthetic Aperture Radar, Building on ERS Achievements towards Future Earth Watch Missions, In: *ESA bulletin No. 102*, pp 91–100. ISSN: 0012-9623.

[6] ESA Sentinel - 2 Team, 2010. GMES Sentinel-2 mission requirements document. ESA. 42 pp.

[7] KRYSAROVA, V. – WECHSUNG, F. – ARNOLD, J. – SRINIVASAN, R. – WILLIAMS, J., 2000. SWIM (Soil and Water Integrated Model). User Manual. Version SWIM-8. Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany. ISSN 1436-0179.

[8] MALNES, E. – GUNERIUSSEN, T., 2002. Mapping of snow covered area with RADARSAT in Norway. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vol.1, pp 683 – 685. ISBN: 0-7803-7536-X.

[9] MALNES, E. – STORVOLD, R., 2004. Near Realtime Snow Covered Area Mapping with ENVISAT ASAR Wideswath in Norwegian Mountaineous Areas, In: *Proceedings: ENVISAT and ERS Symposium*, Salzburg. ISBN 9290928832.

[10] NAGLER, T. – ROTT, H., 2000. Retrieval of wet snow by means of multitemporal SAR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, pp 754–765. ISSN 0196-2892.

[11] ROTT, H. – NAGLER, T., 1995. Monitoring temporal dynamics of snowmelt with ERS-1 SAR, International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS '95. Quantitative Remote Sensing for Science and Applications, vol. 3, pp 1747–1749. ISBN 0-7803-2567-2.

[12] SALOMONSON, V. V. – APPEL, I., 2003. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index. Remote Sensing of Environment, vol. 89, pp 351–360. ISSN 0034-4257.

[13] SIRGUEY, P. – MATHIEU, R. – ARNAUD, Y., 2008. Subpixel monitoring of the seasonal snow cover with MODIS at 250 m spatial resolution in the Southern Alps of New Zealand: Metodology and accuracy assessment. Remote Sensing of Environment, vol. 113, pp 160–181. ISSN 0034-4257.

[14] STORVOLD, R. – MALNES, E. – LAUKNES, I., 2005. Using ENVISAT ASAR wide swath data to retrieve snow covered area in mountainous regions. In: *EARSeL Proceedings 4*, 2/2005. ISSN 1729-3782.

[15] ŠIMŮNEK, J. – ŠEJNA, M. – SAITO, H. – SAKAI, M. – VAN GENUCHTEN, M. TH., 2008a. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.0, HYDRUS Software Series 3. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA. 315 pp.

[16] ŠIMŮNEK, J. – VAN GENUCHTEN, M. TH. – ŠEJNA, M., 2008b. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes. Vadose Zone Journal, 7(2): 587-600. ISSN 1539-1663.

[17] ŠOBRA, J., 2008. Nová generace družic ESA pro GMES – Sentinel 1-5. Dostupné na <http://www.czechspace.cz/cs/gmes/nova-generace-druzic-esa-vyvijenych-gmes-sentinely-1-5>.

[18] U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1972. National Engineering Handbook Hydrology Section 4, Chapter 4-10.

[19] U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1983. National Engineering Handbook Hydrology Section 4, Chapter 19.

[20] VERMOTE, E. F. – KOTCHENOVA, S. Y. – RAY, J. P., 2008. MODIS Surface Reflectance User's Guide Version 1.2, MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility (http://modis-sr.ltdri.org).

[21] WMO, 1986. Intercomparison of Models of Snowmelt. Operational Hydrology Report No. 23, WMO No. 646 ISBN 9263106460.

Kontakty na autora

1 GISAT, e-mail: lukas.brodsky@gisat.cz, katerina.spazierova@gisat.cz

2 Česká zemědělská univerzita v Praze, e-mail: kodesova@af.czu.cz

VYUŽITÍ UMĚLÝCH NEURONOVÝCH SÍTÍ A GENETICKÝCH ALGORITMŮ V MODELOVÁNÍ ČASOVÝCH ŘAD

Jan Šrejber[1], Roman Neruda[2], Martin Neruda[3]

Abstrakt

Článek prezentuje postupy a výsledky experimentů s predikcí časové řady průtoků za využití modelovacích technik založených čistě na vztahu vstupních a výstupních dat bez nutnosti znalostí fyzikálních principů modelovaného procesu jako je lineární regrese nebo při aplikaci umělé neuronové sítě (UNS). Ty umožňují modelování i nelineárních vícerozměrných vztahů.

Zájmovou oblastí bylo povodí horní Ploučnice po limnigrafickou stanici Mimoň, která sloužila jako předpovědní profil. V povodí o rozloze 268 km^2 jsou umístěny dvě srážkoměrné stanice Stráž pod Ralskem a Jablonné v Podještědí. Datové řady poskytnuté Českým hydrometeorologickým ústavem v Ústí nad Labem zahrnovaly hodinová data průtoků ze stanice Mimoň, dále srážková a teplotní data ze stanic Stráž a Jablonné za období dvou let (2006–2007). Nakonec byl přidán jako další proměnná ukazatel předchozích srážek API. Data byla rozdělena na dvě části, 90 % tvořila trénovací a 10 % testovací množina.

Byly testovány vícevrstvé perceptronové UNS různých architektur s jednou i dvěmi skrytými vrstvami, různou historií i dobou předstihu od *t+1* do *t+6*. Predikce na *t+6* hodin byla testována i na jednoduchém lineárním prediktoru, který sloužil pro nastavení měřítka úspěšnosti metod jednovrstvého perceptronu i vícevrstvé neuronové sítě. Jako kritérium úspěšnosti předpovědních modelovacích technik byl použit zejména koeficient efektivity (Nash-Sutcliffe). Pro výběr relevantních hodnot vstupů byly použity i genetické algoritmy (GA).

Klíčová slova: hydrologické modelování, neuronové sítě, genetické algoritmy

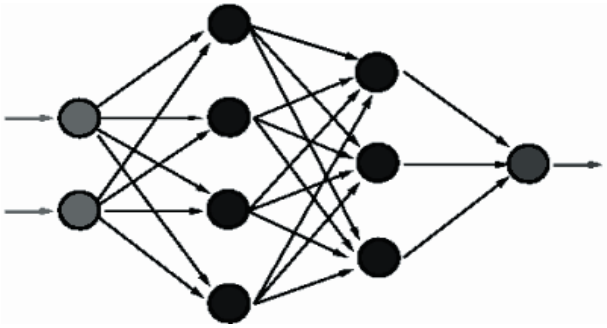
1. Úvod

Modelování přírodních tedy i hydrologických jevů se snaží o vysvětlení a matematické vyjádření fyzikálních zákonitostí. V praxi se často pro modelování procesů hydrologického cyklu využívá koncepčních deterministických modelů, které se snaží o co nejpřesnější popis těchto fyzikálních zákonitostí. Obecně se předpokládá, že čím přesněji jsou tyto vztahy v modelu popsány, tím jsou i výsledky modelu přesnější.

Na druhé straně existují modely, které jsou založeny čistě na vztahu vstupních a výstupních dat bez nutnosti znalostí fyzikálních principů modelovaného procesu. Spoléhají se na vypovídající schopnosti vstupních a výstupních dat při řešení daného problému. Příkladem jsou lineární regresní modely nebo umělé neuronové sítě umožňující modelování i nelineárních vícerozměrných vztahů např. transformace srážky na odtok. Zároveň umožňují i extrapolaci tohoto procesu v čase, tj. konstrukci předpovědních modelů.

2. Umělé neuronové sítě (UNS)

Umělá neuronová síť je výpočetní model sestavený na základě abstrakce vlastností biologických nervových systémů. Základní stavební jednotkou UNS je tedy podobně jako u sítě biologické neuron, resp. jeho matematický model – umělý neuron. Hlavní funkcí umělého neuronu, je transformace vstupních signálů do výstupního a jeho distribuce dalším neuronům.



Obr. 1*:* Schéma vícevrstvé perceptronové sítě

2.1 Učení UNS

K základním vlastnostem neuronových sítí je jejich schopnost učit se. Učení (trénování) UNS je analogický termín pro kalibraci koncepčních modelů. Jde o dynamický proces, při kterém dochází k postupné modifikaci souboru parametrů sítě podle zvoleného učícího algoritmu. Cílem tréninkového procesu je nalézt takový soubor parametrů, který nejlépe odpovídá předkládaným vzorům. V případě predikce časových řad předkládáme neuronové síti data z minulosti s nadějí, že objeví skryté závislosti a bude schopna jich využít pro předpovídání do budoucnosti.

Síť je naučena pokud je splněna předem zadaná podmínka (např. konečný počet iterací, pokles celkové chyby pod předem stanovenou mez atp.). Kriteriem může být např. střední kvadratická chyba, směrodatná odchylka, koeficient determinace apod.

Algoritmů učení je celá řada. V našem případě jsme pro učení dopředné perceptronové sítě použili algoritmus zpětného šíření chyby (BPG - Back-propagation of Gradient Algorythm). Princip tohoto algoritmu učení lze zjednodušeně popsat následovně. Do sítě postupně vstupuje vektor vstupních parametrů. Pro každý vzor je a na základě nastavení vah proveden výpočet. Výsledek je porovnán s požadovanou hodnotou a je vypočtena chyba vzoru. Následně pak probíhá zpětně (tj. ve směru negativního gradientu chybové funkce) postupný výpočet korekcí jednotlivých vah. Do opravené sítě je znovu přiveden vstupní vektor a proces se opakuje. Jde o iterativní proces s cílem nalézt minimum celkové chybové funkce.

2.2. Princip tvorby modelu UNS

Učení NS začíná vytvořením vhodné trénovací množiny vzorů tj. množinu vstupních a korespondujících požadovaných (výstupních) hodnot veličin. Na jejich kvalitě a dostatečném množství závisí úspěšnost řešení daného problému. Praxe ukazuje že je vhodné vstupní časové řady podrobit statistické analýze a použít některé optimalizační metody pro získání vhodných trénovacích dat. Část vytvořené tréninkové množiny ponecháme pro testování, tzn. nepředkládáme tuto část časové řady při učení, ale použijeme ji pro testování naučenosti sítě, schopnosti generalizovat. Kontrolujeme tak kvalitu sítě na jiných datech, než které byly síti předkládány při učení.

Někdy bývá pro přesnější predikci vhodné dodat i doplňkové informace, které by mohly mít vazbu na předpovídanou veličinu. V případě našich experimentů na Ploučnici jsme např. k časovým řadám srážek a průtoků přidali agregovanou hodnotu ukazatele předchozích srážek (API).

Další fází je volba topologie sítě, tedy určení počtu skrytých vrstev a počtu neuronu v těchto vrstvách. Úkolem skrytých vrstev obecně je zvýšení aproximačních vlastností UNS jako celku. Stanovení počtu skrytých vrstev a neuronů je věcí každého řešitele.

Pro správný chod koncepčních hydrologických modelů bývá důležité i nastavení počátečních hodnot parametrů. Analogicky u UNS může ovlivnit výsledek trénovacího procesu nastavení

synaptických vah na počátku učení. Váhy mohou být nastaveny např. explicitně, ale často se používá jejich náhodné nastavení. Podobně jako vhodné stanovení topologie, je i počáteční nastavení synaptických vah věcí experimentální.

3. Predikce průtoku na řece Ploučnici – experimentální část

Experimenty s predikcí časové řady průtoků pomocí modelu umělých neuronových sítí byly zkoušeny na povodí horní Ploučnice po profil limnigrafické stanice Mimoň, která sloužila jako předpovědní profil. V povodí o rozloze 268 km^2 jsou umístěny dvě srážkoměrné stanice Stráž pod Ralskem a Jablonné v Podještědí (viz. Obr. 2) Datové sety poskytnuté Českým hydrometeorologickým ústavem v Ústí nad Labem zahrnovaly hodinová data průtoků ze stanice Mimoň, dále srážková a teplotní data ze stanic Stráž a Jablonné za období dvou let (2006–2007). Data byla rozdělena na dvě části, 90 % tvořila trénovací a 10 % testovací množina.

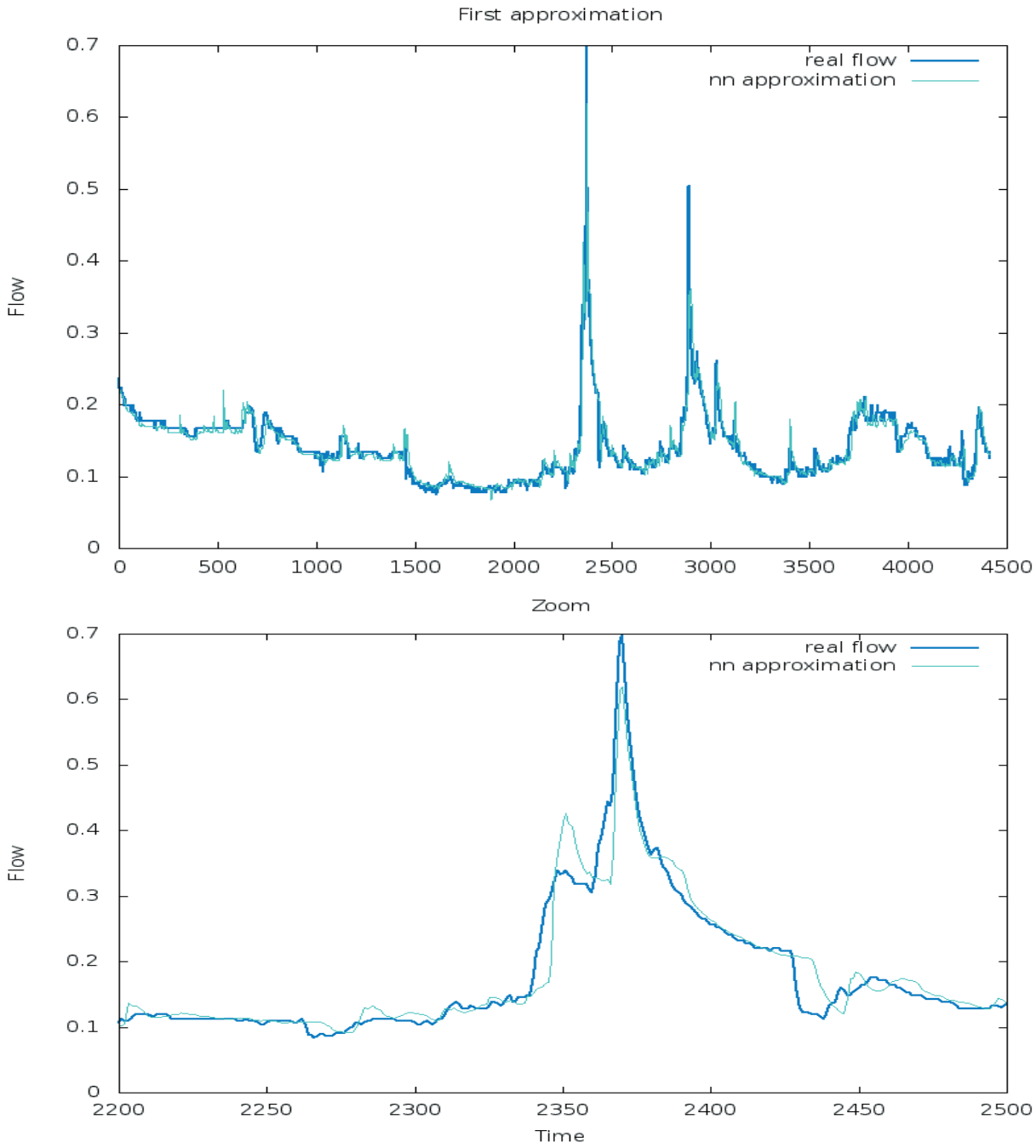


Obr. 2: Zájmová oblast povodí Ploučnice

Při těchto experimentech jsme počítali s 1, 2 a 3 hodinovou historií dat. Predikci průtoku jsme zpočátku počítali na *t+1* a *t+2* hodiny. Byla použita vícevrstvá dopředná síť typu perceptron s algoritmem učení BPG a jeho modifikace - gradientní učení s momentem. Byly zkoušeny různé topologie sítí s jednou či dvěma skrytými vrstvami a s různým počtem neuronů v těchto vrstvách (5-10 v první a 2-4 v druhé skryté vrstvě). Výsledky experimentů na trénovacích a testovacích datech shrnují následující tabulky a grafy.

Tab 1: Výsledky experimentů na trénovacích datech

Network architecture	Correlation coefficient	Mean absolute error	Root mean squared error	Relative absolute error %	Root relative squared error %
1 hour history					
3;5;1	0.9991	0.0394	0.0931	4.3732	4.5065
3;10;1	0.9992	0.0428	0.0938	4.759	4.5363
3;5;2;1	0.9991	0.0394	0.0931	4.3732	4.5065
2 hour history					
6;5;1	0.9997	0.0246	0.0575	2.9193	3.1496
6;10;1	0.9997	0.0253	0.0562	3.0022	3.0761
6;5;2;1	0.9997	0.0263	0.0597	3.1195	3.2687
6;10;4;1	0.9996	0.0267	0.0629	3.1719	3.4446
3 hour history					
9;5;1	0.9997	0.0629	0.0748	7.1259	3.7007
9;10;1	0.9997	0.0581	0.0703	6.5807	3.4809
9;5;2;1	0.9997	0.0644	0.0766	7.2986	3.7906
9;10;4;1	0.9996	0.0682	0.0817	7.7289	4.0442



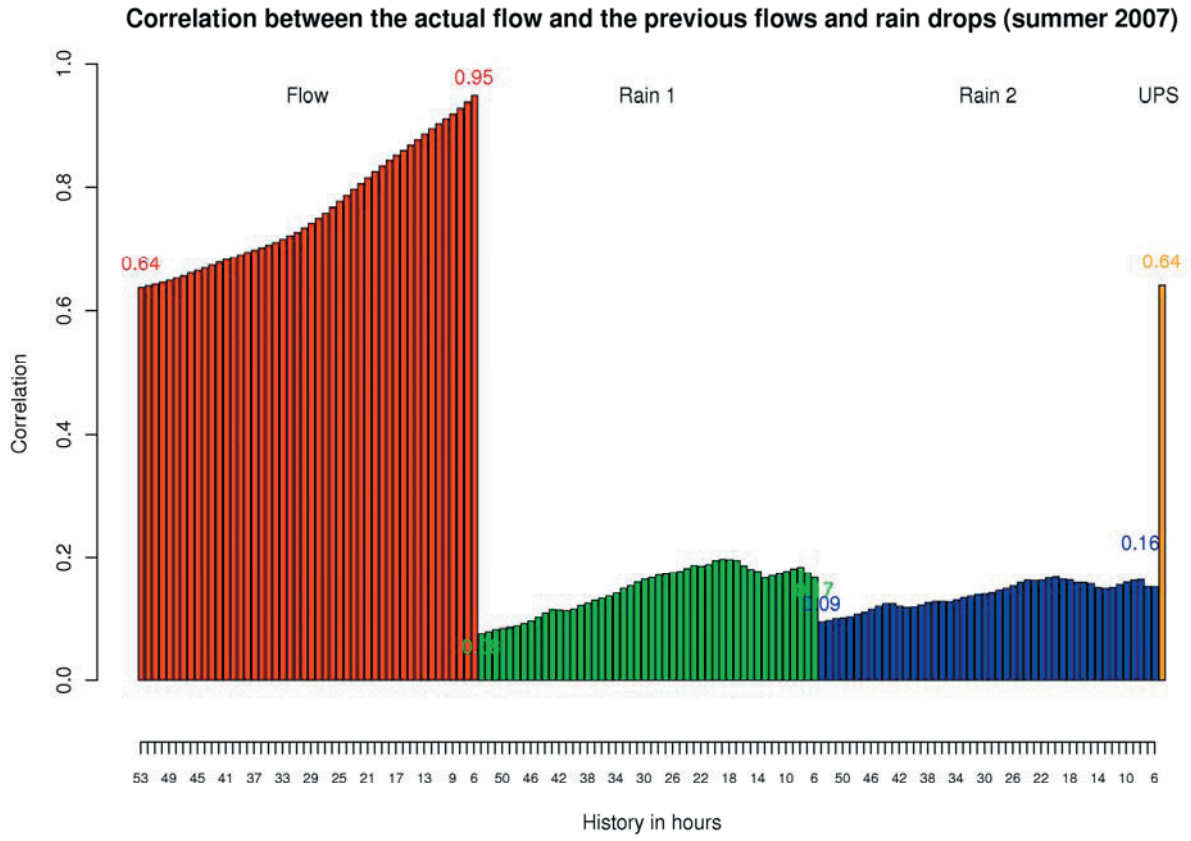
Obr. 3: Grafické porovnání předpovídaných a měřených průtoků *t+2*. Hodnoty průtoků v grafu jsou transformovány do intervalu <0,1>

Porovnáme-li absolutní chyby na trénovacích datech, nejlepší výsledky dosáhly sítě s 2hodinovou historií. Naopak velké sítě vykazují větší chybu na testovacích datech, což může ukazovat na nižší schopnost generalizace. Také se prokázalo, že sítě s 3hodinovou historií vyžadují více času na učení, jelikož obsahují více parametrů, které se musí stanovit během učení. Nicméně všechny sítě úspěšně zvládly proces učení u této úlohy.

V další fázi jsme vyzkoušeli předpovídat na delší časový úsek dopředu. Predikce na *t+6* hodin byla testována na jednoduchém lineárním prediktoru, který sloužil pro nastavení měřítka úspěšnosti metod, jednovrstvém perceptronu a vícevrstvé neuronové sítě. Kritériem byl v tomto případě koeficient efektivity (EC). Výsledné hodnoty koeficientu ukazují, že

vícevrstvý perceptron (0,94) je úspěšnější než jednoduchý perceptron (0,91), který je dokonce horší než lineární predikce (0,92). Dá se říci, že výsledky se od sebe neliší výrazně.

Poslední experiment sloužil k získání informací o tom, jaké historické údaje jsou pro predikci důležité. Míru důležitosti jsme zjišťovali korelací mezi výstupní hodnotou průtoku v čase *t+6* a historickými hodnotami průtoku a srážek a ukazatele UPS. Výsledky tohoto zkoumání ukazuje graf na Obr. 4. Je vidět, že velké míry korelace dosahují předchozí hodnoty průtoku, přičemž míra závislosti klesá s počtem hodin do historie (od 0,95 do 0,64). Podobnou míru závislosti 0,64 má i agregovaný ukazatel předchozích srážek (UPS). Oproti tomu je míra korelace průtoku na srážková historická data poměrně malá (kolem 0,16). Zajímavé je, že korelace je největší pro hodnoty srážek kolem časů *t-18*. Nakonec dodejme, že korelace postihuje především lineární závislost veličin, přičemž problém srážko-odtokových vztahů je nelineární.



Obr. 4: Grafické znázornění korelace mezi predikovanou hodnotou na *t+6* a historickými vstupy průtoků a srážek

4. Genetické algoritmy

Pro výběr relevantních hodnot vstupů byly použity i genetické algoritmy (GA). Genetické algoritmy jsou vyhledávací algoritmy založené na základních principech evoluční biologie (přirozený výběr, křížení, mutace). Principem je proces postupného vylepšování populace jedinců (v našem případě vstupních hodnot jednotlivých časových řad) opakovanou aplikací genetických operátorů, který vede k výběru takových jedinců, kteří lépe vyhovují stanoveným podmínkám než jedinci původní.

GA byl použit jako meta-učící algoritmus, který vybere relevantní vstupy s ohledem na úspěšnost evolučně optimalizovaných neuronových sítí. GA pracuje s populací binárních vektorů, které definují masku výběru vstupů (1 na daném místě znamená, že vstup je vybrán). Byly použity standardní genetické operátory: dvoubodové křížení, náhodnou bitovou mutaci a turnajovou selekci. Ohodnocovací funkce každého jedince spočívá v několika iteracích postupu, který vytvoří a otestuje odpovídající neuronovou síť. V každém jednotlivém ověření nejprve fixujeme počet skrytých neuronů (náhodně mezi 2 a 32) a pak zvolíme vstupní neurony na základě příslušné bitové masky. Váhy sítě jsou náhodně inicializovány, síť se pak po určený čas učí algoritmem zpětného šíření chyby a nakonec otestuje na testovacích datech. Po několika tisících generacích genetického algoritmu je vybrán nejlepší jedinec – vstupní filtr - který během evoluce vznikl. Celá procedura je poněkud náročná na výpočet a na běžném desktopovém PC znamená několik hodin až dnů výpočtů. Z tohoto důvodu byl pro tyto experimenty použit vícejádrový sálový počítač.

5. Závěr

Jedním z hlavních úkolů v hydrologii je vývoj a aplikace matematických modelů schopných správně simulovat a predikovat reakci povodí na spadlou srážku. Jak již bylo řečeno neuronové sítě jsou výborným nástrojem k rychlému rozpoznání závislosti mezi vstupními a výstupními daty.

Obecně můžeme konstatovat, že použité modely neuronových sítě přinášejí oproti lineárním modelům mírné zlepšení.

Tab. 2: Výsledky experimentů

TABLE 2: THE FINAL EXPERIMENT RESULTS

model	EC	MAE	MSE_{pd}	time
last value estimation	0.938	0.1036	0%	0:00
linear regression	0.937	0.1240	−1%	0:00
multilayer perceptron	0.944	0.1252	10%	0:01
evolved multilayer perceptron	0.947	0.1200	16%	0:18

Tabulka 2 ukazuje porovnání úspěšnosti jednotlivých metod. V prvním řádku je pro porovnání odhad průtoku pouze na základě předcházející hodnoty, následuje lineární regresní model. V třetím řádku je vícevrstevný perceptron s jednou skrytou vrstvou předpovídající relativní odtok, který dával doposud nejlepší výsledky. Použitím vstupních filtrů založených na GA se výsledky zlepšily o dalších přibližně 5 %. Jako kritérium byl opět použit koeficient efektivity (EC). Zlepšení je patrno na procentuálním vyjádřením střední kvadratické chyby (MSE_{pd}).

Z experimentů je patrné, že modelu UNS lze úspěšně použít jako alternativní metodu pro krátkodobou predikce průtoků. Podmínkou je dostatečné množství a rozsah kvalitních vzorů pro trénování sítě a nalezení optimálního modelu UNS. Výsledky také ukazují, že použití optimalizačních metod založených na GA pro výběr relevantních vstupů z časových řad přispívá k úspěšnosti modelu UNS.

V současné době chceme využít zkušenosti z experimentů na Ploučnici pro vyžití modelů neuronových sítí pro předpověď průtoků v „on-line“ režimu jako alternativy k již provozovanému srážko-odtokovému modelovacímu systému Aqualog na povodí Smědé pramenící v Jizerských horách. V tomto povodí dochází k častým povodňovým situacím s rychlým průběhem. Předpokládá se, že vhodný model UNS bude sloužit k předpovědi

průtoků za využití reálných datových řad již provozovaného systému. Domníváme se, že to v některých situacích může zlepšit úspěšnost hydrologických předpovědí. Nasazení dvou koncepcí modelovacích technik na jedno povodí může přinést i zajímavé porovnání z hlediska vhodnosti jejich použití.

Literatura

[1] ASCE Task Committee in Application of Artificial Neural Networks in Hydrology, 2000. Artificial Neural Networks in Hydrology II: Hydrologic Applications. In: *Journal of Hydrologic Engineering.* April 2000, pp 124-137.

[2] NACHÁZEL, K. – STARÝ, M. – ZEZULÁK, J. a kol., 2004. Využití metod umělé inteligence ve vodním hospodářství. Academia, Praha. 318 s. ISBN 80-200-0229-4

[3] PAŠČENKO, P., 2009. Computational intelligence models for hydrological predictions, [Matematicko-fyzikální fakulta UK, magisterská práce]. 63 s.

[4] ŠÍMA, J. – NERUDA, R., 1996. Teoretické otázky neuronových sítí. Matfyzpress, Praha. 390 s. ISBN 5-93108-016-3.

[5] TUČKOVÁ, J., 2003. Úvod do teorie a aplikací umělých neuronových sítí. Vydavatelství ČVÚT, Praha. ISBN 80-01-02800-3.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ústí nad Labem, e-mail: srejber@chmi.cz

2 Ústav informatiky AV ČR, Praha; e-mail: roman.neruda@gmail.com

3 Fakulta životního prostředí, Univerzita J. E. Purkyně, Ústí n. L.; e-mail: martin.neruda@ujep.cz

OPTIMALIZÁCIA PARAMETROV HYDROLOGICKÉHO TRANSFORMAČNÉHO MODELU POMOCOU UMELÝCH NEURÓNOVÝCH SIETÍ

Peter Šúrek[1], *Ján Szolgay*[1]

Abstrakt

Hydrologické transformačné modely sú výkonné nástroje vodného hospodárstva, ktoré simulujú transformáciu povodňovej vlny. To umožňuje predpovedanie prietoku v nižšie položenom profile, ak je známy priebeh povodňovej vlny na vstupe do simulovaného riečneho úseku. Príspevok navrhuje nový spôsob simulácie transformácie povodňovej vlny multilineárnym modelom kaskády lineárnych nádrží (KLN). V mnohých prácach bolo preukázané, že súčin parametra *k*, ktorý má rozmer čas a počtu nádrží *n* je rovný hodnote postupovej doby, ktorá odzrkadľuje morfologické a hydraulické charakteristiky toku. Postupová doba je premenlivá, závislá na činiteľoch ako prietok, brehová vegetácia , ale aj tvar povodňovej vlny. V práci bol zostavený koncept, v ktorom je daný model parametrizovaný umelou neurónovou sieťou (UNS). Výstupom použitej UNS sú optimálne hodnoty parametra *k* modelu KLN. Analýza výsledkov transformácie ukázala, že navrhnutý koncept zatiaľ dosahuje lepšiu výkonnosť transformačného modelu KLN ako doterajšie parametrizácie.

Klíčová slova: riečny model, umelé neurónové siete, hybridný model, postupová doba

1. Úvod

V štúdii sa zaoberáme simuláciou transformácie povodňových vĺn v otvorených korytách, ktorú tu chápeme ako proces zmeny tvaru povodňovej vlny pri jej postupe určitým riečnym úsekom. Tento proces je pomerne dobre opísateľný matematickými modelmi, ktoré umožňujú napr. predpovedať povodňové prietoky v určitom riečnom profile. Takto zostavený systém umožňuje riadenie vodohospodárskych sústav v reálnom čase a zefektívňuje tak napr. výrobu elektrickej energie, ale uplatňuje sa i pri tvorbe protipovodňovej ochrany ako súčasť systému včasného varovania.

Postupová doba je dôležitým parametrom transformácie prietokovej vlny, ktorú tu definujeme ako čas, za ktorý postúpia charakteristické body povodňovej vlny (napr. vrcholy alebo ťažiská) riečnym úsekom. Morfologické a hydraulické charakteristiky simulovaného riečneho úseku a tvar prítoku sú premietnuté do postupovej doby transformovanej povodňovej vlny. Tak ako sa morfologické a hydraulické charakteristiky menia s výškou hladiny a teda aj s prietokom v koryte, mení sa aj hodnota postupovej doby.

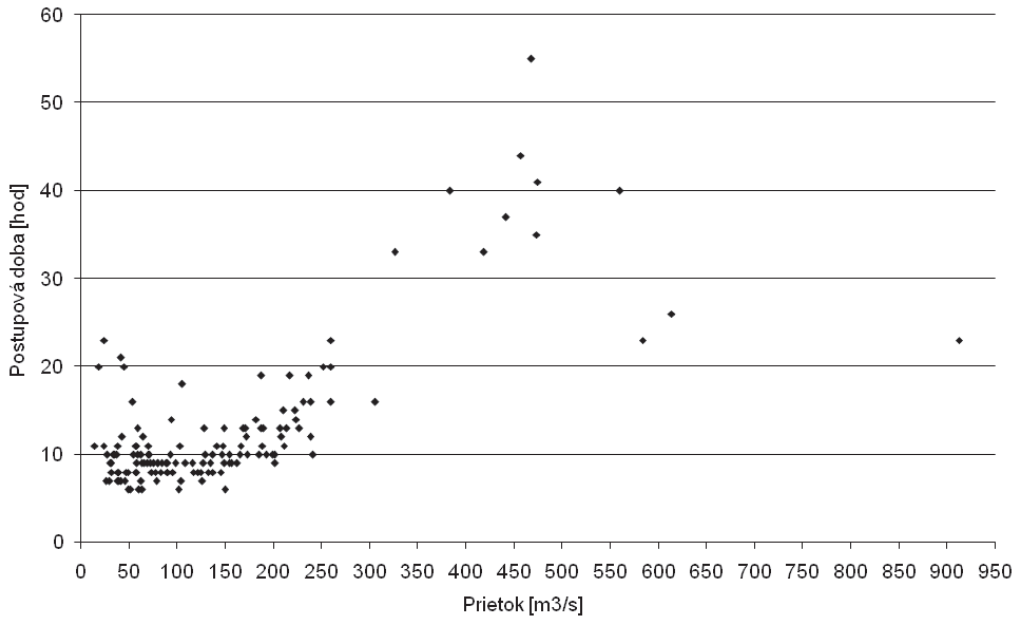
Prevrátenou hodnotou postupovej doby je celerita (rýchlosť postupu prietokovej vlny). Price [6] upozornil na závislosť celerity od prietoku. Všeobecný tvar tejto závislosti popísal ako dve mocninové funkcie spojené prechodovou krivkou v tvare S (Obr. 1).

Danáčová [1] analýzou postupových dôb prietokových vĺn potvrdila tvar závislosti opísaný Pricom [6] na rieke Morava (Obr. 2). Avšak pomerne veľký rozptyl bodov nás pri predpovedaní postupovej doby motivuje popri prietoku ako závislej premennej zohľadniť ďalšie faktory ako napr. vplyv bočných prítokov, sklon vodnej hladiny, alebo drsnosti koryta



Obr. 1: Všeobecný tvar závislosti celerity vlny (prevrátenej hodnoty postupovej doby) od prietoku opísaný v Price [6].

.

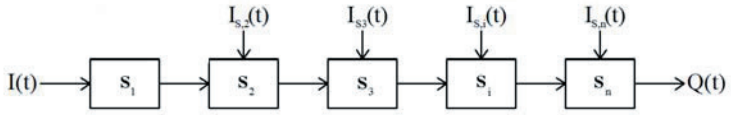


Obr. 2: Závislosť postupovej doby od prietoku na rieke Morava v úseku Moravský Svätý Ján – Záhorská Ves [1].

2. Transformačný model KLN

Na základe prístupu k popisu transformácie prietokových vĺn sa hydrologické modely rozdeľujú do dvoch kategórií: hydraulické a hydrologické. Hydraulický prístup detailne opisuje správanie sa transformácie prietokov v koryte toku pomocou parciálnych diferenciálnych rovníc. Tento prístup vyžaduje veľké množstvo vstupných údajov napr. opis geometrie toku. Parametre týchto modelov majú fyzikálny význam, môžu byť priamo merané alebo vypočítané, a teda parametrizácia modelu nevyžaduje údaje o správaní sa simulovaného úseku v minulosti. Hydrologický prístup je v kontraste s hydraulickým prístupom založený na štúdiu správaní modelovaného javu v minulosti. Parametre modelov nie sú väčšinou priamo merateľné, ale sa získavajú kalibráciou týchto modelov zo zodpovedajúcich si vstupných a výstupných radov historických údajov. Medzi najrozšírenejšie hydrologické modely patria metódy Muskingum a Kalin-Miljukov [3].

V tejto štúdii bol použitý hydrologický transformačný multilineárny model kaskády lineárnych nádrží (KLN), ktorý reprezentuje schéma na Obr. 3. Model KLN predstavuje rozšírenie pôvodného modelu Kalinina a Miljukova [3] o bočné prítoky do každej nádrže v kaskáde.



Obr. 3: Schéma modelu KLN, kde I(t) predstavuje vstupný prítok, $I_{s,i}(t)$ bočné prítoky, Q(t) výstupný prietok z modelu a S_i je stavová veličina reprezentujúca objem vody v i-tej nádrži kaskády.

Každá nádrž okrem prvej má prítok z predchádzajúcej nádrže. Vstup do modelu predstavuje hydrogram v hornom profile modelovaného úseku a výstup z kaskády je zároveň výstupom z riečneho úseku.

Stavové rovnice modelu boli odvodené ešte v práci Szolgay [7], kde sa vychádzalo z rovnice kontinuity a statickej relácie lineárnej nádrže. Odvodené stavové rovnice sú zapísané v tvare:

$$\overline{S}(a+1) = \overline{\Phi}(a+1,a)\,\overline{S}(a) + \overline{\Psi}(a+1,a)\,\overline{I}(a+1,a) \quad (1)$$

$$Q(a+1) = \overline{H}(a)\,\overline{S}(a+1) \quad (2)$$

kde $\overline{S}(a)$, $\overline{S}(a+1)$ je vektor objemov jednotlivých nádrží v časoch *a* , *a+1*.

Q(a+1) je výstup zo systému, matica H je v danom prípade vektor H = [0,0,0,... 1/k] dĺžky *n*, Φ a Ψ sú prechodové matice rozmeru *n* x *n*.

Parametrami modelu sú počet nádrží v kaskáde *n* a parameter *k*, ktoré boli v minulosti počas modelovania považované za konštantné. Kalinin a Miljukov [3] naznačili, že súčin *n* a *k* je úmerný hodnote postupovej doby. Použiteľnosť takto zostrojeného modelu pre rieky s premenlivou postupovou dobou je však obmedzená.

Premenlivosť postupovej doby je možné zohľadniť použitím princípov multilinearity, ktorý navrhol Kundzewicz [4]. Ide o kombináciu dvoch koncepcií, operátora na rozdelenie vstupného signálu do modelu na čiastkové signály a množinu lineárnych transformačných submodelov, ktoré sa podieľajú na transformácii vstupu na výstup zo systému. Nelineárny proces sa potom simuluje množinou lineárnych submodelov. V modeli KLN sa jednotlivé lineárne submodely líšia hodnotou parametra *k*. Túto hodnotu je možné viazať na ovplyvňujúce faktory tak, aby najlepšie vystihovali stav opisovaného javu. Takýto koncept bol použitý napr. aj v Szolgay [8] a Danáčová [2], kde multilineárny koncept modelu KLN bol identifikovaný závislosťou $k=f(Q_{in})$. Išlo o sériu lineárnych modelov, v ktorých sa parameter *k* menil v závislosti na prítoku. V kontraste s predchádzajúcimi prácami je v tejto štúdii multilineárny koncept modelu KLN parametrizovaný umelou neurónovou sieťou, ktorej výstup bol hodnota parametra *k*.

3. Metóda

V práci Danáčová [1] sa parameter *k* modelu KLN menil v závislosti na vstupnom prietoku do simulovaného úseku. Vplyv iných faktorov bol zanedbaný. V Šúrek [10], na ktorú nadväzuje súčasná štúdia, bol transformačný model parametrizovaný pomocou UNS, avšak práce sa líšia samotnými vstupmi do UNS. Vstupy do UNS použitej v tejto štúdii boli podrobne rozpísané v predchádzajúcej kapitole. UNS zo štúdie Šúrek [10] bola zostrojená pre nasledovné vstupy:prietok v profile do modelovaného úseku a rýchlosť nárastu prietoku transformovanej vlny.

Táto štúdia si dáva za cieľ zlepšiť parametrizáciu modelu zabudovaním umelej neurónovej siete (UNS) do transformačného modelu a zohľadnením ďalších podmieňujúcich činiteľov premenlivosti postupovej doby. UNS v modeli nahrádza doposiaľ používanú regresnú závislosť k=f(Q).

V práci je použitá viacvrstvová dopredná neurónová sieť (Feed Forward Neural Network, FFNN), ktorá je zložená z troch typov vrstiev, do ktorých sú neuróny zoskupované:vstupná, skrytá a výstupná vrstva. UNS bola natrénovaná tak, aby odhadovala pre rôzne prietokové stavy optimálnu hodnotu parametra *k*. UNS zohľadňovala vplyv sezóny v roku, vplyv bočných prítokov do simulovaného prítoku ako aj vplyv tvaru povodňovej vlny. Ako vstupy do UNS boli zvolené:

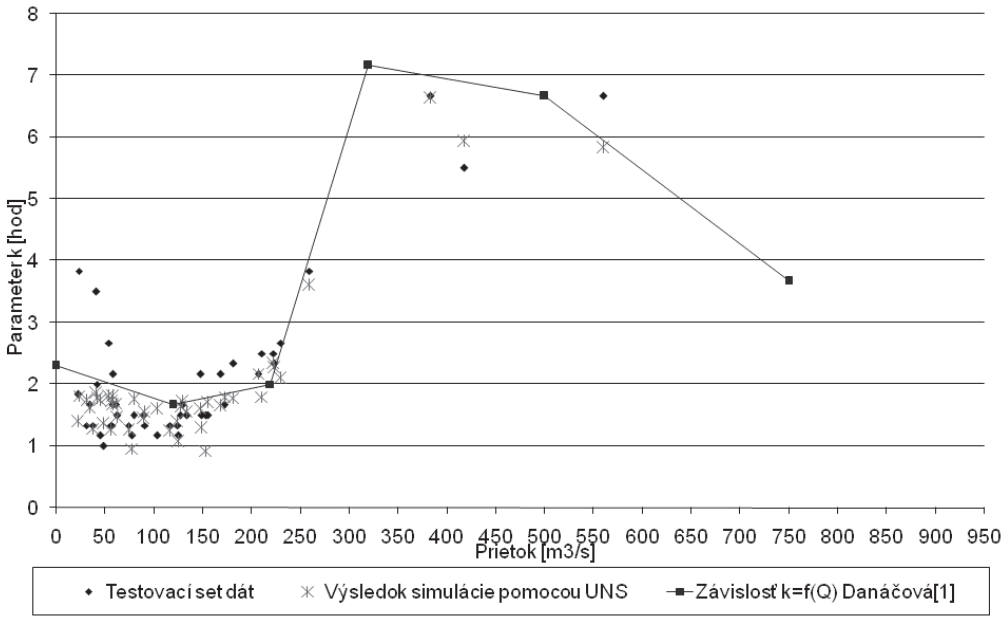
– údaje o prietoku na vstupnom profile do modelovaného úseku s niekoľko hodinovou históriou, aby mala UNS informáciu o tvare transformovanej vlne,

– údaje o prietoku na prítoku Zaya s niekoľko hodinovou históriou.

Na overenie funkčnosti navrhnutého konceptu boli použité hodinové údaje z riečneho úseku medzi vodomernými stanicami Moravský Svätý Ján – Záhorská Ves na toku Morava z obdobia 1992-2002. Rovnaké údaje boli použité v práci Danáčová [1]. To umožnilo porovnanie výkonnosti týchto dvoch koncepcií. Ako porovnávacie kritérium presnosti simulácie bol použitý Nash-Sutcliffov koeficient [5].

4. Prezentácia a analýza výsledkov

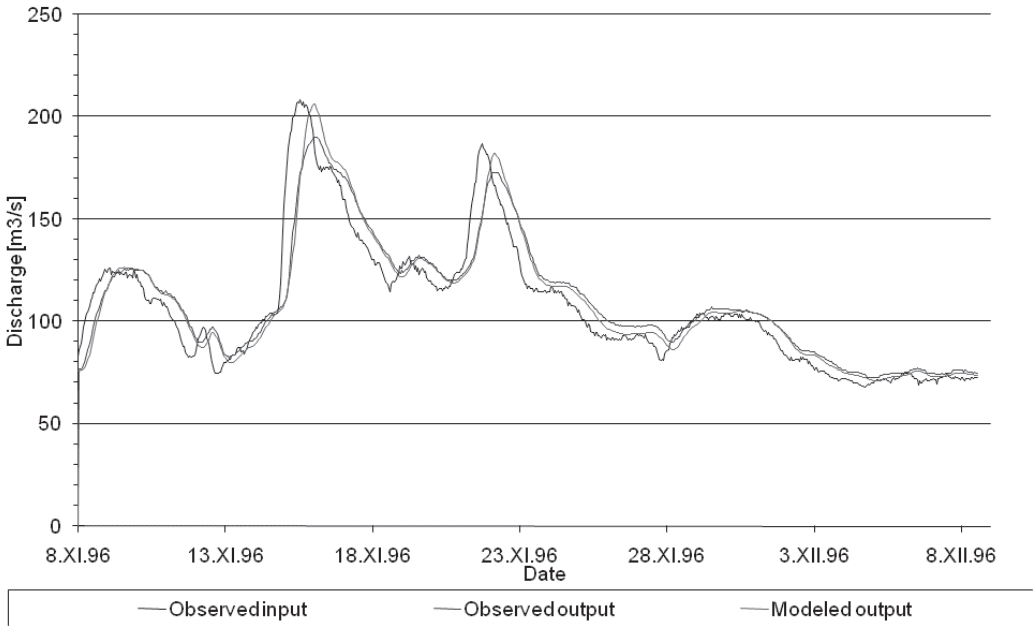
V prvej fáze bola zostrojená UNS, ktorej výstupom sú optimálne hodnoty parametra *k*.



Obr. 4: Výsledky validácie siete a porovnanie schopnosti siete vystihnúť postupovú dobu so reťazenou závislosťou, ktorá bola odhadnutá v práci Danáčová [1].

Sieť lepšie odhaduje hodnoty postupovej doby v porovnaním s regresnou závislosťou [1], kde je postupová doba viazaná iba na hodnoty prietokov. Pri predpovedaní postupovej doby s použitím UNS bola dosiahnutá hodnota kritéria strednej kvadratickej chyby MSE (Mean Squared Error) 10,02 $m^3.s^{-1}$, zatiaľ čo pri použití reťazenej závislosti bola hodnota MSE 13,13 $m^3.s^{-1}$.

Po procese učenia UNS, mohla byť následne sieť napojená na multilinéarny model.



Obr. 5: Priebeh verifikácie prietokovej vlny z obdobia od 8.11.1996-9.12.1996, pri použitý model KLN so vstavanou UNS. Nash-Sutcliffov koeficient dosiahol hodnotu 0, 978.

Tab. 1: Porovnanie dosiahnutých hodnôt Nash-Sutcliffových koeficientov s predchádzajúcimi prácami.

		Predchádzajúce práce		
Obdobie	Kulminácia [$m^3 s^{-1}$]	Dánačová [1]	Šúrek [10]	Súčastná práca
06.06.1992 - 19.06.1992	120,9	0,942	0,952	0,921
13.01.1993 - 14.02.1993	154,7	0,921	0,934	0,935
08.11.1996 - 09.12.1996	207,4	0,976	0,974	0,978
20.12.1995 - 06.01.1996	212,7	0,995	0,929	0,948
29.08.1995 - 13.09.1995	222,8	0,982	0,982	0,982
07.12.1993 - 01.03.1994	251,2	0,987	0,987	0,986
17.11.1991 - 19.11.1991	259,5	0,989	0,957	0,959
24.05.1994 - 06.06.1994	272,6	0,963	0,983	0,944
04.09.1996 - 09.11.1996	305,8	0,983	0,976	0,960
15.10.1998 - 05.12.1998	438,4	0,983	0,985	0,969
09.02.1997 - 18.03.1997	457	0,985	0,989	0,976
11.03.1993 - 06.05.1993	470,6	0,958	0,964	0,946
20.01.1992 - 27.04.1992	583,5	0,984	0,980	0,989
15.03.1996 - 12.06.1996	622,4	0,974	0,973	0,975
Priemer:		0,973	0,969	0,962

V Tab. 1 sú pre porovnanie uvedené získané hodnoty Nash-Sutcliffoveho koeficientu z predchádzajúcich prác Danáčová [1] a Šúrek [10].

Pri simulovaní transformácie povodňovej vlny dosahoval navrhnutý koncept pomerne vysokú presnosť. Avšak v porovnaní s prácou Danáčová [1] dosiahol horšie hodnoty Nash-Sutcliffových koeficientov.

5. Záver

V práci sa overovala použiteľnosť neurónových sietí na parametrizáciu riečneho transformačného modelu KLN.

Analýza výsledkov potvrdila, že UNS sú mimoriadne vhodné na predpovedanie samotnej postupovej doby prietokovej vlny (Obr. 4).

Navrhnutý koncept parametrizácie riečneho transformačného modelu KLN pomocou UNS nedosahoval presnosť simulácie modelu z predchádzajúcej práce Danáčová [1]. Autori článku predpokladajú, že celkový potenciál parametrizácie KLN pomocou UNS ešte nebol dostatočne využitý. Zlepšenie na riečnych úsekoch, kde model KLN parametrizovaný reťazenou závislosťou nedosahuje uspokojivé výsledky.

Spracovanie štúdie bolo podporené Agentúrou na podporu vedy a techniky prostredníctvom finančnej podpory č. APVV-0443-07 a APVV-0012-07.

Literatúra

[1] DANÁČOVÁ, M., 2005. Hodnotenie zmien transformácie vĺn na dolnej Morave. [Diplomová práca], Slovenská technická univerzita v Bratislave.

[2] DANÁČOVÁ, M. – SPÁL, P. – SZOLGAY, J., 2008. Analýza citlivosti multilineárneho transformačného modelu KLN na voľbu počtu nádrží a súčiniteľa lineárnej nadrže. Acta Hydrologica Slovaca, ročník 9, s. 24 – 38.

[3] KALININ, G.P. – MILJUKOV, P. L., 1957. O raschote neustanovivshegosya dvizhenia vodi v otkritich ruslach (in Russian). Meteorologia i gidrologia, 10, p. 10-18. Cited in: PEKAROVA, P. - SZOLGAY, J., 2005. Multilinearny model transformacie prietokov v korytach tokov. In: *Scenáre zmien vybraných zložiek hydrosféry a biosféry v povodí Hrona a Váhu v dôsledku klimatickej zmeny*. Bratislava, s. 203 – 252.

[4] KUNDZEWICZ, Z. W. – DOOGE, J. C. I., 1985. Unified structural approach to linear flood routing. Advances in Water Resources, 8(3), p. 37–42. Cited in: PEKAROVA, P. - SZOLGAY, J., 2005. Multilinearny model transformacie prietokov v korytach tokov. In: *Scenáre zmien vybraných zložiek hydrosféry a biosféry v povodí Hrona a Váhu v dôsledku klimatickej zmeny*. Bratislava, s. 203 – 252.

[5] NASH, J. E. – SUTCLIFFE, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10 (3), pp 282-290.

[6] PRICE, R. K., 1973. Flood routing methods for British rivers. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 55, pp 913–930.

[7] SZOLGAY, J., 1981. Adaptívne modely v hydrologických predpovediach. [PhD Thesis], Bratislava, UHH SAV, s. 130.

[8] SZOLGAY, J., 2003. Multilinear discrete cascade model for river flow routing and real time forecasting in river reaches with variable wave speed. In: *Assessment of the impacts of land–use and climate changes*. Proceedings of the ESF LESC Exploratory Workshop held at Bologna, October, pp 24 – 25.

[9] ŠÚREK, P., 2008. Calibration of a hydrological routing model by Genetic Algorithm. [Diplomová práca], Cranfield University.

[10] ŠÚREK, P., 2009. Parametrizácia hydrologického transformačného modelu neurónovou sieťou. Acta Hydrologica Slovaca, ročník 10.

Kontakty na autora

1 Katedra vodného hospodárstva krajiny, Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Radlinského 11, 83102 Bratislava, Slovenská Republika, e-mail: peter.surek@stuba.sk, jan.szolgay@stuba.sk

VYUŽITÍ RADARŮ PRO ODHADY SRÁŽEK

Milan Šálek[1]

Abstrakt

Odrazivost, kterou je možné získat pomocí měření meteorologickými radiolokátory, je možné pomocí známého Z-R vztahu přepočítat na intenzitu srážek, což umožňuje operativní sledování srážek v poměrně dobrém časovém i prostorovém rozlišení. Radarové odhady srážek jsou však zatíženy mnoha chybami, což vynutilo vytvoření různých algoritmů jejich korekcí. Tzv. fyzikální korekce zahrnují především opravy pomocí vertikálních profilů, adjustační procedury a (geo)statistické algoritmy většinou používají vazbu radarových odhadů srážek a srážkoměrných měření.

V Českém hydrometeorologickém ústavu je od roku 2003 v provozu systém kombinovaných odhadů srážek založený na určitém spojení radarových odhadů a dostupných údajů srážkoměrných stanic. Prostorové rozlišení uvedených odhadů je 1 km^2, do konce roku 2009 byly odhady k dispozici rutinně pouze v časovém kroku 1 hodina a delším. Na počátku roku 2010 byl zaveden inovovaný systém odhadu srážek, který počítá s lokálně proměnlivým, časově konzervativnějším adjustačním koeficientem a s kombinací metodou regresního krigování, které je také známo jako krigování s externím driftem. Příspěvek představí principy uvedeného algoritmu i výsledky testů na souboru hodinových měření 18 srážkoměrných stanic v městě Brně.

Klíčová slova: meteorologický radar, atmosférické srážky, krigování, srážkoměr

1. Úvod

Měření atmosférických srážek na zemském povrchu je založeno na srážkoměrech, což představuje přímý způsob měření srážek. Dalším možným způsobem zjišťování padajících srážek je využití metod dálkové detekce, především meteorologických radiolokátorů, což označujeme za měření nepřímé nebo za nepřímý odhad srážek. Oba způsoby měření a odhadu srážek mají své výhody a nevýhody, které také závisejí na účelu získaných údajů a též na typu vlastních měřených či odhadovaných srážek.

Data meteorologických radiolokátorů vhodná pro kvantitativní odhad srážek jsou v České republice k dispozici od roku 1995, kdy byl uveden do provozu moderní dopplerovský meteorologický radiolokátor Skalky, který poskytoval data v digitální podobě. V roce 2000 byl postaven na vrcholu kopce Praha radiolokátor pojmenovaný Brdy, jenž nahradil zastaralý radar MRL-5 na observatoři Praha-Libuš. Brzy po začátku měření radaru Skalky se objevily první práce hodnotící možnosti jeho radarového odhadu srážek [7], které zjistily některé významné problémy spojené s radarovými odhady a navrhovaly jejich možné korekce.

V zahraniční i domácí literatuře je možno najít velké množství článků a příspěvků, které se zabývaly možnostmi radarových odhadů srážek a korekcemi jejich nedostatků, nicméně do operativní praxe je zavedeno pouze několik. Zatímco se v době zrodu meteorologických radiolokátorů objevovaly názory o možném nahrazení srážkoměrů radary, převládá v současné době paradigma komplementarity, kdy je pro optimální územní odhad srážek vhodné používat více metod měření a jejich vhodnou kombinaci, která minimalizuje (odhadovanou) chybu odhadu.

V příspěvku jsou diskutovány možnosti a omezení využití meteorologického radaru pro odhady srážek, přičemž zde budou rozebírány zejména měření pro území města Brna, kde je předvedeno též srovnání korespondujících odhadů srážek a srážkoměrných měření a algoritmus jejich kombinace. Jedním z původních výsledků projektu GAČR 103/07/0676,

v rámci něhož tato práce vznikla, je odhad maximální vzdálenosti srážkoměrných stanic, při níž radarová měření již ke zlepšení odhadu srážek nepřispívají.

2. Odhad srážek pomocí meteorologického radaru

2.1 Princip měření meteorologických radiolokátorů

Předností meteorologických radarů je plošné pokrytí rozsáhlých území (desetitisíce až statisíce kilometrů čtverečních), nicméně se u radarových odhadů srážek objevují jisté problémy s absolutní přesností naměřených hodnot, pročež se pro praktické aplikace výsledků odhadů srážek zavádějí různé korekční algoritmy.

Princip měření meteorologických radiolokátorů je podrobněji rozebrán v publikacích [3], [2], [8], popř. [11], zde si jej uvedeme pouze ve stručnosti a pro radary využívající záření jedné polarizace.

Meteorologický radar získává objemovou informaci pomocí pohyblivé antény, která podle předem definovaného schématu měření vysílá do prostoru v krátkých pulsech elektromagnetické záření v pásmu mikrovln. Objekty, které leží v cestě tohoto záření, malou část energie zachycují a odrážejí zpět. Tato energie je pak anténou radaru zachycena, změřena a pomocí příslušných algoritmů zpracována. Základní informací poskytovanou meteorologickým radarem je radiolokační odrazivost Z, vyplývající z radarové rovnice (např. [4]):

$$P_r = C\frac{|K|^2 Z}{r^2} = \Pi_M \frac{Z}{r^2} \tag{1}$$

Radarová konstanta C je funkcí vysílaného záření, délky pulsu, tvaru radarového paprsku (který je konvenčně definován jako objemový prostor, kde je intenzita vysílaného záření aspoň 50% intenzity záření ve středu paprsku), a též odráží další charakteristiky konstrukce vlastního radaru Π_M. Může případně zahrnovat i dielektrickou konstantu $|K|^2$ a někdy se nazývá meteorologickým potenciálem radaru, označovaným Π_M. Symbolem *r* je označena vzdálenost cíle.

Vztah intenzity srážek a radarové odrazivosti je následujícího tvaru:

$$Z = aR^b \tag{2}$$

kde koeficienty *a*, *b* závisejí na typu kapalných srážek a na rozdělení velikosti kapek v daném snímaném objemu. Pokud jsou použity hodnoty *a* = 200, *b* = 1,6, pak hovoříme o Marshallově a Palmerově vztahu, který je vztahován k průměrnému dešti ze slohovité (stratiformní, velkoprostorové) oblačnosti.

V minulosti, hlavně v 60. – 80. letech 20. století, se odborníci na radarové odhady srážek soustředili na „ladění“ parametrů vztahu (2), viz např. Battan [1], ale v 90. letech již převládlo následující paradigma. Chyby vlivem nevhodných parametrů vztahu (2) sice nejsou zanedbatelné, ale jsou většinou menší než chyby vznikající vlivem výšky radarového paprsku na zemským povrchem, nerovnoměrným zaplněním snímaného objemu atmosférickými částicemi, různou fází hydrometeorů apod.

2.2 Chyby radarových odhadů srážek

Chyby radarového měření je možné rozdělit na meteorologické, vznikající především proměnlivostí počasí a s tím spojenou různou povahou hydrometeorů (fáze, rozdělení velikosti apod.), a ostatní („nemeteorologické“), které plynou z vlastní techniky radarového měření (kvalita radarového zařízení, tvar a šíření radarového paprsku v atmosféře apod.).

Mnohé chyby radarového odhadu plynou z kombinace obou faktorů, např. vliv měnícího se vertikálního rozsahu oblačnosti a výšky radarového paprsku nad terénem.

Mezi nemeteorologické chyby radarového měření srážek patří např. nepřesná kalibrace radarového měření, tedy nepřesné hodnoty *Z*, která může vyplynout např. ze špatné funkce vlastního radarového zařízení. Moderní radary jsou schopny mnohé z těchto problémů řešit či včas diagnostikovat, ale ne vždy je možné závadu odstranit včas.

Někdy dochází k záměně termínu „kalibrace“ s termínem „adjustace“. Přestože to zatím není všude akceptováno bez výhrad, přijímá se konvence, podle níž se pojmem „kalibrace“ míní nastavení (nebo udržení) parametrů radaru pomocí vlastního zařízení (někdy i pomocí jiného techniky), které zajišťuje především stabilitu měření neboli reprodukovatelnost. Termín „adjustace“ se používá hlavně ve spojení s radarovými odhady srážek, které jsou opravovány pomocí jiných metod měření srážek, typicky pomocí hodnot srážkoměrů.

Mezi podstatné problémy týkající se odhadu srážek z radarů patří výška nejnižšího použitelného paprsku nad zemským povrchem a jeho šířka, přičemž se oba parametry zvětšují s rostoucí vzdáleností od radaru. Ve vzdálenosti 120 km je při běžně používané nejnižší elevaci antény 0,5° střed paprsku ve výšce 2 km nad výškou radaru, geometrický průměr paprsku (při úhlové šířce 1°) 2 km, tudíž snímané meteorologické cíle jsou průměrovány z intervalu výšky 1 až 3 km nad výškou radaru. Při vzdálenosti 230 km je získávána průměrná odrazivost z vrstvy 1,6-5,6 km nad výškou vlastního radaru. Je nutné zdůraznit, že tyto problémy jsou významnější při slohovité oblačnosti, ve které typicky klesá odrazivost s výškou rychleji, zatímco při konvektivních srážkách (letní přeháňky či bouřky) se uvedený problém nejeví jako příliš kritický.

Mezi další nedostatky radarových měření patří možné částečné či úplné blokování paprsku terénními překážkami či jinými objekty (stožáry, budovy, stromy apod.). Samostatným problémem jsou pozemní cíle, jejichž přítomnost může radarové měření zcela znehodnotit. V současné době se k eliminaci („vymazání“) pozemních cílů používají algoritmy využívající Dopplerův jev, neboť pozemní cíle se na rozdíl od hydrometeorů většinou příliš nepohybují, popř. statistický filtr. Od roku 2005 se v určitých azimutech objevuje i rušení vlivem datových přenosů a neodfiltrovatelné pozemní cíle vznikající točením vrtulí větrných elektráren.

Mezi chyby měření srážek vzniklé především měnící se meteorologické parametry, např. změna typu srážek (déšť, sníh, srážky konvektivní či velkoprostorové). Při interpretaci radarových odhadů je tedy nutné znát či kvalifikovaně odhadnout převládající typ srážek.

2.3. Systém odhadů srážek v ČHMÚ

Ke konci 20. století se vyvinulo několik metod, které měly za cíl zlepšit absolutní přesnost radarových odhadů. V ČHMÚ je od roku 2003 v provozu systém, který kombinuje odhady srážek české meteoradarové sítě a dostupná měření ze srážkoměrných stanic. Systém byl zaveden autorem a je podrobněji popsán např. v [12], zde je uvedeno pouze stručné shrnutí. Algoritmus byl inspirován publikacemi [5], [10] a [9].

Základem je myšlenka komplementarity jednotlivých typů měření srážek („plošný“ radarový odhad, „bodová“ srážkoměrná měření) a uvádění informací, které mohou diagnostikovat případné problémy jednoho či druhého typu měření. Z tohoto důvodu se počítají a uvádějí (zobrazují uživatelům) všechny odhady, tedy nekorigovaný (původní) odhad srážek z meteorologických radarů, adjustovaný odhad, odhad srážek počítaný krigováním srážkoměrných měření a kombinace adjustovaného odhadu a srážkoměrných měření. Tyto odhady jsou počítány pro doménu české meteoradarové sítě CZRAD (zasahuje tedy i mimo Českou republiku) v rozlišení 1x1 km, tedy radarů Skalky a Brdy. Podrobnější údaje o těchto radarech jsou na veřejně dostupné internetové stránce http://www.chmi.cz/meteo/rad/rad_sit.html. Zde jen stručně uvedeme, že tyto radary měří na vlnových délkách 5 cm (pásmo C), měří radiální rychlost objektů pomocí Dopplerova jevu, což je využíváno mj. i k eliminaci pozemních cílů.

2.3.1. Radarový odhad (nekorigovaný)

Pro výpočet nekorigovaného radarového odhadu se využívají se měření radiolokační odrazivosti v hladině (vrstvě) nejbližší 2 km nad mořem nebo z nejnižší dostupné elevace, jestliže není odrazivost z hladiny 2 km dostupná (což se označuje jako termínem pseudoCAPPI 2 km). Interval měření byl 10 minut, v roce 2007 se začala využívat pětiminutová měření v tzv. prokládaném módu, na jaře 2009 plnohodnotná pětiminutová měření. Změřená odrazivost ve výšce kolem dvou kilometrů je poté přepočtena na intenzitu srážek Marshallovým a Palmerovým vztahem $Z=200.R^{1.6}$ a suma za dané období je získána časovou integrací příslušných pětiminutových (dříve desetiminutových) měření.

2.3.2 Adjustovaný radarový odhad

Do roku 2009 byla používána adjustace územně konstantním adjustačním koeficientem, od jara 2010 je aplikován územně proměnlivý adjustační koeficient, který je spočten pomocí sumace aktuálně disponibilních párů radarových odhadů a územně příslušných srážkoměrných měření v územním elementu 1x1 km. Uvedený koeficient je plošně interpolován metodou univerzálního krigování.

2.3.3 Interpolace ze srážkoměrných měření

Od jara 2010 je počítán metodou univerzálního krigování.

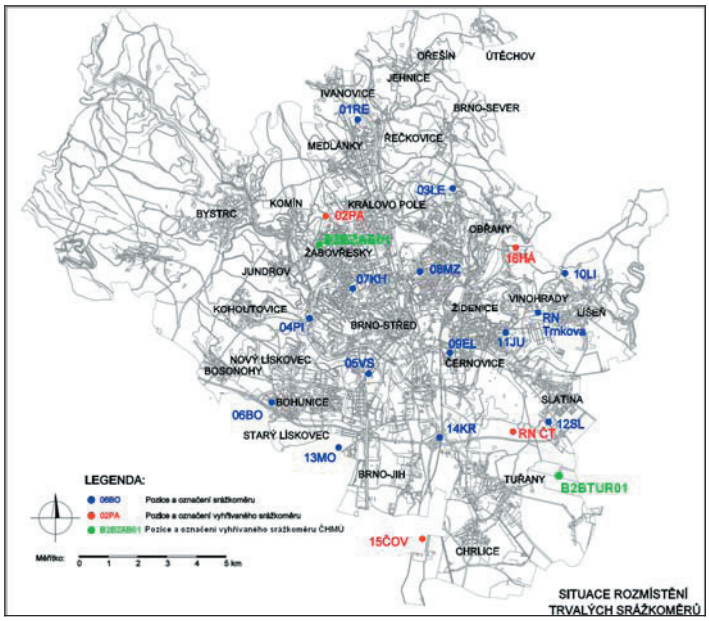
2.3.4 Vlastní kombinace (pracovní název: merge)

Pro závěrečnou kombinaci adjustovaného radarového odhadu srážek byl kromě dříve používaného převzatého algoritmu D. J. Sea [9], který upravil a implementoval autor této práce, vypracován a naprogramován algoritmus regresního krigování (označován jako RK), který je v podstatě totožný s tzv. krigováním s externím driftem (KED) [6].

3. Algoritmy odhadu srážek ve srovnání se srážkoměrnými měřeními v oblasti města Brna

Výše uvedené odhady srážek se operativně počítají v hodinovém (a delším) kroku pro území České republiky a okolí v gridu (územních elementech) velikosti 1 km^2. Hustota dostupných srážkoměrných stanic činí asi 1 stanice na 70 km^2 pro 24hodinové odhady za předpokladu dostupnosti všech měření včetně manuálních, což je však většinou v operativním provozu nedosažitelné. V reálné situaci je průměrná hustota stanic pro hodinové odhady srážek do 300 stanic na území České republiky, což odpovídá 1 stanici na asi 200-240 km^2. Mnoho stanic, jejichž měření jsou součástí operativního odhadu, je do databáze ČHMÚ importováno od jiných subjektů, mezi které patří zejména podniky Povodí.

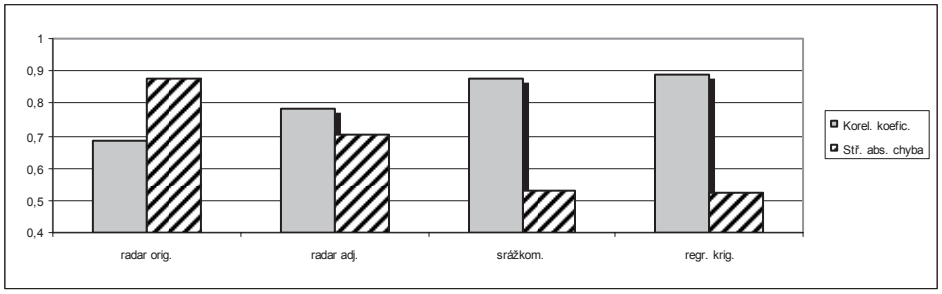
Měření stanic v oblasti města Brna podnikem Brněnské vodárny a kanalizace, a.s., (dále BVaK) poskytlo možnost přesnějšího výpočtu vztahu radarových odhadů srážek s různými korekcemi či kombinacemi a konkrétních hodnot srážkoměrů. Srážkoměrná síť 20 srážkoměrů se zahrnutím stanic Českého hydrometeorologického ústavu na území města Brna je uvedena na Obr. 1. Pro celkovou analýzu bylo použito 18 srážkoměrů účelové sítě BVaK z let 2008 a 2009, přičemž pro systém adjustace radarových odhadů a jejich kombinace se srážkoměrnými měřeními byly použity stanice ČHMÚ, konkrétně Brno-Žabovřesky a Brno-Tuřany. Hustota srážkoměrných stanic na území města Brna je při počtu 18 stanic asi jedna stanice na 8 km^2, tedy zhruba řádově vyšší než činí typická hustota srážkoměrů na území České republiky.



Obr. 1: Rozmístění srážkoměrů ve městě Brně

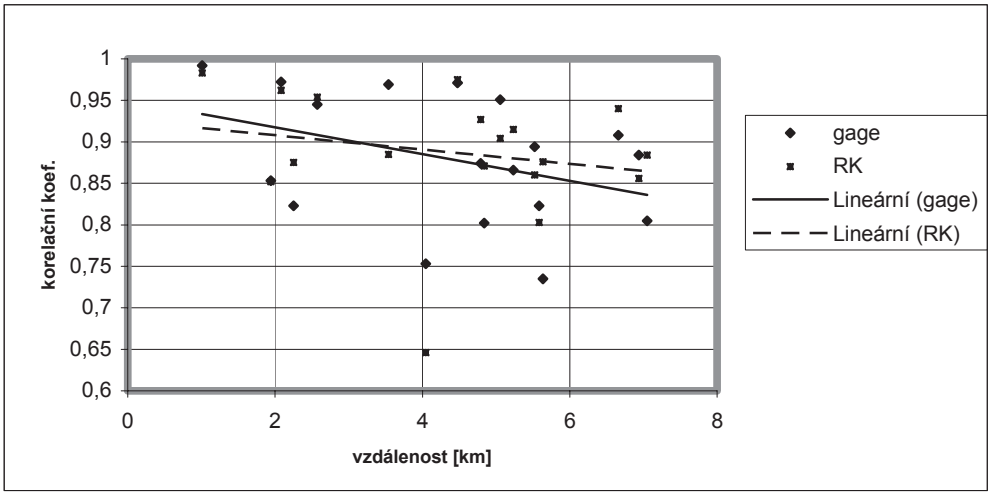
Pro účely zhodnocení různých typů radarových odhadů bylo vybráno období duben až říjen 2009, přičemž do analyzovaných údajů byly zahrnuty pouze hodinové odhady, navíc za podmínky nenulových srážek. Uvedený výběr zajistil lepší statistické rozdělení hodnot srážkových úhrnů. Tímto způsobem bylo vybráno celkem 208 hodinových epizod, pro které byly pro lokality verifikačního souboru stanic BVaK zjištěny odhady výše uvedené odhady srážek.

Pro 18 stanice BVaK byly spočteny charakteristiky vztahu srážkoměrných úhrnů a výše uvedených odhadů. Mezi tyto charakteristiky patřily korelační koeficient a průměrná (střední) absolutní chyba. Korelační koeficienty a střední absolutní chybu na všech (verifikačních) stanicích BVaK uvádí Obr. 2.

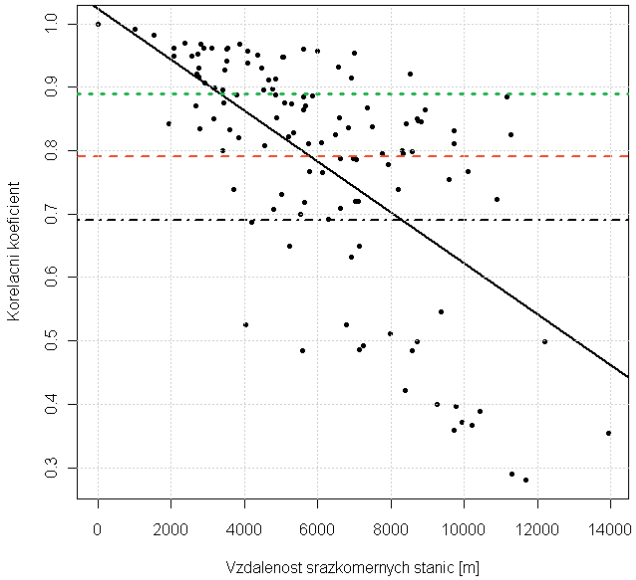


Obr. 2: Korelační koeficienty (šedě) a střední absolutní chyby (šrafura) různých typů odhadu pro stanice BVaK

Z výsledků vyplývá, že nejlepší shodu vykazuje metoda regresního krigování a univerzální krigování bez vlivu radaru, vlastní radarový odhad je výrazně horší. Adjustace sice chybu radarového odhadu výrazně zmenší, ale ani adjustovaný radarový odhad zdaleka nedosahuje kvality odhadu získaného pouze ze srážkoměrů. Radarový odhad zde tedy přispívá k lepší kvalitě odhadu pouze menší měrou a jeho vliv se projevuje pouze při aplikaci algoritmu regresního krigování. Příčinou relativně slabého příspěvku radaru je zřejmě poměrně velká blízkost stanic BVaK a stanic ČHMÚ (průměrně 4,4 km), ze kterých se plošné rozložení srážek algoritmem universálního a regresního krigování počítá.



Obr. 3: Závislost korelačního koeficientu odhadu srážek metodou univerzálního krigování pouze z hodnot srážkoměrů („gage“, plná čára) a metodou regresního krigování s použitím radaru („RK“, čárkovaně) na vzdálenosti od nejbližší srážkoměrné stanice použité ve výpočtu.



Obr. 4: Závislost korelačního koeficientu nenulových hodinových úhrnů srážkoměrných stanic z období duben-říjen let 2008 a 2009 na vzdálenosti (body). Uvedenou závislostí byla metodou nejmenších čtverců proložena přímka. Do grafu byly proloženy hodnoty korelačního koeficientu srážkoměrných hodinových srážkoměrných měření a příslušného nekorigovaného radarového odhadu (spodní čerchovaná přímka o hodnotě 0,69), adjustovaného radarového odhadu (střední čárkovaná linie o hodnotě 0,79) a odhadu metodou regresního krigování (horní tečkovaná přímka o hodnotě 0,89).

Z uvedených hodnot je možné též získat informaci, jak závisí kvalita universálního (tj. pouze srážkoměrného) a regresního (tj. s použitím radaru) krigování na vzdálenosti od nejbližšího použitého srážkoměru. Uvedená analýza je na Obr. 3 pro hodnoty korelačního koeficientu. Obr. 4 ukazuje závislost vzájemné korelace srážkoměrných stanic na vzdálenosti v porovnání s korelačními koeficienty ostatních odhadů.

Z Obr. 3 a 4 je možné usoudit, že radarová měření zpřesňují celkový odhad hodinových srážek až od vzdálenosti zhruba čtyř kilometrů od nejbližší použité srážkoměrné stanice.

4. Závěr

Z předložené studie vyplývá, že radarová měření mohou v oblastech s dobrou radarovou viditelností, ke kterým brněnská aglomerace jistě patří, pozitivně přispět ke kvalitě odhadu plošného rozložení srážek hlavně v případě řidší sítě srážkoměrných stanic, kdy jejich vzájemná vzdálenost přesahuje přibližně čtyři kilometry. Platnost uvedeného závěru je však zatím omezena na hodinové akumulace srážek, jiné intervaly akumulace srážek nebyly testovány.

Poděkování

Uvedená práce vznikla za podpory grantu GAČR č.103/07/0676.

Literatura

[1] BATTAN, L., 1973. Radar Observation of the Atmosphere. Univ. of Chicago Press, Chicago. 324 pp.

[2] COLLIER, C. G. , 1996. Applications of weather radar systems: a guide to uses of radar data in meteorology and hydrology. Ellis Horwood Limited Publishers. Chichester UK.

[3] DOVIAK, R. – ZRNIĆ, D., 1993. Doppler Radar and Weather Observation. Academic Press Inc..

[4] ŘEZÁČOVÁ, D. – NOVÁK, P. – KAŠPAR, M. – SETVÁK, M., 2007. Fyzika oblaků a srážek. Academia. 576 s.

[5] FULTON, R. – BREIDENBACH, J. – SEO, D. J. – MILLER, D. – O'BANNON, T., 1998. The WSR-88D rainfall algorithm. Weather and Forecasting, ročník 13, pp 377–395.

[6] HENGL, T., 2007. A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables. European Commission. Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability.

[7] ŠÁLEK, M. – KRÁČMAR, J., 1997. Odhady srážek z meteorologického radiolokátoru Skalky. Meteorologické zprávy, ročník 4: s. 99–109.

[8] RINEHART, R. E., 1997. Radar for Meteorologists. Rinehart Publications, Grand Forks.

[9] SEO, D. J., 1998. Real-time estimation of rainfall fields using radar rainfall and rain gage data. Journal of Hydrology, ročník 208, č. 1-2: pp 37 – 52, ISSN 0022-1694.

[10] SEO, D. J., 1998. Real-time estimation of rainfall fields using rain gage data under fractional coverage conditions. Journal of Hydrology, ročník 208, č. 1-2, pp 25 – 36, ISSN 0022-1694.

[11] ŠÁLEK, M. – CHEZE, J. L. – HANDWERKER, J. – DELOBBE, L. – UIJLENHOET, R., 2004. Radar techniques for identifying precipitation type and estimating quantity of precipitation. Brussels: COST Office.

[12] ŠÁLEK, M. – NOVÁK, P. – SEO, D. J., 2004. Operational application of combined radar and raingauges precipitation estimation at the CHMI. In: *Third European Conference on Radar in Meteorology (ERAD).* ERAD Publication Series, ročník 2, pp 16–20.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, e-mail: salek@chmi.cz

PROBLEMATIKA PŘEDPOVÍDÁNÍ A HYDROLOGICKÉHO VYHODNOCENÍ PŘÍVALOVÝCH POVODNÍ

Petr Šercl[1], Jan Daňhelka[1], Radovan Tyl[1]

Abstrakt

V posledních letech se na území ČR vyskytlo několik přívalových povodní, které způsobily značné škody na majetku a vyžádaly si i oběti na lidských životech. Přívalové povodně v červnu a v červenci 2009 se svým rozsahem škod zařadily na třetí místo za regionální povodně v červenci 1997 v povodí Moravy a Odry a v srpnu 2002 v povodí Labe. Jejich meteorologické příčiny, průběh a socioekonomické dopady byly vyhodnoceny v rámci komplexního vládního projektu.

Vyhodnocení povodní v červnu a v červenci 2009 přineslo zejména v oblasti hlásné a předpovědní služby velmi důležité poznatky a závěry. Je kladen větší důraz na zlepšení detekce spadlých extrémních srážek, aplikace metod krátkodobých předpovědí srážek a zprovoznění systému na předpovídání možného rizika vzniku přívalových povodní v reálném čase.

Příspěvek přináší v úvodních kapitolách shrnutí dosavadních poznatků z vyhodnocení meteorologických příčin a průběhu přívalových povodní a ve své druhé části se podrobněji věnuje vývoji systému FFG–CZ.

Systém procedur FFG–CZ, vyvíjených v prostředí ArcView GIS, je založený na aplikaci jednoduchého srážkoodtokového modelu, který využívá srážkové odhady z měření meteorologických radarů v 15minutovém kroku a výsledků z krátkodobé předpovědi pohybu bouřkových cel (tzv. nowcastingu) pro odhad odtokové odezvy na povodích o velikostech od 5 do cca 100 km^2.

Pro odhad velikosti přímého odtoku byla zvolena metoda CN-křivek, kde hodnoty CN jsou operativně upravovány na základě předchozích srážek tak, aby zohlednily vliv předchozího nasycení povodí. Transformace přímého odtoku na odtokovou odezvu povodí je realizována pomocí jednotkového hydrogramu dle Clarka a pro postup vlny po toku je použita metoda Muskingum. Parametry srážkoodtokového modelu byly pro jednotlivá povodí odhadnuty na podkladě fyzicko-geografických charakteristik povodí.

Hlavním výstupem je odhad rizika vzniku přívalové povodně v reálném čase, a to na základě překročení určitých prahových hodnot kulminačního průtoku, které byly stanoveny jako násobek teoretické hodnoty 100letého průtoku.

Klíčová slova: přívalové srážky, přívalové povodně, hydrologická předpověď

1. Úvod

Povodně, vyznačující se prudkým vzestupem a poklesem hladiny vody v řádu několika desítek minut až několika hodin a jejichž příčinou jsou zpravidla intenzivní (přívalové) srážky vypadávající z konvekční oblačnosti, označujeme jako přívalové. Přívalové povodně jsou velice nebezpečným fenoménem, neboť přicházejí náhle, bývají často spojeny s dalšími doprovodnými rizikovými jevy (silná blesková aktivita, krupobití, silný vítr) a prediktabilita jejich potenciálního vzniku je doposud velmi nízká.

I když přívalové povodně nejsou na území ČR v letním období vzácným jevem, v posledních cca 15 letech, ale zejména na konci června a začátkem července 2009, se vyskytlo několik přívalových povodní, které způsobily škody na majetku v souhrnu několika miliard korun a vyžádaly si bohužel i ztráty na lidských životech.

Uvedené zkušenosti podnítily nárůst aktivit jak v odborné sféře, tak i ve sféře státní správy a samosprávy, jejichž obsahem je v oblasti vědy a výzkumu podrobnější analýza vzniku, průběhu a možností předpovídání přívalových povodní, praktická část těchto aktivit je zaměřena na potenciální zlepšení monitoringu, varovných systémů a případných protipovodňových opatření.

Obsahem tohoto příspěvku je shrnutí dosavadních znalostí a zkušeností v oblasti předpovídání, monitoringu a zpětného vyhodnocení příčin a průběhu přívalových povodní a nastínění možností dalšího rozvoje v těchto oblastech.

2. Příčiny a průběh přívalových povodní

2.1 Meteorologické příčiny

Hlavní příčinou vzniku přívalových (dříve „bleskových“) povodní jsou velmi intenzivní srážky vypadávající z konvekční oblačnosti. Extremita přívalových povodní a jejich průběh jsou proto primárně závislé na intenzitě, trvání a plošném rozložení příčinných srážek. Intenzita příčinných srážek zpravidla lokálně vysoce překračuje hodnotu 30 $mm.h^{-1}$ s trváním od desítek minut po několik hodin, přičemž rozloha zasaženého území se pohybuje od několika km^2 až po desítky, výjimečně stovky km^2.

Z meteorologického hlediska se ukazují jako nejnebezpečnější pro vznik přívalových povodní organizované konvekční systémy, kdy nad daným územím dochází k relativně dlouhotrvajícímu obnovování bouřkové činnosti doprovázené přívalovými srážkami.

Typickým a velmi častým případem je tzv. „train effect“, kdy jednotlivé bouřkové buňky postupují po stejné dráze a zasahují totéž území. „Train effect“ byl příčinou dlouhotrvajících velmi intenzivních srážek a následné katastrofální přívalové povodně na Dědině a Bělé v povodí Orlice v noci z 22. na 23. července 1998, kdy za 6 hodin spadlo na ploše cca 130 km^2 v průměru 160 mm srážek (ve stanici Deštné v Orlických horách činil srážkový úhrn 204 mm), viz [2]. Přívalová povodeň 15. července 2002 [5] na Hodonínce (levostranný přítok Svratky) byla způsobena obnovováním málo pohyblivých bouřkových buněk nad postiženým územím, kdy srážkoměrná stanice Olešnice zaznamenala úhrn 172 mm za necelé dvě hodiny (více než 100 mm spadlo cca na 25 km^2 plochy). Obě zmíněné povodně si vyžádaly značné materiální škody a oběti na lidských životech.

Další příčinou pro potenciální vznik přívalových povodní bývá přechod tzv. mezoměřítkového (angl. „mesoscale“) konvekčního systému (MCS), kdy v závislosti na směru postupu linie bouřek v čele MCS může v některých případech rovněž dojít k významné akumulaci spadlých srážek na postižených povodích, viz [3].

Naprosto specifický případ výskytu několika významných přívalových povodní byl zaznamenán na území České republiky v poslední dekádě června a na začátku července 2009, kdy po dobu 12 dní nad naše území proudil teplý, vlhký a instabilní vzduch z oblasti Černého moře a východního Středomoří, kdy téměř každodenně po celé toto období docházelo k výskytu četných bouřek různé intenzity. Obdobná situace s takto dlouhým trváním nebyla prokazatelně za posledních 60 let zaznamenána. Z hydrologického pohledu nejvýznamnějšími událostmi byly přívalové povodně v těchto lokalitách:

– oblast Novojičínska, konkrétně povodí Luhy a Jičínky, 24. 6. 2009 ve večerních hodinách, kde následkem „train effectu“ spadlo na rozloze zhruba 150 km^2 více než 100 mm srážek během dvou až tří hodin,

– oblast Jesenicka v noci z 26. na 27. 6. 2009, povodí vodních toků pramenících v Rychlebských horách a severních svazích Jeseníků, kde intenzivní srážky o úhrnu 50–80 mm za 6–7 hodin spadly do již velmi nasyceného území, což negativně přispělo k velikosti následné odtokové odezvy,

povodí Blanice a Volyňky v noci ze 27. na 28. 6. 2009, kde intenzivní srážky o úhrnu 50–80 mm za 7–8 hodin spadly do již velmi nasyceného území, v podstatě obdobná situace jako na Jesenicku,

– Děčínsko, povodí Kamenice a Bystré (přítok Ploučnice) 1. 7. a 4. 7. 2009, kde došlo k opakovanému výskytu přívalových srážek na stejném území, intenzita srážek místně překročila 50–70 mm za dvě hodiny.

Podle výše způsobených škod byly důsledky přívalových povodní v červnu a v červenci 2009 po regionálních letních povodních v letech 1997 a 2002 třetí nejvýznamnější za posledních 15 let a vyžádaly si rovněž oběti na lidských životech. Komplexní vyhodnocení těchto povodní bylo předmětem vládního projektu, jehož výsledkem je mimo jiné publikace určená pro širokou veřejnost [1].

2.2 Doprovodné faktory mající vliv na průběh přívalových povodní

Vedle příčinných srážek jako hlavního faktoru a již zmíněného předchozího nasycení území mají na průběh přívalových povodní významný vliv fyzicko-geografické charakteristiky postiženého území (povodí). V první řadě je nutné uvést způsob využívání území a s tím související propustnost půdního povrchu, kde se zmenšující se propustností roste podíl odteklé vody ze srážek a voda rovněž odtéká i rychleji. Dalším důležitým faktorem jsou sklonitostní poměry. Větší sklon svahů společně se zmenšenou propustností vytváří velmi nepříznivou kombinaci při procesu formování odtoku (např. poměrně dramatická odtoková odezva na Jesenicku 26. 7. 2009), kde může navíc dojít i k výrazným projevům eroze, odnosu splavenin a zemědělské půdy, příp. i k následným sesuvům.

Významnou roli může hrát i tvar povodí, kdy za určitých okolností dochází u vějířovitých povodí ke střetu vrcholových částí povodňových vln.

Antropogenní vliv na průběh přívalových povodní již byl nepřímo zmíněn ve způsobu využívání území, kdy člověk může pozitivně i negativně ovlivnit odtokové poměry v povodí. Do průběhu povodně významně zasahují i komunikační a vodohospodářské stavby přímo na toku. Zatrubnění toků, málo kapacitní mosty nebo propustky, příp. malé vodní nádrže mohou velmi negativně ovlivnit průběh povodně. U propustků nebo mostů může dojít k jejich ucpání splaveným materiálem, následnému protržení a vzniku průlomové vlny. U malých vodních nádrží za situace přítoku vody ze silných přívalových srážek velmi rychle dojde k vyčerpání jejich retenčního objemu a následnému přelévání hrází, kdy hrozí jejich protržení a rovněž vznik průlomové vlny (např. Hustopeče nad Bečvou, 24. 6. 2009). Naopak větší retenční nádrže dokáží povodňovou vlnu z přívalových srážek zpravidla velmi účinně transformovat (např. 2. 7. 2009 na Oslavě, nádrž Mostiště).

Důsledky zatrubnění toků bývají nepředvídatelné, ale zpravidla po zahlcení či ucpání vtoku dojde k průchodu povodňové vlny intravilánem po povrchu s často ničivými následky (např. obce Crhov a Olešnice na Blanensku 15. července 2002).

Velká část výše uvedených vlivů se může za reálné situace zkombinovat, takže skutečný průběh povodně je jen těžko předvídatelný.

3. Monitoring a vyhodnocení přívalových povodní

Na rozdíl od plošně rozsáhlých regionálních povodní není výskyt přívalových povodní bezprostředně vázán na záplavová území větších vodotečí, ale po vypadnutí intenzivních srážek se povrchový odtok nejprve soustřeďuje do údolnic lokálních malých vodotečí nebo po většinu roku suchých koryt, erozních rýh atd., a až poté se dostává do významnějších toků, které bývají již hydrologicky sledovány. Dočasnými „řečišti“ se stává i síť zpevněných cest. Na územích s nízkou nebo s dočasně sníženou infiltrační schopností (např. i vlivem nasycení předchozími srážkami) dochází i k plošnému povrchovému odtoku, takže postižena

náhlým zatopením mohou být i ta území (části obcí), která neleží v bezprostřední blízkosti vodního toku.

Vzhledem k plošné velikosti území, které je zasažené přívalovými srážkami, je monitoring případných přívalových povodní poměrně obtížný, protože hustota sítí srážkoměrných a vodoměrných stanic není a pravděpodobně ani nebude v tomto směru nikdy dostatečná. Přitom většina hydrologických posudků se provádí na malých nepozorovaných povodích, takže vyhodnocení příčinných srážek a hydrologické odezvy je pro hydrologickou praxi velmi významné a důležité.

Vyhodnocení přívalových povodní z června a července 2009 [1], kdy kulminační průtoky v mnoha profilech významně přesáhly stávající hodnoty 100letých průtoků, přineslo tyto základní poznatky:

Nejvěrohodnější pole příčinných srážek lze získat kombinací měření meteorologického radaru a opravných koeficientů, získaných z měření srážkoměr-ných stanic (zpravidla 24hodinových úhrnů). Pro zjednodušení (s vědomím nepřesnosti) lze stejný opravný koeficient použít jak pro celkovou sumu srážek, tak i pro kratší intervaly.

Pro odhad velikosti kulminačních průtoků lze využít jak hydraulického modelu, v nepozorovaných profilech rovněž i srážkoodtokového modelu. Výhodou srážkoodtokového modelu je odhad celého průběhu povodňové vlny (a tím i proteklého objemu) v libovolném stanoveném profilu na základě časového průběhu spadlých srážek, oproti tomu hydraulický model se může opřít o detailní geodetická zaměření příčných profilů a stop maximální hladiny. U hydraulického modelu je však velmi problematické určení součinitele drsnosti, takže nejistota odhadu kulminačního průtoku může dosáhnout až 20 %, u srážkoodtokového modelu může být nejistota ještě vyšší.

Celkové objemy povodňových vln dosahovaly i při velké extremitě kulminačního průtoku (> 100 let) zhruba 30–50 % z objemu spadlých příčinných srážek, což svědčí o poměrně dobré schopnosti svrchní půdní vrstvy zadržet vodu v počáteční fázi nástupu přívalových srážek. U zasažených povodí nebylo prokázáno významné negativní ovlivnění průběhu povodně antropogenní činností.

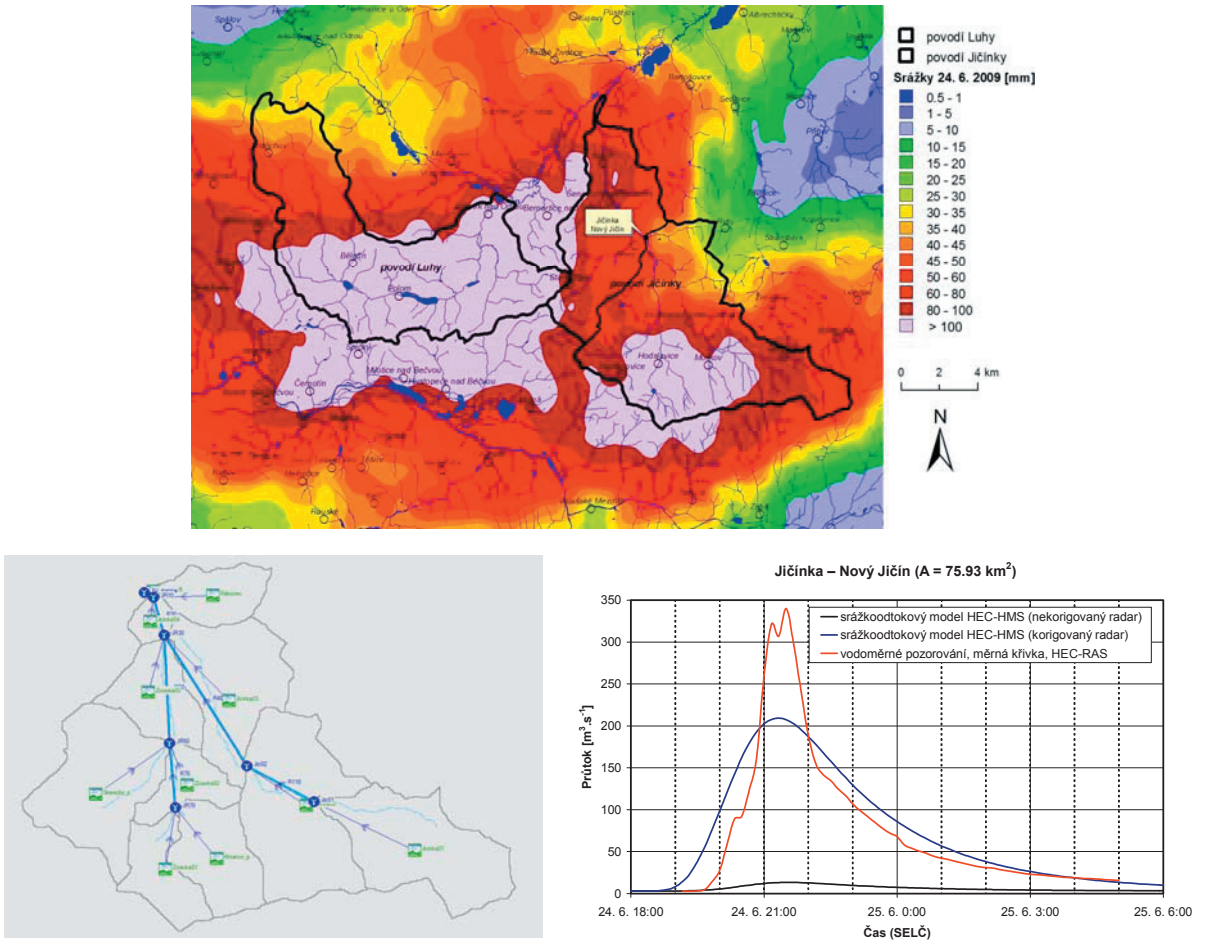
Příklad vyhodnocení pole srážek a odtokové odezvy je na Obr. 1 pro profil vodoměrné stanice Nový Jičín na Jičínce ze 24. 6. 2009.

Pro odhad pole 24hodinových úhrnů srážek byla využita metoda kombinace měření meteorologického radaru a opravných koeficientů, získaných z měření srážkoměrných stanic. Totéž pole opravných koeficientů bylo použito i pro odhad 15minutových srážkových úhrnů, které sloužily jako vstup do srážkoodtokového modelu HEC-HMS. Schéma rozdělení na dílčí povodí je na Obr. 1.

Jako transformační funkce povodí byl aplikován Clarkův jednotkový hydrogram a pro odhad velikosti odtoku byla použita metoda CN křivek, kde v hodnotách CN bylo zohledněno nasycení území předchozími srážkami. Parametry jednotkového hydrogramu (doba koncentrace, transformační faktor) byly odvozeny z fyzicko-geografických charakteristik jednotlivých dílčích povodí. Pro postup vlny v toku byla použita metoda Muskingum.

Odvozený hydrogram pomocí modelu HEC-HMS je v grafu na Obr. 1 znázorněn modře. Pro srovnání je v grafu znázorněn i hydrogram odvozený z nekorigovaných srážkových vstupů z radaru (černou barvou). Je naprosto zřejmé, že u této události došlo k velmi významnému (konkrétně až pětinásobnému) podcenění odhadu celkového množství spadlých srážek.

Velikost kulminačního průtoku byla odhadnuta pomocí hydraulického modelu HEC-RAS na základě zaměřených stop hladiny, viz příloha zprávy [7]. Hydraulické výpočty byly použity i pro extrapolaci měrné křivky průtoku v profilu stanice Nový Jičín. Hydrogram, který vychází z vodoměrného pozorování, je v grafu na Obr. 1 znázorněn červeně.



Obr. 1: Rozložení srážek 24. 6. 2009, schéma rozdělení povodí pro srážkoodtokový model (vlevo) a hydrogramy povodně v profilu Nový Jičín na Jičínce (vpravo).

Na první pohled z porovnání výsledků vyplývá, že srážkoodtokový model v tomto případě nedokázal plně podchytit dynamiku vývoje povodně a pravděpodobně značně podhodnotil velikost kulminačního průtoku. Zároveň ale lze konstatovat, že za předpokladu přiměřeně kvalitních operativních srážkových vstupů (adjustovaný radar) bude možné srážkoodtokový model na bázi HEC-HMS využít pro detekci míry rizika přívalových povodní na malých a středních povodích.

4. Možnosti predikce přívalových povodní, systém FFG–CZ

Velká dynamika vývoje konvekčních bouří je hlavní příčinou, proč stávající meteorologické modely zpravidla nemohou úspěšně předpovědět jak lokalitu, tak i čas výskytu vypadnutí přívalových srážek, které mohou způsobit přívalovou povodeň.

Pravděpodobně jedinou z možností predikce rizika výskytu přívalové povodně jsou operativní vstupy adjustovaných odhadů srážek z měření meteorologického radaru v co nejkratším časovém kroku, využití nowcastingu (krátkodobá předpověď postupu bouřkových jader vycházející z analýzy předchozích radarových snímků) a aplikace jednoduchého srážkoodtokového modelu pro odhad odtokové odezvy.

Důležitou součástí systému predikce je stanovení aktuální nasycenosti území. V rámci výzkumného projektu VaV 1D/1/5/05 „Vývoj metod predikce stavů sucha a povodňových situací na základě infiltračních a retenčních vlastností půdního pokryvu ČR“ řešeného v letech 2005–2007 pod garancí MŽP ČR byla v ČHMÚ jako hlavním řešitelském pracovišti připravena procedura založená na denní bilanci srážek, odtoku a aktuální evapotranspirace,

jejímž výstupem jsou aktualizované hodnoty CN. Algoritmus bilančního výpočtu je podrobně popsán v závěrečné zprávě zmíněného projektu [4].

Na výsledky zmíněného projektu bylo navázáno v dalším výzkumném projektu – SP/1c4/16/07 „Výzkum a implementace nových nástrojů pro předpovědi povodní a odtoku v rámci zabezpečení hlásné a předpovědní povodňové služby v ČR“ (řešeného v letech 2007–2011 rovněž pod garancí MŽP ČR), kde náplní dílčího úkolu „Vývoj robustní metody odhadu odtoku z přívalových srážek“ řešeného v ČHMÚ je vývoj procedur určujících odhad rizika potenciálního výskytu přívalových povodní. Systém procedur je zkráceně nazýván **FFG–CZ** („**F**lash **F**lood **G**uidance–**CZ**ech“), pro jehož název a částečně i obsah nalezli řešitelé inspiraci v systému FFG, provozovaného Národní meteorologickou službou USA (NWS), viz http://www.srh.noaa.gov/rfcshare/ffg.php.

Systém FFG–CZ, založený na platformě ArcView GIS 3.x a určený pro odhad odtokové odezvy z přívalových srážek na povodí do velikosti cca 100 km^2, sestává z následujících dílčích částí:

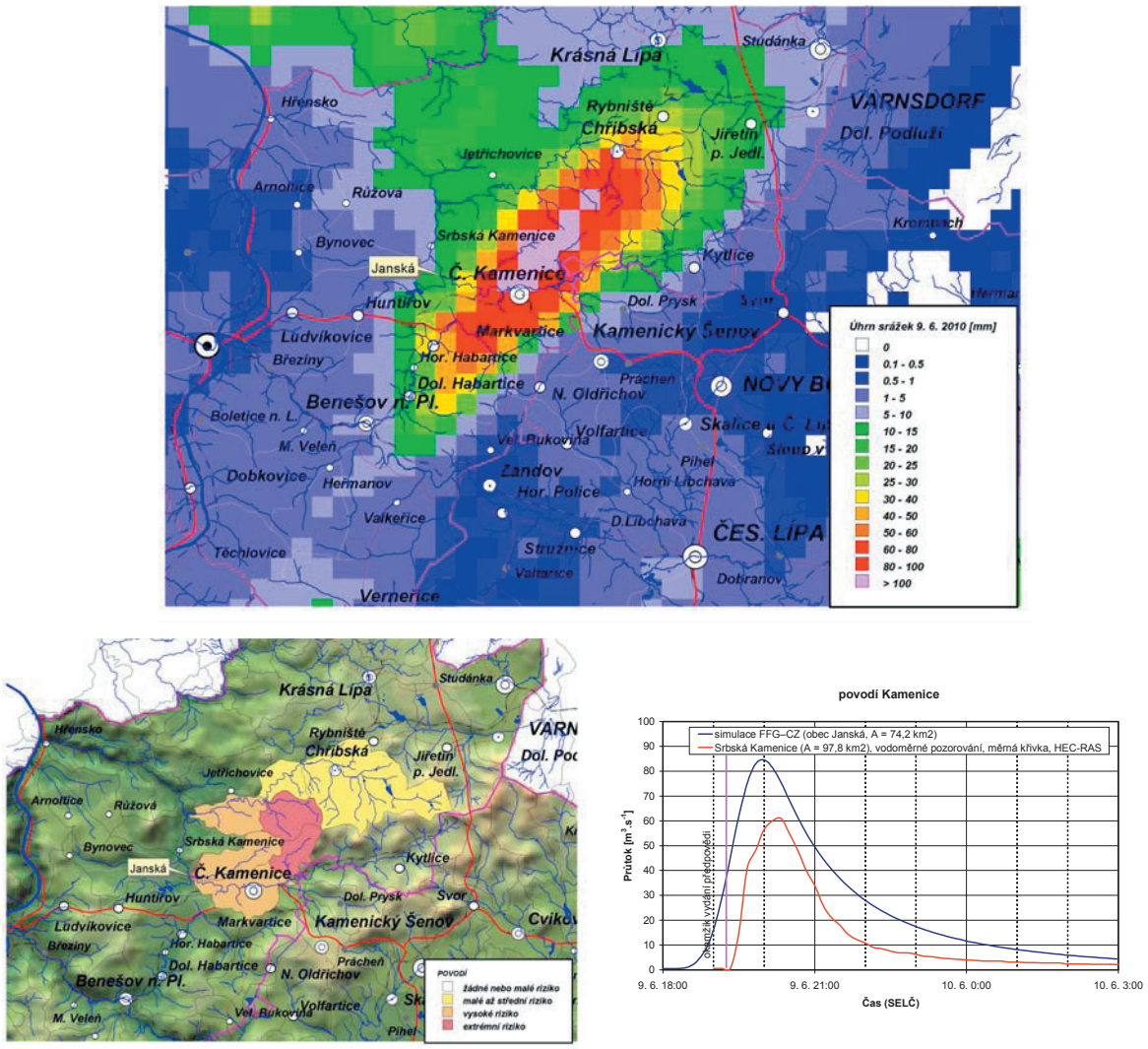
- Výpočet aktuální nasycenosti povodí (denní aktualizace hodnot CN); vstupní data:
  - Rastry denních úhrnů srážek (kombinace srážkoměr+radar).
  - Aktuální denní evapotranspirace ve stanicích interpolovaná do rastru.

- Implementace srážkoodtokového modelu (na bázi HEC-HMS: metoda CN křivek, Clarkův jednotkový hydrogram, Muskingum) pro odhad odtokové odezvy; vstupní data:
  - Rastry 15minutových srážek (adjustovaný radar; možnost uplatnění dat z nowcastingu).
  - Polygonová vrstva základních povodí (velikost cca 5–20 km^2) s fyzicko-geografickými charakteristikami.

Hlavním výstupem FFG–CZ je výpočet odtokové odezvy na (zvolených) povodích, a to na základě operativních 15minutových adjustovaných radarových odhadů srážek. Z odhadu kulminačního průtoku a dosažení či překročení zvolených tří prahových hodnot (násobku regresního odhadu Q_{100} dle metody popsané v [6]) je stanovena míra rizika vzniku nebo výskytu přívalové povodně.

Na Obr. 2 je uveden příklad výstupů ze systému FFG–CZ pro případ přívalové povodně, která se vyskytla v povodí Kamenice 9. června 2010 ve večerních hodinách.

Na mapce v horní části Obr. 2 je znázorněno rozložení srážek, přičemž většina srážek spadla mezi 18. a 19. hodinou. Výpočet hydrogramů byl proveden z 15minutových adjustovaných radarových odhadů srážek za období 17:15–19:00, v reálném čase by tato předpověď byla k dispozici cca v 19:15. První indikace povodňového rizika (stupeň 1–žlutý) v postižené oblasti (Lísecký a Studený potok) byl zaznamenán z běhu výpočtu již v 18:45, což byla povodí postižená nejintenzivnějšími srážkami, v 19:00 by již byl pro tato povodí signalizován stupeň 3. Z tohoto faktu je zřejmé, jak vysoká intenzita přívalových srážek se vyskytovala ve srážkovém centru.



Obr. 2: Rozložení srážek dne 9. 6. 2010, stupně potenciálního rizika přívalové povodně (vlevo) a hydrogramy povodně v povodí Kamenice (vpravo).

V grafu na obrázku vpravo dole je fialovou čárou vyznačen okamžik výpočtu předpovědi a červená čára je hydrogram povodně zaznamenaný ve vodoměrné stanici Srbská Kamenice. Z grafu je zřejmý velice rychlý nástup povodně, kdy v profilu Srbská Kamenice započal v době předpovědi nástup povodně, zatímco dle modelových výpočtů povodeň na povodích Lískeckého a Studeného potoka již v té době kulminovala.

Z toho plyne, že eventuální varovný systém musí být velice pružný a rychlý, aby bylo možné případné varování

- okamžitě aktualizovat na webových stránkách ČHMÚ, případně
- přímo směřovat do (potenciálně) postižených a ohrožených obcí.

5. Závěr

Značné materiální škody a oběti na životech, které si v posledních letech vyžádaly přívalové povodně na území ČR, obrátily k tomuto fenoménu značnou pozornost, a to jak odborné, tak i laické veřejnosti.

Komplexní vyhodnocení přívalových povodní z června a července 2009 a vývoj systému FFG–CZ pro operativní vyhodnocování rizika vzniku přívalových povodní jsou prvními důležitými kroky, které by měly podnítit:

- rozvoj monitoringu potenciálně nebezpečných meteorologických jevů (konvekčních bouří), a to zejména investicemi do údržby a inovací technologie měření meteorologických radarů,
- další rozvoj celostátních, regionálních a lokálních varovných systémů,
- systematický výzkum meteorologických příčin, průběhu a socioekonomických dopadů přívalových povodní,
- vybudování databáze s evidencí historických případů přívalových povodní.

Literatura

[1] DAŇHELKA, J. – KUBÁT, J., 2010. Přívalové povodně na území České republiky v červnu a červenci 2009. Praha: ČHMÚ, MŽP. 72 s., ISBN 978-80-86690-75-9

[2] HANČAROVÁ, E. – METELKA, L. – MRKVICA, Z. et al, 1999. Katastrofální povodeň v podhůří Orlických hor ve dnech 22. až 25. 7. 1998. Meteorologické zprávy, roč. 52, č. 1. s. 1–12.

[3] ŘEZÁČOVÁ, D. – NOVÁK, P. – KAŠPAR, M. – SETVÁK, M., 2007. Fyzika oblaků a srážek. Praha: Academia. 574 s. + DVD. ISBN 978-200-1505-1

[4] ŘIČICOVÁ, P. a kol., 2007: Vývoj metod predikce stavů sucha a povodňových situací na základě infiltračních a retenčních vlastností půdního pokryvu ČR. [Souhrnná závěrečná zpráva ČHMÚ a VÚMOP projektu VaV 1D/1/5/05]. Praha. ČHMÚ.

[5] SOUKALOVÁ, E. et al, 2002. Příčinný déšť a povodně na Blanensku a Žďársku v červenci 2002. Meteorologické zprávy, roč. 55, č. 5. s. 141–144.

[6] ŠERCL, P., 2009. Vliv fyzicko-geografických faktorů na charakteristiky teoretických návrhových povodňových vln. Sborník prací ČHMÚ, svazek 54, Praha: ČHMÚ. 88 s., ISBN 978-80-86690-62-9, ISSN 0232-0401

[7] ŠERCL, P. et al, 2010. Vyhodnocení povodní v červnu a červenci 2009 na území České republiky. Hydrologický průběh povodní. Dílčí zpráva. Praha: ČHMÚ, MŽP. DVD se souhrnnou zprávou a dílčími zprávami z projektu, k dispozici rovněž na internetových stránkách ČHMÚ.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav Praha,
e-mail: sercl@chmi.cz, danhelka@chmi.cz, tyl@chmi.cz

MOŽNOSTI PREDPOVEDE PRÍVALOVÝCH POVODNÍ NA ZÁKLADE PREDPOVEDE PRÍVALOVÝCH DAŽĎOV

Michal Hazlinger[1], Marcel Zvolenský [2]

Abstrakt

Prívalové povodne možno zaradiť medzi prírodné hrozby, ktorých výskyt a intenzita sú veľmi ťažko predpovedateľné aj dokumentovateľné. Možnosť vzniku prívalových povodní je totiž priamo závislá od výskytu vstupného faktora v podobe inej prírodnej hrozby - prívalového dažďa. Napriek používaniu meteorologických predpovedných modelov ako je systém INCA a dištančných spôsobov sledovania vývoja meteorologických prvkov, možno s istotou predpovedať iba meteorologické podmienky vedúce k vzniku búrkovej činnosti, ale už nie presnú lokalitu a intenzitu výskytu tohto javu. Presnú lokalizáciu aj intenzitu nám umožňuje určiť sledovanie pohybu zrážkovej činnosti pomocou meteorologického radaru. Táto metodika však neumožňuje dlhodobú predpoveď a dáva priestor iba na hydrologickú výstrahu s krátkym časovým úsekom nástupu platnosti.

Komplikovanosť predpovede prívalových povodní zvyšuje aj prítomnosť druhého faktora – citlivosti povodí na prívalové zrážky spolu s okamžitou retenčnou kapacitou povodia spojenou s predchádzajúcim dažďom. Citlivosť povodia je podmienená súborom vlastností povodia od vlastností prírodného prostredia až po zásahy do krajiny podmienené činnosťou človeka.

V príspevku sa snažíme charakterizovať možnosti predpovede prívalových zrážok a identifikovať oblasti najviac ohrozené prívalovými zrážkami na základe vlastností jednotlivých povodí.

Kľúčové slová: prívalové zrážky, prívalová povodeň, nowcasting, INCA -CE

1. Úvod

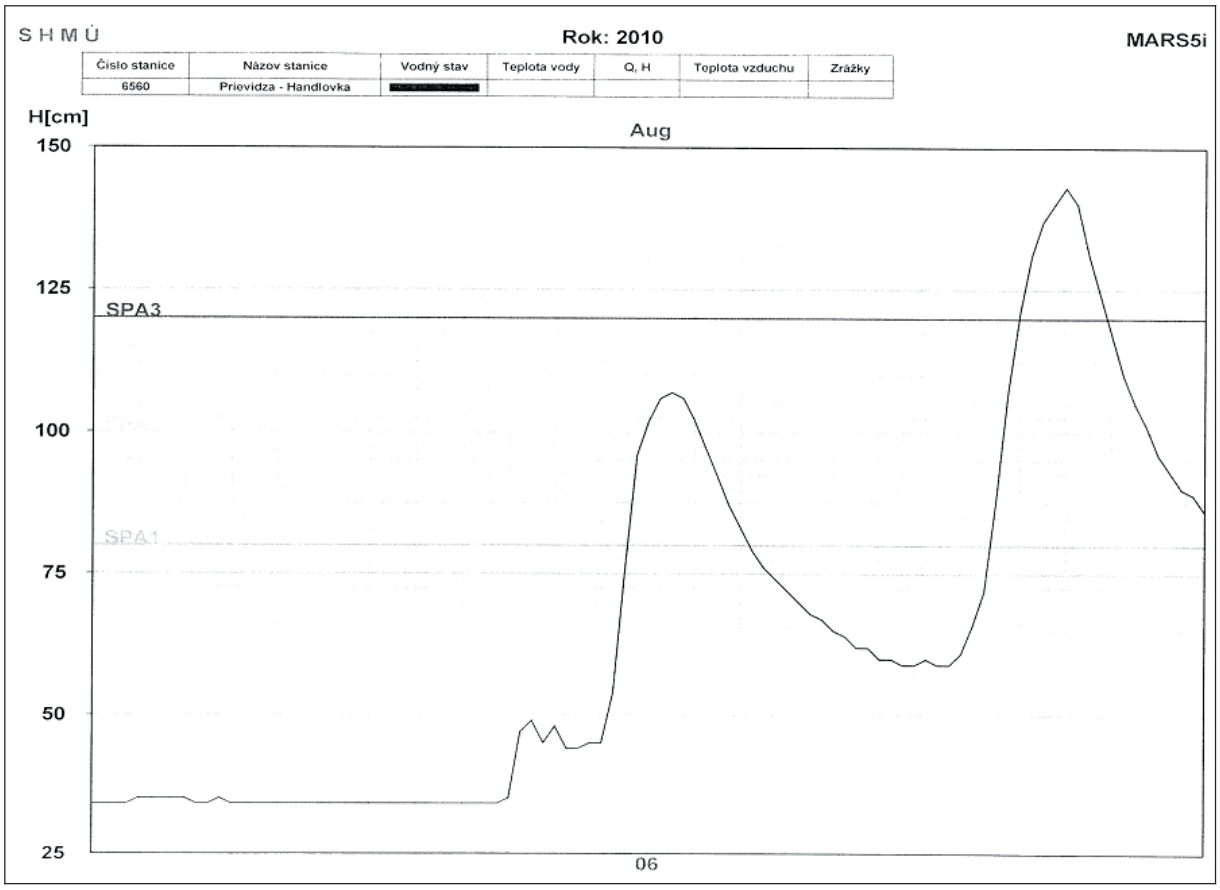
Každoročne nás príroda poučuje o svojej nevyspytateľnosti a sile prostredníctvom rôznych prírodných hrozieb. Povodeň patrí medzi prírodné javy, pred ktorými sa dá utiecť aj sa do istej miery chrániť, v prípade dobre fungujúcej predpovednej hydrologickej služby. Prívalové povodne sú však veľmi ťažko predpovedateľným druhom povodne. Kvôli svojej ťažkej predpovedateľnosti a rýchlemu priebehu sú to práve prívalové povodne, ktoré si ročne vyžiadajú v našich končinách najviac obetí na ľudských životoch, čo nám dokazuje aj nedávny príklad z Liberecka.

Je teda prirodzené, že je snahou hydrologickej a meteorologickej predpovednej služby vyvinúť nástroje, ktoré nám umožnia lepšiu predpovedateľnosť intenzity a lokality výskytu prívalových zrážok a následne nám umožnia predpovedať aj možnosť výskytu a potenciálnu intenzitu prívalovej povodne.

2. Prívalové zrážky a prívalové povodne

Prívalový dážď sa dá najjednoduchšie definovať ako dážď veľkej intenzity, krátkeho trvania a malého plošného rozsahu. Na stanovenie toho, či ide o prívalový dážď neexistujú jednotné kritériá, všeobecne sa však udáva intenzita 10 – 80 mm v priebehu max. 180 minút. [2].

V nadväznosti na túto definíciu prívalového dažďa je potom prívalová povodeň povodňou zapríčinenou prívalovým dažďom [4], s veľmi rýchlym vývojom, kedy v priebehu niekoľkých desiatok minút, prípadne niekoľko mála hodín dochádza k výraznému vzostupu vodných hladín a vzápätí aj k ich výraznému poklesu [4]. Hydrogram typický pre prívalovú povodeň je na Obr. 1.



Obr.1: Hydrogram prívalovej povodne – Prievidza – Handlovka (6. 8. 2010).

Nebezpečenstvo prívalových povodní spočíva vo viacerých faktoroch. Škody spôsobuje nielen samotná masa prúdiacej vody a účinky zatopenia, ale aj dynamika prúdiacej vody, ktorá býva práve pri prívalových povodniach značná. S veľkou dynamikou priamo súvisí aj malá možnosť predpovede a krátka doba nástupu povodne.

Prívalové zrážky bývajú zväčša spojené s výskytom búrkových situácií v letnom období. Konvekciu, a s ňou spojené búrky, spôsobuje rozdielne zahrievanie zemského povrchu, výstupné prúdy na orografických prekážkach alebo strih vetra. Dochádza k nej aj na studených frontoch, kedy je konvekcia zapríčinená vytláčaním ľahšieho teplého vzduchu chladnejším studeným [4]. V našich podmienkach sú prívalové povodne spravidla spôsobené zrážkami veľkej intenzity s úhrnmi často nad 100 mm v priebehu jednej až troch hodín. V roku 1998 bola prívalová povodeň v povodí Malej Svinky spôsobená zrážkami, ktorých intenzita dosahovala 3 $mm.min^{-1}$ a celkové zrážkové úhrny dosahovali 60 – 100 mm, pričom priemerná intenzita dažďa počas celej zrážkovej udalosti bola asi 50 $mm.h^{-1}$ [8]. Keďže takéto množstvo zrážok málokedy vypadne z jednej búrky, sú prívalové zrážky podmienené javom nazývaným „train effect“, čo je líniové zoskupenie búrok a ich postup cez približne rovnaké územie.

Vznik prívalových povodní je okrem zrážok podmienený aj ďalšími faktormi. Najväčší vplyv majú georeliéf a vlastnosti krajiny, spolu s nasýtenosťou povodia predchádzajúcou zrážkovou činnosťou (IPZ – Index predchádzajúcich zrážok). Prívalové povodne sa najčastejšie vyskytujú v oblastiach s väčším sklonom reliéfu. Väčší sklon nielen zvyšuje rýchlosť koncentrácie zrážok, ale aj znižuje retenčný potenciál krajiny. Z vlastností krajiny majú najväčší vplyv infiltračné a drenážne vlastnosti pôd a substrátu a retenčné vlastnosti krajinnej pokrývky [6]. Pri extrémnej intenzite zrážok a väčšom sklone povodia však vlastnosti povodia ustupujú do pozadia kvôli extrémne rýchlemu odtoku vody z povodia do recipientu.

Na základe vyššie spomenutého by sa dali za najcitlivejšie oblasti označiť flyšové oblasti karpatského oblúka. Je to však príliš veľké zovšeobecnenie, keďže napríklad v roku 1998 sa vyskytlo viacero prívalových povodní aj v povodiach na úpätiach Malých Karpát, čo je pohorie tvorené prevažne kryštalinikom [1]. V podstate by sa teda dalo povedať, že jednotné kritérium na určenie citlivejšej oblasti neexistuje a určenie najviac zraniteľných oblastí bude jednou z úloh projektu INCA – CE, ktorý spomíname nižšie.

3. Predpovede prívalových zrážok a prívalových povodní

Všeobecne platí tvrdenie, že čím je meteorologický jav kratší a na čím menšej ploche sa vyskytne, tým je ťažšie predpovedateľný. Keďže je životnosť konvektívnych buniek len rádovo desiatky minút, či niekoľko hodín a ich priestorový dosah je v rádoch kilometrov, patria medzi najťažšie predpovedateľné meteorologické javy [4]. Meteorologické modely síce dokážu predpovedať miesta s výskytom „optimálnych“ podmienok na vznik konvencie a prívalových zrážok, ale nedokážu určiť presnú lokalitu výskytu ani intenzitu, či úhrn zrážok. Pri predpovedí búrok sa dá použiť viacero parametrov ako sú napríklad CAPE (Convective Available Potential Energy), či KO Index, popisujúce potenciál atmosféry na vznik vertikálnych pohybov konvektívneho typu. Tieto indexy sú však časovo a priestorovo veľmi premenlivé a nedokážeme na základe nich určiť presnú lokalitu vzniku búrkovej činnosti. Východiskom pri trasovaní pohybu vznikajúcich a existujúcich búrok sú metódy nowcastingu, ako je napríklad ďalej popisovaný systém INCA.

Úspešnosť predpovede prívalových povodní priamo úmerne závisí od úspešnosti predpovede prívalových dažďov. Hydrológ však musí pracovať s dvojitou mierou neistoty, kedy je okrem výskytu prívalových zrážok neistá aj konkrétna reakcia zasiahnutého povodia. Značnú úlohu tu zohráva aj nasýtenosť povodia predchádzajúcou zrážkovou činnosťou, či presný rozsah lokality zasiahnutej zrážkovou činnosťou. Čím viac údajov o priestorovom rozšírení a intenzite zrážok má hydrológ k dispozícii, tým presnejšiu predpoveď prívalovej povodne dokáže vytvoriť. Problém pri prívalových zrážkach však spôsobuje často aj fakt, že zrážkomerné stanice nemusia byť zrážkami zasiahnuté a jedinou informáciou o aktuálnom stave zrážkového poľa sú radarové merania.

4. Hydrologické modelovanie a možnosť použitia hydrologických modelov pri predikcii prívalových povodní

Hydrologické modelovanie prináša dobré výsledky pri simulovaní odtoku vody z povodia pri dlho trvajúcich zrážkach. Pri prívalových zrážkach sa však znižuje vplyv primárneho retenčného potenciálu povodia a stúpa vplyv svahovitosti reliéfu spolu s výskytom útvarov spomaľujúcich odtok vody z povodia (priehradky, poldery atď.). Následkom tohto je oslabená možnosť uspokojujúcej simulácie odtoku, keďže väčšina komplexných komerčných hydrologických modelov je nastavená na určitý retenčný potenciál krajiny na základe jej pokryvu a využitia. Východiskom je použitie špeciálne upravených hydrologických modelov, prípadne špeciálnych modelov určených práve na simulovanie odtoku z povodia pri prívalových zrážkach.

V rámci riešenia projektu HYDRATE boli autormi z jednotlivých krajín vrátane SR používané hydrologické modely na spätnú simuláciu odtoku vody z koryta [3]. Bola použitá kombinácia metódy CSN kriviek a modulu prerátavajúceho odtok vody zo svahov a v riečnych korytách na základe aproximácie kynetickej vlny [3].

Iný prístup predstavuje použitie konceptuálneho modelu sústavy lineárnych nádrží [5]. V tomto prípade bolo potrebné výrazne upravovať niektoré parametre vstupujúce do modelu a aj napriek tomu neboli výsledku na požadovanej úrovni kvality.

5. INCA (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis)

Nowcastingový systém INCA je vyvíjaný v rakúskom stredisku ZAMG (ZentralAnstalt fur Meteorologie und Geodynamik) od roku 2006. Od roku 2007 je do vývoja systému zapojený aj SHMÚ. Hlavným cieľom tohto systému je zlepšenie krátkodobej predpovede počasia (0-6 h). Systém pracuje s veľkým vertikálnym (200 m) aj horizontálnym rozlíšením (1x1 km) a s malým časovým krokom, čo je nutné kvôli zložitosti a dobrej rozlíšiteľnosti procesov v atmosfére [7].

INCA je modulárny systém a jeho špecifickou vlastnosťou je, že okrem nameraných údajov berie do úvahy aj výstupy z numerického modelu ALADIN. Analyzuje a predpovedá meteorologické polia teploty (3D), atmosferických zrážok (2D), vetra (3D), vlhkosti (3D), oblačnosti (2D) a globálneho žiarenia (2D). Snahou systému INCA je použiť pri analýze aktuálneho stavu všetky momentálne dostupné údaje nielen z automatických meteorologických a hydrologických staníc, radarov, družíc ale aj napr. zo systému na detekciu bleskov SAFIR.

Do analýzy a predpovede poľa atmosférických zrážok vstupujú údaje z 30 profesionálnych meteorologických staníc (AWS), 74 automatických zrážkomerných staníc APS, približne 200 hydrologických staníc MARS5i (AHS), z 2 meteorologických radarov a spolu s nimi aj vyššie spomenuté produkty numerických modelov ALADIN. Analýza atmosférických zrážok je vykonaná zlúčením interpolovaného poľa staničných a radarových údajov. Údaje mimo Slovenskej republiky nám zabezpečujú iba radarové pozorovania spolu s minimálnou interpoláciou zrážok [7]. Pred samotnou analýzou je potrebná kontrola dát kvôli vylúčení chybných meraní z automatických staníc.

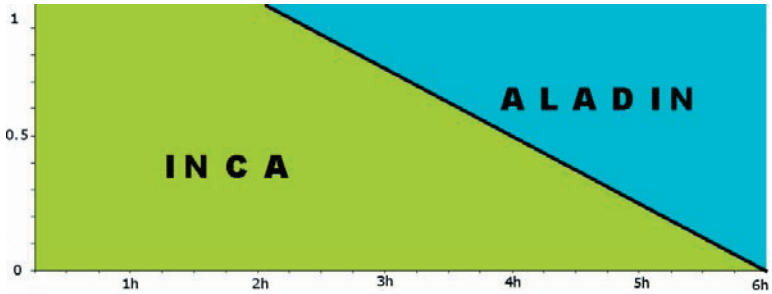
Keďže staničná sieť nie je kompatibilná s pravidelnou sieťou 1*1 km, s ktorou pracuje INCA, musia byť merania nainterpolované do siete pomocou metódy váhovania inverznou vzdialenosťou (IDW - inverse distance weighting). Zrážkové polia získané radarovým meraním netreba interpolovať do siete, ale aj tu sa vyskytujú nepresnosti spôsobené závislosťou radarovej odrazivosti od aktuálneho stavu atmosféry a vzdialenosti od radaru.

Zlúčenie polí atmosférických zrážok $P^{STAT}(i,j)$ a radarov $P^{**RAD}(i,j)$ do výsledného poľa $P^{INCA}(i,j)$ je zabezpečené pomocou váhovej funkcie „v“.

$$P^{INCA}(i,j) = (1-v)P^{STAT}(i,j) + vP^{**RAD}(i,j) \tag{1}$$

$$v(i,j) = 1 - \exp\left(-\left(C\frac{P^{**RAD}(i,j) - P^{**RADSTAT}(i,j)}{\max\left(P^{**RADSTAT}(i,j), 0.1\right)}\right)^2\right) \quad , \ C=2$$

Predpovede atmosférických zrážok v modeli INCA pozostávajú z extrapolácie pozorovaní z predchádzajúcich 4 analýz zrážkových polí a predpovedi modelu ALADIN. Na extrapoláciu pozorovaní bolo testovaných niekoľko rôznych druhov vektorov. Prechod medzi extrapolovanými meraniami a numerickou predpoveďou je zabezpečený pomocou váhovej funkcie znázornenej na Obr. 2.



Obr. 2: Váhová funkcia použitá systémom INCA pri predpovedi na 6 h, zdroj Nestiak, 2007 [7].

Ako aj z obrázku vyplýva, systém INCA dáva v prvých hodinách lepšie predpovede ako numerický model. Potom už jeho váha klesá až k hraničnej hodnote šiestich hodín. Vzhľadom k plánovanému požitiu systému INCA (detekcia a predpoveď prívalových zrážok) sú 2 hodiny postačujúci čas s ohľadom na rýchlosť vývoja konvektívnej oblačnosti a zrážkových jadier.

6. INCA-CE

Systém INCA je hlavným pracovným nástrojom pri realizovaní projektu INCA-CE (CE-Central Europe). Hlavným cieľom tohto projektu je minimalizovať škody spôsobené prírodnými silami založenými na vplyve počasia ako sú povodne, búrky, či suchá. Vďaka tomuto projektu sa systém, pôvodne určený len ako pomocný nástroj pre krátkodobú predpoveď počasia pre presnú lokalitu, stane aj zdrojom vstupných údajov pre systém hydrologických výstrah a následne aj pre systém civilnej ochrany a pomôže tak priamo zachraňovať ľudské životy a majetok.
Do realizácie projektu INCA-CE je zapojených 16 projektových partnerov z 8 stredoeurópskych krajín. Okrem hydrometeorologických servisov a vývojových stredísk sa partnermi stali aj inštitúcie zastupujúce civilnú ochranu a správu ciest jednotlivých krajín, čo by malo zabezpečiť priame praktické využitie výsledkov projektu. Projekt odštartoval v roku 2010 a trvať by mal do roku 2013.
Slovensko je na projekte zastúpené SHMÚ a ministerstvom vnútra (civilnou ochranou). Úlohou SHMÚ bude vyvinúť nástroje, ktoré budú slúžiť najmä na krátkodobú predpoveď prívalových zrážok a na ne nadväzujúcich prívalových povodní. Dané nástroje budú priamo napojené na systém hydrologických výstrah. V tomto systéme sú aj v súčasnosti zahrnuté výstrahy na prívalové povodne. Tieto výstrahy sú však vydávané len na základe meteorologických výstrah na búrky a na základe znalosti empirickej citlivosti jednotlivých oblastí na prívalové povodne. Cieľom projektu INCA-CE bude tento systém vydávania výstrahy zautomatizovať pomocou jednoduchých hydrologických modelov.
Bližšie informácie o projekte INCA-CE sú dostupné na stránke http://www.inca-ce.eu

7. Záver

Na detekciu a predpoveď prívalových zrážok, a za nimi nasledujúcich prívalových povodní, bolo za ostatné roky vyvinutých viacero nástrojov. Z oblasti meteorológie sú to zdokonaľujúce sa meteorologické numerické modely typu ALADIN, ktoré dokážu predpovedať podmienky vhodné na tvorbu konvektívnych zrážok. Na presné trasovanie a odhad intenzity prívalových zrážok slúžia systémy nowcastingu. Na Slovensku sa používa systém INCA, ktorý bude vo svojej finálnej verzii schopný presnejšie odhadnúť vývoj konvektívnej oblačnosti a s ňou spojenej intenzívnej zrážkovej činnosti v časovom horizonte 0 až 6 h.
V oblasti hydrológie je veľa práce sústredenej do napĺňania cieľov projektu INCA – CE. V prvom rade to bude presné určenie oblastí náchylných na tvorbu prívalových povodní pri intenzívnej zrážkovej činnosti. Druhá fáza práce už bude priamo napojená na produkty systému INCA pomocou jednoduchých zrážkovo odtokových modelov, kde bude dôraz kladený na svahovitosť terénu a rýchlosť odtekania vody na úkor retenčných vlastností povodia, ktoré sú samotným charakterom tvorby odtoku z prívalových zrážok zatláčané do pozadia.

Poďakovanie
Táto práca bola podporovaná projektom INCA-CE, spolufinancovaným EÚ.

Literatúra

[1] ABAFFY, D., 2006. Povodne v Slovenskej republike v rokoch 1996 – 2005 a ich následky. In: *Vodohospodársky spravodajca, roč. XLIX, č. 3-4., s. 12-17.*

[2] BEDNÁŘ, J. a kol., 1993. Meteorologický slovník výkladový & terminologický. Academia, Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha.

[3] BORGA, M. (project coordinator), 2010. Post flood event analyses. Methods and case studies in post flood event data collection and analyses – project report. [V digitálnej forme].

[4] DAŇHELKA, J., – KUBÁT, J., 2009. Přívalové povodně na území České republiky v červnu a červenci 2009. MŽP ČR, ČHMÚ, Praha. ISBN 978-80-86690-75-9

[5] HEŘMANOVSKÝ, M., 1997. Srážko-odtokové modelování na malých povodích. Zborník súťažných prác mladých odborníkov (Bratislava, 14. 11. 2007). SHMÚ, Bratislava. *ISBN 978-80-88907-59-6.*

[6] MINÁR, J. – TRIZNA, M. – BARKA, I. – BONK, R., 2005. Povodňový potenciál na území Slovenska. Geografika Bratislava, Bratislava, 2005, ISBN 80-968146-5-6

[7] NEŠTIAK, M., 2007. INCA (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis). Zborník súťažných prác mladých odborníkov (Bratislava, 14. 11. 2007). SHMÚ, Bratislava. ISBN 978-80-88907-59-6.

[8] NOVÁK, J. – ŠKODA, P., 2002. Povodeň na severovýchodnom Slovensku v júli 1998. In: *Zborník prác SHMÚ*, zv. 43. SHMÚ Bratislava, 1998, s. 12-24., ISBN80-88 907-05-5

[9] SINGH, V. P., 1995. Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Littleton, Colorado.186 pp.

[10] SUN, X. – MEIN, R. G. – KEENAN, T. D. – ELLIOTT, J. F., 2000. Flood estimation using radar and raingauge data. In: *Journal of Hydrology,* č. 239, pp 4–18.

Kontakty na autora

1 Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava, e-mail: michal.hazlinger@shmu.sk,

2 Slovenský hydrometeorologický ústav, Žilina, e-mail: marcel.zvolenský@shmu.sk,

MOŽNOSTI PREDIKCE PŘÍVALOVÝCH POVODNÍ V PODMÍNKÁCH ČESKÉ REPUBLIKY

Lucie Březková[1], Petr Novák[2], Milan Šálek[1], Martin Jonov[3], Šárka Maděřičová[3], Hana Kyznarová[2], Petr Frolík[2]

Abstrakt

Povodně způsobené přívalovými srážkami jsou charakteristické velmi rychlým průběhem a jako takové jsou (často oprávněně) považovány za jev, který nelze předpovídat. S rozvojem měření srážek pomocí meteorologických radarů a především pak s rozvojem metod nowcastingu (velmi krátkodobé předpovědi srážek založené na extrapolaci radarového echa) vyvstává otázka, zda by tyto nástroje nešlo využít k predikci přívalových povodní.

Příspěvek shrnuje dosavadní zkušnosti autorů s predikcí přívalových povodní, které byly získány podrobnou analýzou vybraných případů z posledních let. V současné době se operativně počítá nowcasting srážek několika metodami, které se liší způsobem výpočtu pohybového pole a extrapolovaným radarovým produktem (COTREC, CELLTRACK, COTREC-ext aj.). Předpovědi jsou jsou aktualizovány každých 5 nebo 10 minut v závislosti na metodě. Jako měřená srážka slouží kombinace radarového a srážkoměrného měření, příp. odhad srážek pomocí tzv. adjustovaného radaru.

Příspěvek se zabývá možnostmi predikce přívalových povodní jak na úrovni srážek (kdy je průběžně analyzována měřená a předpovídaná průměrná srážka na povodí), tak ve spojení se srážkoodtokovým modelem (HYDROG – Starý et al. 1998). Výsledky naznačují možný přístup při predikci tohoto typu povodní v operativním provozu.

Klíčová slova: předpovědi průtoků, přívalové povodně, hydrologický model

1. Úvod

Na přelomu června a července 2009 bylo počasí v České republice ovlivněno 12 dnů trvající tlakovou níží s centrem nad východním středomořím a Balkánským poloostrovem. V důsledku zasáhla naši zemi série silných bouřek, které na mnoha místech způsobily přívalové povodně s katastrofálními následky. Celkové škody jsou odhadovány na 5 mld. Kč, 15 lidí zemřelo.

Ačkoliv jsou přívalové povodně považovány za jev velmi obtížně předpovídatelný, první snahy v tomto směru již byly učiněny (viz Šálek et al. 2006). Některé povodně mohou být předpovězeny s předstihem několika desítek minut v závislosti zejména na přesnosti radarového měření, pohybu a vývoji konvektivních buněk, apod. Pro předpověď přívalových povodní je nutné použít velmi krátkodobou předpověď srážek (nowcasting) získanou zpravidla extrapolací radarového echa. Na ČHMÚ se v posledních letech vyvíjejí různé metody nowcastingu. Některé jsou již v operativním provozu - např. od roku 2004 COTREC (Novák, 2007) či od roku 2008 CELLTRACK (Kyznarová et. al. 2009), jiné se do operativního provozu teprve připravují (COTREC2, COTREC EXT – Novák et. al. 2010). Takto získané předpovědi srážek, které se zpravidla aktualizují v kroku 5-10 minut, pak nabízejí ve spřažení s hydrologickým modelem pokrok v oblasti předpovědí přívalových povodní.

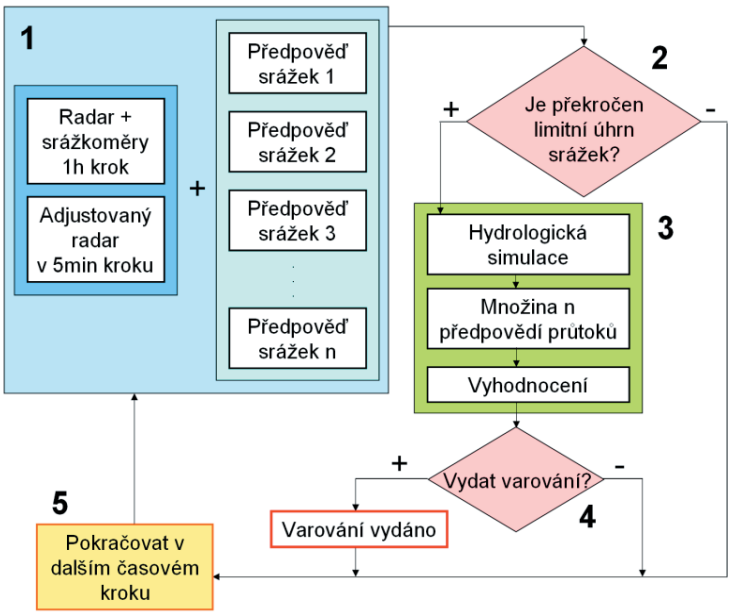
Problém predikce přívalových povodní spočívá zejména ve velké nejistotě předpovídaných i měřených srážek. Chyby měření i předpovědi v tomto směru mohou být skuteně značné. Proto je žádoucí zohlednit tuto nejistotu při výpočtu předpovědi a zejména pak při rozhodování, zda vydat pro příslušnou lokalitu varování.

Příspěvek popisuje, jakým způsobem je možné k předpovědi přívalových povodní přistupovat. Navrhovaná metoda je testována na vybraných povodních, které zasáhly území České republiky v posledních letech.

2. Metoda

Navrhovaná metoda predikce přívalových povodní spočívá v podrobné analýze aktuální situace v zájmovém povodí, a to na úrovni srážek, kdy je kontrolováno překročení limitní průměrné srážky pro dané území, a na úrovni průtoků, kdy je simulován srážko-odtokový proces v povodí v závislosti na měřené a předpovídané srážce. Velikost zájmového území by neměla překročit cca 100 km^2.

Analýza probíhá v několika krocích – viz Obr. 1.



Obr. 1: Analýza aktuální situace v povodí.

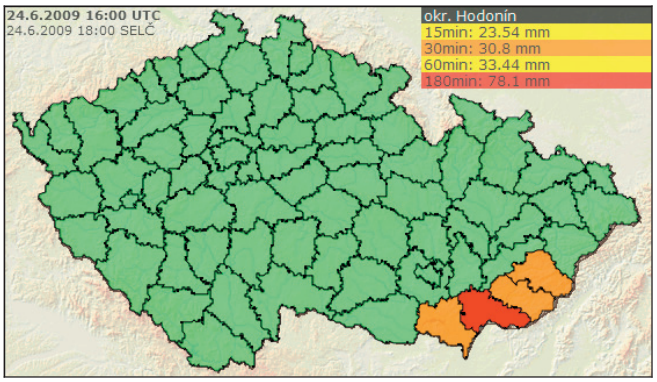
1- Analýza srážek (viz Obr. 3). 2- Porovnání naměřených a předpovězených srážek s limitním průměrných srážkovým úhrnem na povodí. 3- Hydrologické simulace založené na různých scénářích srážek (nowcastingu). 4- Rozhodnutí týkající se případného vydání varování do ohrožené oblasti. 5- Pokračování v dalším časovém kroku. Celý proces se opakuje v kroku 5-10 minut.

Celý proces probíhá v cyklu skládajícím se z několika kroků:

1. *Analýza srážek.* V tomto kroku je naměřená srážka (zpravidla adjustovaný radarový odhad kombinovaný se srážkoměry – viz Šálek et al. 2004) kombinována s různými typy nowcastingu srážek. Protože odhady srážek získané kombinací radarového a srážkoměrného měření jsou dostupné v hodinovém kroku (zpravidla ve 20. minutě nominální hodiny), jsou doplněny odhady z adjustovaného radaru, jež jsou dostupné v 5minutovém kroku. V současné době jsou k dispozici tyto typy nowcastingu srážek:
    a. COTREC –viz Novák (2007),
    b. COTREC EXT využívající data z radarů okolních států (Novák et al. 2010),
    c. CELLTRACK – viz Kyznarová et al. (2009),
    d. PERSISTANCE (opakování poslední naměřené hodnoty).

    Předpovídané srážky je zpravidla nutné adjustovat – k tomu se využívá obvykle poslední dostupný adjustační koeficient (mean field bias – viz Šálek at al. 2004). Předpovědi srážek adjustované různými adjustačními koeficienty mohou tvořit další varianty předpovědí srážek a být tedy součástí množiny všech dostupných

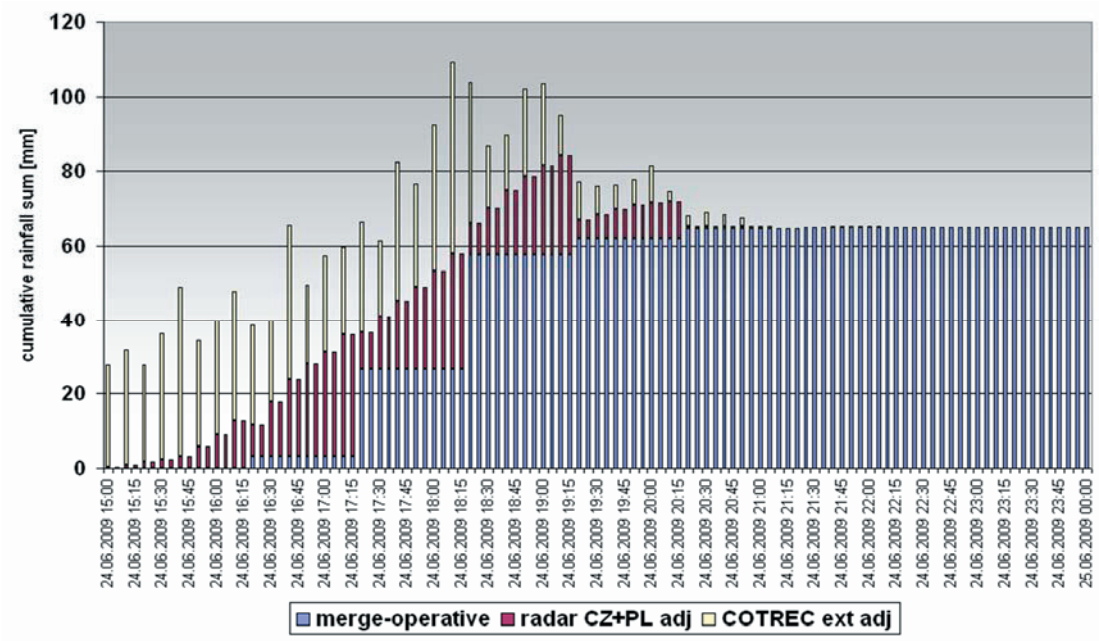
předpovědí srážek. Ty jsou pak podkladem pro další analýzy (viz Březková et al. 2008). Analýza srážek může být zobrazena pomocí mapy (viz Obr. 2), případně pomocí grafu (viz Obr. 3). Protože analyzujeme průměrnou srážku na povodí, má tato analýza význam pouze pro velmi malá povodí.



Obr. 2: Mapa srážkové analýzy. Překročení limitních úhrnů je znázorněno různými barvami (viz Novák et al. 2010).

2. *Rozhodovací bod.* Kontroluje se srovnání naměřených a předpovězených úhrnů se stanovenými limitními průměrnými úhrny srážek na povodí. Limitní úhrny mohou být stanoveny buď subjektivně na základě zkušenosti hydrologa, případně mohou být získány na základě modelového výpočtu a aktuální nasycenosti povodí (viz Šercl et al. 2010).
3. *Hydrologická simulace.* V případě překročení srážkových limitních úhrnů je spuštěn hydrologický výpočet. K tomu je nutné využít (semi) distribuovaný hydrologický model s dostatečně podrobně popsanou vstupní srážkou. V našem případě je využíván model HYDROG uzpůsobený simulaci srážko-odtokového procesu na malých povodích (viz Šálek et al. 2006). Takto získáme množinu předpovědí průtoků pro dané povodí. Celkovou množinu předpovědí však můžeme získat v konečném důsledku na základě simulací z více hydrologických modelů. Pro každé povodí je dále nutné stanovit kritickou hodnotu průtoku. U pozorovaných povodí se stanovenými stupni povodňové aktivity je to obvykle 3. SPA (v souladu se Systémem integrované výstražné služby). U nepozorovaných povodí je nutné tuto hodnotu stanovit individuálně (např. podle míry protipovodňové ochrany v místních obcích).
4. *Rozhodovací bod.* V případě překročení limitní hodnoty průtoku je třeba se rozhodnout, zda vydat varování do ohrožené lokality či nikoliv. Pravidlem pro toto rozhodnutí může být například překročení limitní hodnoty průtoku alespoň v jednom případě. Je třeba však počítat s velkým množstvím falešných alarmů.
5. *Pokračování v dalším časovém kroku.*

Uvedená metoda se snaží postihnout nejistotu předpovídání přívalových povodní pomocí variantního přístupu. Zároveň je aplikovatelná v reálném čase. Výpočty předpovědí průtoků v operativním provozu by byly dostupné přibližně v 5. minutě po radarovém měření.



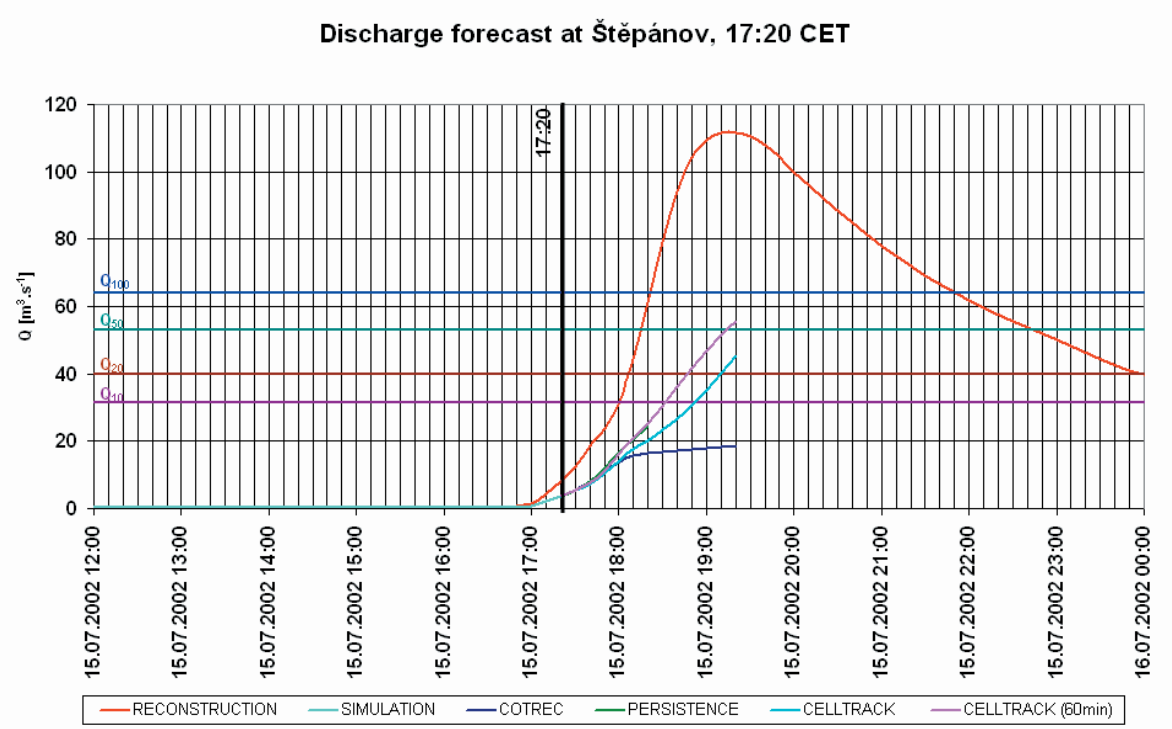
Obr. 3: Ukázka analýzy srážek – kumulace průměrného srážkového úhrnu na povodí je každou desátou minutu doplněna o předpověd srážek (adjustovaný COTREC EXT). Modře jsou znázorněny kombinace radarového a srážkoměrného měření dostupné v hodinovém kroku vždy k 20. minutě nominální hodiny. Červeně je znázorněn přírůstek srážky v 5minutovém kroku získaný z adjustovaného radarového odhadu srážek. Žlutě je pak předpovídaný 3h srážkový úhrn získaný metodou COTREC EXT, který je dostupný každou desátou minutu. Analýza byla provedena pro povodí Luhy.

3. Případové studie

Uvedená metoda byla testována na čtyřech epizodách. Jedná se o přívalové povodně v povodí Hodonínky (15. 7. 2002), Sloupského potoka (26. 5. 2003), Jičínky (24. 6. 2009) a Luhy (24. 6. 2009). Povodí Jičínky a Sloupského potoka jsou pozorovaná povodí. Na Hodonínce byla povodeň vyhodnocena hydraulickým výpočtem podle informací získaných z terénního průzkumu. V povodí Luhy nebyla povodeň vyhodnocena, avšak podle obrovských povodňových škod se dá předpokládat, že kulminační průtok přesáhl Q_{100} v závěrovém profilu. Výsledky simulací jsou souhrnně uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1: Výsledky simulace operativních předpovědí průtoků pro vybrané přívalové povodně

Povodí	Jičínka	Luha	Hodonínka	Sloupský potok
Plocha [km^2]	95	96	67	50
Závěrový profil	Nový Jičín	Jeseník nad Odrou	Štěpánov	Sloup
Limitní hodnota průtoku [$m^3.s^{-1}$]	49	37	32	12
Q_{100} v závěrovém profilu [$m^3.s^{-1}$]	178	87	64	35
N-letost povodně	>>Q_{100}	>>Q_{100}	>>Q_{100}	>Q_{50}
Čas, kdy má smysl ještě vydat varování (pro závěrový profil)	18:40 (CET)	20:00 (CET)	17:50 (CET)	13:50 (CET)
Čas možného vydání varování	17:40	18:40	17:20	13:20
Předstih předpovědi [min]	60	80	30	30



Obr. 4: Ukázka variantní předpovědi průtoků založená na několika typech nowcastingu (simulace operativních předpovědí průtoků při povodni na Hodoníce 15. 7. 2002).

4. Závěr

Výsledky ukazují, že některé přívalové povodně jsou s využitím nowcastingu srážek spřaženého s distributivním hydrologickým modelem předpovídatelné s předstihem maximálně několika desítek minut. Protože přívalové povodně jsou velmi extrémním jevem, není směrodatná v případě takové predikce její přesnost, ale pouze kvalitativní hodnota - zda hrozí nebezpečí povodně či nikoliv. Protože ČHMÚ je v dnešní době schopen zajistit operativní výpočet několika metod srážkového nowcastingu, je vhodné přistupovat k problematice analýzou všech dostupných variant předpovědi srážek.

Uvedená metoda bude testována operativně na brněnské pobočce ČHMÚ, čímž získáme také lepší představu o přesnosti jednotlivých metod nowcastingu nejen z pohledu varování před povodněmi, ale také z pohledu falešných alarmů.

Je třeba také podotknout, že případné varování je nutné co nejrychleji telefonicky směřovat do ohrožení lokality, což Systém integrované výstražné služby využívající prostředků elektronické pošty a sms zpráv prakticky neumožňuje.

Poděkování

Práce byla vytvořena s podporou projektů GAČR 103/07/1620, MŠMT 1P05ME748 a MŠMT ME09033.

Literatura

[1] BŘEZKOVÁ, L. – JONOV, M. – NOVÁK, P. – ŠÁLEK, M., 2008. Different methods of adjustment of the nowcasting data from the point of view of the hydrological forecasting, In: *Fifth European Conference on Radar in Meteorology (ERAD) 30. 6. - 4. 7. 2008*, Helsinki. ERAD publication series. Conference Abstract. [Full text on enclosed CD].

[2] KYZNAROVÁ, H. – NOVÁK, P., 2009. CELLTRACK – Convective Cell Tracking Algorithm and Its Use for Deriving of Life Cycle Characteristics. Atmospheric Research, 93, pp 317–327.

[3] NOVÁK, P. – BŘEZKOVÁ, L. – FROLÍK, P., 2009. Quantitative Precipitation Forecast using Radar Echo Extrapolation. Atmospheric Research, 93, pp 328–334.

[4] NOVÁK, P. – FROLÍK, P. – BŘEZKOVÁ, L. – JANÁL, P., 2010. Improvements of Czech Precipitation Nowcasting System. In: *ERAD 2010 proceedings. ERAD 2010*, 6. -10. 9. 2010, Sibiu.

[5] STARÝ, M. – TUREČEK, B. Operative control and prediction of floods in the River Odra basin. In.: *Flood Issues in Contemporary Water Management, NATO Science Series,* 2. Enviromental Security - Vol.71, Kluwer Academic Publishers, 2000, pp 229–236, ISBN 0-7923-6452-X.

[6] ŠÁLEK, M. – BŘEZKOVÁ, L. – NOVÁK, P., 2006. The use of radar in hydrological modelling in the Czech Republic - case studies of flash floods. Natural Hazards and Earth System Sciences, 6, pp 229–236.

[7] ŠÁLEK, M. – NOVÁK, P. – SEO, D. J., 2004. Operational application of combined radar and raingauges precipitation estimation at the CHMI. In: *ERAD 2004 proceedings*, ERAD publication series, Vol. 2, pp.16-20.

[8] ŠERCL, P. – DAŇHELKA, J. – TYL, R., 2010. Problematika předpovídání a vyhodnocení přívalových povodní. Sborník Hydrologické dny 2010, 25. - 27. 10. 2010, Hradec Králové.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno,
e-mail: lucie.brezkova@chmi.cz, milan.salek@chmi.cz

2 Český hydrometeorologický ústav, Praha,
e-mail: petr.novak@chmi.cz, kyznarova@chmi.cz, petr.frolík@chmi.cz

3 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ostrava,
e-mail: jonov@chmi.cz, madericova@chmi.cz

OPERATIVNÍ PŘEDPOVĚDI POVODNÍ Z PŘÍVALOVÝCH DEŠŤŮ POMOCÍ FUZZY MODELU

Petr Janál[1], Miloš Starý[2]

Abstrakt

Předpověď povodní z přívalových dešťů je dnes velmi aktuálním tématem. Jedná se o jednu z nejobtížnějších úloh operativní hydrologie. Obtížnost řešení spočívá především v rychlosti průběhu jevu a velké míře neurčitosti obsažené v předpovědi srážek a srážkoodtokovém procesu v rámci malých povodí. Rychlost výpočtu a především schopnost pracovat s neurčitými vstupy patří k přednostem modelů využívajících fuzzy logiku. Prezentovaný fuzzy model byl sestaven ve vývojovém prostředí MATLAB a to na základě zpracované závislosti mezi zvolenými vstupy a výstupem modelu pro množinu malých povodí. Na základě předpovězené srážky nad povodím a geomorfologických vlastností zasaženého povodí je model schopný operativně odhadnout budoucí kulminační odtok a stanovit míru ohrožení povodí povodní z přívalového deště. Model by měl tvořit navazující článek na nowcasting srážek a operativně odhadovat ohrožení pro množinu malých povodí. Model byl sestavený na VUT FAST v Brně v rámci řešeného grantu GAČR 103/07/1620. V rámci jeho poloprovozního testování na ČHMÚ v Brně byla provedena zpětná simulace provozu za období od 24. 6. do 17. 7. 2009. Stručný popis sestavení a kalibrace modelu a vyhodnocení výsledků za simulované období je předmětem příspěvku.

Klíčová slova: fuzzy logika, přívalová povodeň, operativní předpověď

1. Úvod

Se vzrůstající extremitou počasí a s ní spojeným častějším výskytem přívalových srážek a povodní jimi způsobených, rostou požadavky na vývoj systémů pro včasné varování ohrožených osob. Transformace spadlé srážky na odtok v rámci malých povodí je ovlivněna spoustou faktorů s mnohostrannou vzájemnou vazbou a podmíněností, navíc časový a prostorový vývoj přívalových srážek je natolik nevyzpytatelný, že jen těžko budeme hledat jednu metodu, která by problematiku bezezbytku řešila. K úspěchu je třeba kombinovat různé metody a přístupy.

2. Metoda

Teorii fuzzy logiky i dalších použitých metod umělé inteligence (neuronové sítě, genetické algoritmy) lze nalézt např. v [1]. Sestavení a kalibrace modelu je podrobněji popsána např. ve [2] a [3], v dalším se omezíme pouze na stručný popis.

Model sestavený pomocí Fuzzy Logic Toolboxu ve vývojovém prostředí MATLAB [5] zahrnuje sedm vstupních veličin a využívá fuzzy inferenční systém (FIS) typu Mamdani. Vstupní veličiny jsou následující:

– plocha povodí [km^2] ..... *P*

– součinitel tvaru povodí α ……. *a*

– sklonitost povodí (Herbstův sklon) … *SK*

– lesnatost povodí [%] ……*LES*

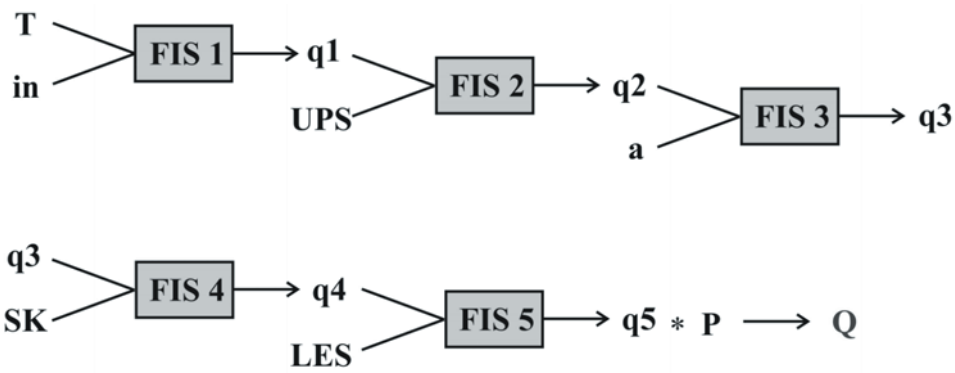
– doba trvání srážky [min] …….. *T*

– průměrná intenzita příčinné srážky [mm.h^{-1}] … *in*

– ukazatel předchozí srážky ……. *UPS*

Výstupní veličinou je kulminační odtok vody z povodí *Q* [m^3.s^{-1}], případně stupeň ohroženosti povodí.

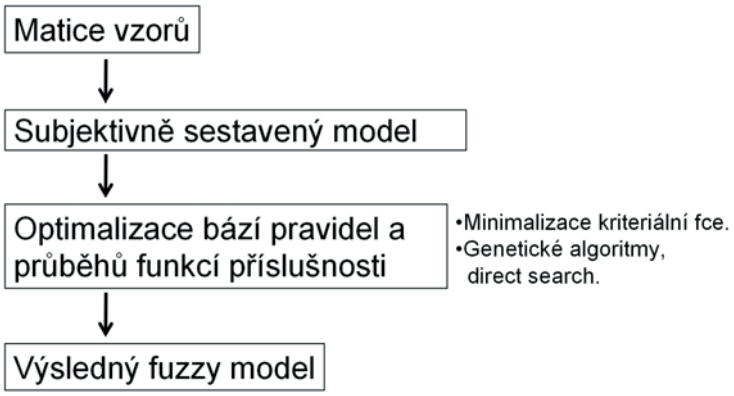
Zvolených sedm vstupních veličin lze do modelu zapojit více způsoby. Vstupy lze všechny zapojit do jednoho FIS, nebo lze vytvořit soustavu více FIS, které na sebe navazují, a vstupy zapojovat postupně. Na Obr. 1 je znázorněna sekvence struktury modelu použitého pro zmíněnou simulaci provozu.



Obr. 1: Schéma sekvence 5 FIS

Na obrázku 1 značí *q1*,…,*q5* dílčí specifické odtoky vody z povodí v jednotlivých fázích výpočtu a *Q* výsledný kulminační odtok.

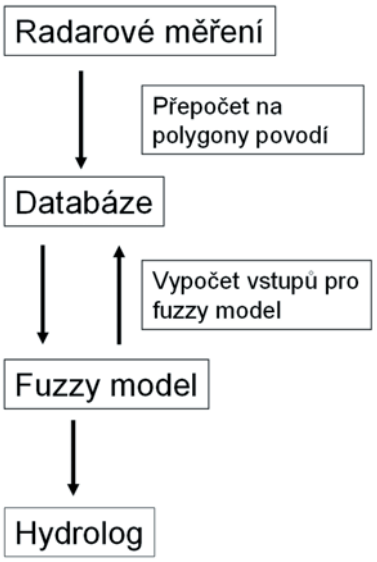
Sestavení modelu vychází z matice vzorů (u neuronových sítí mluvíme o tréninkové matici). Matice vzorů přiřazuje hodnoty výstupní veličiny různým kombinacím hodnot vstupních veličin. Získáme jí rozborem povodňových situací, které nastaly v minulosti. Reprezentativnost matice vzorů má stěžejní vliv na kvalitu výsledného modelu. Sestavení modelu a možnosti kalibrace jsou podrobně popsány v [2]. Postup lze shrnout následujícím schématem.



Obr. 2: Schéma sestavení fuzzy modelu

V praxi by měl model navazovat na nowcasting srážek a v obdobích hrozících přívalových povodní poskytovat hydrologům odhady ohroženosti povodí. V současnosti probíhá testování

modelu na brněnské pobočce ČHMÚ, kde by měl být v budoucnu provozován. Operativní provoz modelu vyžaduje rychlé získání vstupní dat. Vstupní veličiny charakterizující morfologii povodí jsou připravené předem pro celou množinu modelovaných povodí, zbývající vstupy se musí získat z měřených a předpovídaných dat. Za účelem přenosu a zpracování radarových odhadů srážek byla vytvořena databáze, která obsahuje různé produkty radarového měření srážek pro jednotlivá modelovaná povodí a další data potřebná pro provoz modelu. Databáze poskytuje možnost archivace jak vstupních veličin, tak i výstupů modelu a je tak nezbytná pro ladění modelu v průběhu provozu. Operativní provoz modelu lze shrnout schématem na Obr. 3.



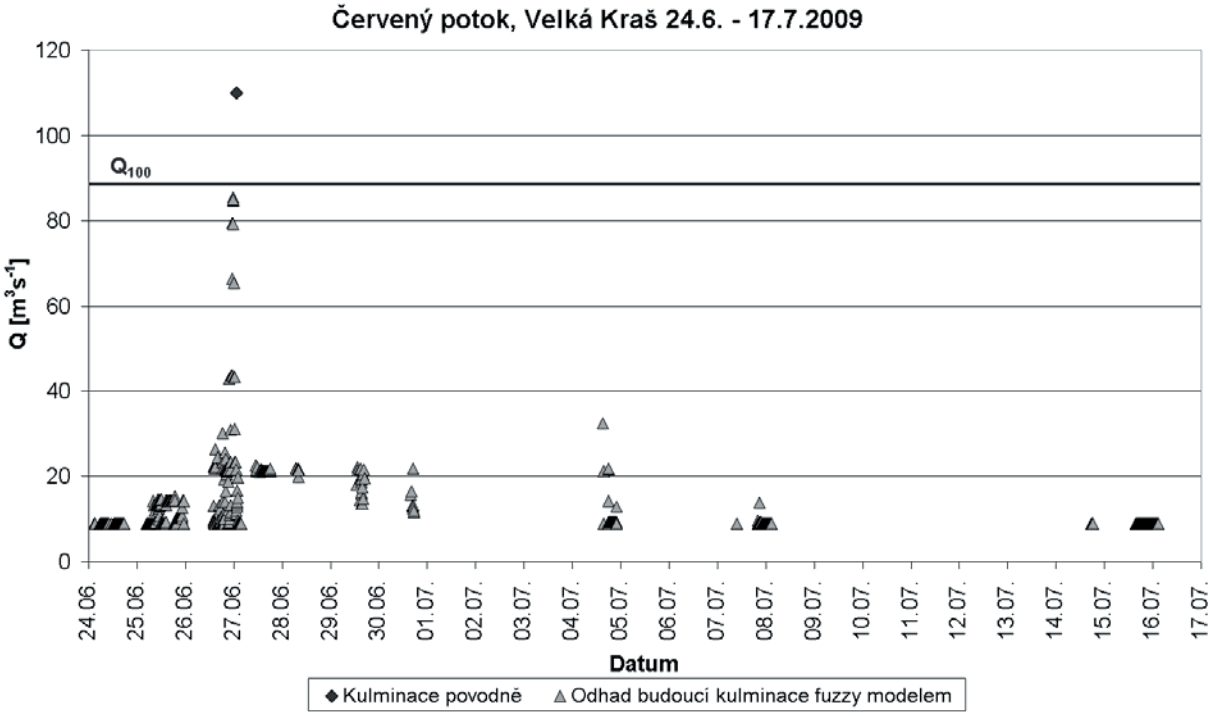
Obr. 3: Schéma operativního provozu modelu.

Výpočet probíhá v časovém kroku pěti minut. Proces operativního získávání hodnot vstupních veličin je popsán v [4].

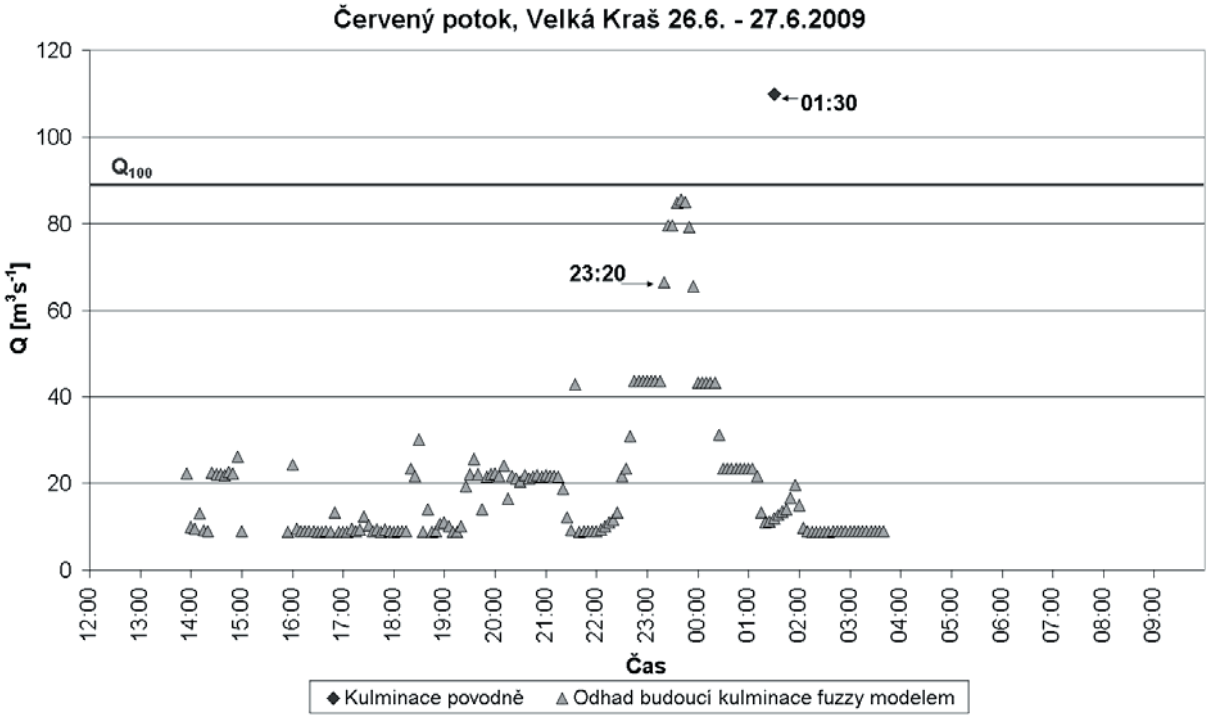
3. Výsledky

Pro období od 24. 6. 2009 do 17. 7. 2009 byla provedena zpětná simulace operativního provozu modelu. Během tohoto období bylo území ČR zasaženo četnými přívalovými srážkami. Využita byla předpověď srážek na 180 minut dopředu. Výpočet probíhal v pětiminutovém kroku. Na obrázcích 4 a 5 jsou uvedeny výstupy modelu pro povodí Červeného potoka se závěrovým profilem ve stanici Velká Kraš. Z měřených hodnot byla za sledované období k dispozici pouze hodnota kulminace 27. 6. 2009, která přesáhla hodnotu 100leté vody. Obr. 4 zachycuje celé simulované období a Obr. 5 přináší bližší pohled na povodeň z noci na 27. 6. Model poskytuje odhady budoucích kulminací a blíže nespecifikuje kdy přesně nastanou. Zmiňme ještě, že nejde o spojité modelování, model v každém časovém kroku znovu zhodnotí situaci na základě aktualizovaných dat bez jakékoli návaznosti na výpočet v předešlém kroku.

Další výsledky simulace operativního provozu lze nalézt v [4], kde jsou uvedeny výsledky pro povodí Jičínky a Fryšávky.



Obr. 4: Výsledky simulace operativního provozu modelu pro povodí Červeného potoka za celé simulované období.



Obr. 5: Výsledky simulace operativního provozu modelu pro povodí Červeného potoka 26. 6. – 27. 6. 2009.

4. Závěr

Fuzzy model navazuje na nowcasting srážek. Úspěšnost předpovědi srážek udává i úspěšnost předpovědi kulminačních průtoků fuzzy modelem. Při simulaci operativního provozu modelu se objevovaly i falešné alarmy. Při simulaci bylo využito předpovědi srážek na 180 minut dopředu. Zkrácením předpovědi na 120 minut lze očekávat nižší počet falešných alarmů, jelikož úspěšnost nowcastingu srážek rychle klesá s rostoucí dobou platnosti předpovědi. Zkrátí se tím ovšem i možný předstih předpovědi před kulminací povodně. Model je kromě verze určené pro operativní provoz, využívající databázi a skripty pro operativní výpočet vstupních hodnot, připraven i ve verzi umožňující přímé zadání hodnot vstupních veličin. Tuto verzi lze použít k odhadu budoucích kulminací pro libovolná povodí, pro které jsou známy hodnoty vstupních veličin. Na začátku řešení se uvažovalo o vytvoření modelu, který by byl univerzální a byl schopný vydávat předpovědi pro libovolná povodí v rámci povodí Moravy. Do simulace operativního provozu byla zahrnuta již poměrně rozsáhlá množina povodí, rozkládající se na velkém území. S rozšiřováním množiny modelovaných povodí roste i obtížnost sestavit model tak, aby podával uspokojivé výsledky na všech povodích. Vztahy mezi vstupy a výstupem modelu se pro vzdálená povodí mohou lišit vlivem dalších charakteristik nepostihnutých zvolenými vstupními veličinami. Řešením může být zavedení dalších vstupů, které by zohlednily např. vliv podloží. Fuzzy model je otevřený pro dodatečné přidání dalších vstupních veličin, případně obměnu těch stávajících. Přidané vstupy však zvyšují počet parametrů, které je třeba nastavit kalibrací a snižují přehlednost modelu. Z dnešního pohledu se jeví jako nadějnější řešení sestavení více fuzzy modelů pro menší skupiny povodí případně sestavení samostatného modelu pro každé povodí z množiny modelovaných povodí. Skupiny povodí by měly být tvořeny povodími s podobnou hydrologickou reakcí na srážku, jejich velikost a rozmístnění vyplyne z výsledků operativního provozu.

Literatura

[1] NACHÁZEL, K. – STARÝ, M. – ZEZULÁK, J., 2004. Využití metod umělé inteligence ve vodním hospodářství. Praha, Academia, ISBN 80-200-02229-4.

[2] JANÁL, P. – STARÝ, M., 2009. Fuzzy model pro předpověď stupně ohroženosti povodí povodněmi z přívalových dešťů. Journal of Hydrology and Hydromechanics, roč. 57, č. 3, s. 145–153. ISSN 0042-790X.

[3] JANÁL, P. – STARÝ, M., 2009. Fuzzy Model Use for Evaluation of Peak Outflow from River Basin during Flash Flood. In: *Proceedings of the tenth international conference on computing and control for the water industry.* Sheffield, pp 725–729. ISBN 978-0-415-54854-9.

[4] JANÁL, P. – STARÝ, M., 2010. Předpověď povodní z přívalových dešťů – fuzzy model. In: *Sborník workshopu A. Patery 2010 – extrémní hydrologické jevy v povodích.* Brno.

[5] MATLAB. 2010.Fuzzy Logic Toolbox – Neuro Toolbox,The Language of Technical Computing. The MathWorks, 1984-2010.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, e-mail: petr.janal@chmi.cz

2 Vysoké učení technické v Brně, Ústav vodního hospodářství krajiny, e-mail: stary.m@fce.vutbr.cz

LOKÁLNÍ VÝSTRAŽNÉ SYSTÉMY NA POVRCHOVÝCH TOCÍCH ČESKÉ REPUBLIKY

Tomáš Kocman[1]

Abstrakt

Mimořádné povodňové situace v posledních letech inicializovaly vyšší zájem o lokální výstražné systémy na vodních tocích. Jedním z prvních takto provozovaných systémů byla protipovodňová ochrana města Šumperku jako ohlas na povodně 1997. Postupně přibývaly další lokality, kde s různým úspěchem zřizovatelé instalují měřící techniku s cílem místně informovat obyvatelstvo o aktuální situaci na vodních tocích.

V rámci projektu „Vyhodnocení povodní v červnu 2009 v ČR“ byla zpracována jeho dílčí část „Lokální výstražné systémy na povrchových tocích ČR“. Na území ČR bylo provozováno k datu 25. 11. 2009 celkem 22 lokálních výstražných systémů, které obsahují 32 měrných bodů na vodních tocích a 8 srážkoměrných bodů.

Cílem příspěvku je poskytnout souhrnné informace o již provozovaných lokálních výstražných systémech, koncepčních řešeních, vazbách na pozorovací sítě ČHMÚ i s. p. Povodí a o dosavadních provozních zkušenostech. Zpracovaná prvotní dokumentace je podkladem pro zavedení jednotného a koordinovaného přístupu k měrným bodům různých provozovatelů na povrchových tocích České republiky.

Klíčová slova: lokální výstražné systémy, monitoring, povodňové orgány

1. Úvod

Předpovědní povodňová služba je zabezpečovaná Český hydrometeorologickým ústavem ve spolupráci se správci vodohospodářsky významných vodních toků. Hlavním účelem služby je informovat povodňové orgány a ostatní účastníky povodňové ochrany o nebezpečí vzniku povodně a jejím vývoji. Výskyt přívalových povodní prokazuje, že nelze zejména pro malá povodí v horských a podhorských oblastech úspěšně zajišťovat hlásnou a předpovědní službu. Pro tyto případy je vhodné měřící systémy provozované ČHMÚ a případně správci toků kombinovat s lokálními výstražnými systémy (dále také LVS). Jedná se nejčastěji o monitoring stavů hladin a srážek v zájmových územích zřizovaný obcemi pro potřeby místního varování o mimořádné srážkové nebo povodňové situaci.

Podporu v instalaci lokálních výstražných systémů můžeme najít mimo jiné v usnesení vlády č. 382 ze dne 19. dubna 2000 „Strategie ochrany před povodněmi v České republice”. Projektová příprava a budování lokálních výstražných systémů je od roku 2008 předmětem dotací MŽP z Operačního programu Životní prostředí, oblast podpory 1. 3. Omezování rizika povodní.

2. Průzkum lokálních výstražných systémů

Vláda České republiky svým usnesením č. 966 ze dne 20. 6. 2009 uložila ministru životního prostředí realizovat projekt „Vyhodnocení povodní v červnu 2009 v ČR“. V rámci tohoto projektu byla zpracována jeho dílčí část “Lokální výstražné systémy na tocích ČR”.

Cílem tohoto projektu bylo vytvoření prvotní evidence doplňkových měřících bodů, jejich posouzení, zhodnocení a případné doporučení k dalšímu využití. Jednání s provozovateli měrných bodů bylo vedeno nejčastěji s pracovníky odboru životního prostředí nebo útvaru krizového řízení. Byly zjišťovány informace o významu lokálního varovného systému, důvodech jeho vzniku a provozních zkušenostech.

Do průzkumu byly zahrnuty všechny provozované lokální výstražné systémy mimo připravovaný projekt Severočeského sdružení obcí (SESO) „Monitoring pohybu hladin a zajištění přenosu dat a informací – protipovodňová opatření na drobných vodních tocích Ústeckého kraje“.

Jedním z prvních lokálních výstražných systémů byl poměrně rozsáhlý projekt protipovodňové ochrany města Šumperku instalovaný rok po povodních 1997. Tento systém je nyní již nefunkční a tak mezi „nejdéle” provozované a funkční lokální výstražné systémy patří protipovodňová ochrana města Olomouce. V roce 2001 byl navržen a následně realizován vzorový projekt Českého hydrometeorologického ústavu protipovodňového varovného systému pro obec Olešnice v Orlických horách. Další instalace byly směrovány zejména do období po povodních v roce 2006.

Na území ČR bylo provozováno k datu 25. 11. 2009 celkem 22 lokálních výstražných systémů, které obsahují 32 měrných bodů na vodních tocích a 8 srážkoměrných bodů. Lokální výstražný systém nejčastěji obsahuje jeden měrný bod na vodním toku bez srážkoměru (celkem 11 případů). Dále jsou provozovány na jeden lokální výstražný systém různé kombinace dvou až max. tří měrných bodů na vodních tocích a jednoho až dvou srážkoměrů.

Tab. 1: Struktura lokálních výstražných systémů

Počet LVS	Lokalita	Vodoměrná stanice	Srážkoměr
1	Rokycany	3	1
1	Prostějov	3	0
1	Rychnov n. Kn.	2	2
1	Svitavy	2	1
4	Trutnov, Dvůr Králové, Olomouc, Světlá n. S.	2	0
1	Olešnice v Orl. horách	1	2
2	Příbram, Dačice	1	1
11	Horažďovice, Přeštice, Klikov, Nová Bystřice, Prachatice, Protivín, Hodonín, Hranice, Přerov, Valašské Meziříčí, Rožnov p. R.	1	0
Celkem: 22		32	8

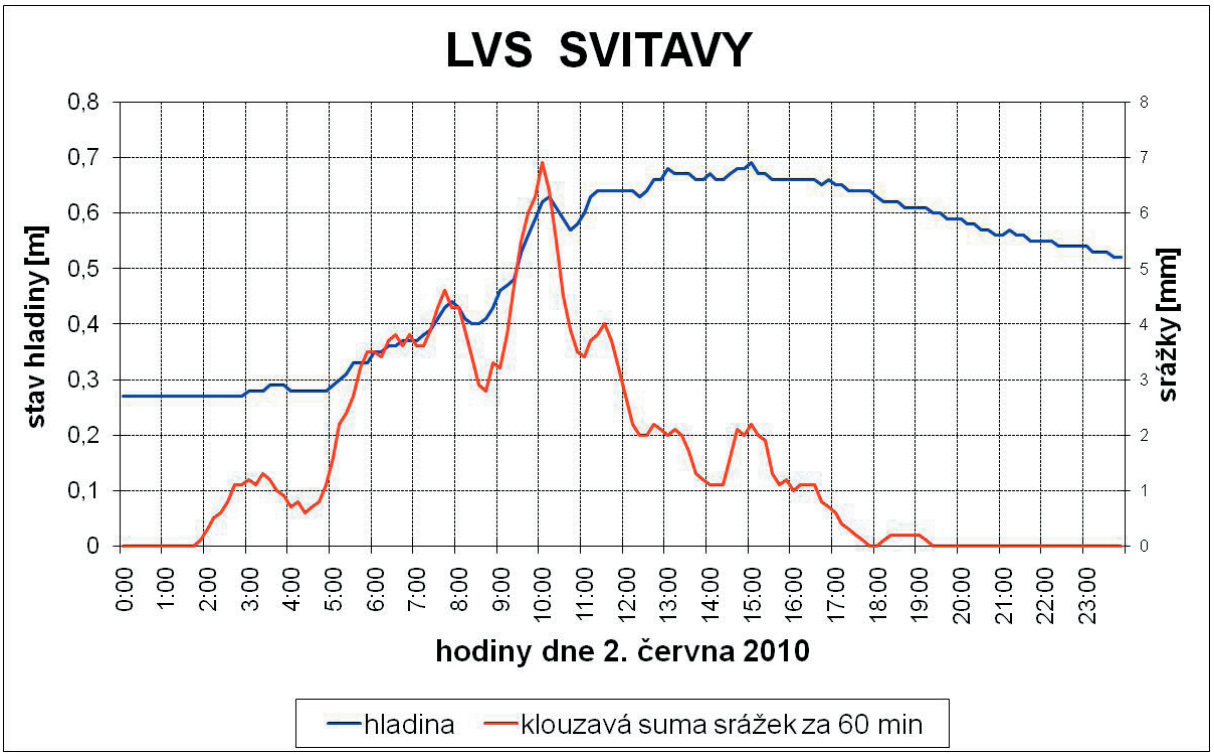
Význam lokálních varovných systémů roste zejména v horských oblastech a v malých povodích. Celkem deset lokálních výstražných systémů bylo instalováno v povodích do 50 km^2 a dalších deset v povodích do 200 km^2. Vznik katastrofálních povodní z přívalových dešťů ovlivňují nejen geografické charakteristiky povodí, ale i jeho zalesněnost, způsob hospodaření na zemědělských plochách, nasycenost půdy a řada dalších faktorů.

Mezi nejlépe koncepčně hodnocené výstražné systémy patří například LVS Rokycany, kde 12 km protiproudně od města je instalována vodoměrná stanice doplněna o srážkoměr a přímo v místě vybřežení toku ve městě Rokycany jsou instalovány další dvě vodoměrné stanice.

Obdobně lze hodnotit i LVS Přerov, kde vodoměrná stanice v Oseku nad Bečvou poskytuje informace pro město Přerov s dostatečným časovým předstihem.

Lokální výstražný systém pro obec Olešnice v Orlických horách dokumentuje vhodné řešení pro malá povodí. V horních částech dvou hlavních povodí jsou instalovány srážkoměry, které s časovým předstihem poskytují informace o aktuální srážce a tím i o očekávaných hladinách na toku Olešenka. Podle vyhodnocení provedeného ČHMÚ srážkoměrné měřící systémy zasílají ve dvou třetinách událostí SMS alarmy 60 – 80 minut před kulminací hladiny v obci.

Automatické měřící systémy poskytují detailní záznam o průběhu stavu hladin nebo průběhu srážek. Alarmová hlášení formou SMS jsou zaslána při překročení nastavených limitních hodnot hladin a klouzavých součtů (60 minut,15 minut) minutových sum srážek.



Obr. 1: LVS Svitavy – průběh povodňové situace ze dne 2. 6. 2010

Grafické zpracování provozu LVS ve Svitavách znázorňuje průběh měřených srážek a stavů hladin, přičemž nastavené limitní hodnoty jsou předmětem alarmové SMS. Průběh aktuální situace je přístupný prostřednictvím webové aplikace pro držitele oprávnění (zabezpečeno heslem) a také pro širokou veřejnost na volně přístupném serveru poskytovatele služby. Povodňové orgány tak mají k dispozici dostatek informací o srážkové situaci a následném nástupu hladiny na vodoměrném profilu v obci.

3. Nové projekty lokálních výstražných systémů

Zásadní změnu v rozvoji a budování lokálních výstražných systémů přinesl Operační program životního prostředí (OPŽP), oblast podpory 1.3. Omezování rizika povodní.

V rámci tohoto programu jsou zpracovány obsahově širší projekty, které zahrnují zpracování digitálních povodňových plánů, vybudování sítě prvků vyrozumívání obyvatelstva zájmového území (bezdrátový rozhlas, sirény) a měrné body pro měření stavů hladin a srážek.

Tento komplexní přístup k řešení lokální hlásné a varovné služby přináší však odklon od zásad automatického monitoringu stavů hladin a srážek pro potřeby povodňových orgánů. Zpracovatelé při zpracování koncepce lokálního výstražného systému neuvažují s možností získání informací z hlasných profilů kategorie A a B, provozovaných ČHMÚ resp. příslušnými správci povodí. V řadě případů je podceňován význam měření srážek v povodí toků jako včasné indikace mimořádné situace. Není správně zvolený počet srážkoměrů na plochu povodí a jejich umístění, obdobně je tomu v případě měření stavů hladin na toku. Stále častěji jsou v projektech navrhovány hlásiče limitních hodnot bez možnosti sledování trendů a změn povodňové situace pomocí záznamových jednotek s dálkovým přenosem měřených dat a funkcemi alarmových SMS. Ve většině případů měrné body nebudou poskytovat informace s dostatečným časovým předstihem, jelikož jsou zpravidla umístěny přímo v

obcích a jsou technologicky zahrnuty do sítě vyrozumívání obyvatelstva. Pro povodňové orgány budou takto navržené monitorovací systémy poskytovat v některých případech daleko méně informací než doposud provozované a ověřené lokální výstražné systémy.

4. Závěr

Povodně v České republice za posledních 15 let způsobily ztráty na životech občanů v postižených území a miliardové materiální škody. Zvláštní skupinou povodní jsou přívalové povodně, kdy vznik a vývoj je natolik rychlý, že nelze situaci zavčas vyhodnotit a doručit výstrahu pro konkrétní území. Pro potřeby snížení těchto škod a včasné varování obyvatelstva zejména při vzniku přívalových povodní jsou na úrovni obcí budovány automatické lokální výstražné systémy.

Dotační politika OPŽP 1.3. přinesla komplexní přístup v řešení protipovodňové ochrany a budování lokálních výstražných systémů je nyní řešeno společně s prvky vyrozumívání obyvatelstva a zpracováním digitálních povodňových plánů. V některých projektech dochází však k omezení možností a funkcí automatických měřících systémů a v těchto případech nebudou povodňové orgány informovány o průběhu povodňové situace standardním způsobem.

Ministerstvo životního prostředí připravuje projekt “Podpora povodňové služby” a jeho částí bude také vytvoření odborné příručky „Lokální předpovědní, hlásné a varovné systémy pro města a obce“. Cílem bude zpracování potřebných standardů mimo jiné i pro oblast lokálních výstražných systémů.

Lokální výstražné systémy jsou provozovány na některých lokalitách již téměř 10 let. Pro povodňové orgány jsou důležitým zdrojem informací o aktuálním průběhu srážek a situaci na sledovaných povrchových tocích v zájmovém území. Potvrzuje se význam této doplňkové monitorovací sítě v protipovodňové ochraně a to je předpokladem jejího dalšího rozšiřování a rozvoje.

Literatura

[1] TOLASZ, R. a kolektiv, 2009. Lokální varovný protipovodňový systém pro obec Olešnice v Orlických horách. 1. vyd. Český hydrometeorologický ústav, Praha. 69 s. ISBN 978-80-86690-73-5.

[2] DAŇHELKA, J. – KUBÁT, J., 2009. Přívalové povodně na území České republiky v červnu a červenci 2009. Český hydrometeorologický ústav Praha. 72 s. ISBN 978-80-86690-75-9.

[3] KOCMAN, T., 2009. Lokální výstražné systémy na tocích ČR. Dílčí zprava projektu „Vyhodnocení povodí v červnu a červenci 2009 na území České republiky“. 110 s. [Distribuce výstupů projektu na CD].

[4] Automated Local Flood Warning Systéme Handbook,1997. Weather Service Hydrology Handbook No. 2. NOAA ´s Weather Service. Dostupné na <www.nws.noaa.gov>.

Kontakty na autora

1 Kocman monitoring, e-mail: tkocman@asdm.cz

PŘEDPOVĚDI PRŮTOKŮ PRO SOUTOKOVOU OBLAST MORAVY A DYJE

Eva Soukalová[1], Pavel Neruda[1]

Abstrakt

Povodí Moravy se rozkládá na území tří států: České republiky, Slovenské republiky a Rakouska. Po katastrofálních povodních v roce 2002 a 2006, které postihly také území Rakouska, vznikl požadavek vlády Dolního Rakouska na rozšíření předpovědi průtoků pro horní část povodí Dyje na rakouském území a po roce 2006 i pro soutokovou oblast Moravy a Dyje. V prosinci 2006 bylo rozhodnuto na trilaterálním setkání zmocněnců vlád CZ, SK a A, že bude vypracována studie proveditelnosti o společném prognózním modelu, na dalším setkání pak byla ustanovena expertní skupina, která spolupracovala na studii proveditelnosti. První verze studie proveditelnosti byla představena v Rakousku v prosinci 2007. Ve studii bylo rozhodnuto, že se rozšíří stávající prognózní model HYDROG po profil Hohenau (Moravský Sv. Ján) pro řeku Moravu pod soutokem s řekou Dyjí, doplní se stávají automatický monitoring v 9 lokalitách v pohraničním úseku řek Moravy - Dyje a vypracuje se 2D model pro řeku Moravu až po ústí do Dunaje. Společný projekt A a CZ byl schválen v rámci Programu Evropská územní spolupráce Rakousko-Česká republika 2007 – 2013. V únoru 2010 se na P-Brno uvedl do provozu model HYDROG až po profil Hohenau a v testovacím provozu jsou denně předávány předpovědi s dobou předstihu 48 hodin pro profil Hohenau.

Klíčová slova: předpověď průtoků, soutoková oblast, studie proveditelnosti, předpovědní model

1. Úvod

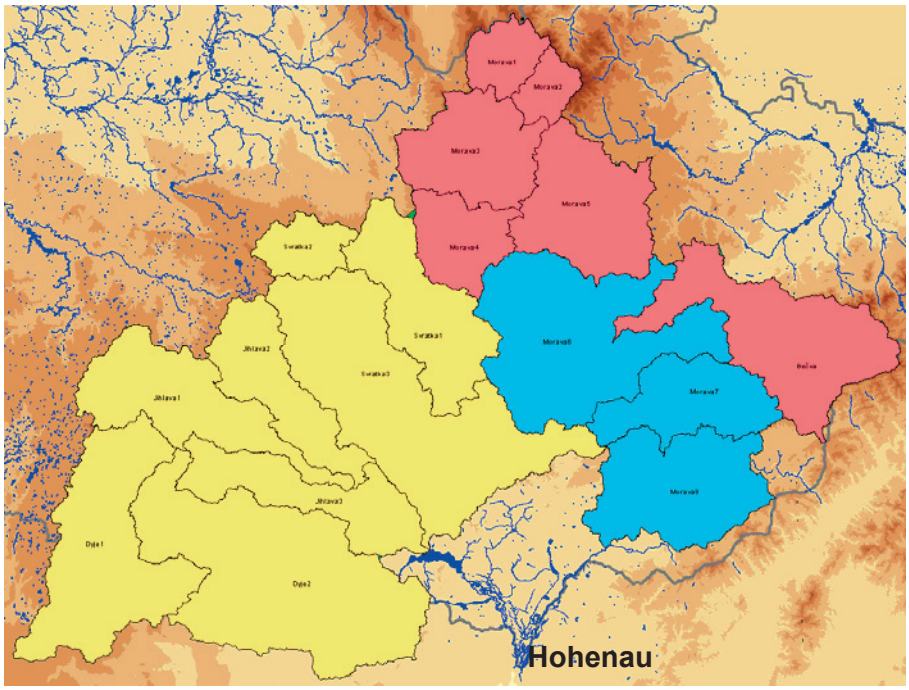
Povodí řeky Moravy leží na území tří států: České republiky, Rakouska a Slovenské republiky. Největší plocha povodí náleží České republice. Morava je levostranným přítokem Dunaje, soutok Moravy a Dunaje leží na hranici Rakouska a Slovenska. Morava tvoří hranici mezi těmito oběma státy.

Řeka Morava je jeden z významných přítoků Dunaje. Co se týče délky 353 km (284 km na českém území) je vyčíslena jako 12., podle svého průtoků (120 $m^3.s^{-1}$) při ústí jako 14 nejvýznamnější přítok a podle své plochy 26 580 km^2 jako 7. nejvýznamnější přítok. Na území ČR leží 83,7 % plochy povodí, 8,3 % leží ve Slovenské republice a 8 % v Rakousku.

Nejvýznamnějším přítokem je řeka Dyje, která je hraniční řekou a tvoří část hranice mezi Rakouskem a Českou republikou. Dyje vzniká soutokem dvou řek Moravské Dyje, která pramení v Brtnické pahorkatině, a Německé Dyje, která pramení v Dolním Rakousku blízko Schweigers. Soutok obou řek je na rakouském území v městě Raabs.

Po katastrofálních povodních v roce 2002 a 2006, které postihly také území Rakouska, vznikl požadavek vlády Dolního Rakouska na rozšíření předpovědi průtoků pro horní část povodí Dyje na rakouském území a po roce 2006 i pro soutokovou oblast Moravy a Dyje.

V roce 2007 bylo podepsáno se zástupci oddělení hydrologie Dolního Rakouska Memorandum of Understanding, kde byla domluvena spolupráce s Dolním Rakouskem při předpovědi povodní. Rakouská strana dostává předpovědi pro dva profily: Schwarzenau – Německá Dyje a Raabs – Dyje v horním povodí Dyje.



Obr. 1: Soutoková oblast Moravy a Dyje a schema nasazení modelu HYDROG před jeho rozšířením v roce 2010

2. Studie proveditelnosti

V prosinci 2006 bylo rozhodnuto na trilaterálním setkání zmocněnců vlád CZ, SK a A, že bude vypracována studie proveditelnosti o společném prognózním modelu, na dalším setkání pak byla ustanovena expertní skupina, která spolupracovala na studii proveditelnosti. Studie proveditelnosti [1] byla vypracována skupinou expertů v roce 2007 a vyhotovena rakouskou firmou Scietec. Příprava probíhala na 6 setkáních ve Vídni, Brně a Bratislavě. První verze studie proveditelnosti byla představena v Rakousku v prosinci 2007. Ve studii bylo rozhodnuto, že se rozšíří stávající prognózní model HYDROG [2] po profil Hohenau (Moravský Sv. Ján) pro řeku Moravu pod soutokem s řekou Dyjí, doplní se stávají automatický monitoring v 9 lokalitách v pohraničním úseku řek Moravy - Dyje a vypracuje se 2D model pro řeku Moravu od Hohenau až po ústí do Dunaje.



Obr. 2: Dürnkrut – povodeň v r. 2006

Společný projekt A a CZ byl schválen v rámci Programu Evropská územní spolupráce Rakousko-Česká republika 2007 – 2013.

Projektu se účastní za českou stranu Povodí Moravy, s. p. (PM, s. p.) jako vedoucí partner, za rakouskou stranu oddělení vodního hospodářství Úřadu Dolnorakouské zemské vlády. Obě strany se dohodly na partnerské spolupráci při realizaci společného projektu. ČHMÚ spolupracuje s Úřadem Dolnorakouské zemské vlády.

Vodoměrná stanice Hohenau se nachází pod soutokem Moravy a Dyje na rakouském břehu řeky Moravy, na slovenské straně řeky Moravy se nachází vodoměrná stanice Moravský Svätý Ján.

Projekt mimo jiné předpokládá doplnění stávajícího monitoringu v 9 lokalitách v pohraničním úseku řek Morava – Dyje, získávaná data by kromě jiného umožnila zpřesnění výpočtu předpovědí průtoků modelem HYDROG.

Doplnění automatického monitoringu na území České republiky představuje:



1 VD Nové Mlýny
2 VD jez Bulhary
3 Břeclav – městské rameno
4 Odlehčovací rameno Dyje Poštorná
5 VD jez Pohansko
6 VD jez Hodonín
7 Moravská Nová Ves – odlehčovací objekt
8 Týnec – odlehčovací objekt
9 VD poldr Soutok

Obr. 3: Doplnění monitoringu v soutokové oblasti Moravy a Dyje (zdroj PM, s.p.)



Obr. 4: Poldr Soutok – přelivný objekt s přepočtem odtoků z poldru do řeky Moravy včetně automatiky. (zdroj PM, s. p.)



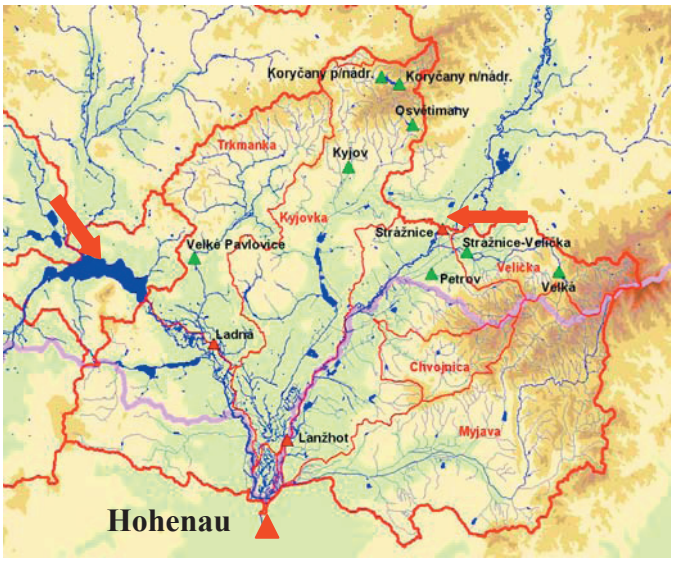
Obr. 5: VD Nové Mlýny - vybudování ultrazvukového měření rychlosti vody v toku u stávající limnigrafické stanice (zdroj PM, s. p.)

3. Rozšíření modelu HYDROG

Dle studie proveditelnosti se modelování provádí pomocí rozšířené verze HYDROGu, přičemž pro Dyji se v tomto modelu bere v úvahu také dílčí oblast nacházející se na rakouském státním území a pro řeku Moravu také povodí Myjavy na Slovensku. Za součást hydrologického modelování se v HYDROGu berou v úvahu i manipulace na nádržích v povodí Dyje. Jako výsledek dodá model HYDROG časovou řadu hodinových předpovědí průtoků pro profil Hohenau/Moravský Svätý Ján s dobou předstihu 48 hodin.

V ČHMÚ P-Brno se počátkem roku 2010 před rozšířením modelu HYDROG do soutokové oblasti počítaly předpovědi průtoků po profil Strážnice na řece Moravě a pro přítoky do VD Nové Mlýny: Trávní Dvůr – Dyje, Židlochovice – Svratka a Ivančice – Jihlava. Do modelu HYDROG pro profil Hohenau vstupují pak odtoky z VD Nové Mlýny, které poskytuje PM

s dobou předstihu 48 hodin, a předpovědi pro profil Strážnice – Morava (výsledek předpovědního úseku Morava 8).



Obr. 6: Situace soutokové oblasti

Studie proveditelnosti navrhla realizaci celého projektu ve čtyřech fázích:

- fáze 0: Příprava vstupních dat do modelu.
- fáze 1: Regionální rozšíření HYDROGu až k profilu Hohenau/Moravský Sv. Ján, předání modelu HYDROG pro povodí Myjavy SHMÚ a zaškolení pracovníků.
- fáze 2: Vývoj hydraulických detailních výpočtů v úseku mezi Hohenau/Moravský Sv. Ján a ústím Moravy do Dunaje, fáze 2 by se měla implementovat paralelně s fází 1.
- fáze 3: Vyhodnocení přesnosti modelu, další zlepšování.

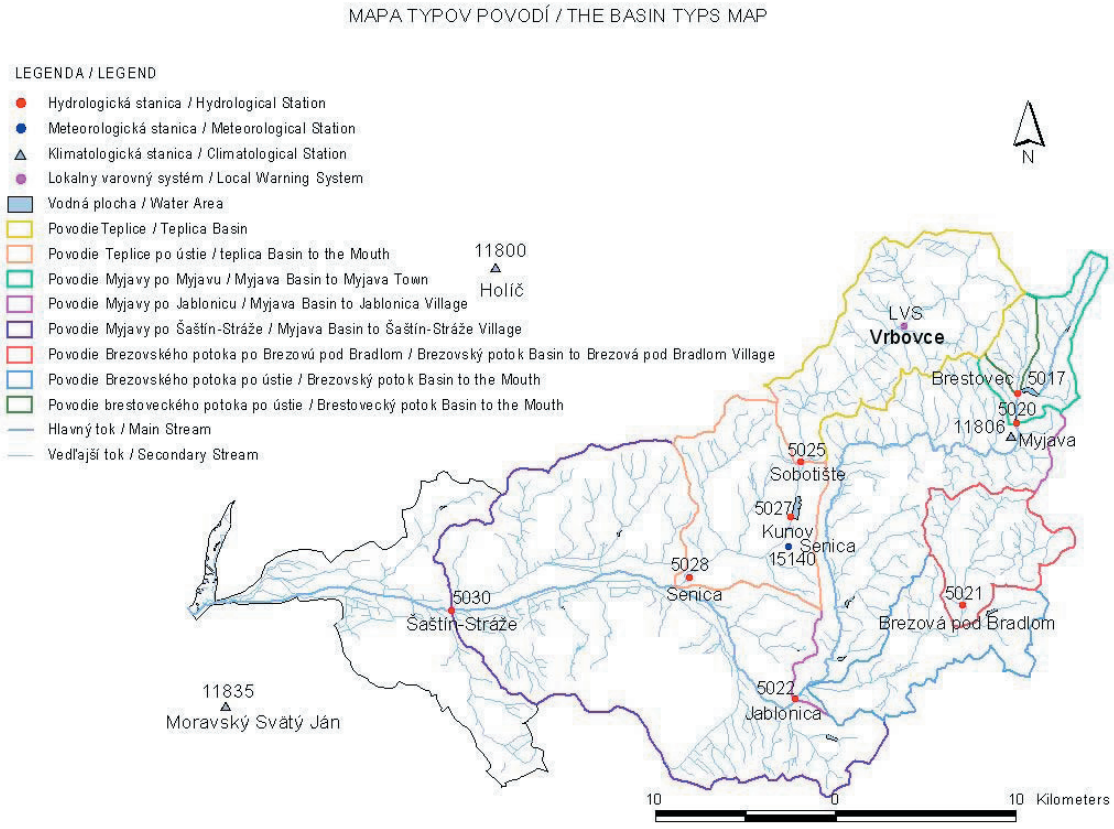
V rámci vývoje společného projektu se za podstatná doprovodná opatření považují důsledná sledování očekávané přesnosti prognóz a rozšíření měřicí sítě v záplavových oblastech mezi Novými Mlýny a soutokem Dyje a Moravy. Hydrologická detailní sledování se plánují pro fázi 1, rozšíření měřicí sítě pro fázi 1. Pro implementaci systému se pro fázi 0, 1 a 2 vychází z doby realizace cca 12 – 24 měsíců. Pro fázi 3 se očekává doba uskutečnění asi 3 – 5 let.

3.1 Povodí řeky Myjavy

Povodí řeky Myjavy [3] s plochou povodí 745,12 km^2 je situováno na území západního Slovenska. Myjava je levostranným přítokem Moravy a ústí v 71,544 km do Moravy nad soutokem Moravy a Dyje.

Nejvyšší místo povodí leží v 819 m n.m., nejnižší v 149 m n.m., délka toku je 84 km a průměrný sklon toku 6,43 ‰. V povodí je 13 klimatologických stanic a 8 vodoměrných stanic. Závěrová stanice je Šaštín – Stráže (A = 644,89 km^2), pozorovaná do roku 1968. Dlouhodobý Q_a = 3,04 m^3.s^{-1} při ústí. V povodí převládají zimní a jarní povodně. Ve stanici Šaštín – Stráže je Q_{100} = 105 m^3.s^{-1}. Nejvyšší průtok byl zatím vyhodnocen v roce 1977 v Šaštíně – 80,2 m^3.s^{-1}. V povodí je dále 11 nádrží, největší je nádrž Kunov na Teplici s celkovým objemem 3,14 mil. m^3.

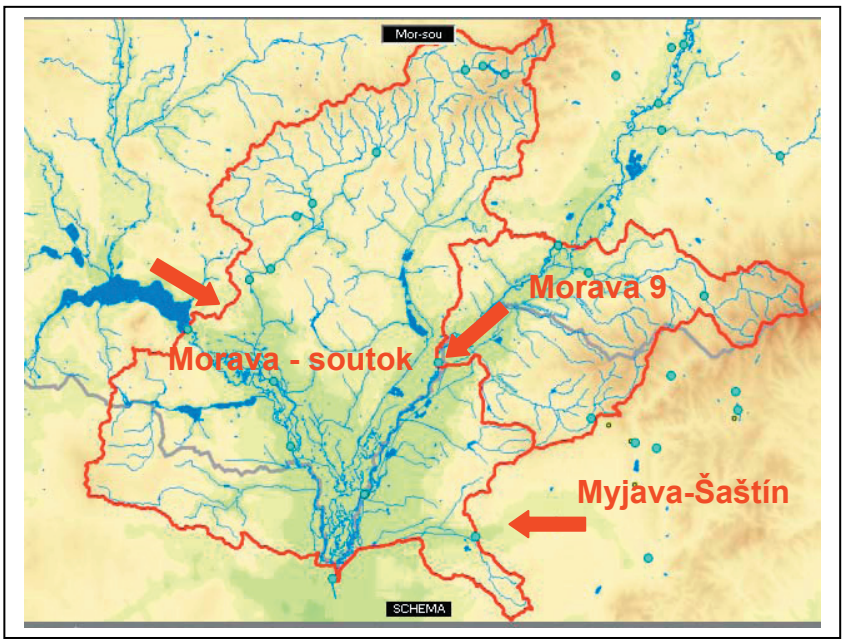
Koncem roku 2009 byla Slovenskému hydrometeorologickému ústav (SHMÚ) předána licence na model HYDROG a požadavky na vytvoření společného ftp serveru na předávání dat z povodí Myjavy. V březnu roku 2010 pak prognózní pracoviště SHMÚ obdrželo nakalibrovaný model HYDROG pro povodí řeky Myjavy a příslušní pracovníci byli zaškoleni.



Obr. 7: Vodoměrné stanice v povodí řeky Myjavy (zdroj SHMÚ)

3.2 Soutoková oblast Moravy a Dyje

Na Obr. 7 jsou znázorněný přítoky do modelu Morava-soutok.



Obr. 8: Schéma přítoků do modelu Morava-soutok

Ke konci roku 2009 obdržel ČHMÚ P-Brno nakalibrovaný model HYDROG pro soutokovou oblast Moravy a Dyje, zatím bez zahrnutí funkce poldrů.

Od února 2010 začala pak P-Brno připravovat v testovacím provozu předpovědi po profil Hohenau / Moravský Svätý Ján a předávat je rakouské a slovenské straně.

Příprava dat probíhá přes databázovou aplikaci SOMDATA [4] pro přípravu a zpracování meteorologických a hydrologických dat využívaných ve srážko-odtokových modelech.

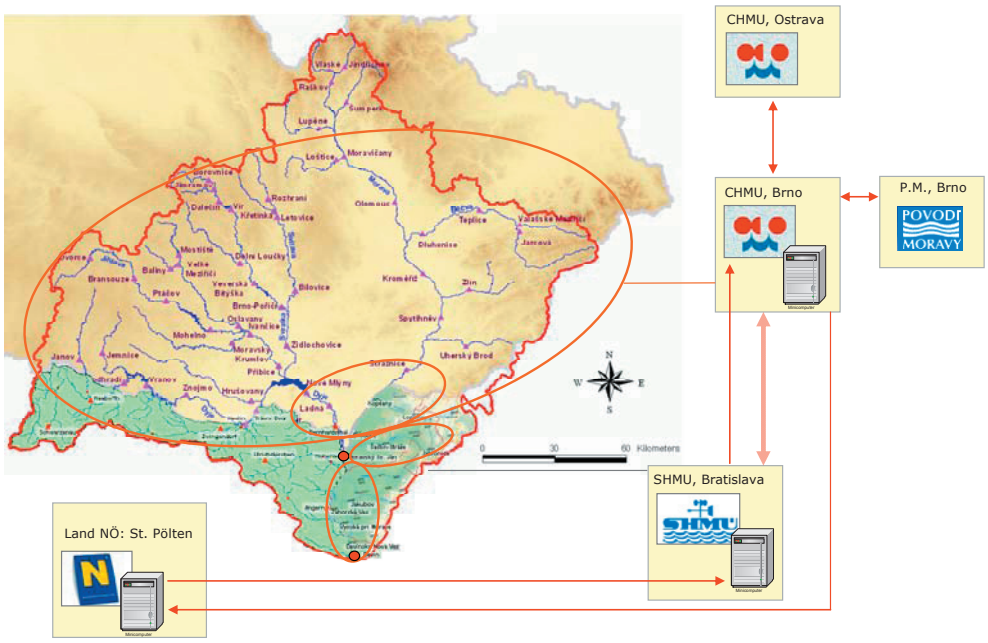
Vstupní data:

- data ze základních klimatologických a meteorologických stanic – v hodinovém kroku (srážky a teploty),
- data z hydrologických automatických stanic – v hodinovém kroku (stavy, průtoky, srážky a teploty vzduchu),
- data z automatické měřící sítě Povodí Moravy s.p. – v hodinovém kroku (srážky, vodní stavy a průtoky),
- teploty – výpočet plošné informace pomocí nástrojů GIS (plošná interpolace staničního měření v závislosti na nadmořské výšce),
- radarové informace – plošné informace o srážkách
  - kombinace radarových údajů a data ze srážkoměrů,
  - nowcasting – hodinová data srážek vždy na tři hodiny dopředu metodou COTREC,
- ALADIN – předpověď srážek a teplot v hodinovém kroku, aktualizace každých 6 hodin,
- ECMWF – předpověď srážek a teplot v šestihodinovém kroku, aktualizace dvakrát denně,
- sníh a vodní hodnota (plošné interpolace v závislosti na nadmořské výšce pomocí nástrojů GIS).



Obr. 9: Klimatologická a hydrologická pozorování v soutokové oblasti Moravy a Dyje

Na Obr. 10 je znázorněno schéma postupného výpočtu předpovědi průtoků po profil Hohenau.



Obr. 10: Schéma postupného výpočtu předpovědí průtoků pro soutokovou oblast Moravy a Dyje [1]

Postup:

- ČHMÚ P-Ostrava - výpočet předpovědí pro horní část povodí Moravy se závěrovým profilem Olomouc-Morava a Dluhonice-Bečva, předání dat na P-Brno,
- SHMÚ Bratislava - výpočet předpovědí pro závěrový profil Šaštín-Stráže v povodí Myjavy (zastupitelnost na P-Brno) – předání dat na P-Brno – bude uvedeno do provozu během roku 2010,
- předání dat z nových monitorovacích míst zřízených PM, s.p., pokud jsou v provozu, předání manipulací z VD Nové Mlýny s dobou předstihu 48 hodin,
- ČHMÚ P-Brno – po předání výše uvedených dat výpočet předpovědí pro profil Hohenau
- předání výsledků oddělení hydrologie Dolního Rakouska v St. Pöltenu a SHMÚ Bratislava přes ftp server.

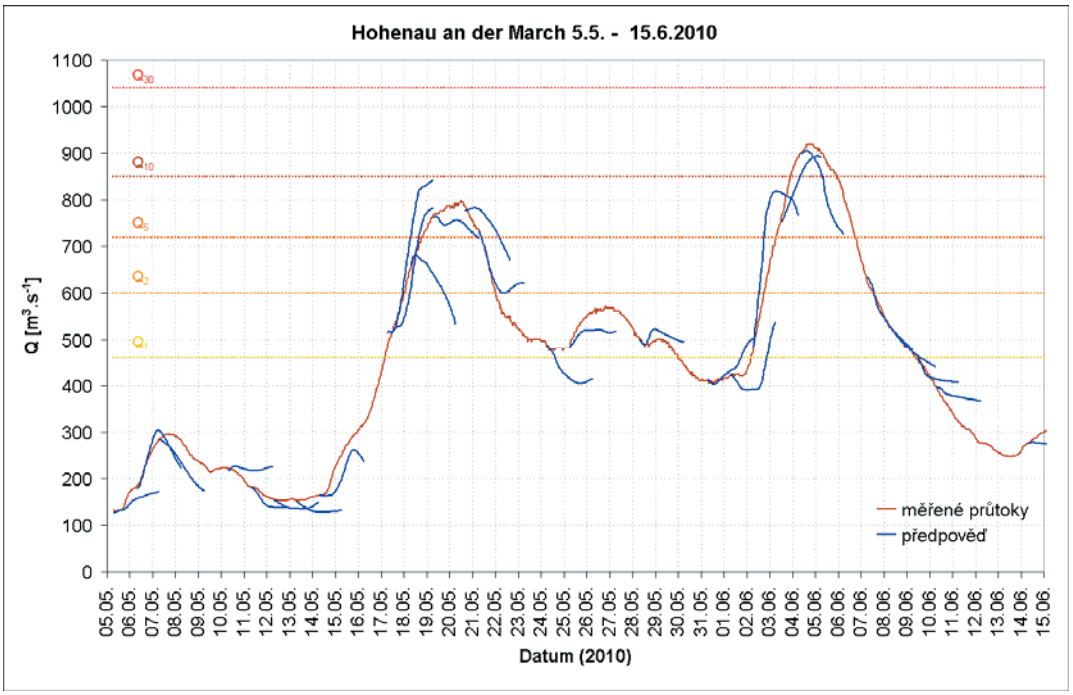
3.3 Zkušební provoz modelu při povodních v květnu a červnu 2010 na Moravě

Model HYDROG pro profil Hohenau byl poprvé ověřen při povodních v květnu a červnu 2010 na Moravě. Byl počítán dle potřeby několikrát denně a předáván oddělení hydrologie v Dolním Rakousku a SHMÚ Bratislava.

V této době ještě nebyla instalována měřící zařízení PM, s.p. na výpustných objektech (odlehčení z Dyje však nebylo nutné) a nebyly počítány předpovědi pro Myjavu. Kulminační průtok ve Strážnici na Moravě byl v květnu i v červnu na úrovni Q_{50}. Poldr "Soutok" byl napouštěn z Moravy při dosažení asi 560 $m^3.s^{-1}$ v Lanžhotě na Moravě. Kulminační průtok v Hohenau dosáhl 920 $m^3.s^{-1}$, což byla větší než 10letá voda.

Byla snaha tyto skutečnosti v modelu operativně zohlednit, předpovědi průtoků pro Hohenau lze hodnotit jako poměrně úspěšné.

Oddělení hydrologie Dolního Rakouska po této velké povodni poděkování za podporu, která pomáhala povodňovým orgánům při rozhodování.



Obr. 11: Předpovědi pro profil Hohenau v květnu a červnu 2010

4. Závěr

- Pro zlepšení předpovědi průtoků je nutné doplnit automatický monitoring PM, s.p. a upravit přenosy dat databáze ČHMÚ,
- model HYDROG pro Myjavu doplnit o manipulace na nádrži Kunov,
- uvedení do provozu modelu HYDROG pro Myjavu (další zaškolení pracovníků SHMÚ),
- upgrade modelu HYDROG včetně rozlivů podél řeky Moravy,
- upgrade modelu HYDROG včetně rozlivů v okolí stanice Hohenau/Moravský Svätý Ján,
- vyhodnocování přesnosti modelu.

Literatura

[1] Firma SCIETEC, Flussmanagement GmbH, 2007. Studie proveditelnosti – Hochwasserprognose March. Brno, St. Pölten, Bratislava, Linz.

[2] STARÝ, M. – TUREČEK, B.,2000. Operative control and prediction of floods in the River Odra basin. In: *Flood Issues in Contemporary Water Management*. NATO Science Series, 2. Enviromental Security - Vol.71, Kluwer Academic Publishers, pp 229-236. ISBN 0-7923-6452-X.

[3] MATOKOVÁ, K. – SMRTNÍK, P., 2006. Myjava River Basin. SHMÚ Bratislava.

[4] BŘEZKOVÁ, L. – JONOV, M. – ŽIDEK, D., 2008. SOMDATA databázová aplikace pro přípravu a zpracování meteorologických a hydrologických dat využívaných ve srážko-odtokových modelech. ČHMÚ, Brno, Ostrava.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno,
e-mail: eva.soukalova@chmi.cz, pavel.neruda@chmi.cz

VYUŽITÍ EXPERIMENTÁLNĚ MĚŘENÝCH A ZPRACOVÁVANÝCH KLIMATOLOGICKÝCH DAT V HYDROPROGNÓZNÍ PRAXI

Libuše Bubeníčková[1], Martina Kimlová[1], Pavla Řičicová[1], Šimon Bercha[1]

Abstrakt

Součástí hydrologických předpovědních modelů, které se používají na území České republiky, je proces akumulace a tání sněhové pokrývky. Jedná se o poměrně složitou proceduru, která v předpovědní praxi bývá méně přesná než předpovědi v období beze sněhu. Model kontinuálně počítá odtok ze sněhu a současně i vodní hodnotu pro jednotlivá povodí. Terénní profilová měření sněhové pokrývky a údaje automatických sněhových polštářů umožňují provádět kontrolu a případnou korekci těchto výpočtů. V poslední době jsme se soustředili i na analýzu tání v bezesrážkových obdobích v experimentálních povodích Jizerských hor. Nejvýznamnějším faktorem, který ovlivňuje množství vody odteklé ze sněhu za časovou jednotku, je teplota vzduchu, ale nemalou měrou se na tání podílí také síla a směr větru. Rozbor těchto případů přispěje i jako varianta odborného odhadu k modelovému výpočtu předpokládaného odtoku či úbytku výšky sněhu a jeho vodní hodnoty. Další hydroprognózní pomůckou je kompletní zpracování celé řady pozorování, více než 70 let údajů o sněhové pokrývce v reprezentativní stanici, která charakterizuje povodí Sázavy. V oblastech s nižší nadmořskou výškou je často problém odhadnout, kdy výška sněhu dosáhla svého maxima, aby čas a vynaložené náklady pracovníků byly efektivní. Rozhodnutí se řídí podle údajů naměřených ve staniční síti a znalostí jak kvalitní je měření.

Klíčová slova: akumulace a tání sněhové pokrývky, výška a vodní hodnota sněhu, teplota vzduchu, rychlost a směr větru

1. Využitelnost naměřených a spočtených údajů sněhové pokrývky

Vodní hodnotu a výšku sněhové pokrývky získáváme z více zdrojů, ovšem ne všechny údaje jsou vhodné pro kontrolu a případnou opravu hodnot spočtených hydrologickým modelem. Nejvhodnějším zdrojem jsou údaje naměřené při profilových měřeních na volných prostranstvích a v lese. Pro povodí Jizery se využívá měření, která provádějí pracovníci aplikovaného hydrologického výzkumu v 27 profilech v Jizerských horách a v 13 profilech v západních Krkonoších. Profily byly vybrány tak, aby měření zahrnovalo různé terény, nadmořské výšky i porosty. V době maxima vodní hodnoty sněhu a před předpokládaným obdobím tání je profilové měření rozšířeno i do dalších oblastí České republiky, pro pražské předpovědní pracoviště se jedná o povodí Sázavy.

Dalším zdrojem kvalitních údajů jsou automatické sněhoměrné stanice, které kontinuálně měří výšku a vodní hodnotu sněhu. Na území ČR byly zatím instalovány 4 stanice v lokalitách Desná – Souš v Jizerských horách, Hanapetrova paseka v Krkonoších, Churáňov na Šumavě a Herálec ve Hornosvratecké vrchovině. Vzhledem k tomu, že testovací provoz prokázal, že zařízení pracují spolehlivě, měření jsou kvalitní a denně dostupná na internetu, bude se síť automatických polštářů rozšiřovat i do dalších horských či podhorských oblastí ČR v Javořické vrchovině (Českomoravská vrchovina), Orlických horách, Hostýnsko-vsetínské hornatině a Hrubém Jeseníku.

V neposlední řadě je důležitou informací při zpracování parametrů sněhové pokrývky i každodenní automatický výpočet vodní hodnoty sněhu – SVHV pro klimatologické stanice, který je ukládán v databázi CLIDATA. Výpočet je prováděn v závislosti na denním úhrnu srážek, výšce nového sněhu, celkové výšce sněhu a průměrném denním tlaku par (autorem

algoritmu je L. Němec). Předpovědní pracoviště zatím tyto údaje využívají velmi málo, ale porovnání s terénními měřeními vykazují dobré výsledky, takže v budoucnu lze předpokládat všeobecně širší použití i v prognózní praxi.

2. Sněhový model a faktory ovlivňující tání

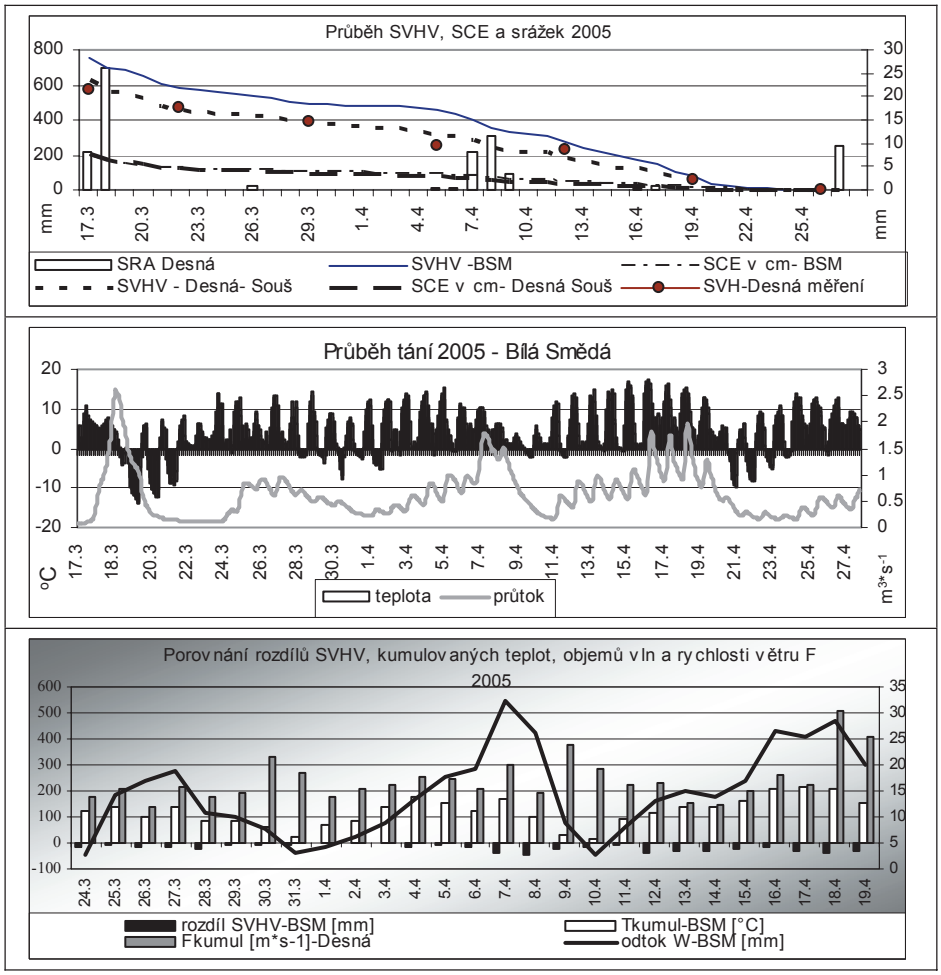
Proces tání a vytváření sněhové pokrývky na základě údajů o srážkách a teplotě vzduchu je v našich podmínkách neoddělitelnou součástí srážko-odtokových modelů. Modelovací technika SNOW-17, vyjadřuje matematicky nejdůležitější procesy, které tvorbu tání sněhové pokrývky provázejí: výpočet výšky plošného rozsahu sněhové pokrývky, výměnu tepla mezi sněhem a ovzduším, mezi sněhem a půdou, výpočet obsahu vody ve sněhové pokrývce. Pro upřesnění výpočtu model využívá v terénu naměřené vodní hodnoty sněhu. V poslednich několika letech se uplatňuje při hodnocení měření vodní hodnoty sněhu ve stanicích i vypočtená vodní hodnota jako funkce srážek, výšky a hustoty sněhu a tlaku vodních par. Nespornou výhodou je, že takto získáváme údaje denně pro všechny klimatologické stanice, kdežto ve staniční síti ČHMÚ se vodní hodnota měří jednou týdně v pondělí. Sněhový model obsahuje řadu parametrů, které byly empiricky odvozeny a jsou i dobře v literatuře popsány. Jedná se o vliv větru, opravný parametr na srážky, faktor tání v závislosti na okolní vegetaci, pokrytí povodí sněhem, několik teplotních parametrů ve vztahu k předchozím podmínkám, k teplotě půdy, ke kapacitě sněhové pokrývky vzhledem k možnosti zadržování tekuté vody a další. Důležitou roli při tání sněhu zastává zejména směr a rychlost větru, na kterém závisí rozsah a pohyb vodních par. Absence vstupních údajů ve sněhovém modelu je někdy nahrazována zvýšením teplot, aby bylo dosaženo množství odtálého sněhu odpovídající realitě. Proto rozbor odtokových epizod v bezsrážkových obdobích v experimetálních povodích Jizerských hor umožní lépe pochopit složité zákonitosti chování sněhové pokrývky, kdy v podobných synoptických situacích jsou často výsledné dílčí odtoky odlišné.

3. Tání sněhu v bezsrážkových obdobích v experimetálních povodích Jizerských hor

Pro hodnocení odtokových epizod při jarním tání v bezsrážkovém období byly použity údaje o srážkách, teplotě vzduchu, rychlosti a směru větru, vodní hodnotě sněhu a odtoku v letech 2005, 2006 a 2009, které byly z hlediska výšky sněhové pokrývky nadprůměrné. Hodnoceno bylo sedm experimentálních povodí v centrální části Jizerských hor, které leží v nadmořské výšce cca 780 -1122 m n. m. Pro studii byla použita data ze stanic Desná-Souš 772 m n. m., Bedřichov-přehrada 777 m n. m. (klimatologická databáze ČHMÚ) a z měření prováděných pracovníky Oddělení hydrologického výzkumu z pracoviště v Jablonci nad Nisou (databáze OEX). Pro jednotlivá povodí byly průměrné výšky sněhové pokrývky (SCE) a denní vodní hodnoty sněhu (SVHV) vypočteny z měření prováděných v týdenním intervalu tak, aby co nejlépe vystihovaly poměrné zastoupení nadmořských výšek a rozložení lesa a mýtin. Podle vzorce L. Němce byly upraveny dle stanic Bedřichov a Souš do denních údajů. Pro následující demonstraci bylo vybráno povodí Bílé Smědé s největší naměřenou výškou sněhu a s vlastním měřením teplot vzduchu (T-BSM). Údaje o větru (F) a vstupní údaje vodní hodnoty sněhu SVH pro přepočet vypočítané vodní hodnoty sněhu SVHV byly použity ze stanice Desná-Souš. Kumulovaná teplota (Tkum-BSM) byla stanovena jako suma hodnot od 0:00 do 23:00 hodin, obdobně z hodinových průměrných hodnot bylo vypočteno Fkum-Desná.

3.1 Průběh tání 2005

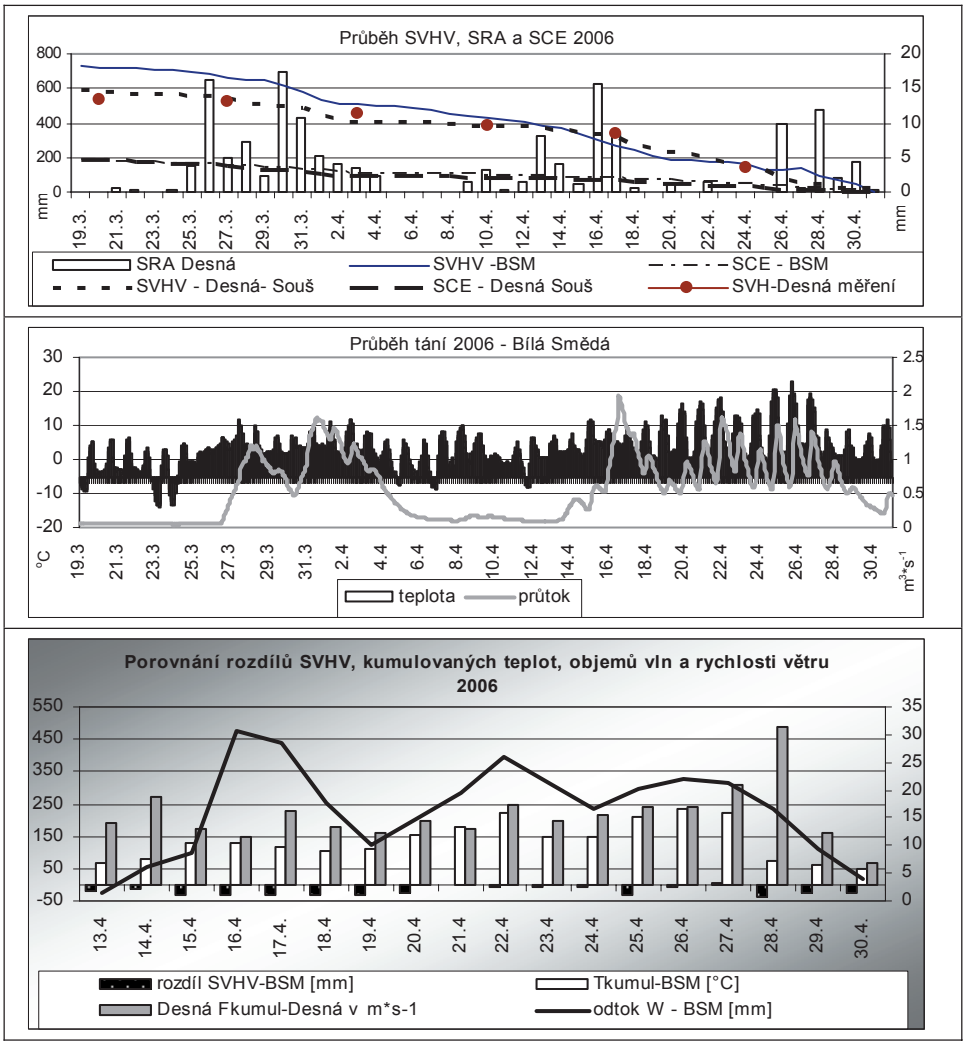
V roce 2005 začala odtávat sněhová pokrývka po vydatnějších srážkách v polovině března (Obr. 1). Maximum vodní hodnoty sněhu (SVHV) 766 mm bylo na Bílé Smědé dosaženo 16. 3. Denní kolísání průtoků naznačuje, že nesouvislá pokrývka sněhu se udržela až do začátku května. Úhrny srážek nebyly v průběhu tání velké, pouze ve dvou epizodách dosahovaly až 10 mm. Tání sněhu mezi 24. 3. - 27. 4. bylo ovlivňováno zejména teplotou vzduchu v kombinaci s poměrně silným větrem ve vyšších polohách. Denní úbytky SVHV dosahovaly zpočátku 10 až 20 mm, později až 30 mm. K nejintenzívnějšímu tání bez přispění srážek došlo 18. 4. (42 mm SVH a 9 cm SCE), kdy kumulované teploty (Tkum) několik dní dosahovaly nejvyšších hodnot, zároveň byly vysoké i hodnoty maximální rychlosti větru (Fmax).



Obr. 1: Vybrané parametry tání 2005 ve stanici Bílá Smědá (BSM)

3.2 Průběh tání 2006

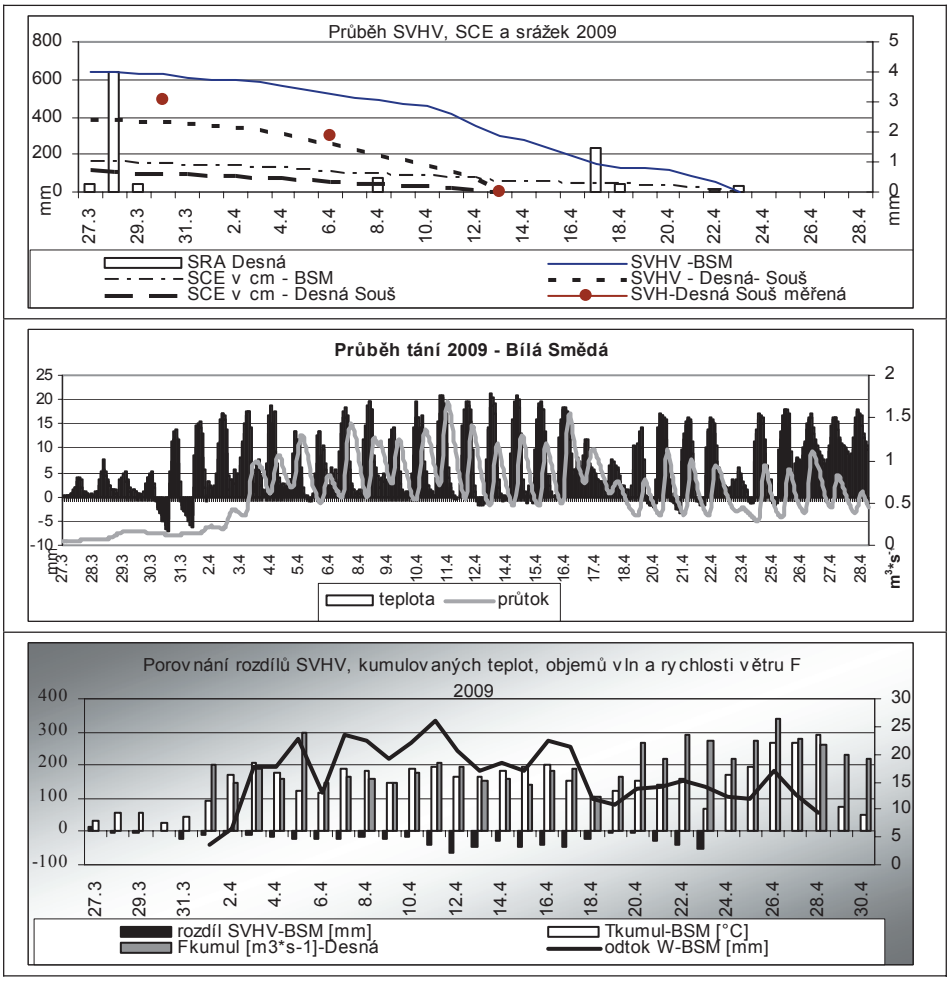
V roce 2006 začalo tání sněhu na konci druhé dekády března, dne 18. 3. byla dosažena maximální hodnota SVHV 732 mm (Obr.2). Zejména na přelomu března a dubna bylo tání podpořeno rychlým nárůstem teplot a několikadenními vydatnějšími srážkami. Bezsrážková období byla poměrně krátká, na začátku hodnoceného období (1. 4. do 30. 4.) se ještě vyskytovaly srážky 7 až15 mm. Srážky do 2 mm nebyly brány v úvahu. Denní úbytky SVHV byly zpočátku do 10 mm, v následujících dnech se nejčastěji pohybovaly od 10 do 30 mm. K nejintenzívnějšímu tání bez přispění srážek došlo 26. 4. (37 mm SVH a 10 cm SCE), kdy kumulované teploty (Tkum) několik dní dosahovaly nejvyšších hodnot.



Obr. 2: Vybrané parametry tání 2006 ve stanici Bílá Smědá (BSM)

3.3 Průběh tání 2009

Maximálních hodnot SVHV v experimentálních povodích bylo dosaženo většinou 27. 3. (Obr. 3). V porovnání s ostatními sledovanými roky bylo bezsrážkové období v tomto roce zdaleka nejdelší, srážky do 4 mm se vyskytly pouze na začátku tání, pak se již nevyskytovaly nebo byly málo významné. Tání sněhu od 1. 4. bylo zpočátku pozvolné, s denními úbytky do 10 mm, v následujícím období se denní rozdíly nejčastěji pohybovaly od 15 do 35 mm. K nejintenzivnějšímu tání sněhové pokrývky docházelo v období od 11. do 13. 4., kdy byly dosaženy 3 dny po sobě nejvyšší hodnoty kumulovaných teplot (Tkum). Následující ochlazení tání trochu zpomalilo, následné vyšší teploty 16. 4. opět zvýšily intenzitu tání. Do konce sledovaného období (28. 4.) se nejvyšší hodnoty Tkum vyskytly od 20. do 21. 4. Zatímco úbytky SVHV byly již ve většině ostatních povodí nižší (do 20 mm), v povodí Bílé Smědé byly vzhledem k větší akumulaci sněhu stále poměrně vysoké (30-50 mm).



Obr. 3: Vybrané parametry tání 2009 ve stanici Bílá Smědá (BSM)

3.4 Diskuze

V roce 2009 jsou hodnoty maximálního úbytku nejvyšší a vyskytovaly se v první polovině tání. V letech 2005 a 2006 se největší úbytky objevily na konci tání. V tabulce jsou shrnuty vybrané parametry tání v letech 2005, 2006 a 2009. Přestože délka, začátek, podmínky i průběh tání jsou ve 3 sledovaných letech odlišné, hodnoty průměrných rozdílů denních hodnot SVHV i velikosti odtoku se výrazně nelišily.

Tab. 1. Vybrané parametry ovlivňující tání a odtoky

Rok	Max. denní úbytek SVHV-BSM	Denní odtok W -BSM	Max.denní odtok W - BSM	Změna SCE-BSM	Tkum-BSM v [°C]	Maximální denní teplota Tmax–BSM [°C]	Minimální denní teplota Tmin -BSM [°C]	Maximální náraz větru [m*s^{-1}]
2005	42 mm (18.4.)	28,4 mm	28,4 mm (18.4.),	9 cm	206	15,4	2,5	12,5
2006	37 mm (25.4.)	20,1 mm		10 cm	210	20,5	-0,8	10,5
			26,1 mm (22.4.)	6 cm	221	17,6	3	11
2009	57 (12.4.)	20,6,mm		14 cm	165	19,8	-0,5	8,6
			26 mm (11.4.)	8 cm	199	20,8	0.3	10.1

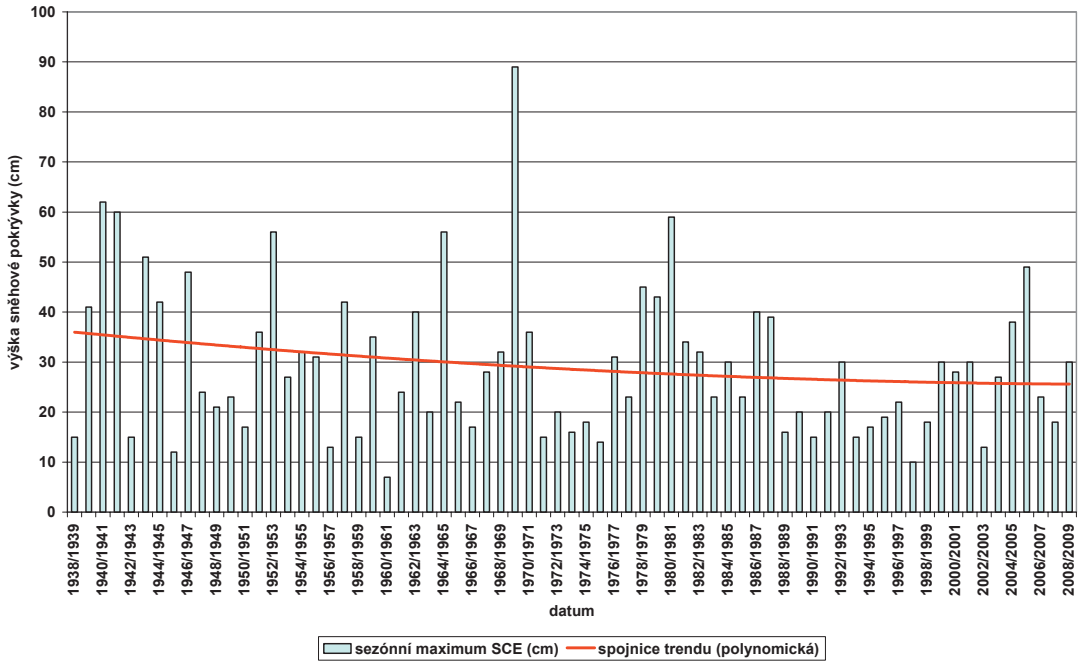
Hodnoty odtoku (W) a rozdílů SVHV v letech 2005 a 2006 byly u všech hodnocených stanic obdobné a při korelaci vykazovaly vysokou míru spolehlivosti. V roce 2009 nebyly závislosti

tak těsné a projevovaly se značné rozdíly mezi západní a východní částí experimentálních povodí. Denní rozdíly SVHV se pohybovaly nejčastěji v rozmezí od 10 do 35 mm, rozdíly v odtoku od 4 od 20 mm. Při Tmax do 5 °C probíhá tání velmi pozvolna. Pokles Tmin pod 0 °C proces tání velmi zpomalí nebo zastaví. Nejintenzívnější tání probíhá při Tmax nad 15 °C, Tkum kolem 200 °C a zároveň kladných Tmin. Maximální úbytky SVHV dosahovaly hodnot od 42 do 57 mm, Tmax překračovala 15 °C a Tmin neklesala pod 0 °C. Ve všech případech bylo tání podpořeno vysokými hodnotami Fmax. Vliv větru se prokázal jako podpůrná složka zesilující tání. Příkladem jsou dny s podobným průběhem teplot, kdy velikost odtoku nebo úbytek vodní hodnoty sněhu byla vyšší v případě výskytu silného větru.

4. Vyhodnocení pozorování parametrů sněhové pokrývky v klimatologické stanici pro prognózní účely

V oblastech s nižší nadmořskou výškou je často problém odhadnout, kdy na měření sněhu vyjet, zda je vhodná doba – tedy zda výška sněhu dosáhla svého maxima, aby čas a vynaložené náklady pracovníků byly efektivní. Rozhodnutí se řídí podle údajů naměřených ve staniční síti a znalosti jak kvalitní je měření, jaká bývá dosažená maximální výška sněhu za sezonu, kolik dnů se sněhová pokrývka ve stanicích v průměru vyskytuje, kolik sněhu napadne za celou zimu a podobně. Je proto důležité pro prognózní účely znát i historii pozorování ve vytipované reprezentativní stanici v povodí.

V povodí dolního a středního úseku toku Sázavy je takovou orientační stanicí klimatologická stanice v Ondřejově (485 m n. m.), kde se výška sněhu soustavně měří od roku 1942. Vzhledem k tomu, že na začátku 40. let byly zimy bohaté na sněhovou pokrývku, doplnili jsme údaje od sezóny 1938/1939 z Ročenek klimatologického pozorování podle nejbližších stanic přibližně stejné nadmořské výšky (Líšno a Benešov) a získali soubor 71 let.



Obr. 4: Sezónní maximum výšky sněhové pokrývky 1939 – 2009 ve stanici Ondřejov

V Obr. 4 jsou vynesena roční maxima výšek sněhové pokrývky za celé období pozorování. V období 1969/1970 byla zaznamenána nejvyšší hodnota 89 cm, druhá v pořadí byla zima 1940/1941 s 62 cm, třetí pak 1941/1942 s 60 cm. Průměrná výška sněhu pro stanici Ondřejov je 29 cm. V 71leté řadě pozorování není patrný žádný významný cyklus opakování dosažených maximálních výšek sněhové pokrývky. Naznačený trend (polynomická funkce) je mírně klesající, s převahou poklesu v prvních 30 letech, pak je tendence spíše setrvalá.

Podle počtu dnů, ve kterých se vyskytovala sněhová pokrývka, byla první v pořadí sezona 2005/2006, kdy sníh ležel 130 dnů, druhá byla sezona 1969/1970 se 127 dny, třetí 1962/1963 se 114 dny, průměr pro toto období je 71 den. V hodnocení, které zimy patří mezi nejvíce bohaté na sněhovou pokrývku, se tedy nejčastěji opakují sezony 1969/1970 a 2005/2006.

Naopak mezi období chudá na sníh patřily zimy 1960/1961 s maximem 7 cm, 1997/1998 s 10 cm a 1945/1946 s 12 cm. Nejmenší počet dnů se sněhovou pokrývkou byl zaznamenán v zimě 2006/2007 (21 den), dále 1997/1998 (30 dnů) 1974/1975 (32 dny). V tomto pohledu na zimy s nedostatkem sněhu se vícekrát opakuje pouze zima 1997/1998.

Tab. 2: Maximum výšky sněhové pokrývky, počet dní se sněhem, max dosažený průtok

Pořadí	Sezona	Max výška sněhu (cm)	Počet dní se sněhem	Q_{max} Poříčí n.S (Nespeky)
1	1969/1970	**89**	127	1 až 2 letý
2	1940/1941	62	93	10 letý
3	1941/1942	60	97	½ až 1letý
4	1980/1981	59	91	½ až 1letý
5	1952/1953	56	102	½ až 1letý
6	1964/1965	56	87	2letý
7	1943/1944	51	103	2 až 5letý
8	2005/2006	49	**130**	**20letý**
20	1987/1988	39	54	10letý
21	2004/2005	38	72	2letý

Četnost výskytu maxim výšky sněhové pokrývky není jednoznačně soustředěn do určitého měsíce, ale je rozložen vcelku rovnoměrně. Mírně převažují maxima zaznamenaná v únoru (23x) nad lednem (20x) a březnem (15x).

Z 65-členné řady průměrných měsíčních teplot je patrné, že prvních třicet let bylo chladnějších v zimních měsících prosinec-březen, oproti následnému 35letému období.

Nejbližší hydrologickou stanicí je Poříčí n. Sázavou, od roku 2000 pak Nespeky. Délka pozorování vodních stavů a průtoků je zde od roku 1915, zahrnuje tedy roky měření v Ondřejivě. Za 95 let se zde vyskytl v období tání jedenkrát 20letý průtok (2006), dvakrát 10letý (1941 a 1948) a jednou 2 až 5letý (1944). V ostatních letech s nadprůměrnou výškou sněhu se vyskytly průtoky s opakováním nejvýše 2 roky, ale častěji ½ až 1rok, viz Tab. 2. Z tabulky je patrné, že jednoduchá závislost mezi výškou sněhové pokrývky, počtem dní se sněhem a maximálním dosaženým průtokem neexistuje. K prokázání těsnějšího vztahu by musely být předmětem zkoumání i další parametry (srážky teploty, vodní hodnota apod.). Platí pouze, že v zimách bohatých na sníh v povodí dolní Sázavy byl vždy dosažen průtok alespoň půlletý.

Pro odhad, kdy provádět terénní měření v povodí Sázavy, je doba vhodná k výjezdu zřejmě nejpozději při dosažení výšky sněhu 29 cm (průměr) ve stanici Ondřejov. Ovšem za předpokladu, že bude zohledněna i meteorologická předpověď počasí. Při nižší výšce sněhové pokrývky není výjezd z hlediska možného budoucího odtoku tak významný.

5. Závěr

V našich geografických podmínkách je znalost chování sněhové pokrývky jako významného hydrologického prvku velmi zásadní. Hydrologické modely jsou schopny spočítat velikost odtoku. Úspěšnost těchto předpovědí je do značné míry závislá na spolehlivosti a přesnosti měřených dat, v zimním období tedy na parametrech sněhové pokrývky. Prováděné rozbory historických klimatologických řad, nové metody měření sněhu nebo analýzy procesu tání v experimentálních povodích Jizerských hor mohou být přínosem pro předpovědi i v ostatních regionech ČR. Dílčí závěry jsou uvedeny v jednotlivých kapitolách.

Tento příspěvek byl napsán za podpory projektu SP/1c4/16/07 „Výzkum a implementace nových nástrojů pro předpovědi povodní a odtoku v rámci zabezpečení hlásné a předpovědní povodňové služby v ČR“.

Literatura

Zpráva projektu za rok 2009 SP/1c4/16/07 “Výzkum a implementace nových nástrojů pro předpovědi povodní a odtoku v rámci zabezpečení hlásné a předpovědní povodňové služby v ČR“.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav Praha,
e-mail: bubenickova@chmi.cz, kimlova@chmi.cz, ricicova@chmi.cz, bercha@chmi.cz

ZÁSOBY VODY V SNEHOVEJ POKRÝVKE – POTENCIÁLNA POVODŇOVÁ HROZBA

Kateřina Hrušková[1], Daniela Kyselová[1], Danica Lešková[2]

Abstrakt

Vo fyzicko - geografických podmienkach Slovenska, zvlášť v oblastiach, ktoré majú stredohorský a vysokohorský charakter, má sneh a snehová pokrývka veľký klimatický, hydrologický, ekologický, environmentálny ako aj vodohospodársky význam. V týchto miestach sa počas zimného obdobia akumulujú veľké zásoby vody, ktoré sa potom v relatívne krátkom čase uvoľňujú, čím zároveň predstavujú riziko vzniku jarných povodní. Topenie snehu a jeho hydrologická odozva je zložitý proces, pri ktorom hrajú významnú úlohu nielen zásoby vody v snehovej pokrývke, ale aj meteorologické a hydrologické podmienky, ako sú teplota vzduchu, výskyt a intenzita tekutých zrážok, hĺbka premrznutej pôdy, výskyt ľadových javov na tokoch, štruktúra snehovej pokrývky, morfológia územia. Aj keď z rozboru jednotlivých zimných období vyplynulo, že aj pri veľmi vysokých zásobách snehu nemusí dôjsť k vzniku povodňovej situácie, ak sa nevyskytnú podmienky na intenzívne topenie sa snehovej pokrývky, kvalita predpovede jarného odtoku priamo závisí od stanovenia objemu zásob vody v snehovej pokrývke. V príspevku predstavíme výsledky vyhodnocovania zásob vody v snehovej pokrývke, poukážeme na niektoré aspekty problematiky spracovania priestorového rozloženia charakteristík snehovej pokrývky, vychádzajúceho z bodových meraní a poukážeme na význam expedičných meraní charakteristík snehovej pokrývky pri ich priestorovom spracovaní. Zároveň budeme analyzovať odtokové pomery v období topenia sa snehu vo vybraných zimných obdobiach v závislosti na klimatických charakteristikách, teplote vzduchu a zrážkach.

Kľúčové slová: snehová pokrývka, akumulácia a topenie sa snehu, odtok zo snehu, povodeň

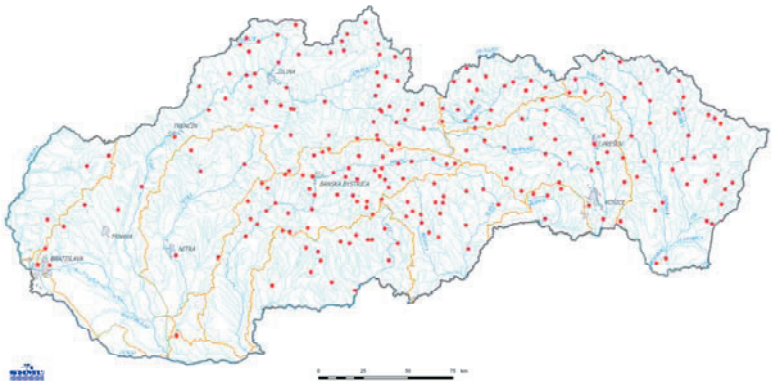
1. Úvod

Zo Zákona o ochrane pred povodňami č. 666/2004 Zb. vyplýva pre SHMÚ povinnosť poskytovať orgánom štátnej správy a správcom tokov pre vybrané profily informácie o zásobách vody v snehovej pokrývke. Tieto vydáva nepravidelne operatívna hydrológia už od začiatku 70. rokov. Základom sú údaje o charakteristikách snehovej pokrývky z vybraných zrážkomerných staníc SHMÚ. S ohľadom na rastúce požiadavky, týkajúce sa nielen kvality poskytovaných dát, ale aj počtu profilov, a možnosti, ktoré ponúkajú prostriedky geografických informačných systémov, má SHMÚ na svojej webovej stránke informácie o priestorovom rozložení celkovej výšky snehovej pokrývky a vodnej hodnoty snehu.

Vodná hodnota snehovej pokrývky je klimatologickým prvkom, ktorý v sebe spája priemet sumárneho úhrnu zrážok v reálnych teplotných a vlhkostných podmienkach danej zimy. Je dôležitým vstupným údajom pre bilanciu zásob vody v povodiach pred jarným topením snehu. Jej nenápadná pozícia medzi charakteristikami zrážok vyplýva zo sezónneho výskytu snehovej pokrývky v našich prírodných podmienkach a určite aj preto, že vodná hodnota snehovej pokrývky sa meria v sieti meteorologických staníc SHMÚ iba raz týždenne, v pondelok ráno, ak sa v tomto termíne nachádza v priestore stanice súvislá snehová pokrývka.

2. Problematika operatívneho stanovenia zásob vody v snehovej pokrývke

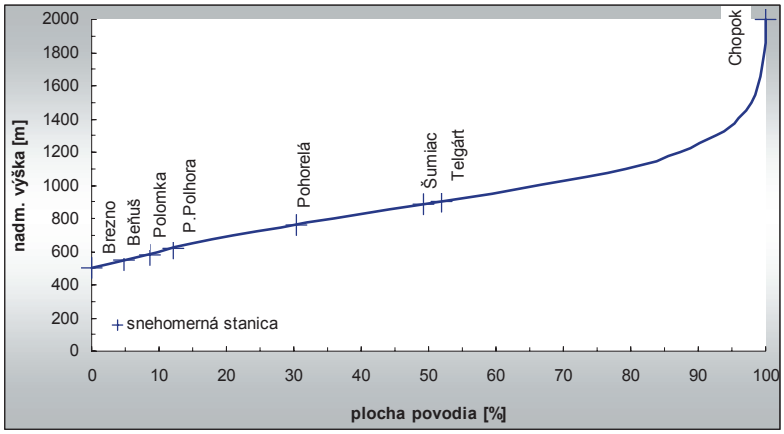
Zásoby vody v snehovej pokrývke sa na SHMÚ začali pravidelne vyhodnocovať v zime 1982/1983 a to pre vodné diela v povodí Váhu. V súčasnosti sa počítajú celkom pre 35 profilov v povodiach Váhu, Hrona, Ipľa, Slanej, Popradu, Hornádu, Bodvy a Bodrogu. Pre výpočet sa používajú údaje o celkovej výške snehovej pokrývky a jej vodnej hodnote v reálnom čase z 238 snehomerných staníc. Ich rozloženie na území SR je na Obr. 1.



Obr.1: Snehomerná sieť SHMÚ

Aj keď ich rozmiestnenie v záujmových povodiach sa zdá byť rovnomerné, je často s ohľadom na členitý reliéf územia SR nereprezentatívne a limitované dostupnosťou v teréne a ľudským faktorom. Až 95 % snehomerných staníc sa nachádza do nadmorskej výšky 1000 m. Napr. v povodí horného Hrona po Brezno s plochou 582,1 km^2 sa tretina celkových snehových zásob tvorí v nadmorských výškach 1000 až 1400 m, ktoré sa podieľajú 26,1 % na celkovej ploche povodí, pričom v týchto výškach nie lokalizovaná ani jedna snehomerná stanica (Obr. 2).

Tiež samotné meranie vodnej hodnoty snehovej pokrývky v základnej sieti snehomerných staníc pomocou zrážkomernej nádoby alebo váhového snehomera môže byť zdrojom nepresností – problémy pri odbere snehu do nádoby a jeho následnom rozpúšťaní. Analýza ČHMÚ [1] ukázala, že údaje o vodnej hodnote, namerané v staničnej sieti, sú väčšinou mierne podhodnotené, obzvlášť v stredných a vyšších nadmorských výškach.



Obr. 2: Hypsografická krivka povodí horného Hrona po Brezno

Preto je dôležité venovať pozornosť tomu, aby údaje o snehovej pokrývke zo staníc základnej snehomernej siete reprezentovali aj snehové pomery širšieho okolia a mali tak výpovednú hodnotu pre stanovenie zásob vody v záujmovej oblasti predovšetkým v čase tvorby maximálnych zásob, ale aj pred predpokladaným odtokom. Pre overenie správnosti týchto meraní v základnej sieti, ako aj získanie údajov v lokalitách, kde nie je dostatočne hustá sieť (predovšetkým v horskom teréne), slúžia expedičné merania priemernej výšky a vodnej hodnoty snehovej pokrývky.

V súčasnej dobe sa na určenie zásob vody v snehovej pokrývke štandardne používa metóda čiary vodnej hodnoty. Jej princíp rozpracoval Turčan [3]. Spočíva v analytickom vyjadrení závislosti vodnej hodnoty snehu od nadmorskej výšky. Na SHMÚ sa používa lineárna aproximácia bodových meraní metódou najmenších štvorcov. Vyrovnávajúcou čiarou vodnej hodnoty je priamka, podľa ktorej rovnice sa pre každú výškovú zónu odvodí vodná hodnota snehu, vzťahujúca sa na stred výškového intervalu konkrétnej zóny. Priemerná vodná hodnota snehovej pokrývky na povodie sa vypočíta váženým priemerom s podielom plôch jednotlivých zón ako váhami. Táto metóda dáva vyrovnanú vodnú hodnotu snehu pre každú výškovú zónu. Nie je preto nutné mať merania vo všetkých výškových triedach. Z údajov o priemernej plošnej vodnej hodnote snehovej pokrývky a ploche povodia sa následne určia zásoby vody v snehu pre daný profil.

Metóda je vo svojej podstate veľmi jednoduchá a pokiaľ sú splnené podmienky pre rovnomerné rozloženie snehovej pokrývky na povodí, aj presná. Problém nastáva v čase, kedy sa zásoby snehu na povodí vyskytujú iba vo vyšších nadmorských výškach. Potom sú vypočítané snehové zásoby podhodnocované.

3. Metodika tvorby máp priestorového rozloženia charakteristík snehovej pokrývky

Nakoľko stúpajú nároky na vodu, stúpajú aj nároky na informácie o zásobách vody v snehu. Využívanie geografických informačných systémov umožňuje získanie nielen informácií o priestorovom rozložení celkovej výšky a vodnej hodnoty snehovej pokrývky, ale aj výpočet snehových zásob pre rôzne profily podľa požiadaviek zákazníka. Na druhej strane oveľa citlivejšie reaguje na kvalitu dát ako aj výber vhodnej interpolačnej techniky.

V priebehu zimných období, 2005/2006 a 2006/2007, boli v rámci operatívnej prevádzky klimatologickej služby Slovenského hydrometeorologického ústavu vykonávané prvé pokusy s priestorovou analýzou vodnej hodnoty snehovej pokrývky, pričom do úvahy sa brali operatívne údaje zo siete meteorologických staníc merajúcich vodnú hodnotu snehovej pokrývky pravidelne každý týždeň v pondelok ráno. Nakoľko počet staníc, ktoré nielen merajú, ale aj pre potreby operatívnej prevádzky posielajú údaje o vodnej hodnote snehovej pokrývky takmer okamžite na pracoviská SHMÚ (Bratislava, Žilina, Banská Bystrica a Košice) nie je celkom dostatočný (reálne ich je niečo vyše 200 staníc) pre vykonanie dôslednejšej a priestorovo korektnejšej klimatologickej analýzy, v rámci predbežnej operatívnej analýzy bola použitá len jednoduchá 2D interpolácia bez zakomponovania vplyvu georeliéfu. V súčasnej dobe sa vykonáva komplexnejšia a z klimatologického hľadiska korektnejšia priestorová analýze so zohľadnením vplyvu georeliéfu. Aj napriek zdanlivo hustej pozorovacej staničnej sieti sa na území Slovenska vyskytujú pomerne rozsiahle oblasti, z ktorých údaje o snehových pomeroch absentujú. Ide najmä o stredohorské a vysokohorské oblasti Malých a Bielych Karpát, Javorníkov, Malej a Veľkej Fatry, Moravských a Oravských Beskýd, Nízkych, Vysokých a Západných Tatier ako aj niektorých ďalších, najmä pohraničných pohorí. Pre potreby komplexnejšej priestorovej analýzy bolo nevyhnutné údaje o vodnej hodnote snehovej pokrývky pre uvedené oblasti doplniť prostredníctvom tzv. „virtuálnych staníc“, ktorých priestorové rozloženie v konkrétnych horských regiónoch bolo expertne navrhnuté s ohľadom na klimatické špecifiká akumulácie a časového vývoja snehovej pokrývky v prírodnom prostredí Slovenska. Celkový počet virtuálnych staníc, ktorý sa momentálne v operatívnej klimatologickej praxi používa (a to nielen pre potreby

priestorovej analýzy vybraných charakteristík snehovej pokrývky) presahuje hodnotu 100. Ich počet ako aj priestorová lokalizácia sa ukazuje byť pre tento typ analýzy dostatočne vyhovujúci, čomu zodpovedajú aj výsledky publikované v niektorých predošlých prácach venovaných priestorovým analýzam teploty vzduchu a atmosférických zrážok na území Slovenska. Hodnoty vodného obsahu snehu (vodná hodnota snehovej pokrývky) sa pre virtuálne body odhadujú buď prostredníctvom dostatočne presného regresného modelu, pre ktorého konštrukciu je potrebné do štatistickej analýzy zahrnúť merania vodnej hodnoty snehovej pokrývky z celého územia Slovenska, alebo expertným odhadom (a to v prípade, že prvá uvedená metóda nie je dostatočne presná). Počas posledných dvoch zím, zimy 2008/2009 a 2009/2010, sa uskutočňovali expedičné merania charakteristík snehovej pokrývky jednotlivými regionálnymi pracoviskami, ktoré boli zamerané práve na oblasti virtuálnych staníc, aby sa overili metodiky ich odhadu.

Zložitejšia (komplexnejšia) 3D analýza so zohľadnením doplnkových „virtuálnych staníc“ bola vykonaná v prostredí GIS-GRASS 6.0.2 pomocou regularizovaného splajnu s tenziou s možnosťou nadstavenia (odvodenia) vstupných parametrov tenzie (tension), zhľadzovania (smoothing) a pod. Matematická formulácia regularizovaného splajnu s tenziou umožňuje pri interpolácií zahrnúť aj informácie o priestorovom rozložení doplňujúcej premennej, napr. pri interpolácii atmosférických zrážok a teploty vzduchu využiť informácie o topografii územia (georeliéf). Najlepšie výsledky dosahuje pri interpolácii veľmi hladkých povrchov znázorňujúcich napr. klimatické javy. Keďže metóda splajnov využíva matematicky definované krivky, ktoré po častiach interpolujú jednotlivé časti povrchu, výsledný povrch má minimálnu krivosť. Interpolačná metóda regularizovaný splajn s tenziou patrí k veľmi presným a flexibilným interpolačným metódam.

Priestorové analýzy (Obr. 3, 4) skvalitnili operatívne informácie o celkovej snehovej pokrývke a zásobách vody o snehu, poskytované povodňovým orgánom, vodohospodárom, ale aj širokej verejnosti operatívnou hydrológiou.

4. Vývoj zásob vody v snehovej pokrývke a odtokové pomery v období topenia sa snehu

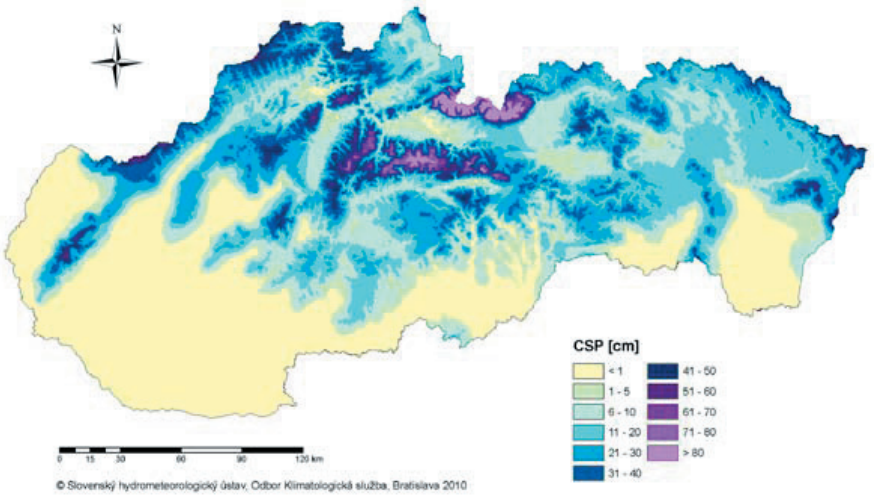
Vývoj snehových zásob a odtokové pomery v období topenia sa snehu boli analyzované v závislosti od teploty vzduchu a atmosferických zrážok vo vybraných zimných obdobiach a vybranom povodí. V povodí horného Hrona po Banskú Bystricu, s plochou 1766,48 km^2, sa zásoby vody v snehu pravidelne vyhodnocujú od zimy 1990/1991. Je to povodie, ktoré je predovšetkým vo svojej hornej časti málo ovplyvnené ľudskou činnosťou. Vyznačuje sa prirodzeným režimom odtoku. Snehová pokrývka, zásoby vody v nej a následný jarný odtok tu predstavujú významný hydrologický fenomén.

Podľa veľkosti objemu maximálnych zásob (Obr. 5) boli do ďalšieho spracovania vybrané zimy 1999/2000, 2003/2004, 2004/2005 a 2005/2006. Počas zím 2004/2005 a 2005/2006 sa vytvorili priaznivé podmienky pre akumuláciu zrážok v snehovej pokrývke a v povodí horného Hrona boli zaznamenané najvyššie maximálne zásoby vody v snehu od začiatku vyhodnocovania snehových zásob. Maximálne zásoby vody v snehu v zime 1999/2000 dosiahli 72 % maximálnych zásob rekordnej zimy 2004/2005, ale kulminačné prietoky jednotlivých vĺn počas jarného odtoku boli významnejšie. Zimná sezóna 2003/2004 charakterizuje zimu, kedy sa na povodí vytvorili priemerné snehové zásoby.

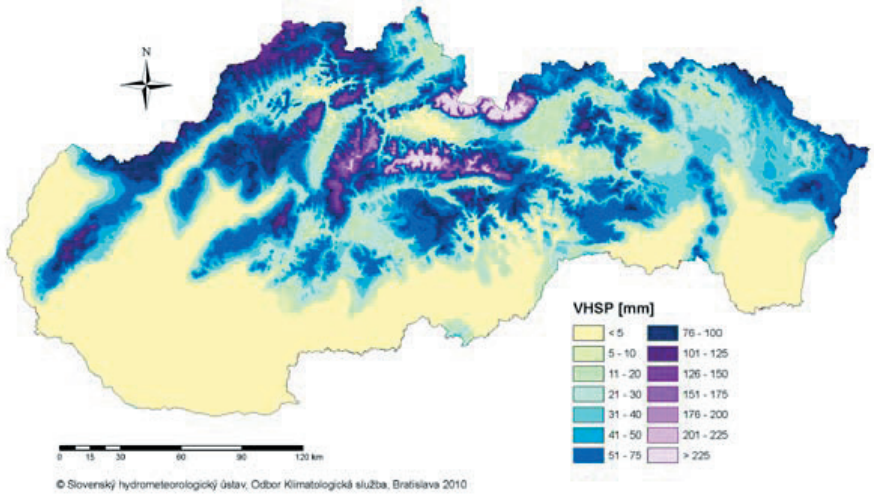
Priebeh odtoku v závislosti od teploty vzduchu, atmosferických zrážok a snehových zásob na príklade zimy 1999/2000 ukazuje Obr. 6.

Na veľkosť kulminácie a objem odtokovej vlny má dominantný vplyv veľkosť príčinných zrážok, ako aj priemerná vodná hodnota snehovej pokrývky na povodí, čiže veľkosť snehových zásob na začiatku topenia sa snehovej pokrývky. Pred samotným procesom topenia sa snehu je možné z pohľadu hydrológie identifikovať najdôležitejšiu časť zimnej sezóny – obdobie maximálnych zásob vody v snehovej pokrývke, ktoré je z hľadiska jarného

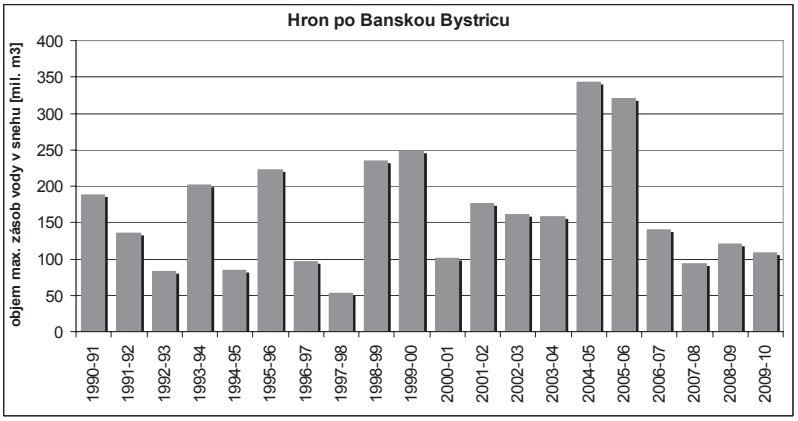
odtoku najpodstatnejšie. Teplota vzduchu je rozhodujúca pri vlastnom naštartovaní procesu topenia sa snehu.



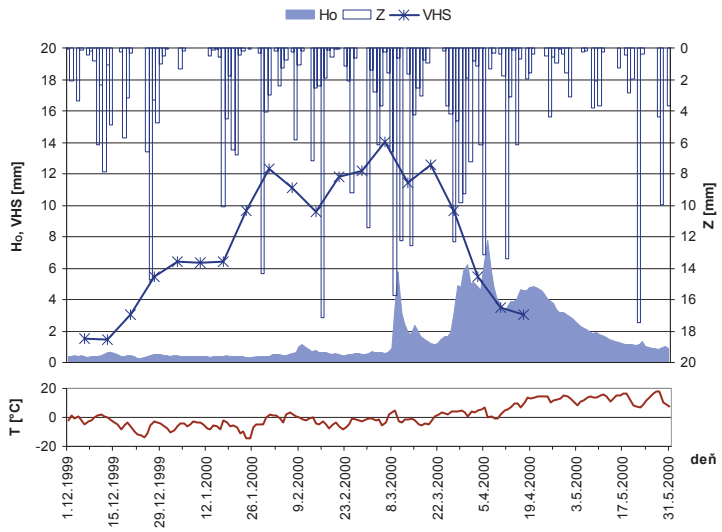
Obr. 3: Priestorové rozloženie celkovej výšky snehovej pokrývky na území Slovenska dňa 22. 2. 2010



Obr. 4: Priestorové rozloženie vodnej hodnoty snehovej pokrývky na území Slovenska dňa 22. 2. 2010



Obr. 5: Vývoj maximálnych zásob vody v snehovej pokrývke [mil.m^3] v povodí horného Hrona po Banskú Bystricu počas zím 1990/1999 až 2009/2010



Obr. 6: Vývoj snehových zásob (VHS), priebeh odtoku (H_O), chod denného úhrnu zrážok (Z) a priemernej dennej teploty vzduchu (T) v povodí horného Hrona po Banskú Bystricu v zime 1999/2000

5. Záver

Z pohľadu hydrológie predstavuje snehová pokrývka obrovskú zásobáreň vody, ktorá odteká v relatívne krátkom čase a zvlášť v čase nástupu topenia sa snehovej pokrývky môže byť zdrojom nekontrolovaného odtoku. Ako vo svojej práci uvádza Mihina [2], v horských oblastiach Slovenska akumuluje snehová pokrývka približne 20-30 % celkového ročného úhrnu zrážok. Z tohto dôvodu znalosti o tvorbe a topenia sa snehovej pokrývky a následnom odtoku majú praktický význam pri protipovodňovej ochrane miest a obcí. Využívaním geografických informačných systémov získavame informáciu o priestorovom rozložení snehovej pokrývky a jej vodnej hodnoty, a tak vieme určiť objem zásob vody v snehovej pokrývke pre ľubovoľný profil. Ale aj zásoby vody v snehovej pokrývke, ktoré nepatria k rekordným, môžu v závislosti od hydrometeorologických podmienok zapríčiniť (r. 2000) alebo zhoršiť (r. 2009) povodňovú situáciu a na druhej strane ani rekordná zima nemusí byť príčinou povodní (r. 2006).

Literatúra

[1] BERCHA, Š. – ŘIČICOVÁ, P. – NĚMEC, L., 2006. Posouzení reprezentativnosti měření vodní hodnoty sněhu při jarní povodni 2006. In: *Workshop Adolfa Patery 2006 – Extrémní hydrologické jevy v povodích*. Praha, s. 45-53.

[2] MIHINA, V., 1987. Metódy vyhodnocovania zásob vody v snehovej pokrývke na povodí Hrona. Etapová správa: II-5-1/05/03, SHMÚ, Bratislava. 56 s.

[3] TURČAN, J., 1973. Príspevok k určeniu zásoby snehu v horskom povodí. Vodohospodársky časopis, roč. 21, č. 3-4.

Kontakty na autora

1 Slovenský hydrometeorologický ústav, Regionálne stredisko Banská Bystrica, e-mail: katerina.hruskova@shmu.sk, daniela.kyselova@shmu.sk

2 Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava, e-mail: danica.leskova@shmu.sk

VÝZKUM PROCESŮ AKUMULACE A TÁNÍ SNĚHU V KRUŠNÝCH HORÁCH

Alice Taufmannová [1], Michal Jeníček[1], Dana Kučerová[1], Hana Pevná[1], Slávek Podzimek[1]

Abstrakt

Pro výzkum a modelování procesů akumulace a tání sněhu je klíčová znalost množství vody akumulované ve sněhové pokrývce. Určení tohoto množství není ovšem s ohledem na prostorovou variabilitu charakteristik sněhové pokrývky vůbec jednoduché. Údaje o sněhové pokrývce ze staničních měření se zejména v horském terénu mohou výrazně lišit od skutečných podmínek, které panují v povodí i v nejbližším okolí stanice. Cílem příspěvku je shrnutí dosavadních výsledků výzkumů v oblasti sněhové hydrologie prováděných na katedře fyzické geografie a geoekologie PřF UK v horských povodích v Krušných horách. Hlavní výsledky se týkají především metodiky terénního monitoringu sněhové pokrývky, metod výpočtu prostorového rozložení sněhu a modelování akumulace a tání sněhu na vybraných povodích. Od roku 2008 probíhá v povodích Bystřice a Zlatého potoka monitoring klimatologických a hydrologických veličin a také monitoring výšky sněhové pokrývky a vodní hodnoty sněhu. Poznatky získané terénním průzkumem a následnou analýzou v GIS byly použity při modelování akumulace a tání sněhu pomocí srážko-odtokového modelu HEC-HMS a metody Temperature Index. Výsledky potvrdily původní předpoklady, že podrobný monitoring může přinést zpřesnění parametrů hydrologických modelů a následně umožní přesnější simulace akumulace a tání sněhu.

Klíčová slova: hydrologické modelování, akumulace a tání sněhové pokrývky, HEC-HMS, teplotní index, interpolační metody

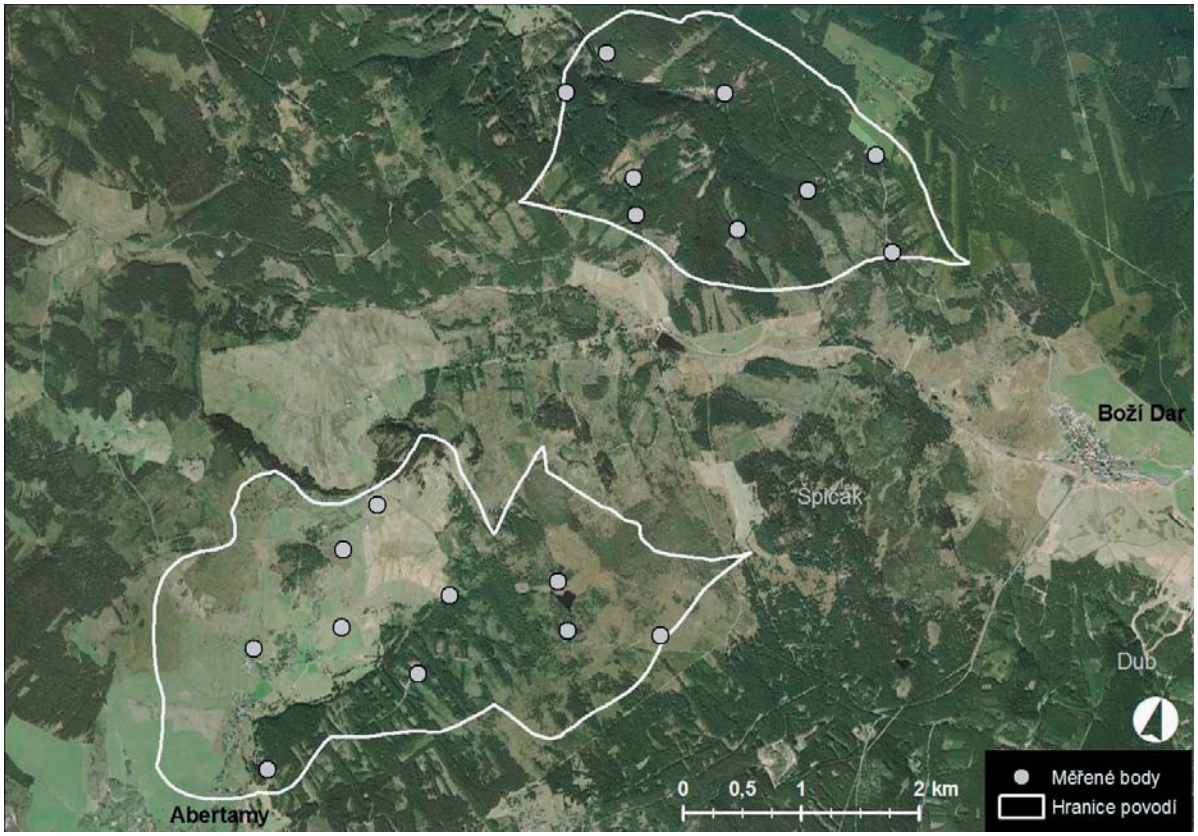
1. Úvod

Tání sněhu vlivem zvýšené teploty, doprovázené dešťovými srážkami, představuje v České republice častou příčinu vzniku povodně. Předpověď povodní z tání sněhu představuje složitý úkol, kterému je v současnosti věnováno stále více pozornosti. Problematikou modelování akumulace a tání sněhové pokrývky se zabývalo množství domácích i zahraničních autorů [1], [2], [3], [4], [5], [12]. Pro operativní hydrologické modelování je zásadní znalost množství sněhu v povodí a jeho prostorová distribuce zejména ve smyslu změny s nadmořskou výškou a krajinným pokryvem. Problematikou hydrologického modelování z tajícího sněhu, ale i akumulací sněhové pokrývky v různých fyzickogeograficky heterogenních prostředích se zabývá v České republice vedle oborově hlavní instituce Českého hydrometeorologického ústavu i další pracoviště výzkumného zaměření v čele s univerzitami. Od roku 2006 se tématem tání a akumulace sněhové pokrývky a odtokem ze sněhu zabývá i katedra fyzické geografie a geoekologie na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze.

Na katedře fyzické geografie a geoekologie začal pravidelný výzkum sněhové pokrývky z dat naměřených v terénu v zimní sezóně 2006/07 [6], [7], [13]. Od této sezóny jsou charakteristiky sněhové pokrývky sledovány několikrát během zimy na zvolených experimentálních povodí na Šumavě a v Krušných horách. Průběžně je monitorována výška sněhové pokrývky a vodní hodnota sněhu válcovým sněhoměrem s průřezem 50 cm^2. Do terénních měření jsou začleňováni studenti, kteří zpracovávají problematiku hydrologie sněhu ve svých bakalářských, magisterských a disertačních pracích. Monitoring sněhové pokrývky je intenzivněji prováděn v době tání ve snaze zachytit vztah tání a množství vody v závěrových profilech experimentálních toků, na nichž byly katedrou instalovány hladinoměry. Součástí monitoringu charakteristik sněhové pokrývky je i měření průtoků v profilech, kde se nacházejí hladinoměry.

V posledních dvou letech je největší pozornost věnována výzkumu v experimentálních povodích horní Bystřice a Zlatého potoka v Krušných horách. Tým pracovníků a studentů katedry se zabývá problematikou vlivu fyzickogeografického prostředí na akumulaci, distribuci a tání sněhu, modelováním odtoku ze sněhové pokrývky či problematikou vstupních dat o sněhové pokrývce do srážko-odtokových modelů. Cíle výzkumu sněhové pokrývky na katedře lze shrnout do následujících bodů:

- Zhodnocení vybraných fyzickogeografických faktorů na dynamiku akumulace a tání sněhu (nadmořská výška, vítr, vegetace, sklon, expozice)
- Vývoj metodiky měření a prostorové interpretace dat o sněhu pomocí pozemních metod a DPZ
- Modelování akumulace a tání sněhu v experimentálních povodích katedry, kombinace různých přístupů (Degree-Day, Energy Balance), tvorba scénářů odtoku z tajícího sněhu
- Problematika vstupních dat o sněhové pokrývce do srážko-odtokových modelů (interpolační metody)



Obr. 1: Poloha experimentálních povodí horní Bystřice (na jihu) a Zlatého potoka (na severu) s vyznačenými měřenými body

V Krušných horách je sněhová pokrývka sledována na celém povodí Bystřice po závěrový profil Ostrov (127,6 km^2), zvlášť pak v její horní části uzavřené profilem Abertamy (9,0 km^2) a na Zlatém potoce (5,5 km^2). Obě povodí patří mezi nejvýše položená povodí v Krušných horách a je zde předpoklad velkých zásob vody ve sněhové pokrývce a s tím související hrozby vzniku jarních povodní během náhlých oteplení. Horní Bystřice a Zlatý potok představují nejen dvě vegetačně odlišná povodí, ale liší se i orograficky, neboť se zde různě projevuje efekt návětří a závětří. Tato povodí byla vybrána za účelem srovnání odtoku vody z tajícího sněhu v odlišných fyzickogeografických prostředích. Polovinu území horní Bystřice tvoří nezalesněné otevřené plochy, naopak povodí Zlatého potoka je zalesněno celé (obr. 1).

2. Data a metody

2.1 Zdroje dat

Monitoring v Krušných horách začal v zimě 2008/2009, během něhož se vyvíjela metodika terénního měření, tak aby byla distribuce sněhu v povodí zachycena co nejreprezentativněji. Měření výšky sněhu a vodní hodnoty sněhu není bodové, ale profilové, tzn. výška sněhové pokrývky je 10x měřena na 100 m profilu po cca 10 m, přičemž na 1., 5. a 10. bodě je měřena vodní hodnota sněhu. Profily byly určeny na hranici otevřené plochy a lesa, aby byly zohledněny rozdíly charakteristik sněhu u obou okrajových variant hustoty vegetace pro Krušné hory. Zároveň byly profily stanoveny na místa s typickou expozicí svahu a sklonitostí pro daný výškový stupeň po 100 m. Každý profil pak reprezentuje charakteristický bod pro danou nadmořskou výšku. Data získaná terénním měřením jsou převedena do prostorové reprezentace pomocí interpolačních metod v ArcGIS. Interpolace v prostředí ArcGIS vycházely z průměrné hodnoty měření pro daný profil. Volba vhodné interpolační metody je v současnosti samostatně řešeným tématem, které bude diskutováno níže. Naměřená data slouží jako vstup do srážko-odtokových modelů. Pomocí získaných dat pak probíhá kalibrace modelu. Zkalibrovaný model umožňuje následně modelování variantních simulací dynamiky akumulace a tání sněhové pokrývky.

Fyzikogeografický charakter území určuje rychlost a intenzitu tání na různých místech povodí. Nedílnou součástí sledování odtoku ze sněhové pokrývky je i monitoring hydrologických a klimatologických charakteristik území. Klimatologická stanice katedry na Hřebečné poskytuje údaje o úhrnu srážek, teplotě vzduchu a půdy, vlhkosti vzduchu, radiaci, směru a rychlosti větru a také o výšce sněhové pokrývky. Obě experimentální povodí jsou uzavřena automatickými hladinoměry s kontinuálním sledováním vodního stavu. Data získaná z vlastní pozorovací sítě jsou doplněna o data z měřicí sítě ČHMÚ, Povodí Ohře, s. p a Deutscher Wetterdienst (DWD). Pro hodnocení vlivu krajinného pokryvu na tání sněhové pokrývky byla použita databáze CORINE Land cover 2000 [8].

2.2 Metody

Ve všech řešených studiích probíhá modelování odtoku ze sněhu v prostředí srážko-odtokového modelu HEC-HMS. Pro zpracování prostorových dat bylo využito programu ArcGIS verze 9.3 firmy ESRI. Hydrologické charakteristiky povodí a vybrané fyzickogeografické charakteristiky povodí byly zjištěny z digitálního modelu terénu pomocí hydrologické extenze ArcHydro Tools. V prostředí HEC-HMS byl sestaven diskretizovaný model povodí a pro každé dílčí povodí byly odvozeny parametry charakterizující jejich strukturu a chování. Pro výpočet parametrů komponent srážko-odtokového procesu bylo použito standardních metod, které jsou v podobných studiích často aplikovány [9]. Pro výpočet objemu odtoku byla použita metoda SCS CN. Pro stanovení přímého odtoku byla zvolena metoda Clarkova jednotkového hydrogramu, podzemní odtok byl popsán metodou exponenciálního poklesu a pro výpočet postupu povodňové vlny v korytě byla vybrána metoda Muskingum-Cunge.

Zásadní problematikou související se snahou o co nejpřesnější simulaci odtoku vody ze sněhové pokrývky je správný popis prostorového rozložení sněhu na povodí pomocí interpolačních metod. V současnosti je k dispozici několik interpolačních metod, zdaleka ne všechny však mohou být použity na horská povodí. Využity byly interpolační metody v extenzi Geostatistical Analyst v ArcGIS, a to Thiessenovy polygony, IDW (Inverse Distance Weighting), GPI a LPI (Global a Local Polynomial Interpolation), RBF (Radial Basis Function), OK (Ordinary Kriging), Cokriging, ORO (orografická interpolace), RK (Residual Kriging). Jednotlivé metody byly srovnány pomocí křížové validace (Cross Validation).

Důležitou technikou použitou pro modelování odtoku ze sněhu v prostředí HEC-HMS je sněhový model a v jeho rámci metoda teplotního indexu (temperature index). Teplotní index (degree-day factor) počítá akumulaci a tání sněhové pokrývky na základě vstupních hodnot úhrnu srážek a teploty vzduchu. Teplotní index je definován jako denní úbytek vodní

hodnoty sněhu při zvýšení teploty vzduchu o jeden stupeň nad kritickou teplotu, při které začíná proces tání. Degree-day model je doplněn o výpočet zrání sněhové pokrývky, především zohlednění teplotního deficitu sněhu (Cold Content) a sezónní změny faktoru degree-day faktoru. Rozšířený model teplotního indexu zohledňuje pomocí dodatečných parametrů rozdíly v tání ve srážkovém i bezesrážkovém období a zjednodušeně počítá i výměnu tepla mezi sněhovou pokrývkou a zemským povrchem. Principy sněhového modelu jsou podrobně popsány v literatuře [10].

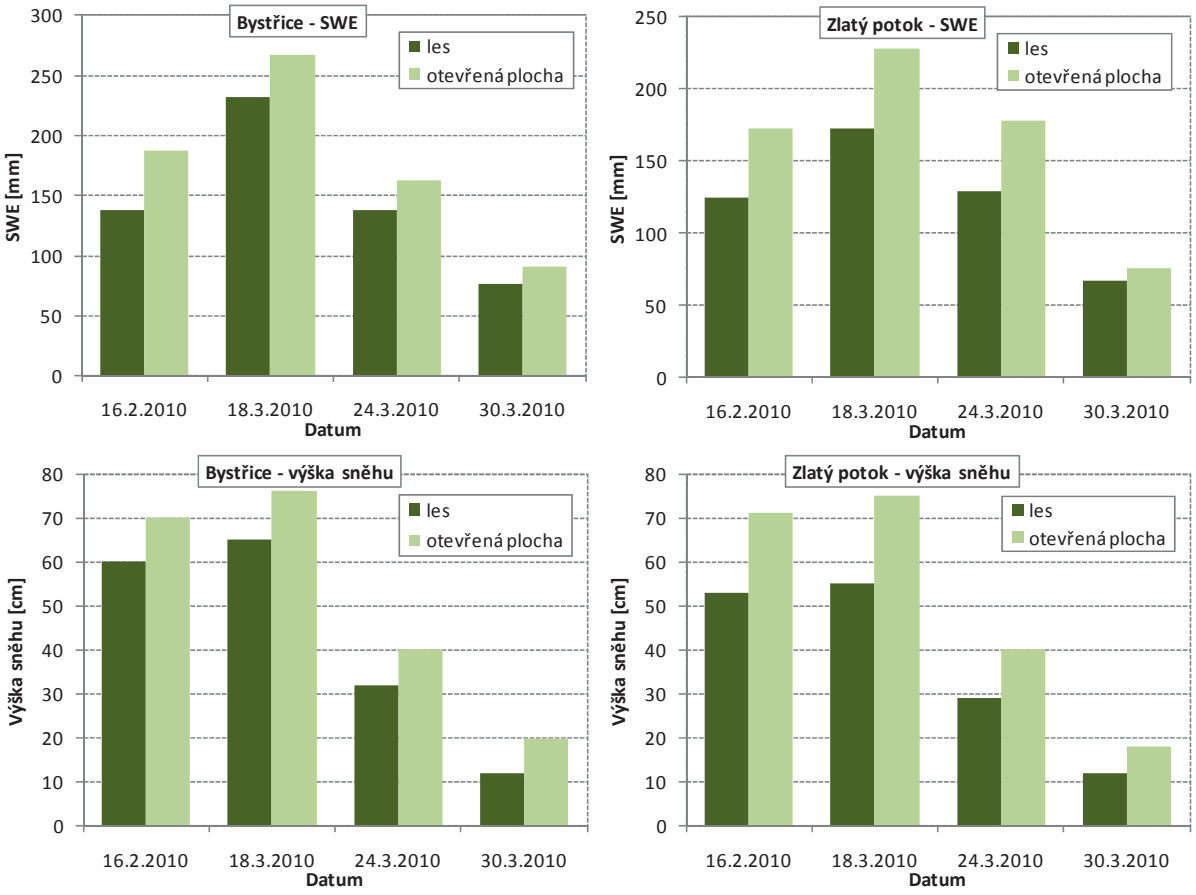
Modelování vlivu krajinného pokryvu na odtok ze sněhu z povodí proběhlo v jedné řešené studii pro celé povodí Bystřice pro tři scénáře krajinného pokryvu [13]. První variantou byl skutečný stav podle databáze CORINE Land cover 2000. Druhou variantou byl teoretický stav, ve kterém byly listnaté a smíšené lesy, orná půda, pastvina i louky nahrazeny jehličnatým porostem. Třetí varianta uvažovala nahrazení všech lesů na louky a pastviny. V modelu se jednotlivé krajinné pokryvy lišily hodnotou degree-day faktoru, při jehož výpočtu se vycházelo ze studie Federera [11]. Výsledné hodnoty degree-day faktoru byly 4,1 $mm.°C.d^{-1}$ pro skutečný stav krajinného pokryvu, 2,7 $mm.°C.d^{-1}$ pro hypotetický stav jehličnatého lesa a 6,3 $mm.°C.d^{-1}$ pro teoretický scénář nezalesněného povodí.

3. Výsledky

Při aplikaci celistvé formy sněhové komponenty hydrologického modelu HEC-HMS byla vyhodnocena simulace akumulace a tání sněhové pokrývky na povodí Bystřice po závěrový profil Ostrov následovně [13]. Dobrou shodu mezi simulovaným a pozorovaným vývojem vodní hodnoty sněhu vyznačovaly především vrcholové a horní polohy ve sledovaném povodí, ve střední části již docházelo k určité chybě a většinou nevyhovující shoda byla zaznamenána v nižších nadmořských výškách povodí Bystřice. Z jednotlivých výsledků vyplynulo, že různý charakter a průběh zimního období může mít vliv na schopnost modelu simulovat odtok a vodní hodnotu sněhu.

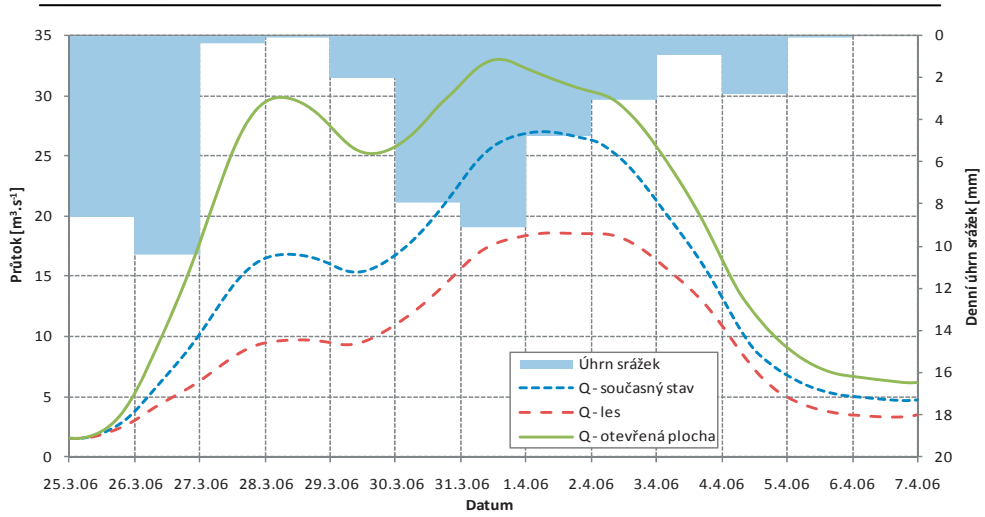
Rozložení sněhu v povodí je významně ovlivněno např. sklonem, expozicí, nadmořskou výškou, vegetací atd. Většina interpolačních technik však nezohledňuje vliv fyzickogeografických charakteristik povodí na rozložení sněhové pokrývky. Pouze několik jich do interpolace výšky sněhové pokrývky a vodní hodnoty sněhu zahrnuje vliv nadmořské výšky. U takových metod byl prokázán signifikantní vztah s oběma měřenými charakteristikami, a to především díky tomu, že vybrané modelové povodí Bystřice je horským povodím s významným výškovým rozpětím (394 – 1244 m n. m.). Z hlediska interpolace výšky sněhu na povodí Bystřice poskytla nejlepší výsledky metoda ORO, která vysvětlila variabilitu výšky sněhové pokrývky ze 78 %. Obdobných výsledků dosáhla rovněž metoda RK, OK a cokrigingu (77 – 73 %). Špatnou předpovědní schopnost má naopak metoda IDW, která vysvětlila jen 48 % z celkové variability výšky sněhové pokrývky, a metoda Thiessenových polygonů, která vysvětlila pouhých 20 % variability SCE. Při interpolaci vodní hodnoty sněhu na stejném povodí dosáhla nejlepší předpovědní schopnosti metoda RK (73 %). Vyhovujícími byly také metody ORO, cokriging a OK (73 – 62 %). Nejhorší výsledky poskytla metoda IDW (27 %) a Thiessenových polygonů (11 %).

Během letošní zimní sezóny byla provedena čtyři terénní měření v horní části Zlatého potoka a Bystřice (Obr. 2). Nejvyšší hodnoty naměřené výšky sněhu i vodní hodnoty sněhu byly zaznamenány 18. 3. V období tání v druhé polovině března byla provedena tři měření. Měření vždy probíhalo jak v lese, tak i na otevřené ploše. Oproti očekávání [12] nebyly prokázány vyšší hodnoty vodní hodnoty sněhu v lese než na loukách v závěru zimy, které byly způsobeny pomalejším odtáváním sněhu v lese. Je nutné zdůraznit, že naměřené hodnoty na konci zimy mohou být zatíženy chybou, která vychází z velkého rozpětí měřených hodnot.



Obr. 2: Vodní hodnota sněhu (SWE) a výška sněhu v lese a na otevřených plochách v zimě 2009/2010 v povodích horní Bystřice a Zlatého potoka [13]

Pomocí koncepčního modelu HEC-HMS a metody teplotního indexu byly provedeny simulace vlivu lesa a otevřených ploch na průběh akumulace a tání sněhové pokrývky a na následný odtok ze sněhu na příkladu jarní povodně 2006 způsobené vysokými teplotami, vysokým úhrnem kapalných srážek a následným táním sněhové pokrývky v povodí. Z výsledných hydrogramů (Obr. 3) lze vyvodit vliv odlišných krajinných pokryvů na odtok ze sněhu na povodí Bystřice ve zvoleném období 25. 3. 2005 – 7. 4. 2006. Pomalejší tání sněhové pokrývky v lesním porostu má logicky za následek skutečnost, že oproti skutečnému stavu zůstávají v povodí velké zásoby sněhu i po proběhlé povodňové vlně [viz 13]. Dá se očekávat, že další případné dešťové srážky mohou opět způsobit rychlé tání sněhu s následkem povodně, kulminace by však neměla dosáhnout již tak vysokých hodnot. Lesní pokryv v povodí ovlivňuje rychlost odtávání sněhu, které rozkládá do delšího časového období s více dílčími maximy průtoku. Ty ale nedosahují tak vysokých hodnot jako v případě zastoupení pouze otevřených ploch v povodí. I když výsledky modelování poukázaly na vliv lesa na tání sněhu, letošní terénní měření tuto skutečnost plně neprokázalo. Důvodů se nabízí více a budou muset být diskutovány podrobněji před další zimní sezónou. Možným vysvětlením je malý počet terénních výjezdů a nedokonale zvolená síť měřených bodů vzhledem k charakteru území.



Obr. 3: Modelované hydrogramy průtoku v závěrovém profilu Ostrov 25. 3. 2005 – 7. 4. 2006 pro současný stav a hypotetické varianty krajinného pokryvu „les“ a „otevřená plocha“ [13]

Měření vždy probíhalo na hranici lesa a otevřené plochy v obou krajinných pokryvech. Výsledky měření na loukách tedy reflektují situaci v blízkosti lesa, kde mohou panovat jiné radiační a větrné podmínky než v případě velkých otevřených ploch. Do budoucna by bylo vhodnější do současného stavu měření zakomponovat měření ryze v lesním porostu bez otevřeného vlivu louky a na zcela otevřeném místě. Obzvláště v období tání je potřeba co nejpřesněji zachytit rozdíly mezi vodní hodnotou sněhu v lese a na loukách za účelem odhadu odtoku vody z povodí. Dalším důvodem sporných výsledků může být velký rozptyl naměřených hodnot v době před úplným roztátím, kdy již povodí není souvisle pokryto sněhovou pokrývkou a lze tedy těžko vyvozovat přesné závěry.

4. Diskuze a závěry

V rámci výzkumu katedry fyzické geografie a geoekologie byla na experimentálních územích v Krušných horách v letech 2008 – 2010 provedena měření výšky sněhu a vodní hodnoty sněhu, která byla a budou nadále analyzována v řadě studiích.

V závislosti na vybrané interpolační technice a na jejím nastavení lze zlepšit předpověď množství vody akumulované ve sněhové pokrývce v daném povodí. Podle výsledků poskytují nejlepší předpovědní schopnost metody ORO a RK, tedy metody, které zahrnují vliv nadmořské výšky. Do budoucna má smysl věnovat se zlepšení předpovědi rozložení sněhové pokrývky pomocí zahrnutí dalších fyzickogeografických charakteristik. Kvalita vstupních dat významným způsobem ovlivňuje výsledky hydrologického modelování.

Pomocí koncepčního modelu HEC-HMS a metody teplotního indexu byly provedeny simulace vlivu lesa a otevřených ploch na průběh akumulace a tání sněhové pokrývky a na následný odtok ze sněhu na příkladu jarní povodně 2006 způsobené vysokými teplotami, vysokým úhrnem kapalných srážek a následným táním sněhové pokrývky v povodí [13]. Výsledky modelování ukázaly na nejednoznačnost hodnocení vlivu lesa a otevřených ploch na odtok z povodí v případě, že událost je tvořena více vlnami. V případě lesa sice u první vlny dojde k výraznému snížení, naproti tomu zůstanou v povodí vyšší zásoby sněhu, které mohou způsobit vyšší kulminaci případné druhé vlny. Přesto lze na základě výsledků předpokládat, že kulminační průtoky v případě zalesnění nebudou dosahovat tak vysokých hodnot, jako v případě vyššího zastoupení otevřených ploch.

Modelování srážko-odtokových procesů v povodí ukázalo na řadu nejistot vyplývajících jednak ze vstupních dat a jednak z použitého modelu a modelovacích technik. Jednu z nejistot představuje samotný princip měření sněhu v povodí a interpretace dat. Nejistota použitého modelu vychází především z parametrizace sněhového modelu (určení teplotního

faktoru tání nebo infiltrace vody do půdy) a průběhu výpočtu (nezohlednění denního chodu tání). Je třeba zdůraznit, že získané výsledky jsou příkladem povodí s konkrétními fyzickogeografickými podmínkami a pro konkrétní příčinnou situaci. Interpretace výsledků by měla být založená především na hodnocení zjištěných odlišností v provedených simulacích než na pouhé kvantifikaci modelovaných povodňových vln.

Literatura

[1] BEVEN, K. J., 2001. Rainfall-runoff Modelling, The Primer. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, 360 pp.

[2] DAŇHELKA,J. – KREJČÍ, J. – ŠÁLEK, M. – ŠERCL, P. – ZEZULÁK, J., 2003. Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. Česká zemědělská univerzita, Praha, 189 s.

[3] DEWALLE, D. R. – RANGO, A., 2008. Principles of snow hydrology. Cambridge University Press, Cambridge, 410 pp.

[4] KREMSA, J., 2008. Vliv lesa na akumulaci a tání sněhu a doplňování zásob podzemní vody, Paljakka (Finsko). ČVUT, Fakulta stavební, Praha, 104 s.

[5] NĚMEC, L., 2006. Vodní hodnota sněhové pokrývky. In: *Sborník semináře Stretnutie sneharov - Nová Ves 2006*. ČHMÚ, Praha, s. 41 – 43.

[6] JENÍČEK, M. – KOCUM, J. – JELÍNEK, J., 2008. Monitoring sněhové pokrývky v povodí Rokytky v letech 2007 a 2008. In: Broža, V., Szolgay, J., Fošumpaur, P. (Eds.) *Extrémní hydrologické jevy v povodích*. Praha. ČVÚT, 227 – 236.

[7] KOCUM, J. – JELÍNEK, J. – JENÍČEK, M., 2009. Monitoring sněhové pokrývky a vyhodnocení sněhových zásob na Šumavě a v Krušných horách. In: Hanková, R., Klose, Z., Pavlásek, J. (Eds.) *XIV. Medzinárodné stretnutie snehárov*. Praha. Česká zemědělská univerzita, 105 – 113.

[8] EEA., 2010. Corine land cover – data download [online] [cit. 2010-06-26]. European Environment Agency, Copenhagen. <http://eea.europa.eu/themes/landuse/clc/-download>

[9] JENÍČEK, M., 2009. Runoff charges in areas differing in land use in the Blanice River Basin – application of the deterministic model Journal of Hydrology and Hydromechanics, 57, 3, 154 – 161.

[10] SCHARFFENBERG, W. A. – FLEMING, M. J., 2009. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User´s Manual. USACE, Davis. 289 pp.

[11] FEDERER, C. A. – PIERCE, R. S. – HORNBECK, J. W., 1972. Snow management seems unlikely. In: *Proceedings Symposium on Watersheds in Transition*. American Water Resources Association, 212 – 219.

[12] POBŘÍSLOVÁ, J. – KULASOVÁ, A. 2000. Ukládání a tání sněhu v lese a na odlesněných partiích Jizerských hor. Opera Corcontica, 37, s.113 – 119.

[13] JENÍČEK, M. – TAUFMANNOVÁ, A., 2010. Vliv vegetace na akumulaci a tání sněhu – výběr z výsledků výzkumu Katedry fyzické geografie a geoekologie PřF UK v letech 2009 a 2010. In: Jirák et al. (Ed.). *XV. Medzinárodné stretnutie snehárov*. Praha: ČHMÚ. [in print].

Kontakty na autora

1 Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie, Albertov 6, 128 43 Praha 2, e-mail: alice.taufmannova@guycarp.com, jenicek@natur.cuni.cz

VÝPOČET ZÁSOB VODY VE SNĚHOVÉ POKRÝVCE S VYUŽITÍM V HYDROLOGICKÉ PRAXI NA POBOČCE ČHMÚ OSTRAVA

Martin Jonov[1], Šárka Maděřičová[1], Martin Stříž[1]

Abstrakt

Cílem příspěvku je seznámení s postupy zpracování naměřených dat sněhové pokrývky (výška sněhové pokrývky a její vodní hodnota) na pobočce Českého hydrometeorologického ústavu v Ostravě. V článku jsou shrnuty postupy zpracování sněhu na pobočce od nedávné minulosti, až k aktuálně používané GIS metodě Clidata-DEM. Jsou popsána také následná využití těchto výsledků (vstup pro srážkoodtokový model Hydrog, výpočet zásob vody ve sněhu k vybraným profilům pro podniky Povodí, polskou hydrometeorologickou službu IMGW, atd.). Přípěvek demonstruje zkvalitnění výstupů zpracovávaných dat a také zkrácení doby výpočtu a přípravy vstupů pro další využití dat (automatické výpočty a exporty do databáze).

Klíčová slova: sníh, výška sněhové pokrývky, zpracování klimatologických dat

1. Úvod

V zimním období, kdy je voda v přírodě vázaná ve sněhové pokrývce je nutné provádět výpočet, kolik takto vázané vody se v povodí nachází. Tato informace vstupuje do dalších výpočtů nejen na pobočce (srážko-odtokový model HYDROG), ale je zasílána také podnikům Povodí, které na základě této informace rozhodují o případných manipulacích na nádržích a v rámci mezinárodní spolupráce je tato informace zasílána polské hydrometeorologické službě.

2. Metody výpočtu

2.1 Metoda 1 – lineární výpočet podle nadmořských výšek

Nejstarší postup digitálního výpočtu zásob vody ve sněhové pokrývce byl na ostravské pobočce ČHMÚ vymyšlen a v praxi realizován F. Doleželem a to s dostupností první výpočetní techniky a programovacích jazyků. Postup výpočtu byl vcelku jasný a jednoduchý:

- Byla vytyčena zájmová území. Jako závěrný profil byl vybrán profil pod hrází vodního díla (dále jen VD) v povodí. Na tocích bez VD byl zvolen profil s vodoměrnou stanicí.
- Byl definován seznam terénních stanic s měřením výšky a vodní hodnoty sněhu a přiřazena jejich nadmořská výška.
- Planimetrováním z mapových podkladů byla určena plocha části vybraného povodí pro danou nadmořskou výšku. Rozestup mezi jednotlivými řezy byl 100 výškových metrů.
- Ze změřených dat byla provedena interpolace mezi stanicemi, přičemž byla získána informace o výšce a vodní hodnotě sněhu pro plochy, v jejichž výškovém rozpětí se nenacházela žádná z klimatologických stanic.
- Z plochy výškové vrstvy, výšky sněhu a vodní hodnoty dané vrstvy byl proveden samotný vypočet objemu vody ve sněhové pokrývce pro každou z vrstev.
- Součtem dílčích výpočtů byl spočten celkový objem vody ve sněhu pro zájmové území.
- Po výpočtu byl výsledek přehledně zapsán do tabulky.

Tab. 1: Ukázka výstupu z programu F. Doležela

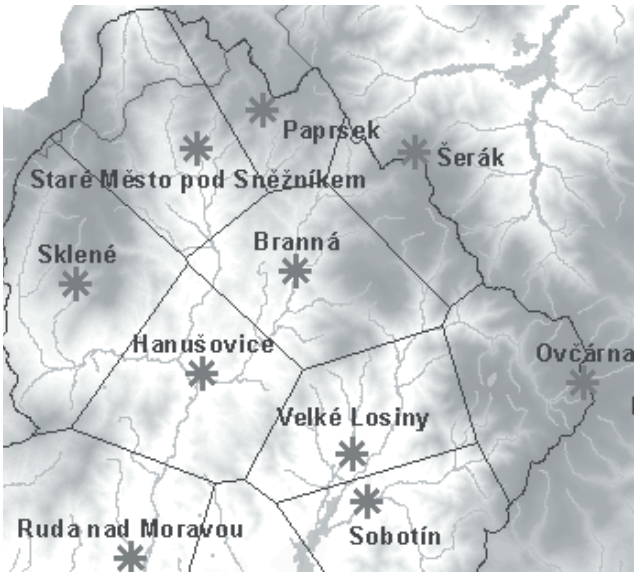
ZASOBY VODY A ODTOK ZE SNEHOVE POKRYVKY V SM.KRAJI

PRO 01 TYDEN ZIMY 2005-06.

PROFIL	ZASOBA		ODTOK V MIL.M3		
	MIL.M3	MM	PRUM	MIN	MAX
LESKOVEC	58.2	126.0	43.0	36.0	49.9
KRUZBERK	68.6	121.1	50.5	42.0	59.0
SANCE	31.6	215.6	25.3	22.8	27.8
MORAVKA	16.0	252.3	11.7	10.7	12.6
RASKOVICE BEZ MO.	13.6	207.5	9.7	8.7	10.7
ZERMANICE	4.4	96.7	3.3	2.4	4.2
TERLICKO	8.3	99.1	6.7	5.9	7.5
MORAVICANY	137.0	87.9	0.0	0.0	0.0
VSETIN	89.8	177.6	0.0	0.0	0.0
VALASSKE MEZIRICI	48.3	190.8	22.2	0.0	48.3
CHMU OSTRAVA	DNE 01-03-2006			10:10:27	

2.2 Metoda 2 - Thiessenovy polygony

Plochy pro výpočet zásob vody byly v této metodě pro jednotlivá zájmová území určeny metodou Thiessenových polygonů. Ze sítě nepravidelně rozmístěných bodů (tyto body představují skutečné sněhoměrné stanice v terénu) je vytvořena síť polygonů. Tato síť pokrývá celé zájmové území a je tvořena tak, že hrany mezi jednotlivými polygony mají vždy totožnou vzdálenost k dvěma sousedním bodům. Pro celý polygon se pak uvažuje měřená hodnota vztažená k bodu, kterou polygon reprezentuje (Obr 1.).



Obr. 1: Ukázka sítě Thiessnových polygonů se středem v měřící stanici

V této metodě byly použity dva vzorce pro výpočet zásoby vody ve sněhu. Do prvního výpočtu vstupovala vodní hodnota sněhu, do druhého výpočtu vstupovala výška sněhu a průměrná hustota sněhové pokrývky. Jako výsledná hodnota zásoby vody ve sněhu je brán průměr hodnot vypočtených oběma způsoby.

2.3 Metoda 3 – CLIDATA-DEM

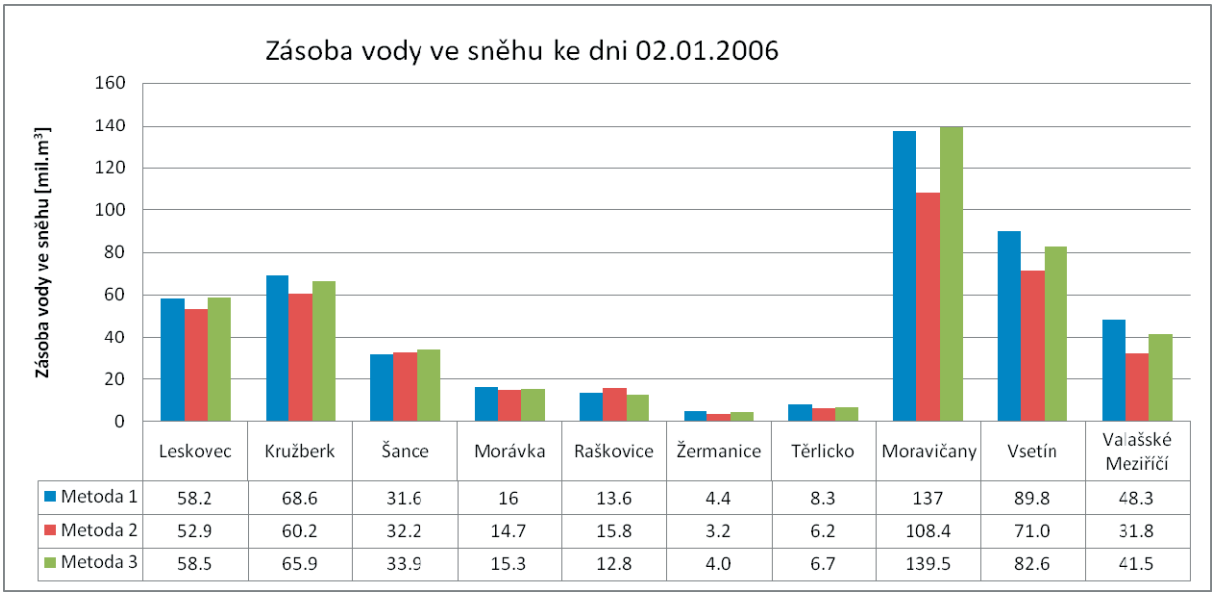
V současnosti je na ostravské pobočce ČHMÚ využíván postup, který je založen na metodě plošné interpolace mezi jednotlivými stanicemi, ve kterých se měří výška a vodní hodnota sněhu, s cílem získat spojitý plošný GRID. Pro výpočet se využívá lineární regrese mezi naměřenou hodnotu (výška sněhu nebo vodní hodnota sněhu) a nadmořskou výšku stanice.

Z těchto plošných dat o rozložení výšky a vodní hodnoty sněhové pokrývky jsou pak přepočtem v GIS získány plošné informace o zásobě vody ve sněhu.

Tato data se použijí pro výpočet zásob vody ve sněhu a průměrnou výšku sněhové pokrývky k závěrným profilům VD a dále pak vstupují do databáze jako hodnoty již rozpočtené dle připravených polygonů s využitím ve srážko-odtokovém modelu HYDROG v zimním období.

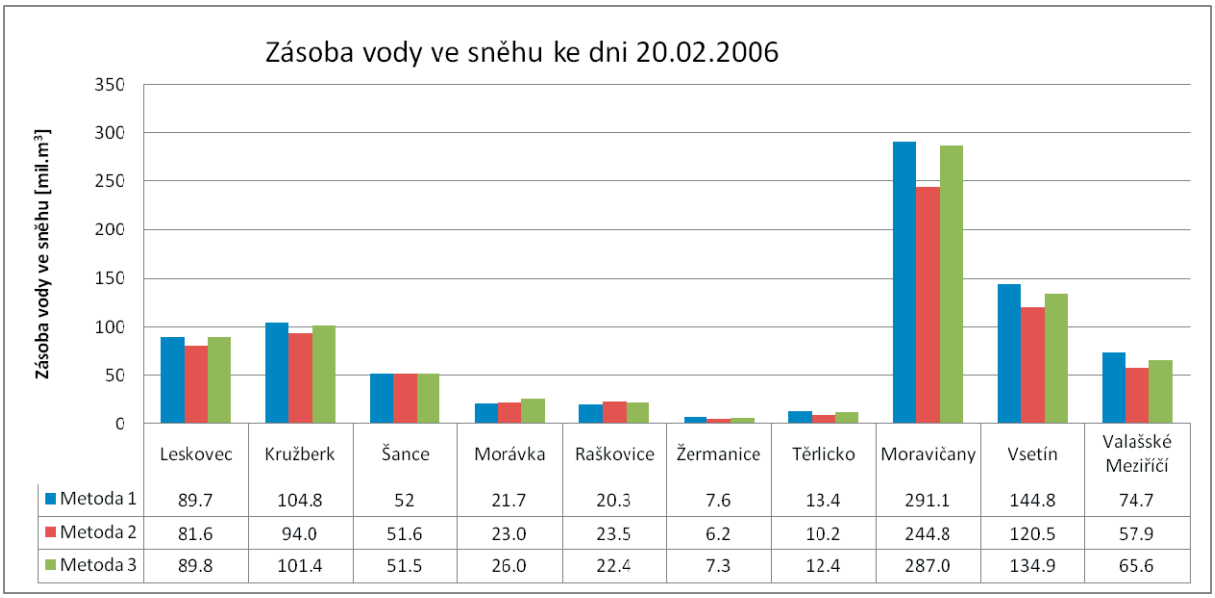
3. Výpočty a srovnání

Pro porovnání výsledků výpočtu z výše uvedených metod byl vybrán rok 2006. V tomto roce byly naměřeny extrémní hodnoty výšky sněhové pokrývky a vodní hodnoty (dále jen VH) i v nižších nadmořských výškách a proto je tento rok vhodný pro srovnání. V tomto roce byly vybrány 3 termíny pozorování – 2. ledna, 20. února a 20. března. Výsledky výpočtů a jejich srovnání jsou v následujících grafech.



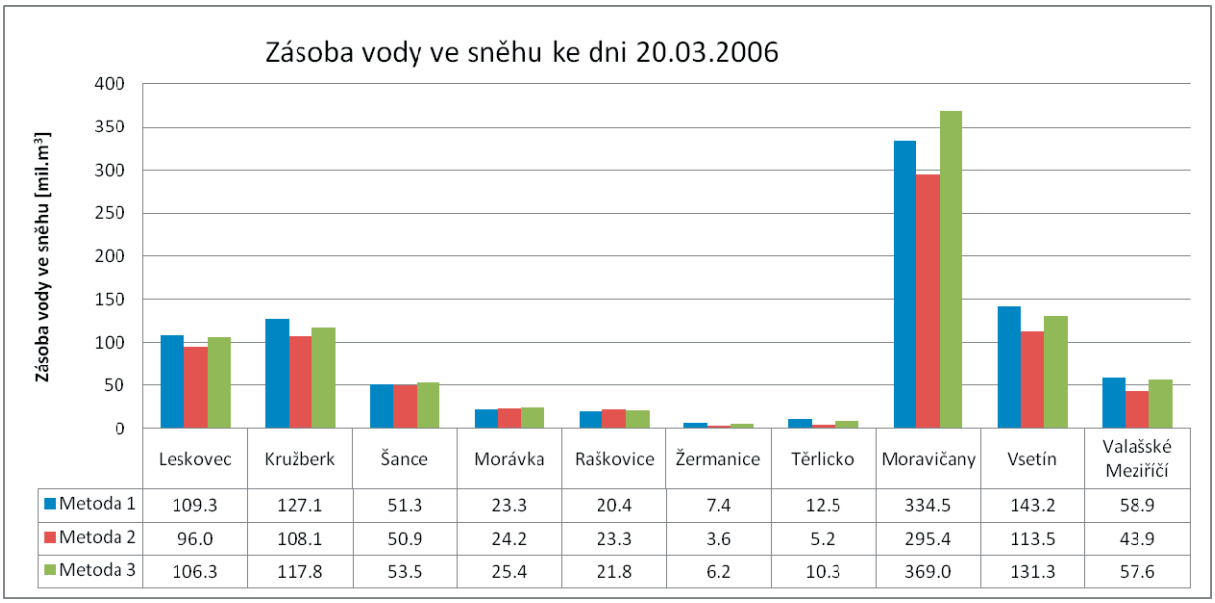
	Leskovec	Kružberk	Šance	Morávka	Raškovice	Žermanice	Těrlicko	Moravičany	Vsetín	Valašské Meziříčí
Metoda 1	58.2	68.6	31.6	16	13.6	4.4	8.3	137	89.8	48.3
Metoda 2	52.9	60.2	32.2	14.7	15.8	3.2	6.2	108.4	71.0	31.8
Metoda 3	58.5	65.9	33.9	15.3	12.8	4.0	6.7	139.5	82.6	41.5

Obr. 2: Zásoba vody ve sněhu vypočítaná třemi metodami ke dni 2. 1. 2006



	Leskovec	Kružberk	Šance	Morávka	Raškovice	Žermanice	Těrlicko	Moravičany	Vsetín	Valašské Meziříčí
Metoda 1	89.7	104.8	52	21.7	20.3	7.6	13.4	291.1	144.8	74.7
Metoda 2	81.6	94.0	51.6	23.0	23.5	6.2	10.2	244.8	120.5	57.9
Metoda 3	89.8	101.4	51.5	26.0	22.4	7.3	12.4	287.0	134.9	65.6

Obr. 3: Zásoba vody ve sněhu vypočítaná třemi metodami ke dni 20. 2. 2006



Obr. 4: Zásoba vody ve sněhu vypočítaná třemi metodami ke dni 20. 3. 2006

Tab. 2: Průměrná výška vodní hodnoty na povodí

PROFIL	Průměrná výška vodní hodnoty na povodí [mm]								
	2. 1. 2006			20. 2. 2006			20. 3. 2006		
	Metoda 1	Metoda 2	Metoda 3	Metoda 1	Metoda 2	Metoda 3	Metoda 1	Metoda 2	Metoda 3
Leskovec	126	113,7	124,7	194,1	175,3	191,5	236,6	206,2	226,7
Kružberk	121,1	106,1	115,4	185	165,5	177,6	224,4	190,3	206,3
Šance	215,6	219,7	231,3	355,2	351,7	371,4	350,1	346,8	364,7
Morávka	252,3	229,0	236,8	343,2	356,9	403,2	368,1	375,9	393,2
Raškovice	207,5	234,6	212,0	310,7	349,8	366,0	312,5	346,9	356,5
Žermanice	96,7	70,2	86,2	167,6	135,5	158,3	163,4	79,4	135,8
Těrlicko	99,1	74,0	79,9	160,4	122,3	147,5	149,4	62,6	122,2
PROFIL	Průměrná výška vodní hodnoty na povodí [mm]								
	2. 1. 2006			20. 2. 2006			20. 3. 2006		
	Metoda 1	Metoda 2	Metoda 3	Metoda 1	Metoda 2	Metoda 3	Metoda 1	Metoda 2	Metoda 3
Moravičany	87,9	68,1	86,9	186,8	153,9	178,8	214,7	185,6	229,8
Vsetín	177,6	140,3	171,0	286,3	238,1	279,2	283,2	224,3	271,8
Valašské Meziříčí	190,8	125,6	160,6	294,8	229,0	253,7	232,4	173,9	222,7

Z výše uvedených tabulek i grafů vyplývá, že metody, při jejichž výpočtu byla zohledněna nadmořská výška terénu zájmového území (metoda 1 a 3), mají velmi podobné výsledky výpočtu zásoby vody ve sněhu i průměrné výšky vodní hodnoty na povodí. Metoda 2 byla zatížena chybou vyplývající z malého počtu stanic na ploše s velkým převýšením (např. na ploše 1591 km^2 s převýšením 1050 m je lokalizováno 16 stanic). Metoda Thiessenových polygonů byla využívána pouze experimentálně.

4. Využití výpočtu

Český hydrometeorologický ústav má dle zákona 254/2001 Sb. o vodách povinnost zajišťovat hlásnou a předpovědní povodňovou službu ve spolupráci se správci povodí. Tato služba je zajišťována mj. vydáváním předpovědí průtoků ve vybraných profilech na 48 hodin. Tyto předpovědi jsou na pobočce Ostrava připravovány srážko-odtokovým modelem HYDROG. Tento model pracuje v zimním období s informacemi o sněhové pokrývce – výška sněhové pokrývky, poměr vodní hodnoty sněhu k výšce sněhové pokrývky a tzv. koeficient K (koeficient rychlosti odtávání sněhové pokrývky).

Model HYDROG nepracuje s plošnou informací o sněhové pokrývce, proto je třeba ji zjednodušit či generalizovat. Tato úprava se provádí v GIS prostředí bezprostředně po výpočtech plošných interpolací a spočívá v rozpočítání plošné informace podle připravených polygonů na průměrné hodnoty ke každému ze sítě polygonů. Úprava je sice zatížena chybou průměru, avšak i přesto je tato informace dostatečně přesná, navíc tato automatická příprava velmi urychluje přípravu dat před samotným modelováním, protože se výsledky přepočtu ihned ukládají do databáze. V minulosti se příprava sněhových dat pro model prováděla tak, že se do modelu data vkládala ručně pomocí editace vstupních souborů, čímž mohlo dojít k chybě v zadání nesprávné hodnoty.

5. Závěr

Výhodou stávající metody CLIDATA-DEM je přesnost samotného výpočtu i úspora času. Všechny výpočty se tvoří z dat v databázi, import a validace dat se provádí pouze jedenkrát a to při vstupu do databáze. I přesto, že jsou výsledky z metody CLIDATA-DEM nejpřesnější z výše uvedených (ověřeno sérií mimořádných měření v terénu), je nutné snažit se o další zpřesňování. Pro přesnější předpověď průtoků z tání sněhu je důležité zpřesnit vstupy, proto je neustále snaha o zkvalitnění měření sněhu a vodní hodnoty (váhový sněhoměr, sněhové polštáře apod.) i o přesnější popis rozložení sněhu v terénu. Další zpřesnění se pak týká tvorby jemnějšího dělení polygonové sítě tak, aby se minimalizovaly chyby při převodu spojité informace o stavu sněhové pokrývky do podoby vhodné pro srážko-odtokový model.

Literatura

[1] SOBÍŠEK, B. a kolektiv. Meteorologický slovník. 1. vyd. Praha, Ministerstvo životního prostředí. 594 s. ISBN 80-85368-45-5.

[2] ČSN 736530. Názvosloví hydrologie. Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření Praha. 91 s. N 22 108

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ostrava,
e-mail: jonov@chmi.cz, madericova@chmi.cz, striz@chmi.cz

AUTOMATICKÉ SNĚHOMĚRNÉ STANICE V ČR

Jan Jirák[1], Šimon Bercha[2]

Abstrakt

V rámci řešení projektu SP/1c4/16/07 „Výzkum a implementace nových nástrojů pro předpovědi povodní a odtoku v rámci zabezpečení hlásné a předpovědní povodňové služby v ČR“ je v ČHMÚ vyhodnocována funkčnost a spolehlivost přístrojů pro kontinuální měření vodní hodnoty sněhu – automatických sněhoměrných stanic (sněhoměrných polštářů). Sněhoměrné polštáře umožňují především on-line přenos dat týkajících se výšky a vodní hodnoty sněhu v průběhu celé zimní sezóny a umožňují tak dokonalý přehled o zásobách vody ve sněhové pokrývce a rychlosti akumulace či tání sněhové pokrývky.

Tyto přístroje jsou využívány v operativní praxi v severní Evropě, ve Švýcarsku či v USA. V rámci projektu jsou testovány sněhoměrné polštáře a získaná data jsou porovnávána s konvenčním měřením pomocí odběrných válců a s daty získanými výpočtem pomocí empirického algoritmu vyvinutého v ČHMÚ (L. Němec) na základě denních měření z klimatologických stanic.

Od zimní sezóny 2006/2007 jsou provozovány dva sněhoměrné polštáře na stanici Desná-Souš v Jizerských horách (váhový typ LEC a tlakový typ SOMMER), od zimní sezóny 2007/2008 je v provozu sněhoměrný polštář na stanici Churáňov na Šumavě (typ LEC) a Svratouch na Českomoravské vrchovině (typ SOMMER). V průběhu podzimu 2009 byly na základě nasbíraných zkušeností přesunuty dva polštáře na vhodnější lokality. Ze Svratouchu byl polštář přemístěn do Herálce v oblasti Hornosvratecké vrchoviny a jeden polštář z Desné-Souše byl přesunut do Dolního Dvora v Krkonoších.

V roce 2010 se počítá s rozšířením sítě sněhoměrných polštářů v rámci ČHMÚ i do ostatních horských lokalit České republiky - Hostýnsko-vsetínské hornatiny, Hrubého Jeseníku, Orlických hor a Javořické vrchoviny. Výběru místa je třeba přikládat velkou váhu, neboť výška a vodní hodnota sněhu jsou i v rámci malé územní jednotky prvky značně variabilní.

Klíčová slova: automatické sněhoměrné stanice, výška sněhu, vodní hodnota sněhu, tání sněhové pokrývky

1. Úvod

Povodňové události z let 2000, 2003, 2005 a 2006, které byly způsobeny táním sněhu v kombinaci s intenzivními srážkami, prokázaly nutnost směřování dalšího výzkumu do oblasti modelování sněhových zásob a jejich operativnímu vyhodnocování pro potřeby hlásné a předpovědní povodňové služby. Stávající praxe měření vodní hodnoty sněhu zahrnuje týdenní měření ve vybraných srážkoměrných stanicích a zpracování výsledků do formy odhadu celkových objemů vody akumulovaných ve vybraných povodích. Vzhledem k obtížím, které se vyskytují při měření sněhu v horských oblastech (při velké výšce sněhové pokrývky) a nedostatečnosti měření v týdenním intervalu v nižších polohách (kde dochází poměrně k výrazným změnám v relativně krátkých periodách), je potřeba rozvíjet metody a zařízení, které by umožnily měřit nebo odhadnout vodní hodnotu sněhu v denním intervalu. Zároveň je třeba věnovat pozornost dosažení co nejúčelnějšího operativního vyhodnocení sněhových zásob zejména pro potřeby ochrany před povodněmi a hospodaření s vodou.

Automatické sněhoměrné stanice jsou ve větší míře využívány v operativní praxi v severní Evropě a Severní Americe. V České republice byla první automatická stanice nainstalována již v roce 1996 (Jizerské hory). Technické nedostatky a drahý provoz vedly po pěti letech k ukončení experimentu. Technologický vývoj posledních let a průkaznější možnosti využití dat vedly k opětovnému zájmu o tuto metodu.

2. Typy stanic provozovaných v ČR

V České republice jsou v současné době v provozu dva typy automatických sněhoměrných stanic. Každá ze stanic pracuje na odlišném principu vážení sněhové vrstvy, ze kterého se určí vodní hodnota sněhové pokrývky. Prototyp stanice vyvinutý firmou LEC s. r. o. (ČR) (dále typ LEC) měří hmotnost sněhové vrstvy pomocí čtyř tenzometrických vah. Měřená plocha je vymezena deskou o rozměrech 4 x 4 m a plotem, který by měl zajistit odřezání sněhové vrstvy na požadovanou plochu (viz kap. 3 Faktory ovlivňující přesnost měření). Druhým typem stanice je zařízení vyvinuté firmou Sommer (Rakousko) (dále typ SOMMER). Stanice pracuje na principu polštáře naplněného glykolem a vodou, kde je snímán hydrostatický tlak způsobený váhou sněhové pokrývky. Polštář má rozměry 3 x 3 m. Odřezání sněhové vrstvy na požadovanou plochu 9 m^2 není zajištěno. Součástí obou stanic je ultrazvukové čidlo na měření výšky sněhové pokrývky a teplotní čidlo.

3. Faktory ovlivňující přesnost měření

Faktory ovlivňující měření je možné rozdělit na dvě skupiny:

a) faktory ovlivňující přesnost měření vodní hodnoty v bodě a její vypovídací hodnotu pro širší okolí,
b) specifické faktory ovlivňující přesnost měření.

add a) Nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím přesnost měření vodní hodnoty v bodě a její vypovídací hodnotu pro širší okolí je výběr místa. Lokalitu je nutné vybrat s dostatečným předstihem a pravidelně monitorovat rozložení sněhové pokrývky během jednotlivých fází zimní sezóny (akumulace, tání). Je nutné brát zřetel na klimatické podmínky daného místa (převládající směry větru, délku slunečního svitu) a jejich možnou změnu při změně okolního prostředí.

add b) V oblastech s pravidelnými teplotními výkyvy v zimní sezóně je nejpodstatnějším faktorem ovlivňujícím přesnost měření vytvoření sněhových mostů. Při pravidelném střídání tání a mrznutí sněhové pokrývky, vznikají firnové a ledové vrstvy, které zapříčiňují rozložení tlaku do širšího okolí, než je vymezená plocha měřící stanice.

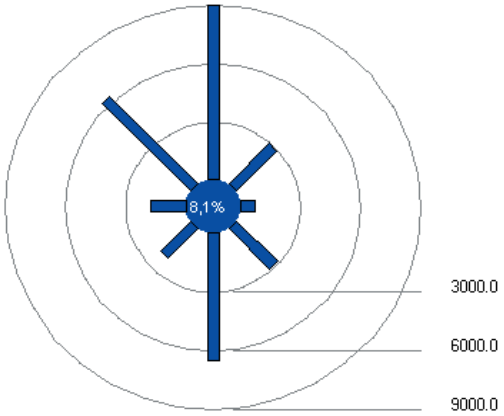
Dalším významným faktorem je smykové tření ve sněhové vrstvě na rozhraní hrany plochy měřící stanice a okolí. To je způsobeno rozdílnou rychlostí tání na měrné ploše a okolní půdě, kdy dochází k rozdílu v rychlosti sesedání sněhové vrstvy a smykovému tření na rozhraní. Tento jev způsobuje změnu tlaku na měřícím zařízení a tedy chybu měření.

4. Provoz automatických stanic – klimatologická stanice Desná – Souš (2008/2009)

Na klimatologické stanici Desná-Souš byly v roce 2006 uvedeny do provozu dvě automatické stanice pro měření výšky a vodní hodnoty sněhové pokrývky – typ LEC a typ SOMMER (viz kap. 2 Typy stanic provozovaných v ČR). Vzhledem k omezenému rozsahu článku bylo ke zhodnocení vybráno zimní období 2008/2009 s vybranými příklady naměřených dat. Byla vyhodnocena data ze stanice typu SOMMER, které budou v roce 2010 instalovány při rozšiřování staniční sítě (viz Obr. 4).

4.1 Umístění stanic

Stanice jsou umístěny na otevřeném prostranství východně od klimatologické stanice. Z východu a z jihu je lokalita chráněna stromy. Ze severu (VD Souš) je lokalita nechráněna a ze západu pouze částečně. Výběr umístění stanic byl problematický vzhledem k nároku na dostatečně velkou vodorovnou plochu. Vzhledem k převládajícímu severojižnímu proudění není výběr místa příliš vhodný, ovšem v dané lokalitě nebyla jiná možnost.



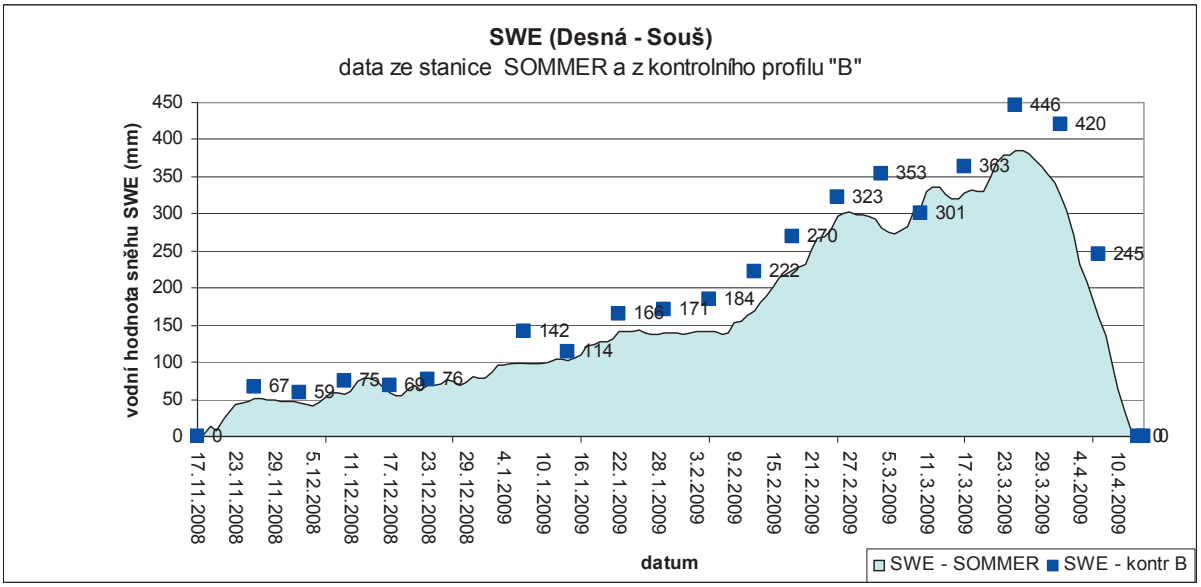
Obr. 1: Větrná růžice (Desná-Souš), hydrologický rok 2009

4.2 Kontrolní měření

Kontrolní měření byla provedena jednou týdně vážením odběrným válcem (průřezová plocha 50 cm^2) ve třech bodech a měřením výšky v deseti bodech. K tomu sloužily 2 kontrolní profily – profil A v bezprostřední blízkosti stanic a profil B (150 m na V), který byl vybrán jako více reprezentativní pro tuto lokalitu (předpoklad menšího ovlivnění větrem).

4.3 Vyhodnocení naměřených dat

Převážná většina níže popsaných problémů je způsobena převíváním sněhu. Z technického hlediska měřily oba přístroje správně, čemuž také odpovídá podobný průběh naměřených veličin.

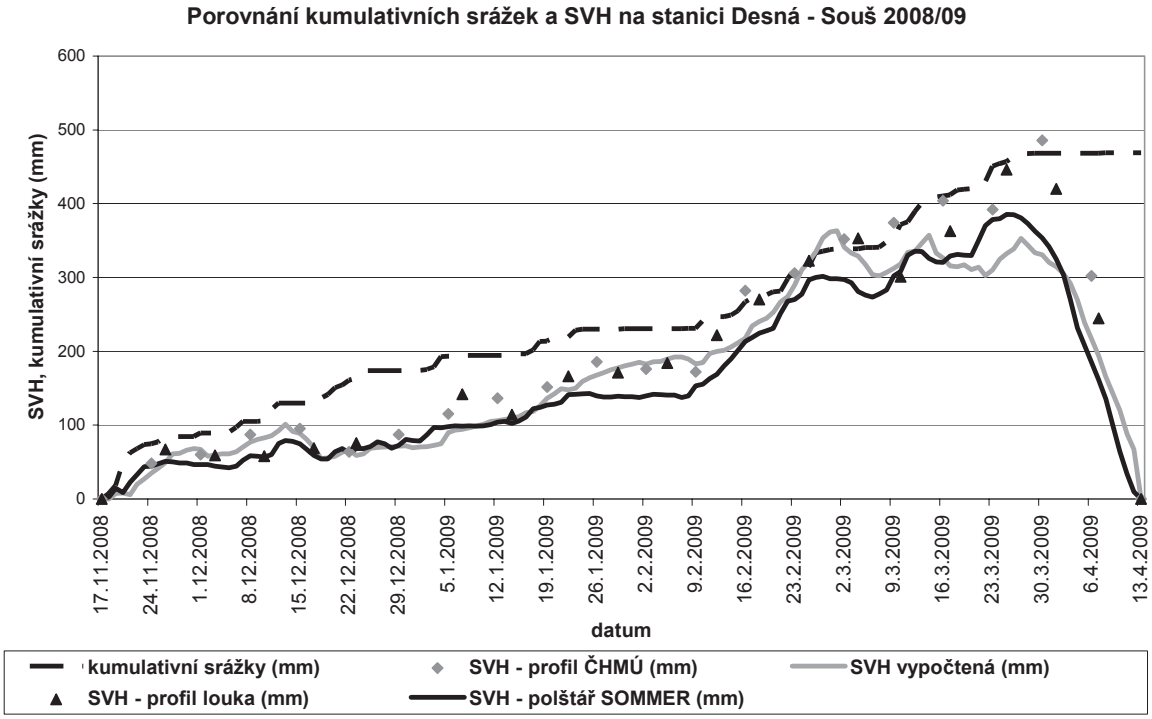


Obr. 2: Porovnání dat ze stanice SOMMER a z kontrolního profilu „B“.

Z naměřených hodnot automatickou stanicí typu SOMMER a z kontrolních měření vyplývá, že v období akumulace a v období tání je trend vývoje velmi těsný. Hodnoty z kontrolních měření jsou většinou mírně vyšší s několika většími výkyvy. Rozdíl v období akumulace dosahuje maximálně 31 % (7. 1. 2009), ve většině případů ovšem do 25 %. Názorným příkladem vlivu větru na ukládání sněhu je situace z období 30. 12. 2008 – 7. 1. 2009, kdy byla zaznamenána významnější odchylka mezi automatickým a kontrolním měřením. V tomto období došlo v profilu B k nárůstu vodní hodnoty sněhu na absolutní hodnotu 142 mm,

zatímco automatická stanice zaznamenala v tomto období nárůst o 18 mm na absolutní hodnotu 99 mm. Úhrn srážek na stanici Desná – Souš měl hodnotu 20,5 mm. Výrazný nárůst sněhové pokrývky v profilu B byl způsoben akumulací sněhu při záporných teplotách při JV směru větru. Na rozdíl od automatických stanic je profil více chráněn ze severu a tudíž došlo k akumulaci na návětrné straně v prostoru profilu.

V období tání stanice velmi přesně zaznamenala úbytek vodní hodnoty. Mezi 30. 3. a 14. 4. proběhlo tání bez dodatečných srážek a za kladných průměrných denních teplot. V období mezi 1. 4. – 7. 4. byl zaznamenán úbytek vodní hodnoty v profilu B 175 mm. Automatická stanice zaznamenala pokles vodní hodnoty o 164 mm.



Obr. 3: Porovnání kumulativních srážek, vodní hodnoty vypočtené, ručních měření vodní hodnoty a vodní hodnoty změřené automatickou sněhoměrnou stanicí na stanici Desná-Souš v zimní sezóně 2008-09.

Důležitou informací při zpracování a porovnávání parametrů sněhové pokrývky je každodenní automatický výpočet vodní hodnoty sněhu (SVHV) pro klimatologické stanice, který je ukládán v databázi ČHMÚ CLIDATA. Vstupními veličinami vytvořeného algoritmu jsou denní úhrn srážek, výška nového sněhu, celková výška sněhu a průměrný denní tlak par (Němec, 2003).

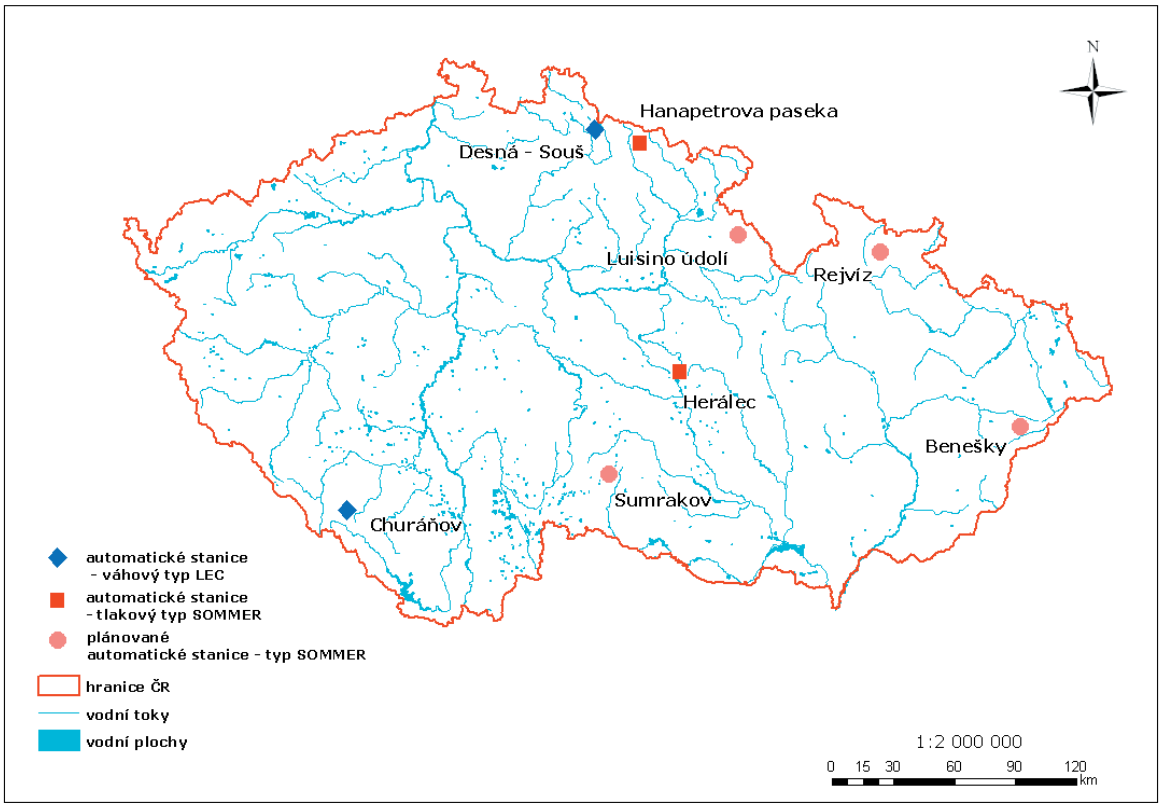
Na Obr. 3 je znázorněn průběh zimní sezóny 2008-09 na klimatologické stanici Desná-Souš. Z grafu je patrný shodný trend vývoje akumulace a tání sněhu změřený automatickou stanicí SOMMER (tmavá celá čára) a vypočtený dle vzorce L. Němce (světlá plná čára).

V průběhu celé zimní sezóny dosahovaly rovněž ručně naměřené údaje SVH o 3 až 35 % vyšších hodnot než údaje naměřené automatickou stanicí, v průměru byly tyto hodnoty vyšší o 17 %. Tento fakt byl způsoben převážně složitým prouděním vzduchu v místě stanice a ručního měření; akumulace sněhové pokrývky za vyšších rychlostí větru je v této lokalitě značně variabilní.

5. Síť automatických stanic v ČR

V roce 2010 přistoupil Český hydrometeorologický ústav k rozšíření sítě automatických stanic. Ke stávajícím lokalitám Desná-Souš (Jizerské hory), Hanapetrova paseka (Krkonoše), Herálec (Hornosvratecká vrchovina) a Churáňov (Šumava) byly na základě předem daných kritérií vybrány lokality Benešky (Hostýnsko-vsetínská hornatina), Rejvíz (Hrubý Jeseník), Luisino údolí (Orlické hory) a Sumrakov (Javořická vrchovina).

Kritéria výběru místa byla nastavena dle předchozích zkušeností s instalací a provozem stanic. Důležitým kritériem je nadmořská výška (600 - 800 m n. m.), procentuálně dostatečně reprezentující vybrané povodí/geomorfologickou jednotku. Okolní vegetace by neměla bránit akumulaci sněhu, ale zároveň by měla, alespoň částečně, chránit před vyvátím sněhu.



Obr. 4: Mapa rozmístění automatických sněhoměrných stanic

5.1 Možnosti využití

Automatické stanice kontinuálně zaznamenají přírůstek a úbytek vodní hodnoty a zároveň výšky sněhové pokrývky. Přestože v porovnání s profilovým měřením jsou hodnoty ve většině případů nižší (viz kap. 4.3 Vyhodnocení naměřených dat), je možné (pokud testovací provoz polštářů prokáže, že měření jsou spolehlivá) vypočítat ze získaných hodnot hustotu sněhu, kterou lze porovnat s hustotou sněhu získanou z dat naměřených pozorovateli na stanicích v blízkém okolí. V případě výrazného rozdílu je možné k výšce sněhové pokrývky naměřenou pozorovateli přiřadit hodnotu hustoty sněhu z automatické stanice. Získáme tak údaj vodní hodnoty sněhu, která je jen z části (měřená výška sněhové pokrývky) ovlivněna možnou chybou měření (lidským faktorem). Na data z automatických stanic je ovšem také nutné pohlížet kriticky a vycházet při interpretaci ze zkušeností získaných déle trvajícím provozem v daném místě.

Takto zpřesněná data mohou zlepšit výpočet zásob vody ve sněhové pokrývce v povodí, které se na centrálním předpovědním pracovišti ČHMÚ v týdenním kroku vyhodnocují a slouží hlásné a předpovědní službě ČHMÚ a vodohospodářskému dispečinku.

Literatura

[1] CEN – European Committee for Standardization, 2009. Technical report - Measurement of Snow Water Equivalent using Snow Mass Registration Devices (Draft). 16 pp.

[2] JIRÁK, J., 2007. Testování a provoz automatických stanic pro měření výšky a vodní hodnoty sněhové pokrývky. In: *Sborník Stretnutie snehárov 2007.* Telgárt. 4 s.

[3] JIRÁK, J., 2007. Czech snow pillow prototype. Workshop of WG CEN TC 318 („SWE Work Group"). Malta. 4 pp.

[4] NĚMEC, L. – KVĚTOŇ, V. – SETNIČKOVÁ, I. – ŠKÁCHOVÁ, H., 2003. Estimation of the Water Equivalent of Snow Cover from the Other Meteorological Measurements. Brig, ICAM and MAP-Meeting 2003. [Extended abstracts]

[5] Závěrečné zprávy 2007, 2008, 2009 Projekt SP/1c4/16/07 „Výzkum a implementace nových nástrojů pro předpovědi povodní a odtoku v rámci zabezpečení hlásné a předpovědní povodňové služby v ČR". ČHMÚ, Praha.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, Želivského 5, 466 05 Jablonec nad Nisou

2 Český hydrometeorologický ústav, Praha, e-mail: bercha@chmi.cz

ČASOVÁ DISTRIBUCE SRÁŽEK PRO STŘEDNĚDOBOU HYDROLOGICKOU PŘEDPOVĚĎ

Ilona Vašková[1], Lucie Březková[2]

Abstrakt

Tvorba hydrologické střednědobé předpovědi je úzce spjata s nejistotou určení množství vstupních srážek. Metoda navržená v tomto příspěvku je zaměřena na přípravu vstupních srážkových dat v šestihodinovém intervalu do hydrologického modelu pro výpočet střednědobé hydrologické předpovědi. Pro první dva předpovídané dny jsou v operativní praxi většinou využívány deterministické předpovědi meteorologických předpovědních modelů, v případě ČHMÚ se jedná o model Aladin. Pro delší předpovědní období než 2 dny, kdy nejistota předpovídaných srážek prudce stoupá, je vhodné využít pravděpodobnostní předpovědi. Cílem této práce bylo navrhnout postup vytvoření syntetické řady 6hodinových úhrnů ve dnech následujících, tj. navázat na předpověď modelu Aladin. Za tímto účelem byly vytvořeny řady syntetických denních srážek pomocí stochastického generátoru počasí, které vykazují shodné pravděpodobnostní rozložení výskytu s daty pozorovanými. Generované denní srážkové úhrny, bylo nutno vhodně rozdělit do 6hodinových intervalů, a to definováním vztahu mezi syntetickými a historickými denními srážkovými úhrny, u nichž jsou známy jejich úhrny 6hodinové. Za účelem zpřesnění této časové diskretizace, z hlediska charakteru srážkové činnosti, byly historické epizody rozčleněny na letní a zimní. K testování metodiky bylo zvoleno povodí Odry, ve kterém jsou k dispozici 6 a 24hodinové záznamy srážkových úhrnů od roku 2000.

Klíčová slova: střednědobá hydrologická předpověď, časové rozdělení srážek, stochastický generátor srážek, stochastická předpověď

1. Úvod

Hydrologická předpověď s dobou předstihu delší než je doba koncentrace daného povodí je významně ovlivněna nejistotou určení množství srážek. Vstupní srážky pro první dva předpovídané dny jsou většinou produktem deterministické předpovědi meteorologických předpovědních modelů. Pro předpovědní období delší než 2 dny je vhodné využít variantní předpověď meteorologického ansámblu (pravděpodobnostní předpovědi) nebo historické analogy průběhu počasí (známé pod pojmem EPS- Ensamble Prediction System).

Metodika ESP (Ensamble Streamflow Prediction) byla vyvinuta v National Weather Service (NWS), kde je také provozována [NWS, 2007]. Vychází z předpokladu, že rozptyl možného průběhu srážek a teploty vzduchu v určité části roku je vyjádřen skutečnými pozorovanými historickými daty (v NWS od roku 1951). ESP využívá v daném předpovědním období vstupní srážky v podobě skutečných dat pozorovaná v předešlých letech ve stejných kalendářních dnech roku. Implementace této metody v ČHMÚ by umožnila 50 variantních předpovědí (s využitím historických meteorologických dat od roku 1961). Nicméně, tato klasická metodika přináší nutnost stále rozšiřovat databázi historických analogů o nově naměřená data.

Správnějšího vystižení skutečné pravděpodobnosti výskytu jevů s malou pravděpodobností opakování v průběhu roku poskytují stochastické generátory počasí. Slouží k vytváření umělých řad definovaných meteorologických prvků. Navíc v případě generovaných řad odpadá nutnost neustálého rozšiřování datových souborů, jak je tomu u metodiky ESP. Řada je nově generována pouze v případě výskytu nového jevu s nízkou pravděpodobností opakování, který by mohl ovlivnit charakteristiky pravděpodobnostního rozložení daného jevu.

Cílem této práce bylo vytvoření 6hodinové řady srážkových úhrnů, navržená metodika hledá vztah mezi syntetickými denními srážkovými úhrny obdrženými stochastickým generátorem a historickými denními a 6hodinovými srážkovými úhrny (rozčleněnými na letní a zimní epizody). Detailní popis metody je prezentován v kapitole 2.2.

2.1 Stochastický generátor řad meteorologických prvků

Stochastické generátory počasí slouží k vytváření umělých řad definovaných meteorologických prvků, které vykazují shodné pravděpodobnostní rozložení výskytu simulovaných prvků jako pozorovaná řada. Základním principem, na kterém jsou stochastické generátory nejčastěji postaveny jsou Markovovy řetězce nebo spell-lenght přístup [Semenov and Barrow, 2002; Wilks and Wilby, 1999]. Pravděpodobnost výskytu prvků je většinou řešena odděleně pro jednotlivé kalendářní měsíce. Generátor současně respektuje autokorelační závislosti jednotlivých řad i vzájemné korelace generovaných řad.

Nutno podotknout, že název generátor počasí může být zavádějící, nejedná se o předpovědní nástroj, ale nástroj ke generování syntetických dat. Jeho původní využití bylo spojeno s výpočtem dodatečně dlouhých syntentických časových řad se stejnými statistickými charakteristikami jako pozorované klimatické řady v dané lokalitě. Současně generátor slouží k vytvoření časových řad v místech, kde nejsou dostupná pozorovaná data (pomocí prostorové interpolace parametrů získaných v nejbližších okolních stanicích). V neposlední řadě generované řady meteorologických prvků jsou využívány ve studiích týkajících se klimatických změn.

V rámci této práce byl využit stochastický generátor LARS-WG (Long Ashton Research Station Wheather Generator) [Semenov and Barrow, 2002; Semenov, 2008; Pretel et al., 2007], založený na principu spell-length, který vytváří řady denních srážkových úhrnů, maximálních a minimálních teplot a radiace. V případě srážek, generátor nejprve modeluje suchá a vlhká období (denní úhrn větší než 0 mm). Délka každé řady je náhodně zvolena podle příslušného semi-empirického rozdělení vlhkého či suchého období (v příslušném měsíci, ve kterém řada začíná). V případě dne se srážkou je hodnota denního úhrnu generována pomocí rozdělení srážkových úhrnů v daném měsíci, bez ohledu na délku srážkové řady nebo množství srážek v předchozích dnech.

Tento generátor byl úspěšně využit v různých hydrologických studiích, lze jmenovat např. Dibike and Coulibaly [2005], nebo Khan et al. [2006]. Program LARS-WG je dostupný na internetu, a v rámci tohoto projektu poskytl autor programu licenci pro volné nekomerční použití generátoru.

2.2 Časová distribuce srážek

Zkušenosti s předpovědními hydrologickými modely ČHMÚ ukazují, že 6hodinový interval je přijatelný pro provoz hydrologického modelu (uvnitř tohoto intervalu je vstupní srážka uvažována jako uniformní).

Předpovídané řady srážkových úhrnů k danému datu jsou složeny v prvních dvou dnech z výstupů předpovědního meteorologického modelu Aladin, tj. v 6hodinovém kroku. Následující úhrny jsou syntetické, pochází ze stochastického generátoru LARS-WG, jedná tedy se o denní srážkové úhrny. Pro každou stanici daného povodí je vygenerována 1000letá řada syntetických denních srážkových úhrnů. Náhodným výběrem roku jsou vybrány denní srážkové úhrny $P_{24h\ synt}$ ke každému dni střednědobé předpovědi (program umožňuje uživateli zadat počáteční datum předpovědi).

Časové redistribuce syntetických denních srážek $P_{24h\ synt}$ na 6hodinové P_{6h} je navržena pomocí paralely se skutečně naměřenými denní srážkové úhrny v dané srážkoměrné stanici v rámci stanovené tolerance a korespondujících 6hodinových srážkových úhrnů. Ke každé hodnotě syntetické $P_{24h\ synt}$ jsou hledány v databázi naměřených srážkových úhrnů v mezích stanovené tolerance (volitelný parametr). Současně musí být dodržena podmínka, že součet

úhrnů v prvním a posledním 6hodinovém intervalu daného dne nesmí převýšit vybraný syntetický denní úhrn $P_{24h\ synt}$. Je nutno zmínit, že při vyhledávání dat je rozlišována srážka "letní" (květen až září) a "zimní" (říjen – duben), je tedy bráno na zřetel datum předpovědi.

Tabulka 1 představuje ukázku části vstupního souboru měřených dat, se kterým pracuje navržený program umožňující automatizaci této metodiky. Soubor obsahuje základní údaje o srážkoměrných stanicích, datum měření, registrované srážkové úhrny denní P_{24h} i 6hodinové P_{6h} a současně úhrny ze dne předchozího a následujícího.

Ze všech dat, které splní výše zmiňované podmínky je náhodně vybrán k jednomu úhrnu $P_{24h\ synt}$ jeden úhrn P_{24h} historický s korespondujícími 6hodinovými úhrny ze dne předchozího a následujícího. Posledním krokem je dopočítání zbylých dvou 6hodinových intervalů vybraného denního úhrnu, náhodným rozdělením zbylého úhrnu na dva díly. Výslednými daty, která představují vstupní soubor pro model střednědobé předpovědi jsou tedy $P_{24h\ synt}$ a čtyři 6hodinové úhrny.

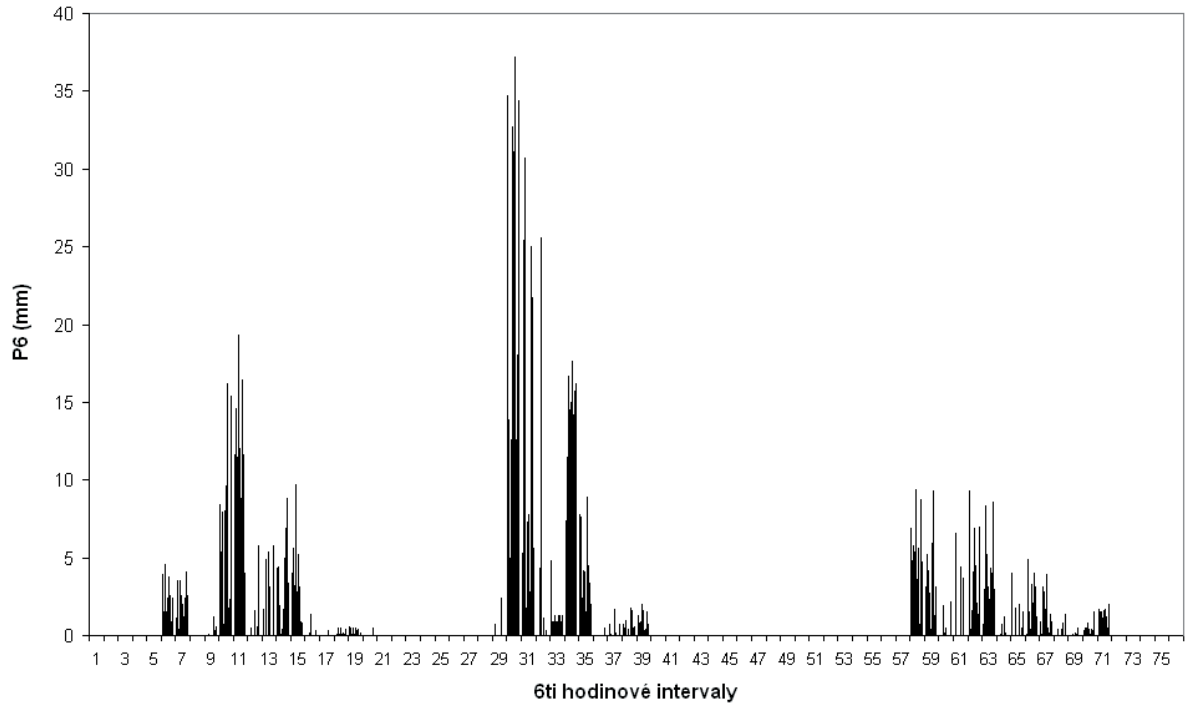
Tab. 1: Ukázka části vstupního souboru měřených dat.

Id kód stanice	Z	X	Y	Year	Month	Day	P_{24h}	$P_{24h\ před}$	$P_{6h\ před}$	$P_{24h\ násl}$	$P_{6h\ násl}$
O1BELO01	306	3702880	5498820	2000	5	17	0	0	0	0	0
O1BELO01	306	3702880	5498820	2000	5	18	0	0	0	25.9	0
O1BELO01	306	3702880	5498820	2000	5	22	0	1.8	0.2	7	3.2
O1BELO01	306	3702880	5498820	2000	5	24	0	7	0.6	0	0
O1BELO01	306	3702880	5498820	2000	5	25	0	0	0	0	0
O1BELO01	306	3702880	5498820	2000	5	26	0	0	0	0	0
O1BELO01	306	3702880	5498820	2000	5	27	0	0	0	0	0
O1BELO01	306	3702880	5498820	2000	5	28	0	0	0	2	0
O1BELO01	306	3702880	5498820	2000	6	2	0	2.1	0	0	0

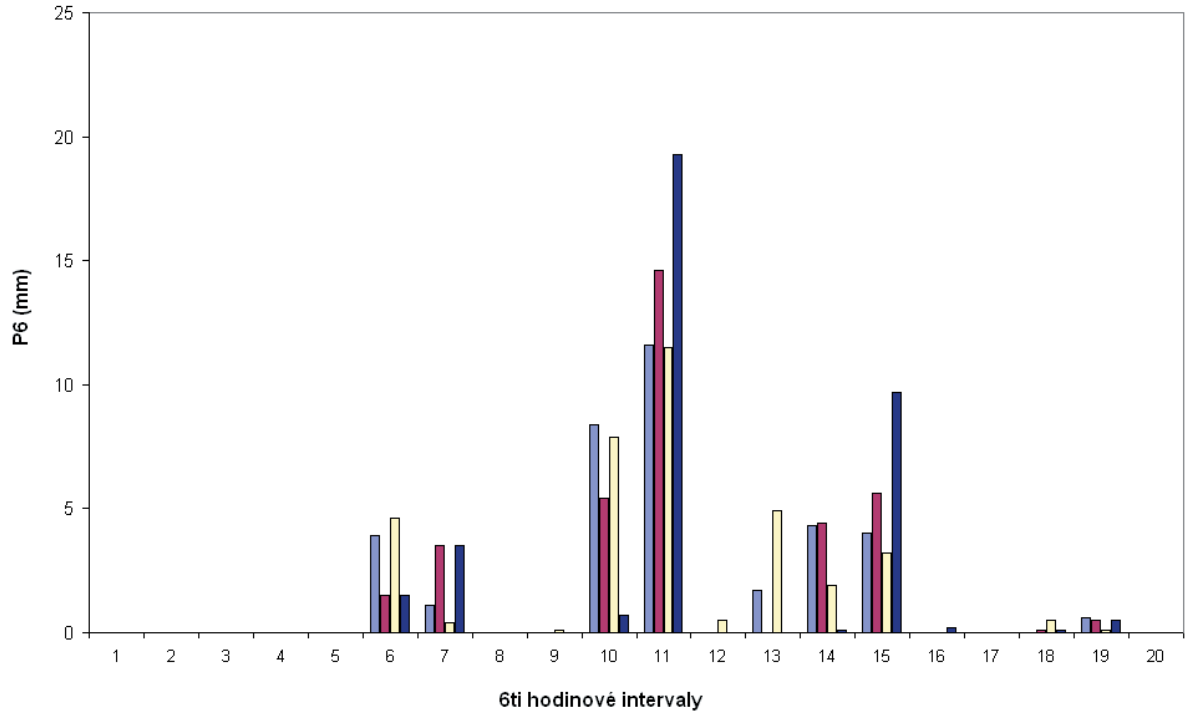
2.3 Aplikace

Metodika byla testována na povodí Odry, na němž se nachází 11 srážkoměrných stanic, ve kterých jsou od roku 2000 měřeny 6 a 24hodinové srážkové úhrny. Jako příklad je zde prezentována předpověď k datu 20. 8. 2009. Pro oblast daného povodí byla vygenerována 1000letá řada syntetických denních srážkových úhrnů. V náhodně vybraném roce je ke každému dni střednědobé předpovědi přiřazen denní srážkový úhrn $P_{24h\ synt}$ (délka střednědobé předpovědi byla zvolena 20 dní).

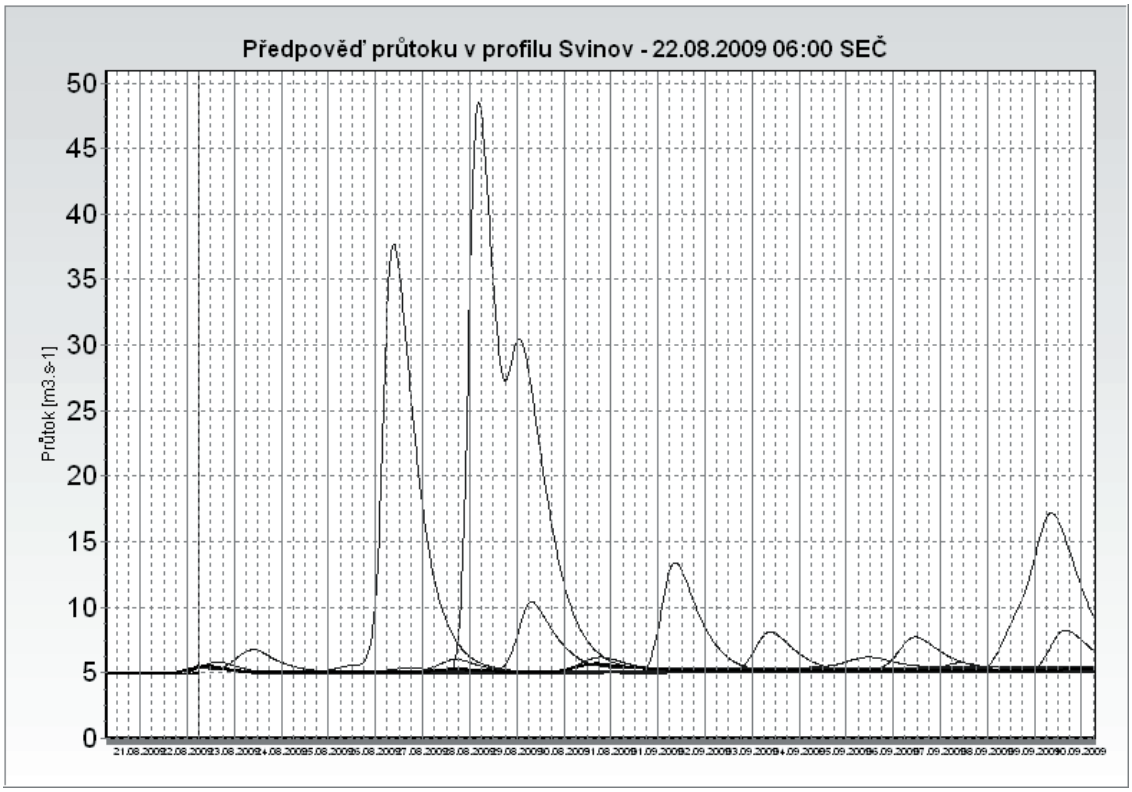
S ohledem na zvolenou toleranci, v tomto případě 10 %, byly ze souboru historických dat vyhledávány všechny "letní" srážkové úhrny P_{24h} spolu s 6hodinovými úhrny ze dne předchozího a následujícího splňující podmínky popsané v kapitole 2.2. Výsledný soubor dat byl vytvořen náhodným výběrem epizod a dopočtem 6hodinových intervalů pro každý den předpovědi a každou srážkoměrnou stanici. Tento soubor je tedy vstupním souborem "předpovídaných" srážek pro model počítající následně střednědobou hydrologickou předpověď (v grafické podobě viz Obr. 1). Pro přesnější představu, je zde prezentován detail výše zmíněného výstupu pro 4 stanice a 4 předpovídané dny (Obr. 2).



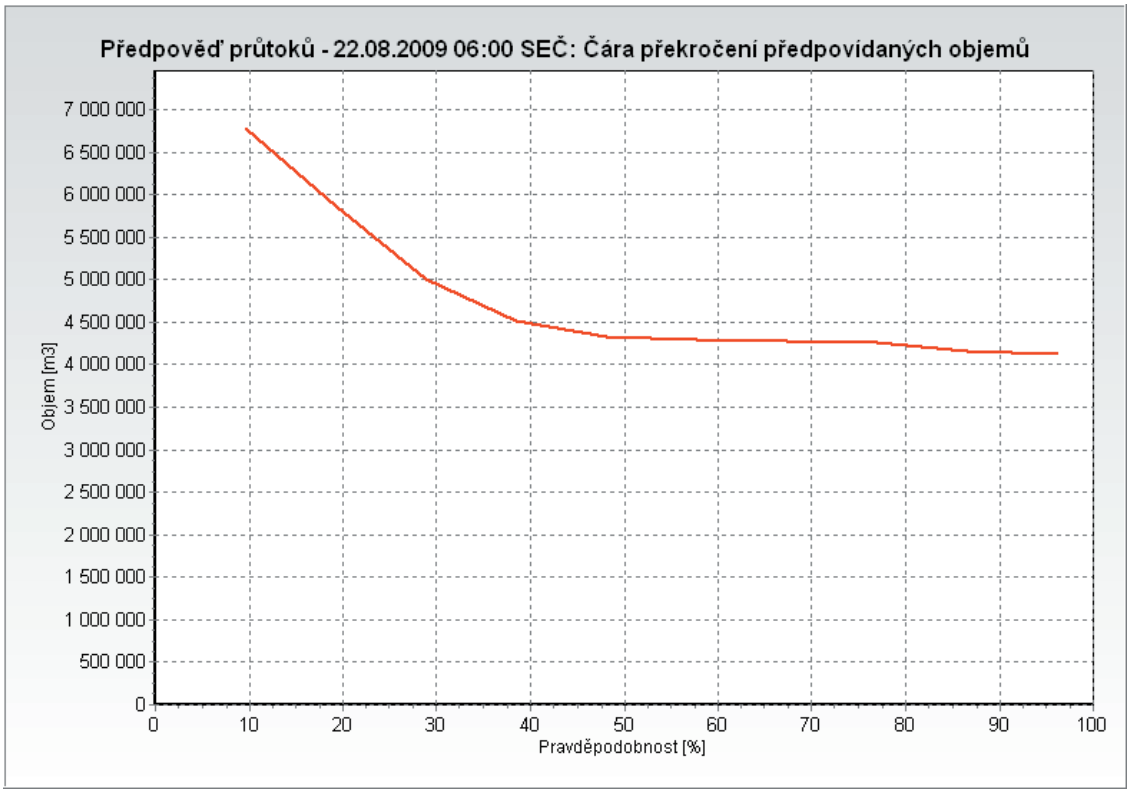
Obr. 1: Výsledné rozložení 6hodinových srážek v horizontu 20 dní v 10 stanicích povodí Odry.



Obr. 2: Časové rozložení 6hodinových srážek ve 4 stanicích (rozlišeno stupněm šedi) v časovém horizontu 4 dní.



Obr. 3: Ukázka 20denní simulace předpovědi průtoků – soubor deseti scénářů průtoků.



Obr. 4: Ukázka 20denní simulace předpovědi průtoků – čára překročení předpovídaných objemů odtoku.

Na Obr. 3 je pro ilustraci znázorněn soubor předpovědí průtoku pro profil Svinov (Odra) založený na 10 srážkových scénářích generovaných uvedenou metodou. Předpovědi průtoků byly počítány srážko-odtokovým modelem HYDROG [Starý et al., 1998]. Na Obr. 4 je pak zobrazena odpovídající čára překročení předpovídaných objemů odtoku.

3. Závěr

V příspěvku je uvedena metoda distribuce 24hodinových srážkových úhrnů do 6hodinových srážkových úhrnů v závislosti na reálně naměřených (historických) datech. Metoda je určena pro přípravu časových řad srážek, které pak slouží jako vstupní data pro výpočet střednědobé předpovědi průtoků.

Navrhovaná metoda je snadno aplikovatelná v praxi. V povodích s řidší srážkoměrnou sítí by bylo vhodné využít k získání historických 6hodinových a denních srážkových úhrnů radarové odhady srážek počítané jako kombinace srážkoměrného a radarového měření, viz [Šálek et al., 2004], (ČHMÚ má k dispozici kontinuální řadu měření cca od roku 2003). Pro výpočet střednědobé předpovědi průtoků v reálném provozu by také bylo vhodné využít větší množství srážkových scénářů.

Poděkování

Práce byla vytvořena s podporou projektu SP/1c4/16/07.

Literatura

[1] DIBIKE, Y. B. – COULIBALY, P., 2005. Hydrologic Impact of Climate Change in the Saguenay Watershed: Comparison of Downscaling Methods and Hydrologic Models. Journal of Hydrology, 307, pp 145-163.

[2] KHAN, M. S. – COULIBALY, P. – DIBIKE, Y. B., 2006. Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. Journal of Hydrology, 319, pp 357 – 382.

[3] NWS, 2007. NWSRFS User Manual Documentation. Dostupné na <www.nws.noaa.gov/oh/hrl/nwsrfs/users_manual/htm/xrfsdocpdf.php>

[4] PRETEL, J. a kol., 2007. Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření. Závěrečná práva o řešení projektu v roce 2007, ČHMÚ, Praha.

[5] SEMENOV, M. A., 2008. Simulation of extreme weather events by a stochastic weather generátor. Clim Res, *11*, pp 203-212.

[6] SEMENOV, M. A. – BARROW, E. M., 2002. LARS-WG-A stochastic weather generator for use in climate impact studies, version 3.0. User manual.

[7] STARÝ, M. – TUREČEK, B., 2000. Operative control and prediction of floods in the River Odra basin. In.: *Flood Issues in Contemporary Water Management.* NATO Science Series, 2. Enviromental Security - Vol. 71, Kluwer Academic Publishers, pp 229-236, ISBN 0-7923-6452-X

[8] ŠÁLEK, M. – NOVÁK, P. – SEO, D. J., 2004. Operational application of combined radar and raingauges precipitation estimation at the CHMI. In: *ERAD 2004 proceedings*, ERAD publication series, Vol. 2, 16-20.

[9] WILKS, D. E. – WILBY, R. L., 1999. The Weather Generation Game: a Review of Stochastic Weather Models. Progress in Physical Geography. 23, pp 329–357.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Hradec Králové, e-mail: vaskova@chmi.cz

2 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, e-mail: lucie.brezkova@chmi.cz

OBDOBÍ SUCHA - VÝSKYT A MOŽNOST JEHO PREDIKCE

***Pavel Treml*[1]**

Abstrakt

V rámci příspěvku je analyzováno období výskytu sucha na vybraném modelovém území. Nejprve je v denním časovém kroku vyhodnocen nástup meteorologického sucha pomocí metody součtových řad a vznik hydrologického sucha byl identifikován pomocí metody nedostatkových objemů pro mez 300denních průtoků. Získané poznatky jsou následně srovnány se zaměřením na vyhledání období překryvu výskytu meteorologického a hydrologického sucha a existenci vzájemné časové vazby.

Klíčová slova: meteorologické sucho, hydrologické sucho, metoda součtových řad, metoda nedostatkových objemů

1. Úvod

Sucho patří mezi extrémní hydrologické jevy, které naše území zasahují nepravidelně. Sucho lze chápat z hlediska meteorologického, hydrologického, agronomického, ale třeba i ze socioekonomického pohledu. Pokaždé se pod tímto pojmem myslí trochu něco jiného, podle důsledků, které pro daný sektor sucho přináší. Prováděný výzkum se většinou soustředí na výzkum pouze v daném sektoru.

Následující příspěvek se pokusí srovnat období výskytu meteorologického a hydrologického sucha s cílem porovnat jejich vztah. Meteorologické sucho bude analyzováno pomocí metody součtových řad a hydrologické sucho pomocí metody nedostatkových objemů.

2. Použitá data a metody

2.1 Použitá data

Pro zpracování příspěvku byly použity teploty vzduchu a srážky z klimatologických stanic Olomouc - Slavonín a Brandýs nad Labem a průtoky z vodoměrných stanic Olomouc - Nové Sady a Brandýs nad Labem. U stanic Olomouc - Slavonín a Olomouc - Nové Sady bylo hodnoceno období mezi lety 1946 – 2009 a u stanic v Brandýse nad Labem období let 1951 – 2005.

2.2 Metoda součtových řad

Metoda součtových řad je ideální metodou pro analýzu nehomogenně se chovajících jevů a poskytuje mocný nástroj pro jejich analýzu. Těmito nehomogenně se chovajícími jevy mohou být např. určení období výskytu sucha [2], určení období převládajících teplot nad určitou hranicí [4], analýza ročního chodu teploty [7] a desítky dalších příkladů možného užití.

Možnosti uplatnění metody součtových řad pro analýzu výskytu období sucha a jeho vlastností si poprvé všiml Ivan Sládek na přelomu 80. a 90. let. Poté byla metoda součtových řad užita v několika diplomových pracích, např. Jitky Weissové [8], Lenky Kopečné [3] nebo Theodora Fialy [1], přičemž tento autor rozšířené závěry ze své diplomové práce publikoval v článku s názvem “Vymezení období sucha a období převládající teploty vzduchu pomocí metody součtových řad na příkladu Vráže u Písku” v časopise Meteorologické zprávy [2]. V roce 2005 vyšel v časopise Acta Universitatis Carolinae - Geographica článek s názvem “Spells of drought: climatological treatment” [5].

Princip užití metody součtové řady je jednoduchý. Ze srážkových úhrnů se vymezí období nedostatku srážek. Jednotlivým srážkovým úhrnům je přiřazena váha, srážkové úhrny jsou transformovány na tzv. proměnnou Z, kde nulovým srážkám je přiřazena hodnota -1, srážkám v intervalu 0,1 - 0,2 mm hodnota 0 a poté se transformovaný interval srážek zvětší vždy o dvojnásobek a hodnota Z o 1. Tyto váhy Z se postupně kumulují, čímž vznikne součtová řada. Pomocí hledání lokálních extrémů této součtové řady je určeno období s nedostatkem srážek. Výraznost těchto vymezených období se následně analyzuje pomocí tzv. indexu suchosti S, který závisí jednak na velikosti rozdílu extrémů součtové řady hodnot Z každého jednotlivého období sucha a jednak na sumě denních průměrů teplot vzduchu v daném období sucha, přičemž se uvažuje o sumě teplot zpravidla nad 0 °C.

Podrobnější ukázku výpočtu metody součtové řady lze nalézt např. v článku [2].

2.3 Metoda nedostatkových objemů

Metoda nedostatkových objemů je základní metodou, která se užívá pro hodnocení výskytu období hydrologického sucha.

Metoda nedostatkových objemů se zabývá analýzou období, kdy je průtok menší než mezní průtok a popisem vlastností objemů, které chybí pro doplnění na mezní průtok. V této studii byl použit pro porovnávání vlastností mezní průtok Q_{300}. Tento ukazatel byl zvolen z toho důvodu, že ještě stále dobře charakterizuje malé průtoky, na straně druhé byl předpoklad, že by se tento průtok měl vyskytnout ve většině let a tudíž, že bude možno dobře srovnat jeho časovou shodu s výsledky metody součtové řady.

Podrobnější popis metody nedostatkových objemů lze nalézt např. v učebnici Hydrological Drought. Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater [6].

3. Výsledky

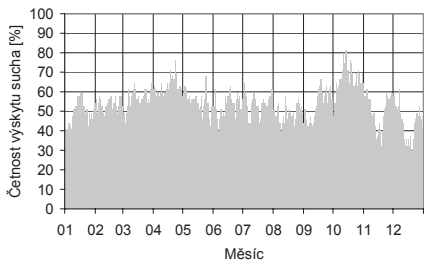
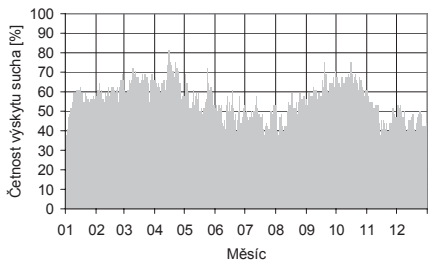
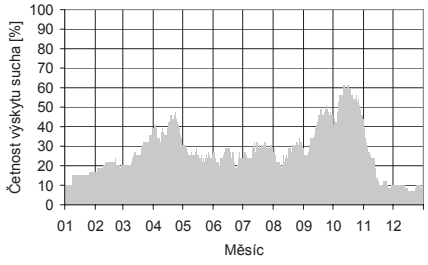
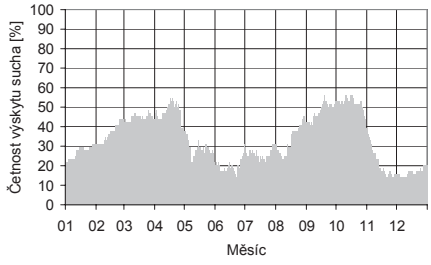
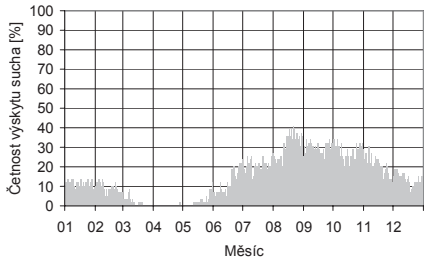
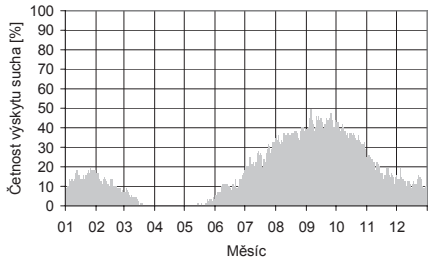
3.1 Metoda součtových řad

V první fázi výzkumu bylo hodnoceno pouze období, jenž bylo beze srážek, příp. v něm byly malé srážky, tj. období, které je vymezeno pouze na základě nalezených lokálních extrémů součtové řady, bez analýzy indexu S. Uvedená charakteristika ukazuje, kdy převládají dny beze srážek, přičemž v těchto dnech ještě není sucho. Ostatní dny lze zjednodušeně charakterizovat tak, že v nich srážky převládají což znamená, že v tomto období mohou být dny beze srážek, avšak nejsou dominantní.

V průměru mezi jednotlivými obdobími roku nejsou podstatné rozdíly (Obr. 1). Nejvíce dnů s převládajícím obdobím beze srážek (období beze srážek vymezené podle součtové řady) je v měsíci říjnu nebo ve 2. polovině měsíce dubna, kdy je ve vybraných dnech i přes 70 % bezsrážkových dnů. Naopak období s nižším zapojením dnů do období beze srážek je především v letních měsících a v období od půlky listopadu do půlky ledna, kdy ve vybraných dnech může na dny beze srážek připadnout i pod 40 % případů. V Brandýse nad Labem bylo vyhodnoceno pro 19. 12. pouze 29 % bezsrážkových dnů.

Pro hodnocení výskytu období sucha je důležitější vyhodnotit převládající období beze srážek spolu s analýzou indexu suchosti S. K tomu byly vybrány indexy suchosti S větší než 1, které již zachycují významnější období sucha a je možno je dobře porovnávat i s vypočtenými nedostatkovými objemy u hydrologického sucha.

I zde dobře vyniká období od půlky měsíce září do konce měsíce října, kdy v analyzovaném období bylo sucho ve více než polovině případů. Výrazně nadprůměrný výskyt dnů beze srážek je i v jarním období, ale zde je toto období odlišně dlouhé a hodně záleží na poloze jednotlivých stanic. Zatímco např. v Olomouci připadá během března a dubna prakticky na všechny dny alespoň 40 % suchých dní, tak v Brandýse nad Labem je to pouze v dekádě od 16. do 26. dubna. Nejméně suchých dnů je pak v zimě a v létě.

	Brandýs nad Labem	Olomouc
Metoda součtové řady Index S > 0		
Metoda součtové řady Index S > 1		
Metoda nedostatkových objemů		

Obr. 1: Procento dnů zapojených do meteorologického a hydrologického sucha

3.2 Metoda nedostatkových objemů

Počet dnů s překročením nedostatkového objemu je značně závislý na zvolené prahové velikosti nedostatkového objemu. Jak již bylo uvedeno, tak v tomto příspěvku byla použita prahová hodnota 300denního průtoku. Nejvýznamnější sucha nastávají opět na podzim (Obr. 1), zejména v měsících srpen až říjen, kdy v mnoha dnech ve více než třetině vyhodnocovaných dnů klesá průtok pod mezní průtok Q_{300}, přičemž v Olomouci bylo dokonce 40 - 50 % dnů v měsíci září, kdy klesl průtok pod Q_{300}.

Naopak mezi poslední březnovou dekádou až koncem první květnové dekády je zapojení počtu dnů do období hydrologického sucha minimální. To, že se nevyskytují žádné nedostatkové objemy, je způsobeno zvýšenými průtoky z tání sněhu a z dotace vody ze zásob podzemní vody. Díky těmto faktorům jsou vykompenzovány i ostatní faktory, které by jinak vedly ke vzniku sucha - zejména nedostatek srážek a vysoký výpar.

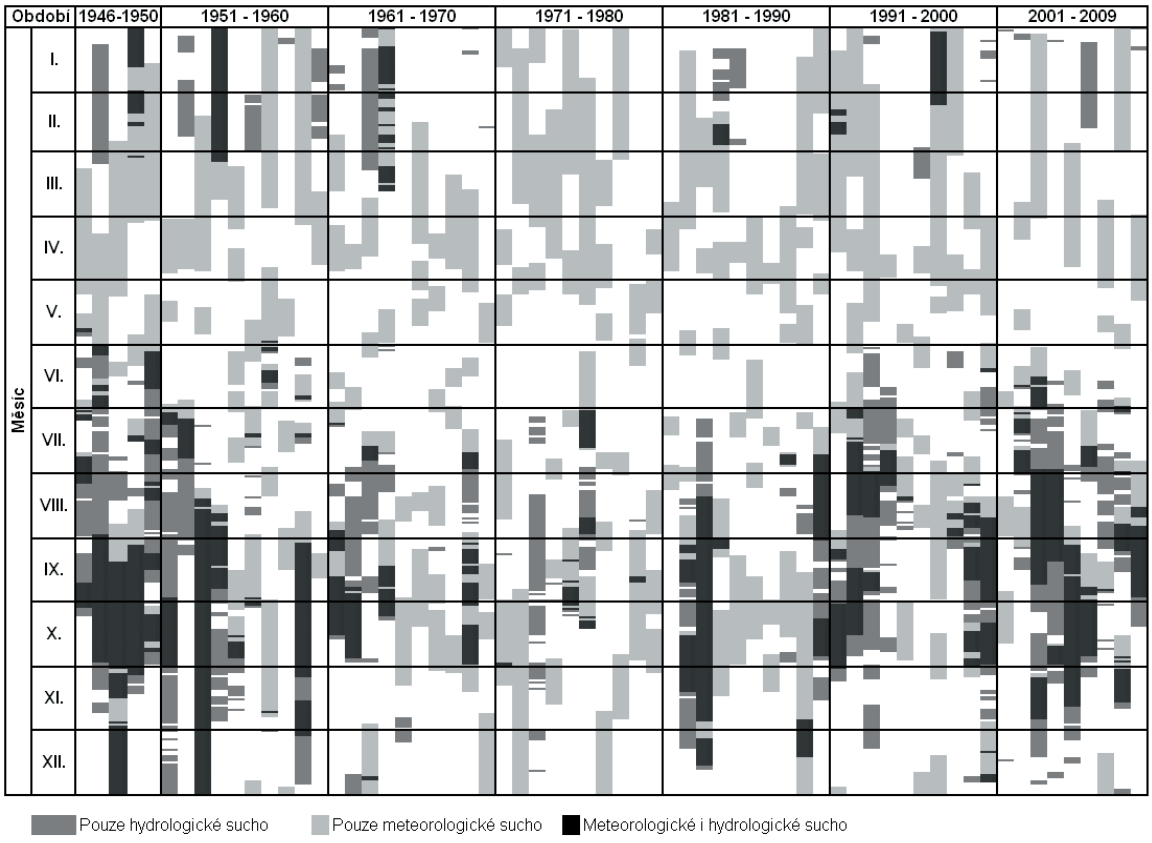
3.3 Porovnání výsledků

Z porovnání výsledků obou metod (Obr. 1, Obr. 2) je patrné, že u výraznějších such je v podzimních měsících ve výskytu meteorologického i hydrologického sucha relativně dobrá shoda, naopak v jarních a zimních měsících se metody neshodují. Jarní a zimní neshoda metod je způsobena tím, že nedostatek vody ve vodních tocích je dotován vodou z tajícího sněhu a vodou ze zásob podzemních vod a proto se nedostatek srážek na průtocích neprojeví.

Naopak v ostatních obdobích již hlavní roli hrají meteorologické faktory a shoda mezi meteorologickým a hydrologickým suchem je větší. Nejvýraznější shoda je v podzimních měsících. U významných such je shoda ve většině případů. Pro začátek výrazných období

hydrologického sucha platí, že se jeho začátek většinou opožďuje za začátkem meteorologického sucha, v Olomouci přibližně o 14 dnů, v Brandýse nad Labem zhruba o 8 dnů. Mezi koncem meteorologického a hydrologického sucha žádný těsný vztah neexistuje.

Jedno souvislé období meteorologického a hydrologického sucha se může díky použité metodice rozdělit do více kratších období. Je to zejména v případě, kdy je meteorologické sucho krátkodobě přerušeno významnějšími srážkami nebo v případě, kdy je index suchosti menší než 1. Podobně je to u hydrologického sucha, které bývá přerušeno v období, kdy je průtok vyšší než vyhodnocovaný mezní průtok Q_{300}. V těchto případech se zdánlivě meteorologické a hydrologické sucho neshodují, avšak ve skutečnosti je existence či neexistence sucha dána prahovými hodnotami výpočtu.



Obr. 2: Období výskytu meteorologického a hydrologického sucha v Olomouci v období let 1946 – 2009

(Pozn. meteorologické sucho je vymezeno metodou součtových řad, kde pro index suchosti S platí, že S > 1)

3.4 Možnosti predikce sucha

Pro vznik meteorologického sucha jsou hlavními příčinami vzniku vysoký výpar a nedostatek srážek, jež jsou typické zejména pro letní a podzimní anticyklonální situace. Vysoký výpar a nedostatek srážek je důležitý i pro vznik hydrologického sucha, avšak pro vznik hydrologického sucha jsou důležité i další hydrologické faktory, kterými je velikost zásoby vody v podzemních vodách a velikost zásob vody ve sněhové pokrývce, počet a retenční kapacita nádrží, z nichž je možno nadlepšovat průtoky apod.

Metoda součtových řad docela dobře vymezí období s nedostatkem srážek. S částečným omezením ji lze použít jako podklad pro možnou predikci výskytu sucha a to jak meteorologického, tak hydrologického, přičemž u hydrologického sucha ji nelze použít od března do května a s rezervou během měsíců leden a únor, kdy je hydrologické sucho

vylepšeno navýšenými průtoky z tání sněhu a podzemních vod. Konkrétní možnosti užití jednotlivých metod pro predikci sucha bude věnován zvláštní příspěvek.

4. Závěr

Příspěvek ukázal, že mezi meteorologickým a hydrologickým suchem existuje vazba a to zejména v podzimních měsících, kdy průtoky na vodních tocích jsou malé a sucho působí největší problémy. Naopak v jarním a zimním období je vztah mezi meteorologickým a hydrologickým suchem minimální, příp. není vůbec, neboť hlavním činitelem, který ovlivňuje průtoky, je zvýšený odtok z tajícího sněhu a nadlepšování vody z podzemních vod. Velikost hydrologického sucha ovlivňuje i možnost nadlepšování vody z přehradních nádrží a další činnosti člověka. V období letních a podzimních měsíců je možno na základě výskytu meteorologického sucha předpovědět sucho hydrologické, přičemž je nutno při formulaci vztahů přihlédnout k fyzicko-geografické a hydrologické charakteristice konkrétního profilu.

Poděkování

Vznik tohoto příspěvku byl podpořen Ministerstvem životního prostředí v rámci subprojektu s názvem “Stanovení vhodných indikátorů pro identifikaci výskytu, předpověď a vyhodnocení intenzity období sucha pro podmínky České republiky”, který je součástí výzkumného záměru VÚV, který má název “Výzkum a ochrana hydrosféry – výzkum vztahů a procesů ve vodní složce životního prostředí, orientovaný na vliv antropogenních tlaků, její trvalé užívání a ochranu, včetně legislativních nástrojů” (identifikační kód MZP0002071101).

Literatura

[1] FIALA, T., 2005. Analýza teplotních a srážkových poměrů Vráže u Písku. Praha: Přírodovědecká fakulta UK. 108 s. [Diplomová práce.]

[2] FIALA, T., 2006. Vymezení období sucha a období převládající teploty vzduchu pomocí metody součtových řad na příkladu Vráže u Písku. Meteorologické zprávy, roč. 59, č. 3, s. 76 – 79. ISSN 0026-1173.

[3] KOPEČNÁ, L., 2002. Klimatický režim sucha v Praze. Přírodovědecká fakulta UK. 74 s. [Diplomová práce.]

[4] SLÁDEK, I., 1989. Určování nástupu a ukončení zvolených teplot vzduchu metodou součtových řad a odchylek. Meteorologické zprávy, roč. 42, č. 2, s. 52 – 56. ISSN 0026-1173.

[5] SLÁDEK, I., 2001. Spells of drought: climatological treatment. Acta Universitatis Carolinae - Geographica, roč. 36, č. 2, s. 147 – 153. ISSN: 0300-5402.

[6] TALLAKSEN, L., M. - VAN LANEN, H., A., J., 2004. Hydrological Drought. Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Amsterdam: Elsevier. 579 pp.

[7] TREML, P., 2010. Vymezení období největšího růstu a největšího poklesu teploty vzduchu a vody metodou součtových řad. Meteorologické zprávy, roč. 63, č. 2, s. 52 – 56. ISSN 0026-1173.

[8] WEISSOVÁ, J., 2000. Hodnocení období sucha v letech 1921 – 1999 podle naměřených meteorologických prvků na stanici Praha - Karlov. Přírodovědecká fakulta UK. 66 s. [Diplomová práce.]

Kontakty na autora

1 Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., e-mail: pavel_treml@vuv.cz

PREZENTACE POSTERŮ K SEKCI 5

PŘEDPOVĚĎ EXTRÉMNÍCH DEŠŤŮ VE VEGETAČNÍ SEZÓNĚ

Miloslav Šír[1], Miroslav Tesař [1], Miroslav Krejča[2], Ľubomír Lichner [3]

Abstrakt

Hydrologický cyklus jeví příznaky homeostáze – tendence k návratu do určitého stabilního stavu po vychýlení z něj vlivem kolísání příkonu tepla, přebytku nebo nedostatku srážek, změny porostu krajiny apod. Lokálním homeostatickým mechanismem je transpirace rostlin ve vegetační sezóně [3], [4]. Příspěvek kvantifikuje homeostázi v měřítku povodí pomocí produkce entropie při výparu vody – transpiraci [1], [2]. Analýza řady dat 1983 – 2000 na malém horském povodí Liz na Šumavě prokázala se, že nefunkční transpirační chlazení způsobuje poruchy v hydrologickém cyklu, které se projevují jako: (1) Extremalizace denního a sezónního chodu teplot vzduchu, (2) Extremalizace chodu srážek a odtoku z povodí. Je prokázáno, že v okamžiku, kdy dlouhodobý deficit v produkci entropie při výparu, způsobený nefunkční transpirací, překročí kritickou hranici, výrazně vzroste riziko vzniku extrémního deště, a tudíž i extrémního odtoku. Produkce entropie při výparu se odvozuje z běžně měřených dat (globální radiace, teplota vzduchu, teplota povrchové vrstvy půdy). Sledování produkce entropie lze tedy rutinně užívat v praxi jako metodu pro včasnou výstrahu před vznikem potenciálně nebezpečných atmosférických podmínek způsobujících extrémní deště ve vegetační sezóně. Příspěvek vznikl v rámci řešení grantů GAČR (205/08/1174, 526/08/1016) a MŽP ČR (VaV Sp 1a6/151/07).

Klíčová slova: extrémní deště, transpirace, produkce entropie

Literatura

[1] ŠÍR, M. – LICHNER, Ľ. – TESAŘ, M. – HALLETT, P. D. – MARTINKOVÁ, M., 2009. Simulation of phytomass productivity based on the optimum temperature for plant growth in a cold climate. Biologia, roč. 64, č. 3, s. 615-619.

[2] ŠÍR, M. – LICHNER, Ľ. – TESAŘ, M. – KREJČA, M. – VÁCHAL, J., 2008. Soil Water Retention and Gross Primary Productivity in the Zábrod area in the Šumava Mts. Soil and Water Research, roč. 3, Special Issue 1, s. 130–S138, ISSN 1801-5395.

[3] TESAŘ, M. – ŠÍR, M. – LICHNER, Ľ., 2010. Absorption of solar radiation and moist and dry convection in the Šumava Mountains. In: *Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins (Proceedings of the Workshop held at Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March–2 April 2009)*. IAHS Publ. 336, pp 121–124. ISBN 978-1-907161-08-7.

[4] TESAŘ, M. – ŠÍR, M. – LICHNER, Ľ. – ČERMÁK, J., 2007. Plant transpiration and net entropy exchange on the Earth's surface in a Czech watershed. Biologia, roč. 62, č. 5, pp 547–551.

Kontakty na autora

1 Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v.v.i., Pod Paťankou 30/5, 166 12 Praha 6, e-mail: milo_sir@yahoo.com, tesarihas@iol.cz

2 Senát Parlamentu České republiky, Valdštejnské náměstí 4, 118 01 Praha 1, e-mail: krejcam@senat.cz

3 Ústav hydrologie SAV, Račianska 75, 831 02 Bratislava, e-mail: lichner@uh.savba.sk

MODELOVÁNÍ ODPOVÍDAJÍCÍCH SI VODNÍCH STAVŮ A PRŮTOKŮ V ŘÍČNÍM SYSTÉMU S VYUŽITÍM UMĚLÝCH NEURONOVÝCH SÍTÍ

Ondřej Fatka[1]

Abstrakt

Příspěvek se zabývá možností aplikace umělých neuronových sítí (UNS) při modelování odpovídajících si vodních stavů a průtoků v předpovědních profilech jednoduchých říčních úseků ve vybraných mezipovodích a porovnáním jejich spolehlivosti s klasickou metodou odpovídajících si průtoků (vodních stavů). Pro dva bezpřítokové úseky (mezi vstupním a předpovědním profilem) v zájmových mezipovodích Radbuzy a Úhlavy byly definovány vlivy působící na postupovou dobu odpovídajících si průtoků a jejich význam následně hodnocen korelační analýzou a multivariačními statistickými metodami. V dalším kroku byly pro tato mezipovodí stanoveny kombinace nezávisle proměnných veličin (vlivů) – posloupnosti předcházejících vodních stavů času t ve vstupním a předpovědním profilu, okamžitý sklon hladiny v úseku toku, ukazatel nasycení půdy a ukazatel plošného rozložení srážek. Pro dané řešení použity vícevrstvé perceptronové sítě (VVPS). Na trénovacích a validačních datech odvozeny optimální modely VVPS pro tyto kombinace a známé závisle proměnné veličiny – odpovídající vodní stavy v předpovědním profilu vodním stavům v horním vstupním profilu a odvozené postupové doby průtoků (vodních stavů) z časů mezi jejich výskytem. Na nezávislých datech byla následně prověřena spolehlivost odvozených modelů VVPS zahrnujících vlivy na závisle proměnné veličiny. Zároveň byl sledován dopad přidání dalších veličin (vlivů) k předešlé ověřované kombinaci na spolehlivost odvozeného modelu VVPS. Spolehlivost odvozených modelů VVPS pro tyto kombinace a klasické metody charakterizována velikostí směrodatné odchylky mezi modelově odvozenou a měřenou hodnotou průtoku v čase $t+\tau$ (čase zvětšeném o modelově vypočtenou postupovou dobu). Na nezávislých testovacích datech byla porovnána spolehlivost těchto modelů vzájemně a s klasickým způsobem odvozování odpovídajících si vodních stavů a postupových dob v předpovědním profilu. Dosažené výsledky prokázaly, že spolehlivost modelu VVPS pouze s jednu nezávisle proměnnou – vodním stavem v čase t a klasické metody odpovídajících si průtoků je obdobná. Zahrnutím dalších nezávisle proměnných veličin (vlivů) do tohoto modelu došlo ke zlepšení jeho spolehlivosti. Za věrohodný model VVPS bylo možné považovat ten, který zahrnuje kombinaci všech dříve definovaných nezávisle proměnných veličin. Závěrem lze konstatovat, že UNS je možné rovněž aplikovat a tyto aplikace dále rozvíjet i v této problematice.

Klíčová slova: vodní stav, průtok, postupová doba průtoků, umělá neuronová síť

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Praha, e-mail: fatka@chmi.cz

VYHODNOCENÍ EXPEDIČNÍCH MĚŘENÍ SNĚHU V ORLICKÝCH HORÁCH PRO ÚČELY HYDROLOGICKÝCH PŘEDPOVĚDÍ

Eugenie Hančarová[1]

Abstrakt

Před jarním táním sněhu je každoročně prováděno expediční měření výšky a vodní hodnoty sněhu na území Orlických hor. Výsledky měření jsou využívány pro zpřesnění výpočtů hydrologického předpovědního modelu a také přispívají k podrobnějšímu poznání vlastností sněhové pokrývky ve vrcholových partiích hor.

Na popud oddělení hydrologického výzkumu ČHMÚ se od roku 2005 měří výška a vodní hodnota sněhu na hřebeni a úbočích Orlických hor v období před jarním táním – vždy začátkem března. S výjimkou roku 2007, kdy byla sněhová pokrývka velmi chudá, byla prováděna dvoudenní nebo alespoň jednodenní profilová měření výšky a vodní hodnoty sněhu za účasti pracovníků pobočky Hradec Králové, Oddělení hydrologického výzkumu (OHV) Praha a Jablonec n. Nisou. Profilová měření poskytují přesnější a podrobnější výsledky, protože měření není prováděno pouze v jednom místě, ale opakovaně v profilu o délce 50 až 100 m, a výsledkem je průměrná hodnota pro profil. Ve většině lokalit jsou také, pokud je to možné, tyto profily v páru: jeden na volném prostranství a na něj pak navazující druhý profil v lesním porostu. Každoročně jsou měření prováděna pokud možno na stejných místech, základní kostra profilů je doplňována dalšími profily podle aktuálního rozsahu sněhové pokrývky.

Výsledky měření jsou využívány pro zpřesnění každodenních výpočtů hydrologického předpovědního modelu AquaLog, který je provozován na regionálním předpovědním pracovišti pobočky ČHMÚ Hradec Králové pro povodí horního a středního Labe po Přelouč. Tento model používá pro výpočty hydrologických předpovědí jako vstupy hodinová data z automatických stanic – vodní stavy případně průtoky v hydrologických stanicích, srážky a teploty vzduchu. Vodní hodnoty sněhu se v modelu vypočítávají ze srážkových úhrnů a teploty vzduchu pro jednotlivá malá povodí o ploše kolem 20 km^2, do kterých je celé zájmové území rozděleno. Stávají se pak součástí každodenně obnovovaných počátečních podmínek, ze kterých vychází výpočet předpovědi průtoků. Vypočtené vodní hodnoty jsou však většinou menší, což je způsobeno umístěním srážkoměrných stanic hlavně do nižších částí povodí, a také časovým tlakem v operativním provozu, kdy nelze všechna vstupní data do důsledku kontrolovat. Vodní hodnoty sněhu se proto v modelu musí občasnými ručními vstupy korigovat podle dostupných měření.

Pro porovnání a opravy je k dispozici vodní hodnota sněhu měřená na klimatologických stanicích pravidelně každé pondělí. Doplnění těchto údajů expedičním měřením podstatně rozšiřuje informaci o množství a charakteru sněhové pokrývky. Pro porovnání změřených bodových hodnot s hodnotami vypočtenými pro plochy jednotlivých povodí v modelu slouží různé metody – nejjednodušší je použití lineární regresní závislosti výšky a vodní hodnoty sněhu na nadmořské výšce, složitější jsou metody využívající prostředí GIS.

Expediční profilová měření jsou důležitým doplňkem hlášení pozorovatelů získávaných pouze z několika stanic na území hor jednou týdně. Kromě využití pro modelování hydrologické předpovědi slouží také pro další ověřování závislostí mezi výškou sněhové pokrývky, vodní hodnotou sněhu a fyzicko-geografickými charakteristikami povodí.

Klíčová slova: sníh, vodní hodnota, hydrologický model, hydrologická předpověď

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Hradec Králové, e-mail: eugenie.hancarova@chmi.cz

POROVNÁNÍ KVANTITATIVNÍCH PARAMETRŮ SNĚHOVÉ POKRÝVKY VE VYBRANÝCH LOKALITÁCH JIZERSKÝCH HOR

Václav Vajskebr[1], Libuše Bubeníčková[2]

Abstrakt

Tvorba sněhové pokrývky je podmíněna výskytem srážek v čase a jejich velikostí v kombinaci s průběhem teploty, která ovlivňuje přeměnu srážek na sníh, jeho ukládání, následné proměny a tání. Práce se zabývá sněhovými poměry v Jizerských horách a v jejich podhůří, které jsou sledovány na zdejších klimatických stanicích Bedřichov, Souš a Hejnice.

Zimy mohou být velmi různorodé především díky kombinaci nadnormálních až pod-normálních srážek i teplot. V Jizerských horách provádí Český hydrometeorologický ústav od roku 1981 v zimních měsících experimentální měření sněhu. Z těchto důvodů byly primárně zhodnoceny zimních režimy od listopadu do dubna z dat klimatologických stanic Bedřichov - přehrada, Desná - Souš a Hejnice v padesátiletí 1961 - 2010. Klimagramy srážek a teploty vzduchu a počty výskytů jejich kombinací umožnily posoudit, jaké zimy a v jaké četnosti se vyskytují. Pro potřeby analýzy trendů byly z řad 1961 - 2010 vytvořeny grafy s charakteristikami: počet dnů se sněhovou pokrývkou (dále jen "SP"); maximální výška SP; počet dnů s výskytem nového sněhu; součet hodnot výšky nového sněhu; počet dnů s výskytem srážek; celkový úhrn srážek; maximální vodní hodnota SP a průměrná teplota v zimním půlroce. Pro zimní období 1981 - 2010 byly v každém roce z Bedřichova a Souše graficky zpracovány součtové čáry srážek, vývoj SP a teplotní poměry, které byly porovnány s průměrnou denní teplotou za období 1961 - 1990. Byla zpracována analýza trendů pomocí lineární spojnice, polynomické spojnice 3. řádu, 3-, 5- a 10prvkového klouzavého průměru. Řady prvků v jednotlivých stanicích i mezi stanicemi byly podrobeny korelační analýze.

Z výsledků je patrné, že ve všech porovnáních sněhových charakteristik jsou hodnoty stanice Bedřichov a Souš podobné a variabilita meteorologických charakteristik je způsobena lokálními rozdíly fyzickogeografických podmínek. Třebaže nárůst teploty je signifikantní ve všech stanicích (0,31 °C/10 let pro Bedřichov; 0,26 pro Souš a 0,29 °C pro Hejnice), v horách významně neovlivnil akumulaci sněhu a trvání SP jako v podhůří, kde faktor sněhu nehraje v zimním období významnou roli a nesetrvává obvykle delší dobu.

Klíčová slova: srážky, sníh, teplota vzduchu, Jizerské hory

Literatura

Databáze prvků z meteorologických stanic Bedřichov - přehrada, Desná - Souš a Hejnice z období 1961 - 2010 ČHMÚ, Jablonec nad Nisou.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, Jablonec nad Nisou, e-mail: vajskebr@chmi.cz
2 Český hydrometeorologický ústav, Praha, e-mail: bubenickova@chmi.cz

ŘÍZENÍ NÁDRŽÍ – MĚŘENÍ ZÁSOB VODY VE SNĚHU

Radek Čekal[1], Jana Šnebergerová[2]

Abstrakt

Příspěvek je vytvořen v rámci spolupráce státního podniku Povodí Vltavy a Českého hydrometeorologického ústavu na zpřesnění údajů o zásobách vody ve sněhu nad vodním dílem Švihov na Želivce řešených v grantovém projektu „Výzkum a implementace nových nástrojů pro předpovědi povodní a odtoku“.

Po zkušenostech s výskytem jarních povodní způsobených táním sněhové pokrývky je část grantového výzkumu zaměřena na problematiku měření množství sněhu s ohledem na možnost zpřesnění podkladů poskytovaných pro provoz vodních nádrží.

V průběhu předchozích let řešení dílčího úkolu č. 3 byla nejprve vytipována vhodná vodní díla v povodí Vltavy, na kterých by bylo možné výsledky výzkumu ověřit. Byly vyhodnoceny požadavky na poskytování informací o zásobě vody akumulované ve sněhu na povodí sledovaných vodních děl. Dále byla definována obecná pravidla pro použití těchto informací ve vodohospodářské praxi.

Pro další práci bylo z vytipovaných vodních děl vybráno vodní dílo Švihov na řece Želivce. Přestože se jedná o vodárenskou nádrž velkého významu, nebyla na jejím povodí meteorologická monitorovací síť příliš hustá. Během letošní zimy bylo měření sněhové pokrývky na povodí VD Švihov rozšířeno o 13 nových lokalit. V těchto lokalitách prováděli měření zaměstnanci Povodí Vltavy, s.p. a doplnili tím měření prováděné pozorovateli ČHMÚ. Všechny lokality jsou umístěny v bezprostřední blízkosti srážkoměrů provozovaných Povodím Vltavy, státní podnik. Tím je zajištěno získání komplexních informací o stavu sněhové pokrývky z dané lokality.

Měření sněhových zásob bylo prováděno každý týden v pondělí a výsledky byly obratem poskytovány pracovníkům ČHMÚ. Ti je spolu s vlastním měřením použili pro konečný výpočet množství a rozložení zásob vody ve sněhu na povodí, pomocí nově vyvinuté aplikace v prostředí GIS. Pro účely hlásné a předpovědní povodňové služby ČHMÚ byla vytvořena aplikace, která za pomoci nástrojů GIS provádí prostorovou analýzu vodní hodnoty sněhu (SVH).

Aplikace je vytvořená v prostředí GIS ArcView 3.2 a přímo spolupracuje s klimatologickou databází CLIDATA, kde jsou uložené meteorologické stanice, které měří SVH a data z těchto stanic.

Aplikace se skládá z několika modulů:

- Modul zadání termínu (ZT) - tento modul slouží pro výběr termínu měření SVH
- Modul import dat z CLIDATA (ID) - tento modul slouží k připojení k databázi CLIDATA (Oracle) přes rozhraní ODBC, následně vytvoření dotazu SQL dle uživatelem definovaného termínu výpočtu a import dat z Oracle databáze do GIS prostředí ArcView.
- Modul virtuální stanice (VS) - tento modul slouží k vytvoření sítě virtuálních bodů, ke kterým se přiřadí hodnota 0 v místech, kde nadmořská výška je menší než hodnota zadaná ve vstupním formuláři. Hustota těchto stanic je daná dalším parametrem ve vstupním formuláři.
- Modul prostorová analýza dat (PAD) - tento modul je nejdůležitějším modulem této aplikace. Prostorová analýza dat je založená na regresní analýze dat mezi naměřeným

prvkem (SVH) a nadmořskou výškou. Hlavní princip je ve výpočtu lokálních regresních koeficientů, které se následně pomocí interpolace a mapové algebry přetransformují do rastrové gridové vrstvy rozložení daného prvku.

- Modul sumarizace dat (SD) - úkolem tohoto modulu je provést sumarizaci vypočtených hodnot (průměrná hodnota) v dané oblasti (plochy povodí k profilům, plochy povodí k vodním dílům). Výstupem tohoto modulu jsou dva textové soubory ve formátu CSV a mapa rozložení daného prvku ve formátu JPG).

V současné době jsou vyhodnocovány výsledky měření a výpočtů z letošní zimy. Je srovnáván přínos nové metodiky výpočtu a rozšíření měrných lokalit na zpřesnění výsledných hodnot zásoby vody ve sněhu.

Klíčová slova: vodní nádrž, vodní hodnota sněhové pokrývky (SVH), GIS.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, Praha, e-mail: cekal@chmi.cz

2 Povodí Vltavy, s.p., e-mail: jsnebergerova@pvl.cz

CEZHRANIČNÁ HARMONIZÁCIA PROTIPOVODŇOVEJ OCHRANY V STREDNEJ EURÓPE (CEframe – Central European Flood Risk Assessment)

Danica Lešková[1], Valéria Wendlová[2], Jana Poórová[3]

Abstrakt

Cieľom projektu je prijatie spoločnej metodiky pre spoločné riadenie povodní, a to najmä na báze prevencie a počas povodne. Základným predpokladom je harmonizácia metodík jednotlivých krajín na hraničných tokoch v prístupoch k ochrane pred povodňami v zmysle Smernica Európskeho parlamentu a Rady č. 2007/60/ES o hodnotení a manažmente povodňových rizík.

Projekt rieši protipovodňovú ochranu Moravy a Dunaja, preto aj riešiteľmi je Rakúska, česká, slovenská a maďarská strana. Osem partnerov pozostáva zo zástupcov vlády, ministerstiev, regionálnych územných celkov, správcov tokov a hydrologických služieb.

Slovenský hydrometeorologický ústav sa bude v projekte zameriavať najmä na hydrologické a morfologické zhodnotenie územia, rozbor a zhodnotenie významných povodňových udalostí a na návrhové charakteristiky pre vybrané profily hraničných tokov.

Projekt začal v máji 2010 a trvať bude 3 roky.

CEframe znamená manažment a vyhodnotenie povodňového rizika v strednej Európe. CEframe je európska iniciatíva na vytipovanie zátopových území v regióne strednej Európy.

Katastrofické povodne v nedávnych rokoch mali dopad na ekonomiku regiónov. Táto oblasť má mnoho spoločných riek, takže na zabezpečenie efektívneho manažmentu povodňového rizika je nevyhnutný spoločný prístup. Príslušné inštitúcie zo štyroch partnerských krajín (AT, CZ, HU, SK) pracujú spoločne na spracovaní povodňami ohrozených oblastí. Žiadna krajina nebude trpieť škodami spôsobenými opatreniami manažmentu povodní inej krajiny.

Preto ako hlavný záver bude manažment protipovodňovej ochrany skvalitnený o spoločné opatrenia pri budúcej protipovodňovej ochrane.

Projekt je kofinancovaný Európskym spoločenstvom s refundáciou od 75 % - 85 % .

Project CEframe sa začal v máji 2010 úvodným mítingom v St. Pölten / Rakúsko.

Projektoví partneri: 9 partnerov zo Rakúska, Českej republiky, Maďarska a Slovenska

Rozpočet projektu: appx. 3.1.mil.Eur

Informace: www.ceframe.eu, www.central2013.eu, info@ceframe.eu

Kľúčové slová: povodne, manažment povodňových rizík, protipovodňová ochrana Moravy a Dunaja, projekt CEframe

Kontakty na autora

1 Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava
e-mail: danica.leskova@shmu.sk, valeria.wendlova@shmu.sk, jana.poorova@shmu.sk

SEKCE 6

HYDROLOGICKÉ ASPEKTY INTEGROVANÉ PÉČE O VODU

IDENTIFIKÁCIA HYDRICKÝCH FUNKCIÍ KRAJINY NA PRÍKLADE POVODIA HORNÉHO VÁHU

Tomáš Lepeška[1, 2]

Abstrakt

Ako sa vodné zdroje stávajú vzácnejšie, vodohospodári hľadajú nové a udržateľné riešenia ako zabezpečiť dostatok kvalitných vodných zdrojov tak pre ekosystémy, ako aj pre socioekonomickú sféru. Príspevok poskytuje prehľad o vlastnostiach prvkov a zložiek krajiny, ktoré vplývajú na jej hydrický potenciál. Ide o prvky a zložky krajiny, ktoré najväčšou mierou ovplyvňujú zadržiavanie a infiltráciu atmosférických zrážok. V práci sme sa sústredili na významné vlastnosti prostredia vo vzťahu k vodám, ako hydrogeologické podmienky, klimatické podmienky, geomorfologické charakteristiky, pôdne pomery, charakteristiky lesných porastov i nelesnej krajiny. Hodnotenie hydrických funkcií krajiny nadobúda aktuálnosť v kontexte tvorby plánov integrovaného manažmentu povodí, ako aj pri tvorbe protipovodňových programov. Porozumenie a rešpektovanie hydrického potenciálu krajiny môže pomôcť zabezpečiť dostatok kvalitných vodných zdrojov tak pre ekosystémy, ako aj pre socio-ekonomickú sféru, znížiť povodňové škody a zabezpečiť vhodný manažment povodí.

Kľúčové slová: hydrický potenciál, povodie, krajina, vodné zdroje

1. Úvod

Klimatické podmienky a pôda (v širšom ponímaní pôdno-zvetralinový plášť) sú jednmi z najvýznamnejších faktorov, ktoré ovplyvňujú dynamiku vegetácie [10], a na druhej strane vegetácia predstavuje dôležitý činiteľ hydrologického cyklu a je zodpovedná za mnoho spätných väzieb a prepojení s atmosférou [9]. Pochopenie faktu, že vodné zdroje nemôžu byť riadené samostatne, ale že sú ovplyvnené celým radom interakcií medzi vodou, pôdou, rastlinami, horninovým podložím a spôsobom využitia krajiny, volá po integrovanom manažmente povodí. Na základe novej vodnej paradigmy – ekohydrológie ([23, 24] je zrejmé, že vhodným riadením ekosystémov a ľudských aktivít je možné dosiahnuť dobrý stav vodných zdrojov, čo je jedna z kľúčových požiadaviek vyplývajúcich z Rámcovej smernice o vode [4]. Na základe ekohydrologických kľúčových hypotéz [23, 24] môžeme hovoriť o hydrických funkciách krajiny, resp. o hydrickom potenciáli krajiny.

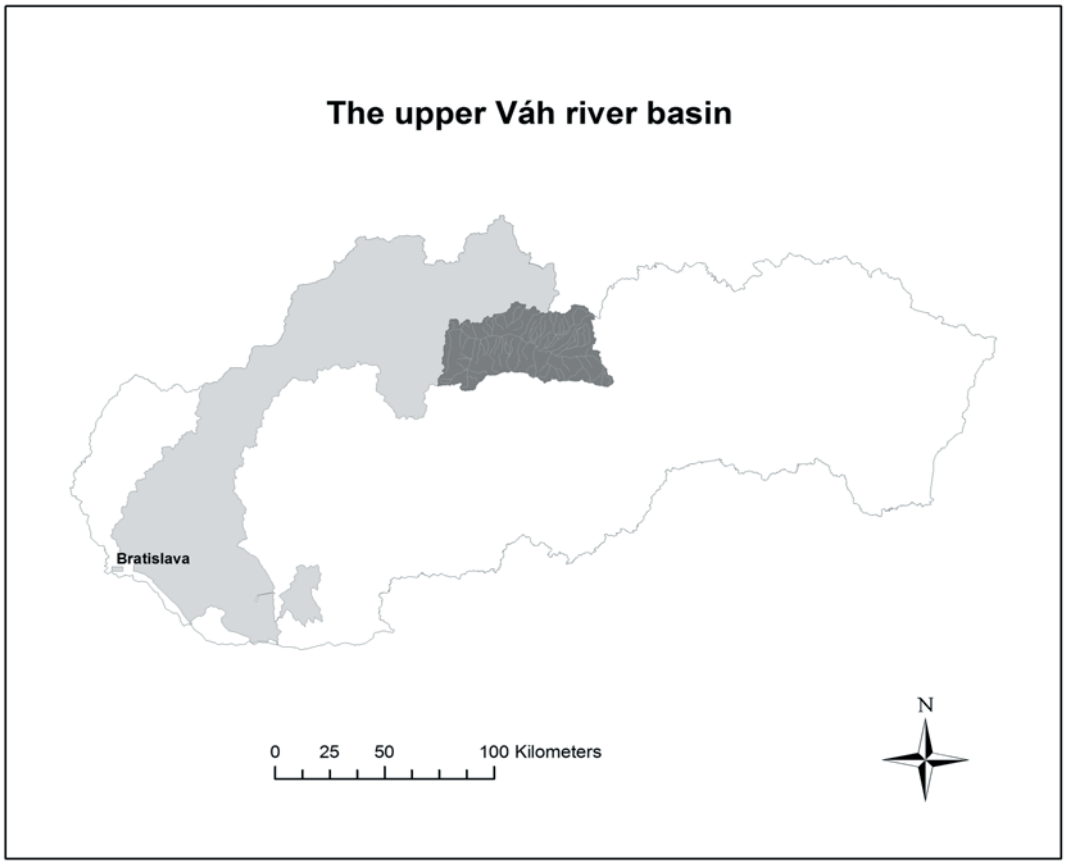
Pod hydrickými funkciami krajiny rozumieme jej schopnosť spomaľovať, zadržiavať atmosférické zrážky a podporovať ich vsakovanie do spodných vrstiev. Ide o vplyv krajiny na odtok vody, prejavujúci sa vo vyrovnávaní odtokových extrémov a v znižovaní veľkých, povodňových prietokov. Hydrické funkcie krajiny závisia od celého komplexu účinkov jednotlivých prvkov a zložiek, ktoré ju tvoria, na hydrologický cyklus.

Pri hodnotení celkovom hydrickom potenciáli krajiny sme sa sústredili na jej významné komponenty vo vzťahu k spomaleniu, zadržaniu atmosférických zrážok a k ich infiltrácii. Ide najmä o transmisivitu (prietočnosť) horninového prostredia, priemerný ročný úhrn zrážok, priemerný ročný úhrn potenciálnej evapotranspirácie, sklonitostné pomery územia, typy a druhy pôd, zloženie, štruktúru, zdravotný stav, stabilitu a pôvodnosť lesných porastov, charakteristiku a štruktúru nelesnej krajiny.

Hodnotenie hydrických funkcií krajiny by malo vždy prebiehať na úrovni povodí, teda v územiach s prirodzenými hranicami. K (integrovanému) hodnoteniu krajiny na báze povodí nabáda i rad dokumentov, napríklad Smernica č. 2000/60/EC (tzv. Rámcová smernica o vode, prijatá Európskym parlamentom a Radou).

Modelové územie

Povodie horného Váhu (Obr. 1) pozostáva z 38 čiastkových povodí a predstavuje významné pramenné oblasti celej rieky, ktorá poskytuje vodu pre potreby ekosystémov, 2,2 milióna obyvateľov, energetiku a priemysel. Modelové územie je tvorené horninami Mezozoika (45 %), flyšu (28 %), kryštalinika (15 %) a ostatnými druhmi (12 %). Na týchto substrátoch sa vyvinuli rendziny (30 %), kambizeme (30 %), podzoly (20 %) a ostatné typy (20 %). Z hľadiska pôdnych druhov v povodí horného Váhu prevládajú hlinité pôdy (45 %) nad piesčito-hlinitými (35 %) a hlinito-piesčitými (11 %). Modelové povodie leží v rozmedzí nadmorských výšok 430-2494 m n.m., s priemernou teplotou vzduchu 6 °C a priemerným ročným úhrnom zrážok 700 $mm.m^{-2}$ v nižšie položených územiach a s priemerným ročným úhrnom zrážok 2130 $mm.m^{-2}$ s priemernou ročnou teplotou vzduchu 0° C (i menej) v horských a vysokohorských oblastiach. Priemerný ročný úhrn potenciálnej evapotranspirácie kolíše od 550-600 mm v nižšie položených častiach, až po menej ako 300 mm vo vysokohorských oblastiach. Súčasné využitie zeme je tvorené lesmi (cca 60 %), poľnohospodárskou krajinou (30 %) a urbánnymi a priemyselnými oblasťami (4 %). Poľnohospodárska krajina, sídelné a poľnohospodárske areály sú zväčša situované v nadmorských výškach 430-800 m n.m. Približne 80 % modelového územia leží v chránených oblastiach (národné parky, prírodné rezervácie, chránené vodohospodárske oblasti a pod.). V povodí horného Váhu žije približne 133 tisíc obyvateľov a miera nezamestnanosti je približne 10 %.



Obr. 1. Povodie horného Váhu

2. Metodika

Pre identifikáciu hydrického potenciálu povodia horného Váhu sme použili metodiku podľa Lepešku [11]. Modelové povodie bolo rozdelené na 38 čiastkových povodí [20]. Podkladovými materiálmi, slúžiacimi pre zistenie atribútov krajiny, ktoré vplývajú na infiltráciu a retenciu zrážok boli údaje o krajinnej pokrývke poskytnuté Slovenskou agentúrou životného prostredia [19], údaje z lesných hospodárskych plánov poskytnuté Lesoprojektom vo Zvolene, mapové a kartografické údaje z Atlasu krajiny Slovenskej republiky [1], údaje digitálneho modelu reliéfu Slovenska v rastrovom formáte s rozlíšením 50 metrov [5] a Základné mapy Slovenskej republiky v mierke 1:10 000, údaje ktorých boli v prípade potreby aktualizované terénnymi pochôdzkami. Analýzy, spracovanie a syntézy podkladových materiálov a tvorba mapy hydrického potenciálu bola realizovaná v prostredí softvérových programov ArcView 3.2 a ArcGis 9.3.

3. Výsledky

Výsledkom analýzy hydrického potenciálu povodia hornej časti Váhu bolo rozdelenie územia do piatich kategórií podľa schopnosti krajiny infiltrovať a zadržiavať vodu.

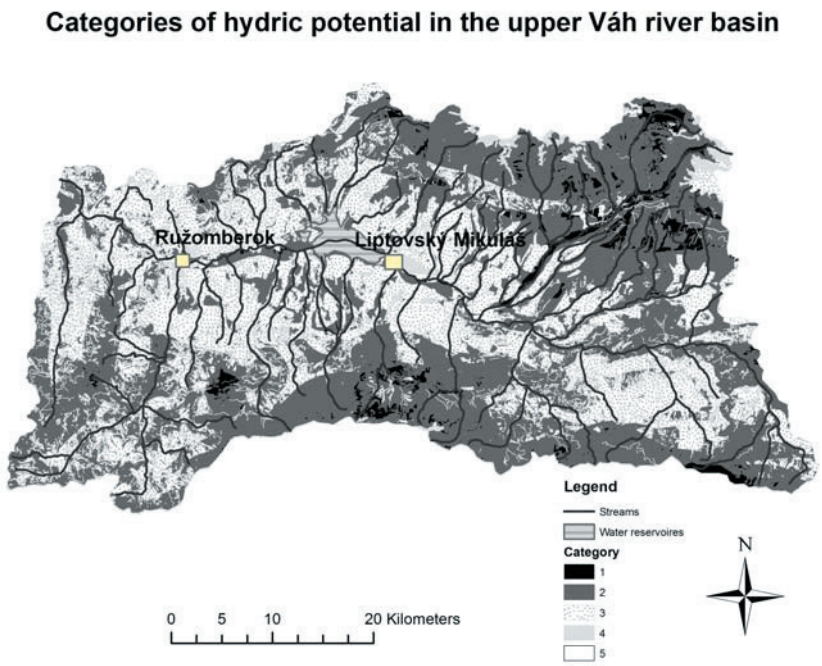
1. kategória: územia s výnimočným hydrickým potenciálom zaberajú 119,48 km^2, čo predstavuje 5,25 % povodia horného Váhu. V modelovom území sú to najmä oblasti Demänovského krasu (NPR Demänovská dolina, NPR Jánska dolina), NPR Salatín, NPR Ďumbier a NPR Brunov v Nízkych Tatrách, NPR Skalnej Alpy a oblasť Tlstej hory vo Veľkej Fatre, NPR Choč, NPR Prosiecka dolina a NPR Kvačianska dolina v Chočských vrchoch, NPR Suchá dolina (oblasť Sivého vrchu), na glacifluviálnych náplavoch Belej a na glaciálnych sedimentoch v dolinách i predhorí Západných a časti Vysokých Tatier.
2. kategória: územia s veľmi dobrým hydrickým potenciálom zaberajú výmeru spolu 1259,74 km^2, čo tvorí takmer 55 % modelového povodia. Spolu s územiami z prvej kategórie veľmi dobre korešpondujú s doteraz vyhlásenými chránenými vodohospodárskymi oblasťami (CHVO Veľká Fatra, CHVO Nízke Tatry – východ a CHVO Nízke Tatry – západ). Paradoxne, plošne najväčšie územia v 1. a 2. kategórii významnosti prostredia (čiastkové povodia väčšej časti Chočských vrchov a Západných a sčasti aj Vysokých Tatier) až na niekoľko výnimiek (povodie Kamenistého potoka a oblasti Bieleho Váhu, Hybice, Bystrého potoka a povodia Prosiečanky – spolu 47,46 km^2) nie sú predmetom legislatívnej územnej ochrany z hľadiska ochrany vodných zdrojov.
3. kategória: územia s priemerným hydrickým potenciálom pokrývajú 810,67 km^2 (35,62 %) modelového povodia. Nachádzajú sa najmä v Liptovskej kotline, vo väčších častiach povodí Svarínky, Ipoltice, Komjatnej a Likavky.
4. kategória: územia s obmedzeným hydrickým potenciálom ležia na ploche 64,18 km^2 (2,82 %) povodia horného Váhu. Tieto sú charakteristické pre intravilány obcí.
5. kategória: územia so značne obmedzeným hydrickým potenciálom zaberajú plochu o výmere 0,08 km^2, čo predstavuje 0,003 % modelového územia. Územia v tejto kategórii významnosti krajiny ležia len v nelesnej krajine.

Detailnejšie charakteristiky všetkých čiastkových povodí horného Váhu sú uvedené v Tab. 1. Kartografické vyjadrenie priestorového rozmiestnenia jednotlivých kategórií hydrického potenciálu v modelovom území je uvedené na obrázku 2.

Tab. 1. Percentuálne zastúpenie čiastkových povodí v jednotlivých kategóriách hydrického potenciálu krajiny

Názov	S_p	Kategória (%)					$I_{\%}$
	(km^2)	1.	2.	3.	4.	5.	(%)
Ľubochnianka	117,56	0,89	55,58	42,56	0,97	<0,01	89,16
Bystrý p.	12,23	0,93	41,07	57,26	0,74	-	78,84
Čutkov p.	11,49	3,45	36,19	57,94	2,4	0,02	89,99
Revúca	264,22	1,17	62,03	33,12	3,66	<0,01	65,84
Ludrovčanka	39,08	0,02	31,97	63,75	3,75	-	68,08
Sliačanka	20,08	-	24,76	66	9,24	-	31,17
Ľupčianka	78,03	5,02	65,86	26,55	2,57	<0,01	81,96
Malatínka	18,05	-	33,83	62,25	3,92	<0,01	39,94
Kľačianka	26,97	0,03	46,79	45,46	7,18	0,01	47,06
Dúbravka	21,66	1,08	48,53	45,88	4,51	-	19,18
Palúdžanka	47,26	1,31	79,28	16,27	3,14	-	66,54
Demänovka	62,1	22,6	57,98	13,32	6,1	-	66,79
Iľanovianka	27,31	0,61	23,06	70,77	5,56	-	61,86
Štiavnica	63,42	9,01	69,73	17,45	3,8	0,01	88,28
Boca	115,05	2,72	76,8	19,23	1,25	-	85,22
Svarínka	24,83	0,27	28,54	70,42	0,77	-	95,17
Ipoltica	86,3	1,16	47,52	50,96	0,36	-	91,31
Benkovský p.	20,35	-	40,22	59,17	0,61	-	78,96
Teplička	12,28	-	33,35	60,68	5,97	-	42,28
Ždiarsky p.	24,3	26,74	61,19	4,07	-	-	87,6
Čierny Váh	32,6	1,4	68,65	29,91	0,04	-	84,03
Šuňavský p.	11,66	-	50,89	45,8	3,31	-	30,57
Hlboký p.	12,22	0,04	48,58	51,32	0,06	-	45,07
Biely Váh	132,7	11,52	61,94	20,59	5,95	-	27,55
Hybica	44,75	10,74	68,76	17,82	2,68	-	18,25
Belá	243,68	19,87	60,54	9,84	9,75	-	55,84
Trnovec	38,49	2,89	53,19	39,95	3,97	-	35,82
Smrečianka	41,04	1,26	56,18	30,27	12,29	-	45,95
Jalovský p.	51,82	2,62	64,49	20,53	12,36	-	44,46
Petruška	18,83	0,85	59,37	35,47	4,31	-	23,73
Kvačianka	76,43	4,32	57,27	33,73	4,68	-	52,86
Prosiečanka	14,64	2,25	74,8	20,49	2,45	-	48,64
Sestrč	24,98	0,01	50,64	46,9	2,45	<0,01	49,44
Teplianka	36,18	0,26	39,37	55,71	4,66	-	59,78
Turík	10,64	3,46	37,29	57,43	1,82	-	68,71
Likavka	30,28	0,73	13,69	66,58	18,86	0,14	53,46
Komjatná	15,9	-	8	83,99	7,94	0,07	51,91
Váh*	343,09	1,02	51,72	39,57	7,69	<0,01	39,11
horný Váh spolu	2272,5	5,25	55,36	35,62	3,77	0,003	58,62

Vysvetlivky: $\mathbf{S_p}$ – výmera povodia (km^2); $\mathbf{I_{\%}}$ – lesnatosť povodia (%); * – 21,6 km^2 zaberajú vodné nádrže, kde neuvádzame kategóriu hydrického potenciálu



Obr. 2. Kategórie hydrického potenciálu v povodí horného Váhu

Nelesná krajina zaberá 940,2 km^2. V prvej kategórii hydrického potenciálu leží 3,08 %, v druhej kategórii 48,86 %, v tretej kategórii 35,93 %, v štvrtej kategórii 12,13 %. V piatej kategórii leží len niekoľko hektárov. Lesná krajina zaberá 1332,3 km^2. V prvej kategórii leží 6,03 %, v druhej kategórii 54,73 %, v tretej kategórii 27,67 % a 0,23 % v štvrtej kategórii hydrického potenciálu.

4. Diskusia

Identifikácia hydrického potenciálu krajiny je dôležitá vo viacerých smeroch. V prvom rade môže slúžiť ako základná poznatková báza pre naplnenie cieľov integrovaného manažmentu povodí. Poznaním a rešpektovaním hydrického potenciálu krajiny môžeme riadiť ľudskú činnosť v povodí. Jednotlivé kategórie hydrického potenciálu krajiny môžu pomôcť zodpovedným orgánom a inštitúciám pri rozhodovaní, kde je potrebné obmedziť konvenčné využívanie krajiny a prírodných zdrojov, resp. ponechať súčasný manažment krajiny a jej zdrojov.

Z hľadiska obhospodarovania krajiny (lesného hospodárstva, poľnohospodárstva, vodohospodárstva a pod.) odporúčame na plochách zaradených do *3. a 4. kategórie hydrického potenciálu* zvýšiť schopnosť krajiny infiltrovať a zadržiavať zrážky. Výnimku však tvoria územia, kde hrozia zosuvy pôdy. Ide o územia ležiace na paleogéne vnútorných Karpát, napríklad v katastri obce Bobrovník, kde po postavení vodnej nádrže Liptovská Mara došlo k podťatiu päty svahu vodnou hladinou. Tu navrhujeme doplniť výsadbu brehových porastov o dreviny (najmä kry) s vysokou desukčnou schopnosťou. Menej hodnotné pozemky v inundačných územiach tokov navrhujeme zaradiť do programov protipovodňovej ochrany územia s možnosťou zníženia povodňovej vlny.

V lesných porastoch navrhujeme ponechať viacej mŕtvej drevnej hmoty a poťažbových zvyškov. Tými sa významne zvýši drsnosť povrchu a predĺži sa čas, za ktorý môže zrážka infiltrovať do pôdy [13, 2]. Mŕtva drevná hmota ovplyvňuje mikroklímu porastov, pôsobí ako rezervoár vody počas suchých období [6] a ochraňuje produkčnú schopnosť pôdy [3]. Veľmi opatrný prístup je nutné dodržať pri spracovaní kalamít po prírodných narušeniach. Heterogenita porastov vyúsťuje do vekovej, druhovej, výškovej diferenciácie porastov a v konečnom dôsledku prispieva k ekologickej stabilite lesných ekosystémov [21]. V chránených územiach a ochranných lesoch by mala ostať nespracovaná. Podľa výskumov [17] si lesná pôda zachová svoje hydrofyzikálne charakteristiky aj 6 rokov po disturbancii, čo

postačuje zmladeniu vytvoriť hustý zápoj, ktorý ochráni pôdu pred eróziou. Prirodzené zmladenie sa pri spracovaní kalamít zdevastuje. Pri manažmente lesných porastov je dôležité nezvyšovať hustotu lesných ciest. Až 99 % všetkých lesných strát pochádza z nespevnených lesných ciest [14].

V poľnohospodárskej krajine navrhujeme zjemniť mozaiku veľkoblokových polí [16], na sklonitých pozemkoch hospodáriť v smere vrstevníc [22] a inak zabezpečovať najmä ornú pôdu proti vodnej erózii. Z hľadiska zabezpečenia kvality vôd je dôležité vylúčiť z užívania pramenné oblasti tokov a pristúpiť k ich zalesneniu [7]. V celej krajine je odporúčame k stabilizácii mokradí a revitalizácii nevhodne zregulovaných tokov a kanálov. Spomínané opatrenia vedú k protieróznej ochrane územia, zníženiu povodní a zvýšeniu kvality vodných zdrojov [25]. Zadržaniu vody v krajine napomáha aj systém malých vodných nádrží umiestnených v prirodzených terénnych depresiách [8].

Urbánne ekosystémy sú typické nízkou alebo žiadnou schopnosťou infiltrovať alebo zadržiavať zrážky. Je niekoľko možností redukcie povrchového odtoku tzv. zelenými strechami, či zachytením zrážkovej vody a využitím ako úžitkovej vody. Na zadržanie vody môžu slúžiť aj priepustné vegetačné pásy, mokrade, či systém umelých nádrží, no ako najdôležitejšie sa javí zníženie výmery nepriepustných plôch z obcí [18].

V územiach zaradených do *1. a 2. kategórie hydrického potenciálu* je rozhodujúce chrániť súčasné podmienky ekosystémov. Všetko úsie by malo byť vyvinuté smerom k extenzívnemu hospodáreniu. V poľnohospodárskej krajine by sa to týkalo premeny ornej pôdy na trvalé trávne porasty, vylúčenia hnojenia pozemkov a pri najvýznamnejších územiach aj ich legislatívnej ochrany. Do popredia by sa mali dostať zásady tzv. multifunkčného poľnohospodárstva [15]. V lesnej krajine by bolo vhodné pristúpiť k preklasifikovaniu kategórií lesov s produkčnou funkciou na lesné porasty s primárnou vodohospodárskou funkciou. Na strmých svahoch môže byť rozšírená o protilavínovú alebo protieróznu funkciu [12].

Poďakovanie

Táto práca je podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0591-07 a projektmi VEGA č. 1/0026/08, 1/0557/10, UGA I-09-000-45 a I-09-015-00.

Literatúra

[1] Atlas krajiny Slovenskej republiky. MŽP SR Bratislava, SAŽP Banská Bystrica, ESPRIT Banská Štiavnica, 2002, 342 p.

[2] BILBY, R.E., – BISSON, P.A., 1998. Function and Distribution of Large Woody Debris. River Ecology and Management, Springer-Verlag, New York, pp 324-346.

[3] BROWN, R.N., – EK, A.R., – KILGORE, M.A., 2007. An Assessment of Dead Wood Standards and Practices in Minnesota. Department of Forest Resources, University of Minnesota, USA. 45 pp.

[4] Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council. 2000.

[5] GEOMODEL, 1999. Digitálny model reliéfu DMR50-SK. GeoModel, Bratislava, [CD].

[6] HARMON, M. E., – FRANKLIN, J. F., – SWANSON, F. J., – SOLLINS, P., – GREGORY, S. V., – LATTIN, J. D., – ANDERSON, N. H., – CLINE, S. P., – AUMEN, N. G., – SEDELL, J. R., – LIENKAEMPER, G. W., – CROMACK, K., – CUMMINS, K. W., 1986. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. Advances Ecological Research 15, pp 133-276.

[7] HRONČEK, J., 1998. Vodohospodársky význam zalesňovania pramennej oblasti Ipľa. Les, 9, s.13-15.

[8] HÜTTE, M., 2000. Ökologie und Wasserbau. Ökologische Grundlagen von Gewässerverbaung und Wasserkraftnutzung. Berlin: Parey Buchverlag, 279 s.

[9] KUTZBACH, J., – BONAN, G., – FOLEY, J., – HARRISON, S.P., 1996. Vegetation and Soil Feebacks on the Response of the African Monsoon to Orbital Forcing of in the Early to Middle Holocene. Nature, 384, pp 623-626.

[10] LARCHER, W., 1995. Physiological plant ecology. Springer-Verlag N. York, 506 pp.

[11] LEPEŠKA, T., 2008. Atribúty krajiny vo vzťahu k jej hydrickým funkciám. In: Nováková M., Sviček M., (eds.) *Environmentálne aspekty analýzy a hodnotenia krajiny: Identifikácia a stanovenie indikátorov (a indexov) na báze prieskumov krajiny a údajov DPZ.* Výskumný ústav pôdoznalectva a ochrany pôdy, Slovenská akadémia pôdohospodárskych vied, Bratislava, s 36-45.

[12] LEPEŠKA, T., 2010. Integrovaný manažment povodí v horských a podhorských oblastiach. Vedecké štúdie, TU Zvolen. 115 s.

[13] MIDRIAK, R. et al*.,* 1981. Diferencované obhospodarovanie lesa podľa integrovaných funkcií. Lesnícke štúdie, 31, Príroda, Bratislava. 224 s.

[14] MIDRIAK, R. et al., 1987. Obhospodarovanie lesov vo flyšových oblastiach. Lesnícke štúdie, 44, Bratislava, Príroda. 156 s.

[15] MIŠTINA, T., 2006. Externality v rastlinnej výrobe. In: Blaas G., (ed.) *Multifunkčné postavenie a trvalo udržateľný rast poľnohopodárstva a lesníctva*. Nitra, SAPV, 55, s 56-61.

[16] NEUERBURG, M. W. – PADEL, S., 1994. Ekologické zemědělství v praxi. Nadace pro organické zemědělství, Ministerstvo zemědělství ČR, Praha. 476 s.

[17] RÉH, J., 1999. Pestovanie účelových lesov. TU Zvolen. 218 s.

[18] SCHUELER, T.R., 1987. Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs. Publication No. 87703. Metropolitan Washington Council of Governments. 275 pp.

[19] Slovenská agentúra životného prostredia, 2004. GIS vrstva CORINE landcover 2000. SAŽP, Banská Bystrica.

[20] SOLÍN, Ľ. – CEBECAUER, T. – GREŠKOVÁ, A. – ŠÚRI, M., 2000. Small Basins of Slovakia and their Physical Characteristics. Slovak Committee for Hydrology, Institute of Geography, SAS, Bratislava. 77 pp.

[21] SPIES, T., 1997. Forest stand structure, composition, and function. In: Kohm K.A., Franklin J.F. (Eds.), Creating *a Forestry for the 21st Century: The Science of Ecosystem Management*. Island Press, Washington, DC, pp 11-30.

[22] ZACHAR, D., 1982. Soil Erosion. Developments in Soil Science. Elsevier, Amsterdam – Oxford – New York. 547 pp.

[23] ZALEWSKI, M. (ed.), 2000. Special Issue on Ecological Engineering on Ecohydrology. Vol. 16, No. 1.

[24] ZALEWSKI, M. (ed.), 2002. Guidelines for the Integrated Management of the Watershed – Phytotechnology and Freshwater Management. Series No.5. 188 pp.

[25] ZHAO, K. – HE, C., 2001. Wetland types, functions and conservation in China. Chinese geographical science, Vol. 11, No. 4, Science Press, Springer-Verlag, pp 300-305.

Kontakty na autora

1 Ústav vedy a výskumu, Univerzita Mateja Bela v Banskej Bystrici, Cesta na amfiteáter 1, 947 01 Banská Bystrica

2 Katedra aplikovanej ekologie, Fakulta ekologie a environmentalistiky, Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen

MODELOVANIE DOPADU ANTROPOGÉNNEJ ČINNOSTI V POVODÍ NA KVALITU VODNÝCH TOKOV

Yvetta Velísková[1], Renáta Dulovičová[1], Marek Sokáč[2]

Abstrakt

Príspevok zahŕňa v sebe poznatky, získané počas riešenia projektu VEGA 2/0101/08 „Určenie závislostí disperzných javov od hlavných hydraulických parametrov tokov“, ktorý bol riešený v spolupráci Ústavu hydrológie SAV Bratislava a Katedry zdravotného a environmentálneho inžinierstva Stavebnej fakulty STU Bratislava. Cieľom projektu bolo zvýšiť spoľahlivosť a aplikovateľnosť existujúcich prostriedkov modelovania transportu vody a rozpustených látok v zložitých prírodných podmienkach pri rôznych hydrologických situáciách, so zameraním na vplyv znečistenia, transportovaného z urbanizovaných povodí do recipientov, na kvalitu vody v nich. Príspevok sa venuje spôsobom stanovovania disperzných charakteristík, ktoré sú špecifickými vstupnými údajmi pre numerické modely, simulujúce šírenie znečistenia v tokoch. V prípade prirodzených tokov pre získanie orientačných hodnôt koncentrácií transportovaného znečistenia postačuje jednorozmerný model, pre detailnejšie riešenie je potrebná aplikácia 2D modelov. Časť príspevku je venovaná preto metodike stanovovania pozdĺžneho, ale aj priečneho disperzného koeficienta. Zároveň sú spomenuté problémy, ktoré pri aplikácii tejto metodiky vznikli. Pri riešení spomínaného projektu bola zároveň sledovaná závislosť hodnôt oboch disperzných koeficientov na hodnotách hlavných hydraulických parametrov toku. Získané hodnoty oboch disperzných koeficientov a ich nadobudnuté závislosti na hydraulických parametroch toku boli použité ako jedny zo vstupných dát do simulačných modelov, ktorými sa modeloval transport znečistenia v rieke Hron. Pri simuláciách sa uvažovalo len s bodovými zdrojmi znečistenia. Dosiahnuté výsledky ukázali, že tieto modelovacie metódy sú vhodným nástrojom na modelovanie kvality vôd vo vodných tokoch a je možné modelovať nimi dopad rôznych opatrení, týkajúcich sa zdrojov znečistenia, na kvalitu vody v recipiente.

Kľúčové slová: disperzia, disperzné koeficienty, modelovanie transportu vody a znečistenia, hydraulické parametre toku

1. Úvod

Kvalita vody a jej dostatok je podstatným faktorom, ktorý podmieňuje rozvoj spoločnosti a je výpoveďou o jej úrovni. V poslednom období sa dostáva do popredia nielen otázka zabezpečenia dostatku vody a problémy, spojené so získavaním jej potrebného množstva, ale aj otázka zabezpečenia ochrany jej existujúcich zdrojov pred znehodnotením z rôznych zdrojov znečistenia, či už bodových alebo plošných. Pri simulácii prenosových procesov sa však stretávame s nedostatkom informácii o veľkosti disperzných koeficientov. Preto je dôležité venovať ich určovaniu veľkú pozornosť a stanoviť ich hodnotu s čo možno najspoľahlivejšou mierou. Existuje niekoľko možností stanovenia hodnoty disperzných koeficientov. Prvá je priame použitie hodnôt disperzných koeficientov z dostupnej literatúry. Ďalšie možnosti sú použitie empirických vzťahov, odvodených rôznymi autormi na základe experimentálnych výsledkov, príp. teoretickej analýzy prenosového javu, či stanovenie hodnoty týchto koeficientov na základe priamych terénych meraní v sledovanej lokalite.

Príspevok obsahuje možnosti stanovenia pozdĺžneho disperzného koeficienta podľa vzťahov rôznych autorov, platných pre otvorené korytá, stanovenie tohto koeficienta z terénnych meraní v prizmatickom koryte kruhového prierezu na vybraných úsekoch stokovej siete medzi Liptovským Jánom a Liptovským Mikulášom, stanovenie priečneho disperzného

koeficienta z terénnych meraní na rieke Hron v úseku Banská Bystrica - Šalková, ako aj následné korekcie týchto hodnôt prostredníctvom modelu MODI.

2. Základné teoretické východiská

V hydrodynamickom zmysle slova pojem disperzia znamená rozptyl rozpustenej látky v kvapaline, ku ktorému dochádza pri prúdení kvapaliny. Rozpustená látka nesleduje len prúdnicu, ale dochádza k jej pozvoľnému šíreniu sa aj do strán, a to v dôsledku pulzácie rýchlosti a rozdielu koncentrácie látky. Disperzia látok v toku je spolu s advekciou základným mechanizmom pohybu rozpustených častíc vo vodnom prostredí. Jej pôsobením dochádza ku znižovaniu maximálnych hodnôt koncentrácie rozpustenej látky v toku.

Hydrodynamický prístup riešenia procesu zmiešavania v povrchových tokoch vychádza z advekčno-difúznej rovnice v takomto tvare:

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t}+\frac{\partial(uhC)}{\partial x}+\frac{\partial(vhC)}{\partial y}+\frac{\partial(whC)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon_x h\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon_y h\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\varepsilon_z h\frac{\partial C}{\partial z}\right)-$$
$$-A.K.C+C_z.q_z, \qquad (1)$$

kde: h - hĺbka [m], C - hmotnostná koncentrácia látky vo vode [kg m^{-3}], u,v,w - zložky vektora rýchlosti prúdenia [m s^{-1}], t - čas [s], x, y, z - priestorové súradnice bodu [m] (x – pozdĺžna horizontálna, y – priečna horizontálna, z –vertikálna), $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ - koeficienty turbulentnej difúzie v smere daných súradnicových osí [m^2.s^{-1}], A - plocha prietokového profilu [m^2], K - súčiniteľ vyjadrujúci vplyv chemických, príp. biologických procesov na rozpustenú látku [s^{-1}], C - koncentrácia látky [mg.l^{-1}], C_z - koncentrácia zdroja, q_z - prietok zdroja [m^3.s^{-1}].

Najjednoduchším je jednorozmerné matematické vyjadrenie disperzie (v pozdĺžnom smere x, s predpokladom rovnomerného rozdelenia koncentrácie látky po hĺbke a šírke toku).

Rovnica (1) zahŕňa dva základné transportné mechanizmy a to advekčný (alebo konvekčný) transport (v dôsledku toku kvapaliny) a disperzný transport (v dôsledku gradientu koncentrácie). Takýto jednorozmerný opis je namieste vtedy, ak prevláda jeden rozmer nad ostatnými (teda napr. rieka, potrubie a pod., kde dĺžka je rozhodujúci rozmer).

2.1 Pozdĺžne zmiešavanie

Získavanie hodnôt pozdĺžneho disperzného koeficienta D_L sa realizuje viacerými spôsobmi: od voľby na základe vlastných skúseností alebo prevzatých skúseností z literatúry, cez kvalifikované odhady, až po aplikáciu špeciálnych výpočtov, ako vyplýva zo zahraničných, ale aj domácich prác napr. [1], [2], [3], [4], [5], atď. Keďže hodnota koeficienta disperzie je určená intenzitou turbulencie v príslušnom úseku vodného toku, jej veľkosť závisí od jeho hlavných hydraulických charakteristík, teda od tvaru a veľkosti priečneho profilu, od rýchlosti prúdenia, prietoku a pozdĺžneho sklonu toku. Preto aj závislosti, ktoré boli odvodené rôznymi autormi pre určenie hodnôt pozdĺžneho disperzného koeficienta, používajú na jeho vyčíslenie tieto charakteristiky. Publikované vzťahy pre stanovenie D_L vo väčšine štúdií vychádzajú z výsledkov experimentálnych meraní na fyzikálnych modeloch v laboratórnych podmienkach alebo priamo z meraní na toku. Vzťahy takto získané majú často tvar:

$$D_L = p.h.u_* \qquad (2)$$

kde: p je empirický bezrozmerný súčiniteľ, resp. bezrozmerný koeficient pozdĺžnej disperzie, h je priemerná hĺbka riečneho úseku [m], u^* je trecia rýchlosť [m.s^{-1}].

Empirický bezrozmerný súčiniteľ p nadobúda podľa výsledkov rôznych autorov hodnoty v relatívne širokom rozmedzí, a to podľa podmienok, za ktorých boli získané. Dokumentujú to výsledky mnohých autorov, napr. [2], [3], [5], ktoré boli spracované z terénnych meraní na prirodzených tokoch. Podmienky terénnych experimentov sú uvedené v tabuľke 1.

Tab. 1: Hodnoty bezrozmerného súčiniteľa p a pozdĺžneho disperzného koeficienta D_L z experimentálnych meraní

Autor	*Podmienky*	D_L $[m^2.s^{-1}]$	*p*
Říha a kol.	rieka Svitava, B=11,5 m; H=0,9 m; Q=(2-3) $m^3.s^{-1}$; u=0,5 $m.s^{-1}$	5,2-8,1	100-250
Brady, Johnson	rieka Wear, B=(20-27,6)m; h=(0,45-1,85) m; Q=(1,62-3,93) $m^3.s^{-1}$; u=(0,07-0,15) $m.s^{-1}$; i=(0,004-0,17)%	4,4-87,22	94,9-2 200
Velísková, Pekárová	rieka Ondava (horný tok), Q=0,9036 $m^3.s^{-1}$, B=12 m, i=0,0033, u=0,35$m.s^{-1}$	0,84-1,36	49,3-80
Glover	rieka South Plate, meandrujúci tok, R=0,46 m; Q=15 $m^3.s^{-1}$; u=1,33 $m.s^{-1}$; n=0,028	15,7	500
Glover	rieka Mohawk, zložité podmienky prúdenia, vodná elektráreň, nádrž, prítoky h=6 m; Q=30 $m^3.s^{-1}$	6	800
Fischer	laboratórny obdĺžnikový žľab	0,0072-0,063	8,7-30
Fischer	laboratórny trojuholníkový žľab	0,123-0,415	190-640

2.2 Priečne zmiešavanie

Pri riešení disperzných procesov v tokoch ako dvojrozmernej úlohy sa stáva dominantnou priečna disperzia [5] a preto je treba venovať pozornosť priečnemu disperznému koeficientu.

Rovnica (1) sa eliminuje na dvojrozmernú. Pri určení hodnôt tohto koeficienta napriek tomu vznikajú ešte väčšie problémy ako pri stanovení pozdĺžneho disperzného koeficienta. Teoretické vzťahy na určenie hodnoty tohto koeficienta zatiaľ nie sú k dispozícii v takej miere ako pri pozdĺžnom disperznom koeficiente a tak možno využívať len experimentálne zistené hodnoty. Tie sa v niektorých prípadoch vyhodnocujú vo forme bezrozmerného koeficienta priečnej disperzie, a to v podobnej forme ako pri pozdĺžnom disperznom koeficiente:

$$a = \frac{\varepsilon_y}{u_* h} \tag{3}$$

kde: u_* - trecia rýchlosť [$m.s^{-1}$].

Hodnota bezrozmerného koeficienta priečnej disperzie umožňuje jeho istú variabilitu vzhľadom na podmienky prúdenia v toku. Niekedy však nie je ľahké a ani možné stanoviť pre konkrétne úseky toku pri platných podmienkach prúdenia v ňom správnu a platnú hodnotu priečneho disperzného koeficienta ani pomocou vzťahu (3) bez predchádzajúcich skúseností.

3. Stanovenie koeficientov priečnej a pozdĺžnej disperzie z terénnych meraní

3.1 Koeficient pozdĺžnej disperzie

Na stanovenie veľkosti pozdĺžneho disperzného koeficienta pre prúdenie s voľnou hladinou sa robil terénny výskum na vybranej časti stokovej siete, na spojovacom zberači medzi

Liptovským Hrádkom a Liptovským Mikulášom. Zberač má profil DN 500, je uložený v sklonoch od 2 $^{o}/_{oo}$ do 9,5 $^{o}/_{oo}$. Pre terénne merania boli vybraté dva úseky zberača – prvý nad obcou Podtureň a druhý za autocampingom Borová Sihoť, pri Liptovskom Hrádku. V prvom úseku boli merané časové priebehy koncentrácie stopovača na rôznych dĺžkach v priamej trati. V druhom úseku sa nachádza niekoľko zalomení trasy (30°, 45° a 90° odklon trasy) a v týchto úsekoch boli merané časové priebehy koncentrácie stopovača s cieľom určiť práve vplyv smerových zmien na veľkosť disperzného koeficienta. Vyhodnotenie výsledkov pokusov spočívalo v tom, že pre každý pokus sa vykonala simulácia stopovacieho pokusu (priebehu koncentrácií) pre rôzne koeficienty pozdĺžnej disperzie. Podkladom pre numerickú simuláciu bolo analytické riešenie jednorozmernej formy advekčno-difúznej rovnice (1) pre prípad okamžitého vnosu stopovača do toku:

$$C(x,t) = \frac{G}{2A\sqrt{\pi D_L t}} . exp\left[- \frac{\left(x - \bar{u} t\right)^2}{4 D_L t} \right] \qquad (4)$$

Vyhodnocoval sa pritom rozdiel nameraných a modelovaných hodnôt. Minimálny rozdiel určoval hodnotu nameraného pozdĺžneho disperzného koeficientu pre každý jednotlivý pokus. Pri praktickej realizácii sa vyskytol jeden problém: pri vyhodnocovaní výsledkov sa zistilo, že závislosť vodivosti a meranej koncentrácie stopovača nemá v celom rozsahu meraní lineárny charakter, čo bolo overené a potvrdené kalibráciou konduktometra.

Hodnoty pozdĺžneho disperzného koeficienta D_L , určené z dvoch sérií týchto stopovacích pokusov v priamom úseku sa pohybovali v rozmedzí 0,085 – 0,12 $m^2.s^{-1}$ (bezrozmerný súčiniteľ p = 11,8 – 25,2). Pri porovnaní hodnôt D_L , získaného v stokovom zberači, a D_L , získaného v prirodzených korytách (Tab. 1), je evidentné, že sa rádovo líšia. Hodnoty pozdĺžneho disperzného koeficienta D_L , získaného v stokovom zberači sa približujú skôr k hodnotám, určeným v laboratórnych podmienkach, čo je však logické, pretože vybraný úsek stokovej siete sa podmienkami prúdenia podobá skôr laboratórnemu žľabu vo väčšom merítku ako prirodzenému toku. Pre porovnanie boli použité v literatúre nájdené empirické vzťahy na určenie D_L pre zrovnateľné podmienky. Taylor napr. uvádza vzťah pre D_L v priamom úseku kruhového potrubia pre turbulentné prúdenie ako funkciu polomeru potrubia a trecej rýchlosti. Použitím tohto vzťahu v našich podmienkach sme dostali hodnoty D_L v rozmedzí 0,14 - 0,23 $m^2.s^{-1}$. Hodnota D_L na dolnom okraji relatívne dobre korešponduje s nameranými hodnotami, horná hodnota rozmedzia je dvojnásobná. Napriek tomu je možné konštatovať, že tento jednoduchý vzťah je použiteľný pre stanovenie pozdĺžneho disperzného koeficienta v priamych úsekoch kruhových potrubí. Podstatne väčšie rozdiely hodnôt vyšli z porovnania nameraných hodnôt a hodnôt, získaných použitím vzťahu odvodeného Parkerom, ktorý upravil Taylorov vzťah do tvaru, platného pre otvorené korytá:

$$D_L = 14.28\, R^{2/3} \sqrt{2 g i} \qquad (5)$$

kde R je hydraulický polomer [m], g je gravitačné zrýchlenie a i je pozdĺžny sklon dna.

Použitím tohto vzťahu boli hodnoty D_L v rozmedzí 0,69 - 0,92 $m^2.s^{-1}$. Vzhľadom na to, že vzťah bol odvodený pre otvorené korytá, možno konštatovať, že jeho použitie pre prípad prúdenia v stokovom zberači nie je vhodné. Pri sérii pokusov s nižším prietokom sa pri vyhodnocovaní výsledkov merania ukázalo, že v meranom úseku sa nachádzala prekážka v prúde, ktorá mala za následok vytvorenie „mŕtvej zóny“ v meranom úseku. Preto bola použitá aj aplikácia Thackstonovho vzťahu [1], ktorý pri odvodzovaní svojho vzťahu počítal aj s prípadným efektom „mŕtvych zón“. Podľa tohto vzťahu hodnoty D_L boli v rozmedzí 0,054-0,12 $m^2.s^{-1}$, čo je pomerne dobrá zhoda s nameranými hodnotami, hlavne na hornom okraji hodnôt.

Metodický postup terénnych meraní v zakrivenom úseku trasy, ako aj spôsob vyhodnocovania hodnôt pozdĺžnych disperzných koeficientov z nich, bol totožný s postupom v priamej trase. Merania boli robené v každom úseku v troch opakovaniach. Zároveň na

každom úseku boli vykonané stopovacie pokusy pri dvoch rôznych hodnotách prietoku. V rámci meraného úseku boli na trase tri uhly zalomenia - 90^o, 135^o a 105^o . Vplyv uhla zakrivenia na hodnotu pozdĺžneho disperzného koeficienta v rámci doteraz vykonaných meraní nebol jasne doteraz vysledovaný. Hodnoty nameraných pozdĺžnych koeficientov v zakrivenom úseku trasy boli v rozmedzí 0,03 - 0,07 $m^2.s^{-1}$, bezrozmerný koeficient pozdĺžnej disperzie dosahoval hodnoty 5,15 – 39,27. Čo sa týka porovnania týchto hodnôt s hodnotami z priamej trasy, jednoznačne hodnoty D_L v zakrivenom úseku sú nižšie ako v priamej trase. Naproti tomu hodnoty bezrozmerného koeficienta *p* vykazujú väčší rozptyl a aj samotné hodnoty v zakrivenom úseku sú vyššie. To naznačuje, že pri disperzii v priamej trase je tento jav dominantne ovplyvnený difúziou v pozdĺžnom smere ako aj gradientom rýchlosti pozdĺž toku. V zakrivenej trase do procesu disperzie nutne vstúpil aj gradient rýchlosti v priečnom smere, čo sa prejavlo „oslabením“ hodnoty D_L . Naproti tomu rozptyl a navýšenie hodnoty bezrozmerného koeficienta *p* je pochopiteľný cez rovnicu (2). Vychádzajúc z jej formy môžeme povedať, že v hodnote *p* je hodnota disperzného koeficientu čiastočne očistená od hydraulických charakteristík spriemerovaných na sledovanom úseku toku a tak detailnejšie vystihuje mieru samotnej disperzie v danej časti.

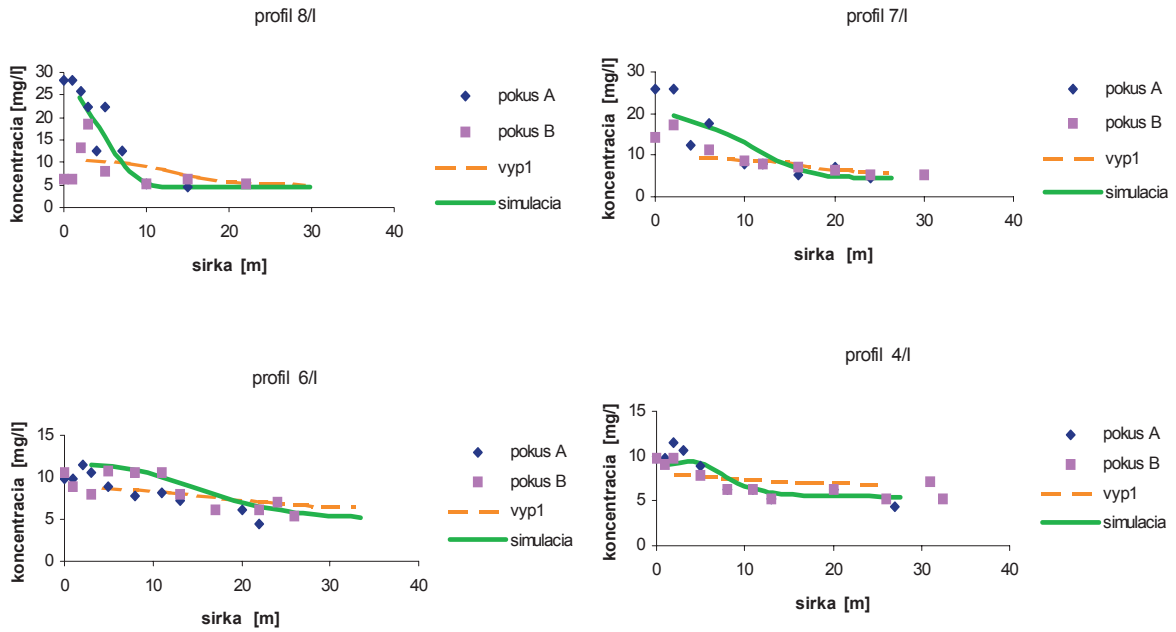
3.2 Koeficient priečnej disperzie

Koeficienty priečnej disperzie boli vyhodnocované z výsledkov stopovacích pokusov na 4 km úseku rieky Hron medzi zaústením toku Istebník a mostom v Banskej Bystrici–Šalkovej. Pomer šírky koryta k priemernej hĺbke bol v rozmedzí od 40 do 70násobku, preto bolo možné považovať koryto za široké a plytké (predpoklad aplikovateľnosti metódy použitej na stanovenie priečneho disperzného koeficienta z terénnych meraní). Pozdĺžny sklon toku v tomto úseku bol 0,001 až 0,0026. V rámci úseku boli vytypované dve časti toku s rôznym smerovým vedením - pravotočivá zákruta a priamy úsek. Merania boli vykonané v troch rôznych obdobiach s rôznymi prietokovými pomermi (6,7 $m^3.s^{-1}$ až 21,97 $m^3.s^{-1}$). Každé meranie osobitne bolo robené za ustáleného stavu. Bol použitý konštantný zdroj stopovacej látky a na stanovenie koeficienta priečnej disperzie bola použitá metóda Demetracopoulosa. Metóda a jej aplikácia už boli opísané v práci [6]. Na základe výsledkov zmiešavacích pokusov, vykonaných na spomínanej lokalite, boli vyhodnotené priečne disperzné koeficienty pre sledovanú časť Hrona. Ich hodnoty sú v Tab. 2.

Na overenie hodnôt koeficienta priečnej disperzie, stanovených z výsledkov zmiešavacích pokusov v terénnych podmienkach metódou Demetracopoulosa a Stefana, bol použitý numerický model MODI. Model bol vyvinutý na ÚH SAV autormi Velísková a Kohutiar [6]. Je založený na numerickom riešení dvojrozmernej formy advekčno-difúznej rovnice, schopný dvojrozmerne simulovať zmiešavacie procesy v neprizmatických korytách pri ustálenom prúdení. Namerané rozdelenie koncentrácie stopovacej látky po šírke profilu bolo porovnávané s výsledkami simulácie. Pre ilustráciu uvádzame časť výsledkov na Obr. 1.

Tab. 2: Namerané a vypočítané hodnoty priečnych disperzných koeficientov na sledovanom úseku Hrona

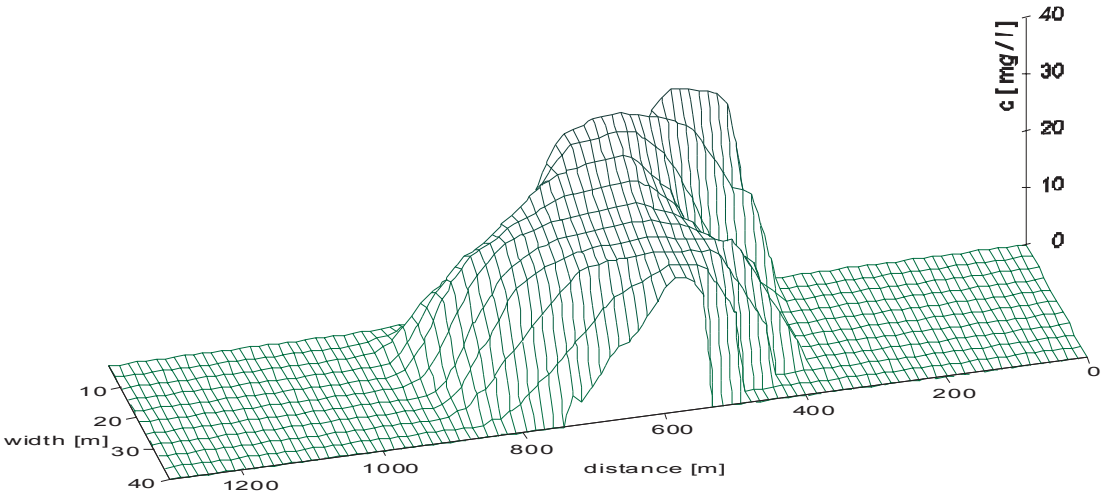
		1. séria pokusov	2. séria pokusov	3.séria pokusov
úsek I. (so zákrutou)	terénne merania (Demetracopoulos Stefan) $\in_y^M$ [$m^2 s^{-1}$]	0,165-0,403	0,896-1,3	0,612-1,242
	model MODI $\in_y^S$ [$m^2 s^{-1}$]	0,02-0,3	0,01-0,2	0,01-0,2
	a [–]	0,2-2,5	0,2-2,55	0,2-2,55
		1. séria pokusov	2. séria pokusov	3.séria pokusov
úsek II. (priama)	terénne merania (Demetracopoulos Stefan) $\in_y^M$ [$m^2 s^{-1}$]	0,044-0,407	0,333-0,727	0,044-0,863
	model MODI $\in_y^S$ [$m^2 s^{-1}$]	0,01-0,02	0,005-0,013	0,007-0,015
	a [–]	0,09-0,27	0,09-0,27	0,09-0,27



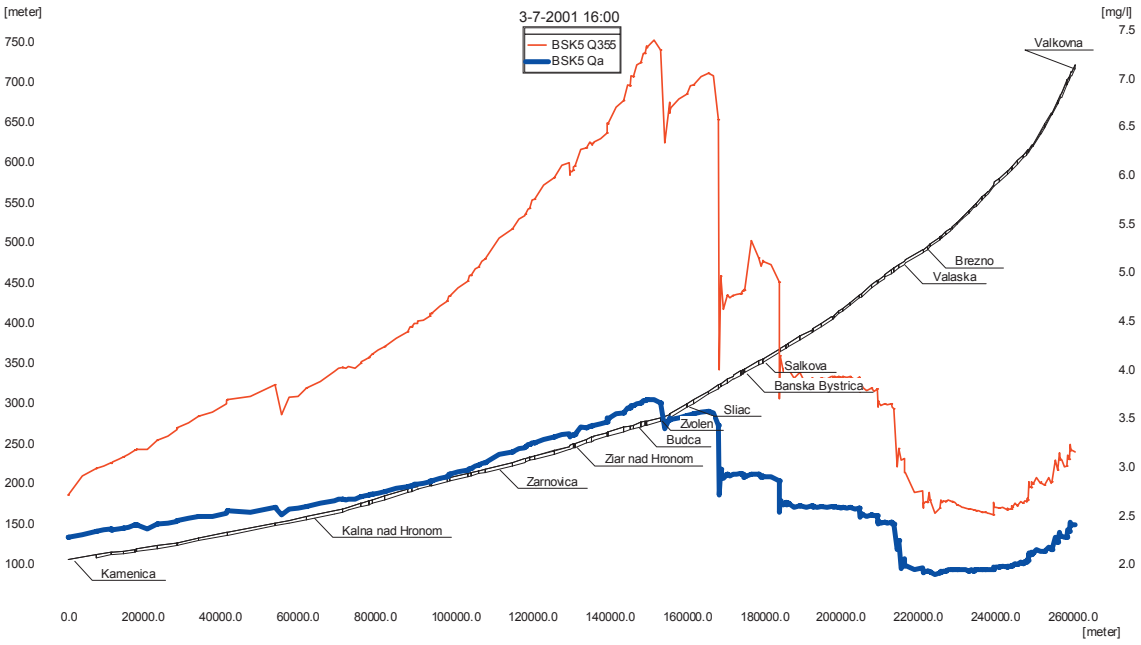
Obr. 1: Grafické zobrazenie rozdelenia koncentrácie stopovača v úseku I („vyp1“ – hodnota $\in_y$ stanovená metódou Demetracopoulosa a Stefana)

Získané skúsenosti z terénnych meraní, ako aj informácie z rešerše literatúry, boli aplikované pri konkrétnych numerických simuláciách transportu znečistenia na rieke Hron. Niektoré výsledky týchto simulácií sú pre ilustráciu na Obr. 2 a), b).

a)



b)



Obr. 2: Numerické simulácie transportu znečistenia na rieke Hron – a) modelom MODI, b) modelom MIKE 11

4. Závery

Získané hodnoty pozdĺžneho disperzného koeficientu pre prizmatické koryto nie sú priamo použiteľné pre prirodzené toky, no pre zjednodušený charakter prúdenia pri ich získavaní je ľahšie analyzovať vplyv základných hydraulických charakteristík na jav disperzie. Preto tieto hodnoty sú vhodným východiskom pre ďalšiu analýzu javu disperzie a hydraulických charakteristík, ktoré ju ovplyvňujú a popisujú. Pri porovnaní hodnôt D_L v priamom a zalomenom úseku stokového zberača hodnoty D_L v priamom úseku boli vyššie ako v zalomenej trase (maximálna hodnota bezrozmerného koeficienta p dosahovala v priamom úseku hodnotu 25,2, v zakrivenej trase zberača až 39,3). Tento výsledok naznačuje, že

v priamej trase sa na disperzii nesenej látky podieľa disperzia v pozdĺžnom smere vo väčšej miere ako v zakrivenom úseku, kde vstupuje svojou podstatnou mierou priečna disperzia. Výsledky z obidvoch úsekov majú následne slúžiť ako podklad pre analýzu vplyvu hydraulických veličín na hodnoty disperzného koeficienta a v konečnom dôsledku budú použité pri numerickom modelovaní disperzie v stokovej sieti i v recipiente.

Literatúra

[1] BANSAL, M. K.,1971. Dispersion in natural streams. J. Hyd. Division, HY11, Nov., 1867-1886.

[2] ELDER, J. W.,1959. Dispersion of marked fluid in turbulent shear flow. J. Fluid Mech., vol. 5, Part 4, pp 544-560.

[3] KARCHER, M. J. et al., 2004. The dispersion of 99Tc in the Nordic Seas and the Arctic Ocean: A comparison of model results and observations. Journal of Environmental Radioactivity 74 (1-3), pp 185-198.

[4] KOSORIN, K. 1995. Disperzný koeficient pre prirodzené profily povrchových tokov. J. Hydrol. Hydromech., 43, 1-2, 93-101.

[5] ŘÍHA, J. – DANĚČEK, J. – GLAC, F.,1997. Vliv disperze na průběh koncentrací látek v toku. J. Hydrol. Hydromech., 45, 1-2, 69-80.

[6] VELÍSKOVÁ, Y. – KOHUTIAR, J.,1992. Určenie koeficientov priečneho zmiešavania v širokých plytkých tokoch. Vodohosp. Čas., 40, č. 6, 506-516.

Kontakty na autora

1 Ústav hydrológie SAV Bratislava, e-mail: veliskova@uh.savba.sk, dulovicova@uh.savba.sk

2 Stavebná fakulta STU Bratislava, e-mail:marek.sokac@stuba.sk

JAKOST VODY V TOCÍCH ČR – PROGNÓZA A SKUTEČNOST

Hubert Kříž[1]

Abstrakt

Předmětem tohoto příspěvku je porovnání výsledků prognózy jakosti vody v tocích na území České republiky k roku 2010, která byla vypracována v roce 1986 a jejím skutečným stavem v letech 2007 – 2008. Předpokládaná jakost vody v tocích v ČR k roku 2010 a její aktuální stav je znázorněn v přehledných mapách [1, 2], v nichž je patrné, že od roku 1985 do současnosti došlo v ČR výraznějšímu zlepšení jakosti vody v tocích než předpokládala prognóza.

Klíčová slova: jakost vody v tocích, prognóza

1. Úvod

V rámci hlavního úkolu Státního úkolu základního výzkumu, SPZV IX–11–4 „Prognóza rozvoje oblastí ČSSR na základě racionálního využívání jejich zdrojů“ byl v Geografickém ústavu ČSAV zpracován dílčí úkol nazvaný „Pracovní hypotéza geograficky generalizované souhrnné prognózy vybraných celků sociálně ekonomické sféry ČSSR k roku 2010“, který byl určen pro potřeby Prognostického ústavu ČSAV, popř. státních orgánů. Jeho součástí byla i prognóza budoucího vývoje vodního hospodářství [1]. Zatímco prognóza vodního hospodářství byla poměrně výrazně ovlivněna tehdejšími podmínkami a představami o budoucím vývoji socialistického národního hospodářství, pokus o předpověď změn jakosti vody v tocích a vodních nádržích vycházel z objektivnějších předpokladů. Výsledky prognózy k roku 2010 znázorněné v mapě [1] umožňují porovnání předpovídaného a aktuálního stavu jakosti vody v tocích [2].

2. Prognóza jakosti vody v tocích ČR 1985 – 2010

Předpovídání budoucího vývoje jakosti vody v tocích je poměrně obtížným úkolem v současnosti a ještě složitějším a náročnějším problémem bylo vypracování této prognózy v osmdesátých letech minulého století. Tehdy nebylo vůbec možné spolehlivě odhadnout jaký bude budoucí vývoj produkce znečištěných odpadních vod vypouštěných do vodních toků, technologií používaných v průmyslu a rozsah chemizace v zemědělství. Jakost vody v tocích také negativně ovlivňovaly případy havarijního znečištění. Jejich počet i důsledky se nesnižovaly a do budoucnosti bylo třeba s nimi počítat. Z hlediska vývoje jakosti vody v tocích bylo kromě produkce a vypouštění odpadních vod rozhodující i objem čištění odpadních vod v sídlech, průmyslových závodech a zemědělských objektech. Podle tehdejších proklamovaných záměrů se měly v budoucnosti vynakládat značné finanční prostředky na stavby čistíren odpadních vod.

Při vypracovávání prognózy jakosti vody v tocích k roku 2010 se vycházelo ze skutečnosti, že tehdejší minulý průběh změn čistoty vody ve vodních útvarech byl trvale nepříznivý a nutně se musel změnit, aby mohly být využívány jako zdroj vody pro zásobování obyvatelstva, průmyslu a zemědělství vodou. Kromě toho se vycházelo z předpokladu, že ve všech vodárenských, popř. i dalších tocích, z nichž byla nebo v budoucnosti měla být odebírána voda pro vodárenské účely, nutně musí být voda neznečištěná nebo jen mírně znečištěná, aby mohla být vhodným způsobem upravena na pitnou vodu. Na těchto tocích musela být realizována opatření, která by umožnila zachování současného vyhovujícího stavu nebo zlepšení jakosti vody.

Součásti prognózy byl i návrh vybudování nových čistíren odpadních vod u větších zdrojů znečištění, kde ještě v roce 1985 tyto čistírny chyběly. Vybudování těchto čistíren odpadních vod bylo jedním z hlavních předpokladů pro to, aby bylo dosaženo předpovídaného stavu jakosti vody k roku 2010.

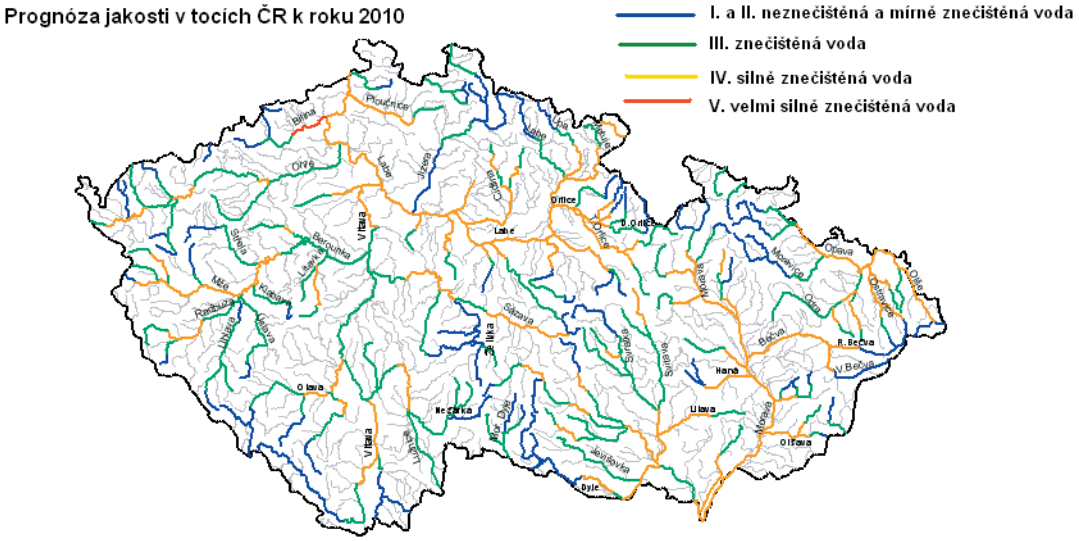
Předpovídaný budoucí stav jakosti vody v říční síti k roku 2010 byl zakreslen do mapy v měřítku 1 : 1 000 000. Jakost vody byla přitom vyjádřena komplexem všech ukazatelů podle tehdejší ČSN 83 0602, tj. kyslíkovým režimem, základním chemickým složením a zvláštními ukazateli. V mapě byly podle obvyklé klasifikace barevně rozlišeny následující třídy jakosti vody:

I. a II. voda neznečištěná a mírně znečištěná,

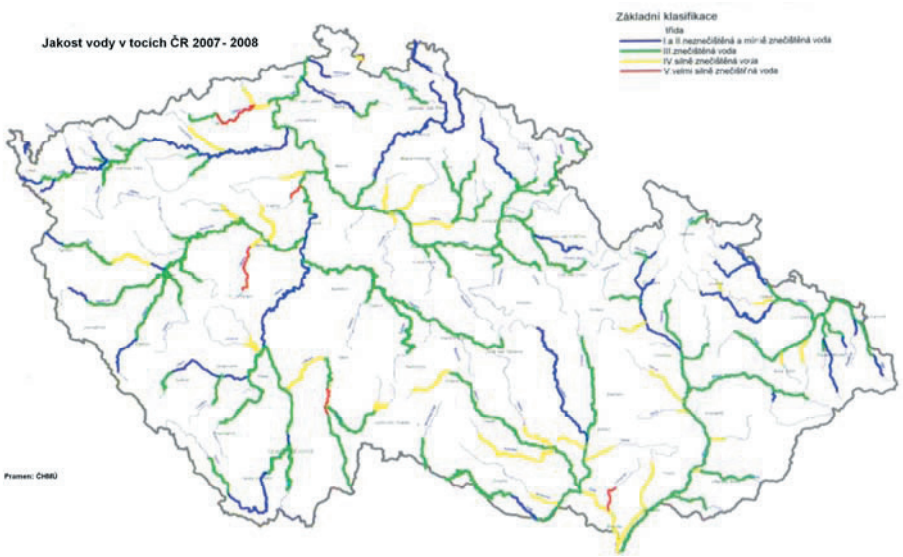
III. znečištěná voda,

IV. silně znečištěná voda,

V. velmi znečištěná voda.



Obr. 1: Prognóza jakosti vody v tocích ČR k roku 2010



Obr. 2: Jakost vody v tocích ČR 2007 - 2008

3. Porovnání prognózy jakosti vody v tocích ČR k roku 2010 s jejím aktuálním stavem

Vzhledem k rozsahu v minulosti sledovaných ukazatelů jakosti vody v tocích bylo možno porovnávat její prognózu s aktuálním stavem pouze podle základní klasifikace uvedené v ČSN 75 7221. Za aktuální stav jakosti vody je přitom považováno její hodnocení za období 2007 – 2008, neboť za další dvouletí 2009 – 2010 nemohlo být zatím sledování jakosti vody vyhodnoceno. Je velmi pravděpodobné, že rozdíly v jakosti vody v tocích za 2007 – 2008 a 2009 – 2010 se příliš lišit nebudou.

Již z prvního porovnání prognózy jakosti vody v Obr. 1 s mapovým znázorněním jejího aktuálního stavu (Obr. 2) je patrné, že od roku 1985 došlo v ČR k výraznějšímu zlepšení jakosti vody v tocích než předpokládala prognóza. Jen v některých případech (Jizera, Bílina, Úhlava, Svitava) je předpovídaná a současná jakost shodná nebo velmi podobná. Největší rozdíly naopak jsou v hodnocení jakosti vody větších toků (Labe, Orlice, Vltava, Sázava, Ohře, Morava, Dyje, Odra, Bečva), které by měly mít podle prognózy vodu silně znečištěnou (IV. tř.), ale ve skutečnosti ji mají jen znečištěnou (III. tř.) nebo jen mírně znečištěnou (II. tř.).

Při hodnocení přesnosti prognózy jakosti vody v tocích z roku 1986 je třeba přihlédnout k tomu v jaké době a za jakých okolností byla vypracována. Tehdy nikdo nemohl vědět k jakým převratným společenským a hospodářským změnám dojde po roce 1989, které se pozitivně projeví i výrazným zlepšením jakosti vody v tocích ČR. Na přesnost této prognózy musela nutně mít vliv skutečnost, že byla vydávána s velkým časovým předstihem 25 let.

4. Závěr

K prvnímu pokusu o dlouhodobou prognózu jakosti vody v tocích ČR došlo v roce 1986 v rámci řešení úkolu SPZV IX – 11 - 4. Tato prognóza nemohla být dostatečně úspěšná. Na její přesnost měly negativní vliv nejen tehdejší nepříznivé okolnosti a podmínky, ale také extrémní délka časového předstihu 25 let. Přesto tato prognóza zahrnovala některé dílčí pozitivní výsledky. Především prokázala, že v dlouhodobém trendu se bude jakost vody v tocích v ČR zlepšovat, a to nejčastěji o jednu třídu. Ve výjimečných případech (ve vodárenských tocích) i o 2 třídy jakosti. Skutečné zlepšení jakosti vody v tocích bylo ještě výraznější, avšak rozsah a příčiny těchto pozitivních změn nemohly být v roce 1986 předpokládány.

Literatura

[1] KŘÍŽ, H.,1987. Vodní hospodářství. In: *Pracovní hypotéza územní prognózy vybraných celků sociálně ekonomické sféry ČSSR k roku 2010*. Edice: Geografie teorie – výzkum - praxe. Brno: Geografický ústav ČSAV, sv. 8, s. 54–69.

[2] Zpráva o stavu vodního hospodářství České republiky v r. 2008. Praha: Ministerstvo zemědělství ČR, 2009. ISBN 978-80-7084-850-0.

Kontakty na autora

1 Branky 39, 66449 Ostopovice, e-mail: hubkriz@brno.cas.cz

KVANTIFIKÁCIA VPLYVU PREPADOV Z ODĽAHČOVACÍCH KOMÔR NA KVALITU VODY VO VODNOM TOKU

Marek Sokáč [1]

Abstrakt

V tomto príspevku sa zaoberáme vplyvom odľahčených vôd z jednotných stokových sietí na kvalitu vody v recipientoch, ktorá je prezentovaná na prípadovej štúdii rieky Hron pod mestom Banská Bystrica. V príspevku je ďalej opísaný simulačný model kvality vody v toku Hron, priestorový rozsah modelu, ako aj modelovanie fyzikálnych, chemických a biologických procesov vo vodnom toku pomocou numerického modelu MIKE 11. Hlavným cieľom modelu bola simulácia kvality vody a jej zmien po dĺžke toku pre kvázi ustálený stav prietokov v dvoch alternatívach – Q_a a Q_{355}. Model slúži ako základ pre modelovanie účinkov bodových zdrojov znečistenia a ich vplyvov na kvalitu vody v rieke Hron za účelom zlepšenia kvality vody.

Kľúčové slova: kvalita vody, numerické modelovanie, bodové zdroje znečistenia

1. Úvod

Matematické modely predstavujú vysoko efektívny nástroj v oblasti vodohospodárskeho plánovania, a to nielen v oblasti riadenia a manažmentu množstva, ale aj v oblasti kvality vôd. Potreba komplexného prognózovania, riadenia a ochrany kvality vody v sieti vodných tokov bude v budúcnosti pravdepodobne vyžadovať postupné „pokrytie“ našich najvýznamnejších povodí matematickými modelmi kvality vody. Postup pri riešení problémov kvality vody v tokoch pozostáva z formulácie problému a cieľa riešenia, navrhnutia vhodnej štruktúry databázy zdrojov znečistenia a výsledkov monitoringu, navrhnutia vhodného matematického modelu, kalibrácie a verifikácie modelu a z navrhnutia metodiky monitorovania a predpovedania vplyvu opatrení na kvalitu vody v sieti vodných tokov. Základným predpokladom numerického spracovania záujmového územia je dostatočne podrobná, úplná a aktuálna báza vstupných dát.

2. Priestorový rozsah modelu

Z priestorového hľadiska sme modelovali časť toku Hron od rkm 261,300 (profil Valkovňa) po ústie (rkm 0,000), teda prakticky okrem krátkeho úseku od prameňa rieky celý tok Hrona.

Definíciu trasy koryta toku sme vykonali v grafickom editore simulačného programu MIKE 11. Ako podklad sme použili digitalizované mapy mierky 1 : 50 000 [VKÚ Harmanec, 1998]. Do podkladu sme zadávali všetky lomové body trasy toku, ako aj body, v ktorých sú bočné prítoky alebo zaústenia, výusty, prípadne iné objekty na toku. Bočné prítoky sme zadávali iba schematicky, v dĺžke cca 500 metrov. Všetky bočné prítoky sme potom pripojili na hlavný tok - Hron, čím sme vytvorili model topológie riečnej siete.

Pre jednotlivé výpočtové body sme definovali priečne profily sústavou súradníc (šírka a hĺbka), pričom bolo potrebné zadať aj nadmorskú výšku súradníc. Pri zadávaní priečnych profilov sme vychádzali z práce [Mišík, 1998], kde autor generalizoval priečny, ako aj pozdĺžny profil pre úsek rieky Hron od profilu Vaľkovňa po ústie.

Treba však pripomenúť, že pre modelovaný úsek toku sme nemali dostatočné množstvo informácií o hydraulike toku (koeficienty drsnosti), resp. kinetike fyzikálnych, chemických a biologických procesov v toku (koeficienty disperzie, reaerácie, dezoxygenácie a pod.). Za najvážnejší problém však považujeme nedostatok kvalitatívnych údajov o prítokoch rieky Hron (pravidelne monitorované sú iba prítoky Čierny Hron, Bystrica, Slatina a Sikenica). Tento problém je však komplexnejší a týka sa všetkých slovenských tokov.

3. Okrajové a počiatočné podmienky

Modely kvality vody v tokoch sa obvykle využívajú na riešenie nepriaznivých stavov na toku, ktoré sa vyskytujú hlavne pri relatívne malých prietokoch. Voda je pri týchto prietokoch obvykle v koryte toku a odpadá tak často obtiažne riešenie prúdenia v inundačnom území. V tejto práci sme pri simulácii uvažovali s dvoma alternatívami kvázi ustáleného stavu prietokov – ročným priemerným prietokom Q_a a 355denným prietokom Q_{355}.

Pretože cieľom práce bolo aj modelovanie kvality vody, bolo nutné v miestach prítokov zadať aj vstupné koncentrácie látok, vstupujúcich v prítoku do modelovanej oblasti. Zadanie bolo potrebné pre každú stavovú premennú, s ktorou sa v modeli kvality uvažuje pri simulácii. Pri zadávaní sme v tomto konkrétnom prípade uvažovali s hodnotami c_{90}., teda s hodnotami kvalitatívnych ukazovateľov, zodpovedajúcich 90%nému kvantilu pravdepodobnosti neprekročenia (nepodkročenia pre O_2) danej koncentrácie látky v toku. V modeli sme použili modul, ktorý umožňuje modelovanie koncentrácií rozpusteného kyslíka (O_2), amoniakálneho dusíka (NH_4-N), dusičnanového dusíka (NO_3-N), biochemickej spotreby kyslíka (BSK_5) a fosforu (P) v rozpustenej a nerozpustenej forme.

Bodmi, v ktorých bolo potrebné zadať prítoky, boli teda všetky miesta bočných prítokov Hrona a ich kvalitatívnych ukazovateľov. Hodnoty, potrebné pre simuláciu prietokov sme určili z hydrologických podkladov, resp. chýbajúce údaje sme doplnili na základe hydrologickej bilancie povodia. Ťažšia situácia bola pri určení kvalitatívnych ukazovateľov bočných prítokov Hrona. V odberových miestach, uvedených v ročenke kvality vody (SHMÚ 2000), sme uvažovali s hodnotami podľa tejto ročenky, v ostatných profiloch sme takisto vychádzali z látkovej bilancie toku Hron.

Takisto bolo potrebné zadať všetky bodové zdroje znečistenia, napr. vyústenia z ČOV, priemyselných podnikov a pod.

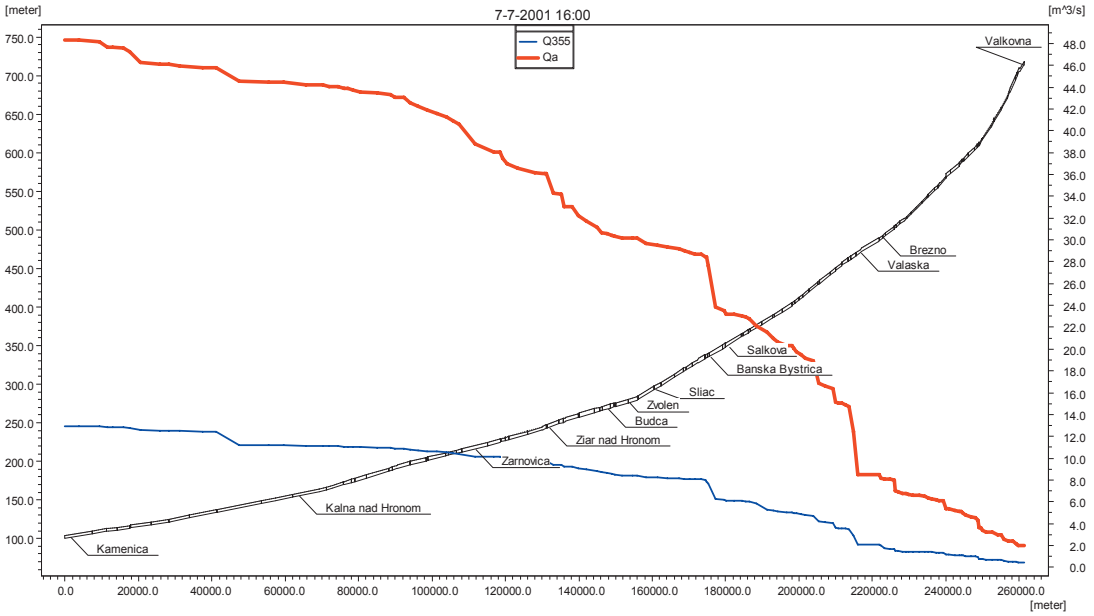
4. Simulácia procesov ovplyvňujúcich kvalitu vody

Pri simulácii kvality vody zvolenou úrovňou komplexnosti modelu boli simulované nasledovné procesy :

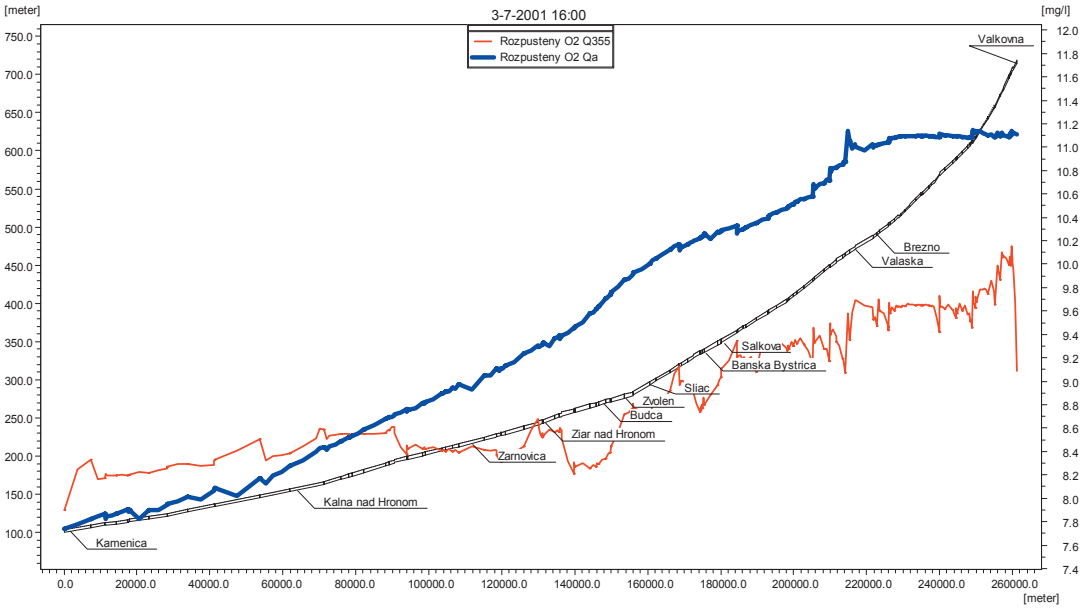
1. Reaerácia
2. Degradácia organických látok - okamžitá spotreba kyslíka
3. Nitrifikácia
4. Denitrifikácia

Proces č. 2, okamžitá spotreba kyslíka, je spotreba kyslíka v dôsledku biochemického rozkladu organických látok prítomných vo vodnej fáze (teda nie v sedimente). Proces znižovania kyslíka v dôsledku biochemického rozkladu organických látok v sedimente (aj resuspenzia sedimentu) sa označuje ako *oneskorená spotreba kyslíka.* Pri simulácii oneskorenej spotreby kyslíka je nutná simulácia transportu a kvalitatívnych procesov nekohezívneho sedimentu. Vzhľadom na to, že sme simulovali viacmenej ustálený stav prúdenia, a teda prípad okamžitej spotreby kyslíka, v modeli sme nepoužívali modul na simuláciu kvalitatívnych procesov a transportu nekohezívneho sedimentu.

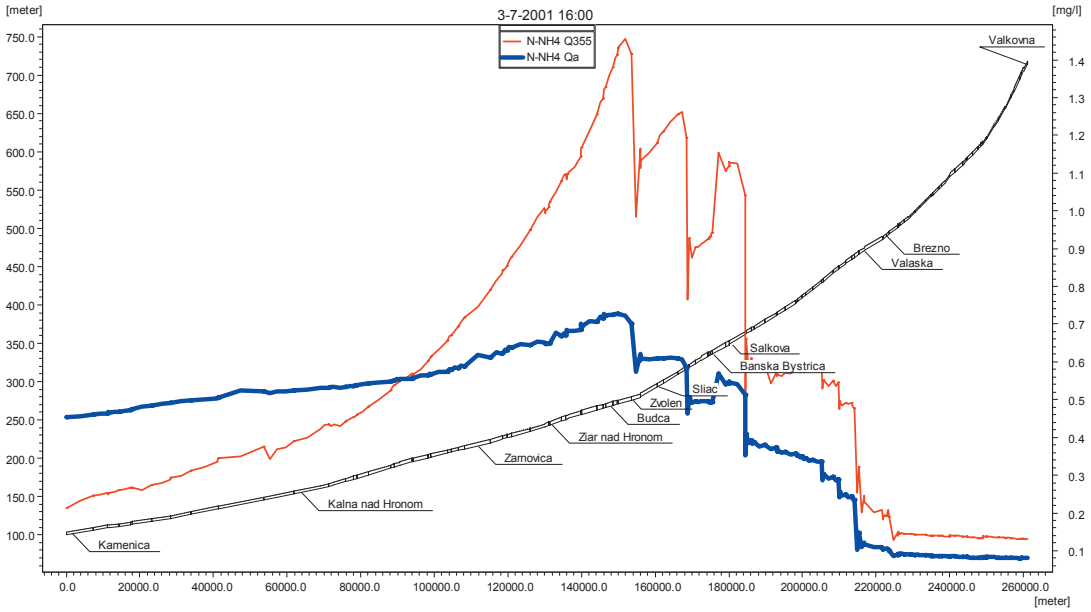
Modul kvality vôd vyžaduje od užívateľa prakticky iba údaje, potrebné pre definíciu kinetiky jednotlivých procesov, prebiehajúcich vo vodnom toku. Jednotlivé koeficienty, ovplyvňujúce kinetiku procesov sme nemenili a ponechali sme hodnoty odporúčané v manuáli programu. Dôvodom tohto postupu bol nedostatok údajov pre kalibráciu a verifikáciu modelu. Predpokladáme, že v budúcnosti bude možné potrebné koeficienty spresniť na základe meraní, resp. na základe nových alebo doplňujúcich údajov z literatúry [Velísková, 2004]. Výsledky simulácie sú zobrazené v pozdĺžnych profiloch toku na Obr. 1 až 4.



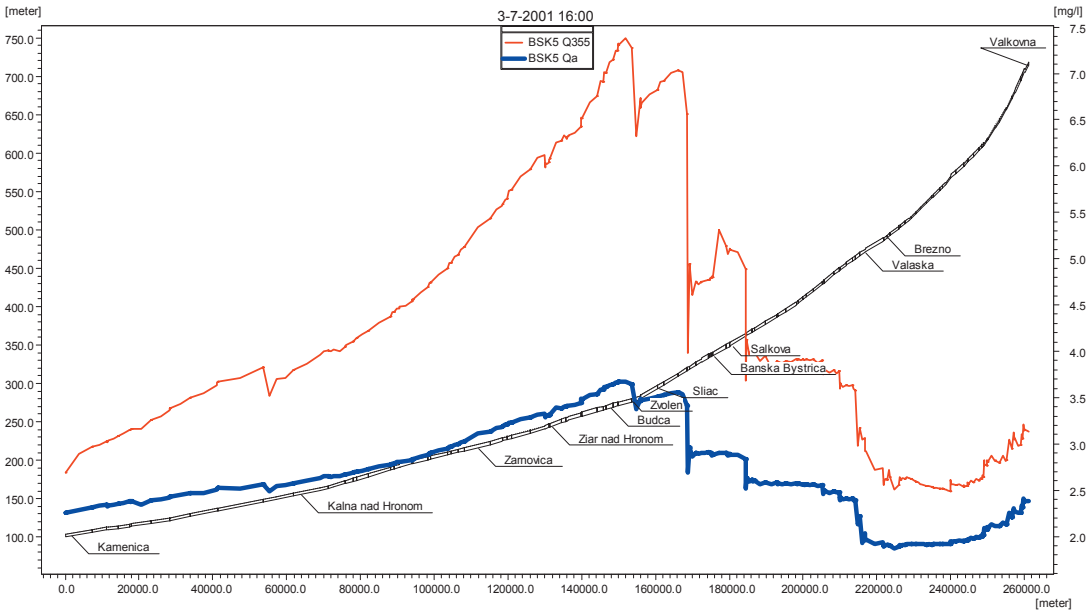
Obr. 1: Prietoky v modelovanom úseku rieky Hron pri dlhodobom priemernom prietoku (hrubá čiara) a pri 355dennom prietoku (tenká čiara)



Obr. 2: Priebeh koncentrácie rozpusteného kyslíka v modelovanej oblasti rieky Hron pri dlhodobom priemernom prietoku Q_a (hrubá čiara) a pri 355dennom prietoku (tenká čiara)



Obr. 3: Priebeh koncentrácie amoniakálneho dusíka N-NH_4 v modelovanej oblasti rieky Hron pri dlhodobom priemernom prietoku Q_a (hrubá čiara) a pri 355dennom prietoku (tenká čiara)



Obr. 4: Priebeh koncentrácie BSK_5 v modelovanej oblasti rieky Hron pri dlhodobom priemernom prietoku Q_a (hrubá čiara) a pri 355dennom prietoku (tenká čiara)

5. Modelovanie kvality vody v rieke Hron

V rámci projektu bola vykonaná matematická simulácia kvantitatívnych, ako aj kvalitatívnych pomerov v sledovanom úseku rieky Hron, od profilu Valkovňa po ústie rieky. Cieľom bolo zistiť priebeh vybraných ukazovateľov kvality vody v pozdĺžnom profile. Simulované ukazovatele kvality vody boli BSK_5, rozpustený O_2, teplota, NH_4-N, NO_3-N, P.

Pre posúdenie vplyvu bodových zdrojov znečistenia na modelovaný úsek toku Hrona boli vykonané simulácie v dvoch alternatívach – pri dlhodobých priemerných prietokoch (Q_a – na Hrone, ako aj vo všetkých prítokoch) a pri prietokoch blízkym minimálnym prietokom – pri 355 dennom prietoku Q_{355}. V prvej alternatíve (prietok Q_a) sme použili pre simuláciu kvality priemerné hodnoty ukazovateľov znečistenia, v druhej alternatíve simulácie (Q_{355}) sme

použili hodnoty c_{90}. Ako vstupné hodnoty boli použité údaje, prebraté z ročeniek kvality vôd (SHMÚ 1999, SHMÚ 2000).

Významný vplyv na výsledky simulácie má skutočnosť, že pri simulácii sme neuvažovali vplyv nebodových zdrojov znečistenia, pričom na určitých úsekoch rieky Hron sa takýto vplyv nebodových zdrojov znečistenia výrazným spôsobom prejavuje najmä v dolnej časti toku. Na druhej strane práve takýto prístup umožňuje kvantifikovať vplyv nebodových zdrojov znečistenia na celkovom znečistení rieky Hron.

Ďalším faktorom, ktorý určite nepriaznivo ovplyvnil výsledky simulácie je fakt, že model nebol kalibrovaný, najmä čo sa týka advekčno- disperzných koeficientov a koeficientov, určujúcich kinetiku biochemických procesov v toku. Ako sme zistili v priebehu simulácie, významný vplyv majú aj iné veličiny, ako napr. sedimentačná rýchlosť nerozpustených látok , resp. hraničná rýchlosť, pod ktorou nastáva sedimentácia. Pri vyšších rýchlostiach naopak môže dôjsť k resuspenzii dnových nekohezívnych sedimentov.

Najväčším zdrojom nepresností bola však skutočnosť, že z približne 130 prítokov, ktoré sme zadávali do modelu ako prítoky do modelovej oblasti, sme mali k dispozícii iba 4 toky, ktoré boli monitorované z hľadiska kvality (Čierny Hron, Bystrica, Slatina a Sikenica). Ak by sme vyjadrili túto skutočnosť vzhľadom na prietoky, tak iba cca 30 % prítokov do systému boli monitorované toky. Na všetkých ostatných malých tokoch sme zadávali kvalitatívne údaje iba odhadom na základe látkovej bilancie toku. Ako ukázali výsledky simulácie, vo všeobecnosti môžeme tento postup prijať, ale lokálne vznikali veľké odchýlky výsledkov simulácie od skutočných hodnôt, najmä na hornom úseku toku rieky Hron. Malé prítoky Hrona môžu byť relatívne čisté toky z podhorských oblastí, ale takisto môžu byť značne znečistené, najmä ak pretekajú malými obcami bez vybudovanej kanalizácie (priame výusty septikov do vodného toku, podzemné vody znečistené netesnými žumpami a podobne.)

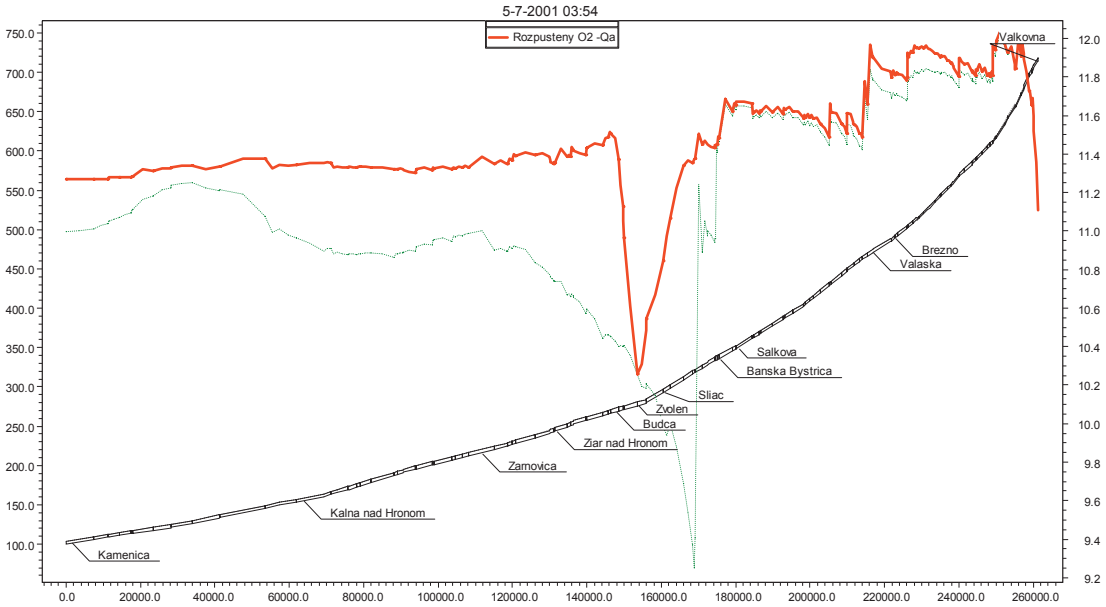
Aj porovnávanie modelových výsledkov so štatisticky odvodenými hodnotami jednotlivých ukazovateľov kvality vody v toku nie je práve z metodického hľadiska najvhodnejšie.

6. Simulácia vplyvu bodových zdrojov znečistenia

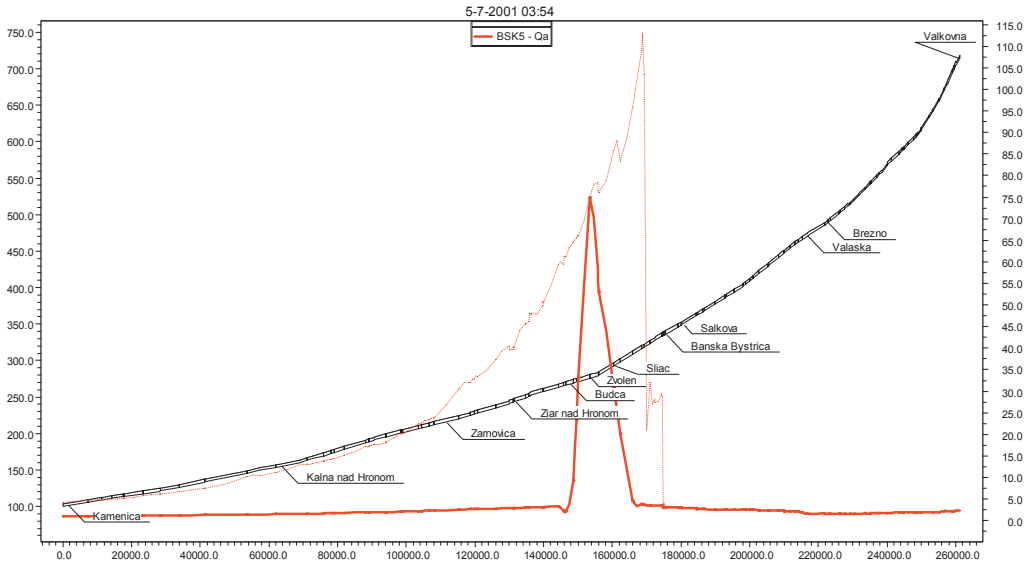
Vyššie opísaný model kvality vody v rieke Hron predstavuje nástroj, ktorým je možné modelovanie vplyvu bodových zdrojov znečistenia, ako sú napríklad výusty z komunálnych alebo priemyselných čistiarní odpadových vôd. Môže pritom ísť o kontinuálny alebo diskontinuálny charakter vypúšťania týchto odpadových vôd. Zaujímavým príkladom využitia modelu je práve diskontinuálny prípad vypúšťania odpadových vôd, ktorý sa v praxi veľmi často vyskytuje ako hydraulické odľahčenie odpadových vôd zo stokových sietí počas prívalových dažďov cez odľahčovacie komory na stokových sieťach. V tomto prípade ide o pomerne krátkodobé, o to však intenzívnejšie hydraulické a látkové zaťaženie recipientu.

Model sme preto využili na simuláciu vplyvu odľahčovania vôd z mestskej aglomerácie Banská Bystrica na kvalitu vody v rieke Hron v príslušnom riečnom kilometri. Pri modelovaní sme použili údaje a výsledky z predchádzajúcich výskumných projektov a meraní, ktoré boli riešené v spolupráci KZEI a VÚVH (Sztruhár, 2001). Simulácia odtoku odpadových vôd bola vykonaná pomocou modelu MOUSE (DHI). Výsledky simulácií v podobe minimálnych koncentrácií kyslíka a maximálnych koncentrácií BSK dosiahnuté pri simulácii odľahčenia odpadových vôd zo stokovej siete počas prívalových dažďov, sú na Obr. 5 a 6.

Vplyv vypúšťaných odľahčených odpadových vôd na recipient výrazne závisí nielen od množstva a kvality odpadových vôd, ale aj od prietokov a kvality vody v rieke v čase odľahčenia, ako aj od rôznych iných faktorov, ktoré ovplyvňujú napr. kinetiku procesov samočistenia v toku. Na tomto mieste je potrebné uviesť, že urbanizované povodie mesta Banská Bystrica je pomerne špecifické – má relatívne veľký sklon a veľké množstvo odľahčovacích komôr, takže odpadová voda sa rýchlo cez odľahčovacie komory dostane do recipientu vo veľkom množstve (veľmi malá detenčná schopnosť siete, úplná absencia akumulačných prvkov na sieti).



Obr. 5: Priebeh koncentrácie O_2 v modelovanej oblasti rieky Hron pri simulácii odľahčenia odpadových vôd (plná čiara – aktuálna hodnota v danom čase, čiarkovaná čiara – maximálne koncentrácie)



Obr. 6: Priebeh koncentrácie BSK_5 v modelovanej oblasti rieky Hron pri simulácii odľahčenia odpadových vôd (plná čiara – aktuálna hodnota v danom čase, čiarkovaná čiara – maximálne koncentrácie)

Pri modelovaní kvality vody v rieke sme takisto dospeli k záveru, že nárazové znečistenie z odľahčovacích komôr v rieke Hron nie je likvidované iba samočistiacou schopnosťou samotného toku, ale vo veľmi veľkej miere sa na likvidácii znečistenia podieľa zriedenie, zmiešavanie a disperzia. Napríklad po odľahčení sa v priebehu niekoľkých hodín prietok vplyvom bočných prítokov Hrona takmer zdvojnásobí (od profilu Sliač po profil Žarnovica), v dôsledku čoho koncentrácie poklesnú teoreticky takmer až na polovinu pôvodných hodnôt. Tento fakt má aj zásadný vplyv na modelovanie koncentrácie rozpusteného kyslíka – predpokladáme, že z bočných prítokov priteká voda s vysokým obsahom kyslíka (horské oblasti, veľké spády prítokov), čo vo významnej miere zlepšuje kyslíkovú bilanciu toku Hron

po vyústení odľahčených odpadových vôd. Táto situácia je pomerne špecifická, aj keď je možné ju predpokladať na veľkej časti hlavne horných (horských) úsekov slovenských tokov.

7. Záver

Dosiahnuté výsledky ukazujú, že metódy matematického modelovania sú vhodným nástrojom na modelovanie kvality vôd v povrchových tokoch. Použitou metódou je možné modelovať dopad rôznych opatrení týkajúcich sa zdrojov znečistenia na kvalitu vody v recipiente. Predkladané výsledky modelovania môžu slúžiť ako námet pre aplikáciu na ďalších slovenských tokoch.

Poďakovanie

Tento príspevok vznikol za podpory vedeckej grantovej agentúry VEGA v rámci riešenej grantovej úlohy č. VEGA 2/0101/08 „Určenie závislostí disperzných javov od hlavných hydraulických parametrov tokov“ a grantovej úlohy KEGA č. 3/7452/09 „Odkanalizovanie urbanizovaných území“.

Literatúra

[1] MIŠÍK, M.,1998. Posúdenie geomorfologických a hydrodynamických parametrov koryta Hrona od Kozmáloviec po ústie. Výskumný ústav vodného hospodárstva, Bratislava.

[2] Kvalita povrchových vôd na Slovensku 1997 – 1998, 1999. SHMÚ, Bratislava.

[3] Kvalita povrchových vôd na Slovensku 1998 – 1999, 2000. SHMÚ, Bratislava.

[4] Geomorfologický atlas Hrona, 1986. VÚVH, Bratislava.

[5] SZTRUHÁR, D.– SOKÁČ, M. – MARKOVIČ, A., 2001. Výsledky hodnotenia odľahčovacích komôr na verejných stokových sieťach jednotnej sústavy. II. časť – Hodnotenie kvality odľahčených odpadových vôd. Vodohospodársky spravodajca, roč. 44, 2001, č. 6.

[6] VELÍSKOVÁ, Y., 2004. Stanovenie koeficienta priečnej disperzie na hornom úseku rieky Hron. J. Hydrol. Hydromech, vol. 52, 2004, 4, s. 342–354. ISSN 0042 790X

Kontakty na autora

1 Doc. Ing. Marek Sokáč, PhD., Katedra zdravotného a environmentálneho inžinierstva, Stavebná fakulta, Slovenská Technická Univerzita Bratislava, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, e-mail: marek.sokac@stuba.sk

TRENDOVÉ ANALÝZY VÝVOJA KVALITY ZÁVLAHOVÝCH VÔD

Ján Hríbik[1], Vladimír Píš[1]

Abstrakt

Permanentný monitoring kvality vody používanej na zavlažovanie sa začal v Slovenskej republike vykonávať od roku 1995. V priebehu tohto obdobia sledovania vznikla rozsiahla databáza nameraných údajov a zistených faktov. Je efektívne z týchto databáz získavať hodnotné závery, napr. trendovými analýzami orientovanými na rôzne aspekty. Závery sú užitočné pre nielen pre decizívnu sféru, ale aj pre sféru užívateľov a odberateľov závlahovej vody. Príspevok analyzuje vývoj kvality vôd, hodnotených z aspektov druhu vodného zdroja a jeho lokalizácie a z obsahu najsledovanejších prvkov. Prioritne sa pozornosť venuje obsahu dusičnanov a konfrontujú sa závery s často prezentovanými a niekedy nepodloženými tvrdeniami. Venuje sa pozornosť vplyvom, ktoré majú špecifiká odberov vody na zavlažovanie na celkovú metodológiu monitorovania.

Kľúčové slová : závlahová voda, monitoring kvality vody, dusičnany, štrkoviská, malé vodné nádrže

1. Úvod

Tzv. Vodný zákon, teda Zákon č. 384 / 2009 Z. z. o vodách..., účinný od 1. 11. 2009, všeobecne definuje úlohu monitoringu vôd takto: *Zisťovaním výskytu a hodnotením stavu povrchových a podzemných vôd sa zabezpečujú podklady potrebné na tvorbu koncepcií trvalo udržateľného využívania vôd a ich ochrany, na výkon štátnej vodnej správy a na poskytovanie informácií verejnosti.*

Na plnenie tejto úlohy bol vytvorený účelový nástroj – Čiastkový monitorovací systém (ČMS) VODA. Projekt ČMS sa skladá zo siedmich podsystémov a v rámci monitorovacieho podsystému č. 6 Závlahové vody je uložené rezortu pôdohospodárstva (Vodný zákon § 64, ods. b) zabezpečiť sledovanie kvality závlahových vôd. Systematické sledovania kvality závlahových vôd od roku 1995 až dodnes vytvorili dostatočnú údajovú a poznatkovú bázu, ktorej výsledky analýz majú cennú výpovednú hodnotu a sú uplatniteľné vo všetkých troch rovinách plnenej úlohy monitoringu, teda koncepčnej, decizívnej a informačnej. Práve tou informačnou úlohou, teda poskytovaním informácií verejnosti, sa napĺňajú princípy ochrany zdravia ľudí, zvierat a pôdy , pričom dôsledky jej prípadného nedostatočného uplatňovania môžu byť najzávažnejšie.

2. Materiál a metódy

Na vyhodnotenie vývojových trendov zmien vo vývoji kvality závlahovej vody boli vybraté dva aspekty posudzovania. Prvým aspektom bol výber druhu vodného zdroja a jeho lokalizácia a druhým aspektom bol výber najrozhodujúcejšieho kvalitatívneho parametra – obsahu dusičnanov. Výber malých vodných nádrží (MVN) reprezentoval zdroje povrchových vôd a výber štrkovísk charakterizoval tzv. otvorené podzemné vody. Vzhľadom na to, že celkove je obsah dusičnanov v závlahových vodách relatívne nízky boli hodnotené lokality v ktorých bol priemerný obsah dusičnanov vyšší ako 2 $mg.l^{-1}$.

Vzorky vôd boli odoberané od apríla do septembra, príp. októbra. Vo vzorkách boli stanovované základné ukazovatele 1× mesačne (pH, RL, chloridy, sírany, NEL, koliformné baktérie, fekálne koliformné baktérie, enterokoky, skúška klíčivosti, dusičnany, uhličitany, horčík, vápnik, sodík, draslík) a v čase intenzívneho využívania závlah sa vykonali minimálne 2× rozšírené rozbory (t.j. základné ukazovatele + atrazín, simazín, PCB, aniónaktívne tenzidy, kadmium, meď, zinok, ortuť, chróm, kobalt, mangán, železo, hliník).

3. Výsledky a diskusia

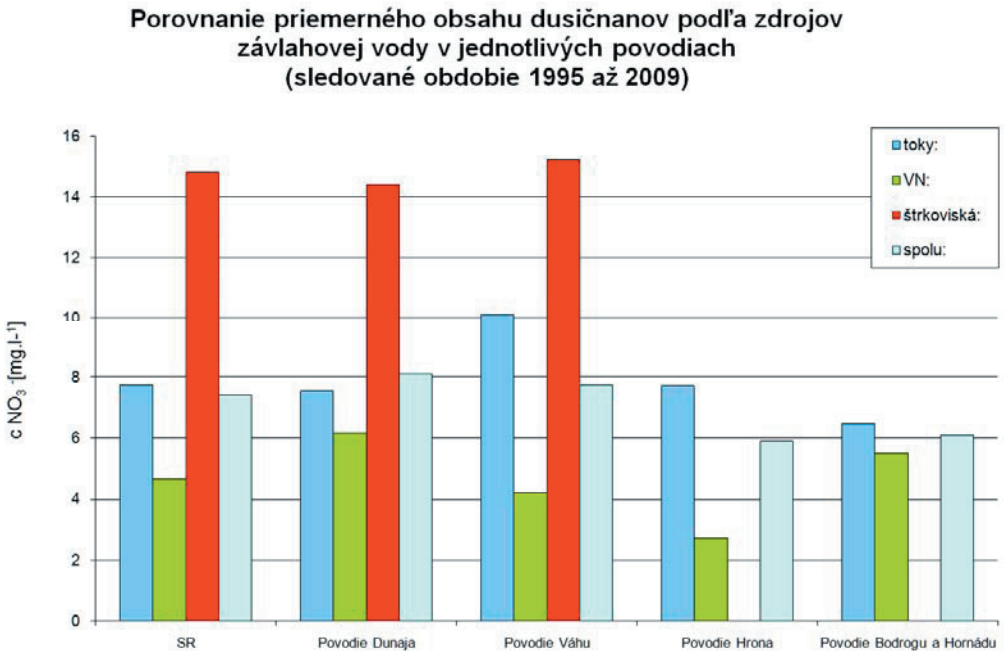
Pre porovnávaciu bázu sú v začiatku uvedené aj všeobecné vývojové trendy podľa povodí riek a podľa druhu vodných zdrojov v intenzívnych pestovateľských a teda aj závlahových oblastiach.

Tab. 1: Obsah dusičnanov (NO_3^-) v závlahových vodách v $mg.l^{-1}$ v období 1995-2009

	Počet vzoriek	Max.	Min.	Priemer
Povodie Dunaja	2551	85,3	<1	8,00
Povodie Váhu	1571	141	<1	7,80
Povodie Hrona	416	37,0	<1	5,91
Povodie Bodrogu a Hornádu	1204	90,4	<1	6,10

Tab. 2: Obsah dusičnanov (NO_3^- $mg.l^{-1}$) vo vodných nádržiach, štrkoviskách a tokoch SR v období 1995-2009

Zdroje ZV	Počet vzoriek	Max.	Min.	Priemer
Vodné nádrže	1637	141	<1	4,39
Štrkoviská	483	107	<1	14,5
Toky	3544	90,4	<1	7,63



Obr. 1: Porovnanie priemerného obsahu dusičnanov podľa zdrojov závlahovej vody v jednotlivých povodiach

Väčšina vybraných lokalít patrí do oblastí s intenzívnym využívaním poľnohospodárskej pôdy, takže je vysoká pravdepodobnosť, že aj kvalita vody je ovplyvnená touto činnosťou. V tabuľkách č. 1 a 2 sú uvedené základné štatistické údaje obsahu dusičnanov vo vybraných vodných nádržiach a štrkoviskách.

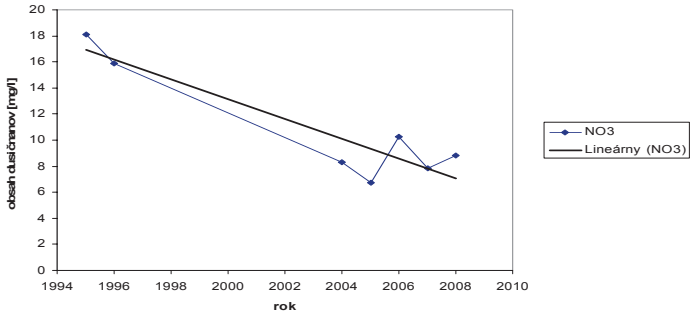
Tab. 3: Základné štatistické údaje obsahu dusičnanov – malé vodné nádrže

Lokalita	Počet meraní	Obsah dusičnanov [mg.l^{-1}]		
		Min.	Max.	Priemer
Blatné	39	<1	23,8	10,9
Budmerice	31	<1	17,7	5,19
Lazany	59	<1	18,4	2,71

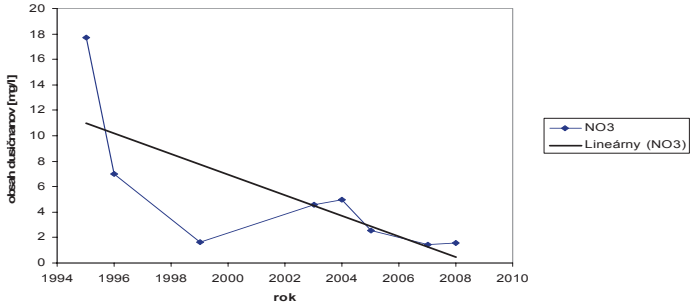
Tab. 4: Základné štatistické údaje obsahu dusičnanov – štrkoviská

Lokalita	Počet meraní	Obsah dusičnanov [mg.l^{-1}]		
		Min.	Max.	Priemer
Bernolákovo	39	14,1	78,6	46,2
Mliečno	35	<1	12,4	4,84
Šamorín	28	<1	85,3	10,2

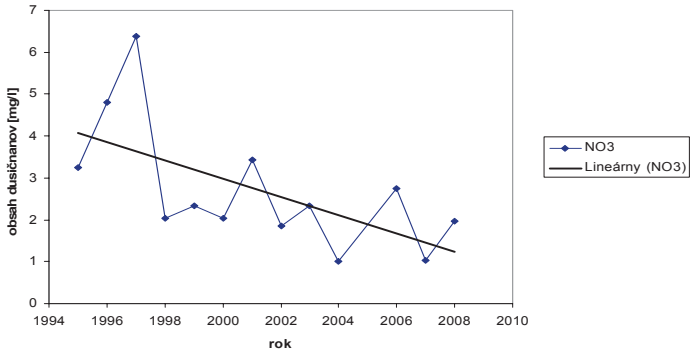
Z údajov vyplýva, že obsah dusičnanov je pomerne variabilný avšak vidieť, že v štrkoviskách je ich obsah výrazne vyšší. Ako sa menil obsah dusičnanov v priebehu celého sledovaného obdobia bolo hodnotené pomocou trendovej analýzy lineárnym trendom. Na obrázkoch č. 2 až 4 sú hodnotené vodné nádrže a na obrázkoch 5 – 7 štrkoviská.



Obr. 2: Trend vývoja priemerného obsahu dusičnanov vo vodnej nádrži Blatné



Obr. 3: Trend vývoja priemerného obsahu dusičnanov vo vodnej nádrži Budmerice



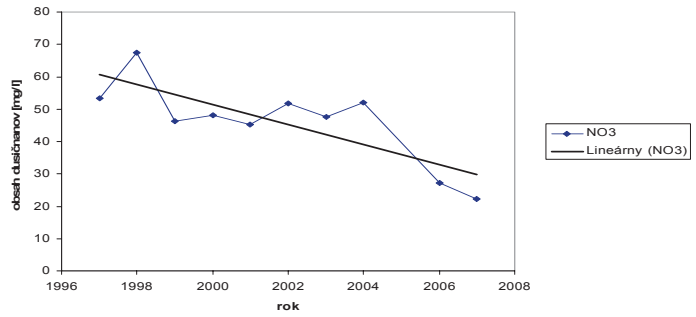
Obr. 4: Trend vývoja priemerného obsahu dusičnanov vo vodnej nádrži Lazany

Z hodnotenia trendu vývoja priemerného obsahu dusičnanov vody z vodných nádrží vyplýva, že vo všetkých bol zhodne v priebehu rokov 1995 – 2008 zaznamenaný pokles obsahu dusičnanov.

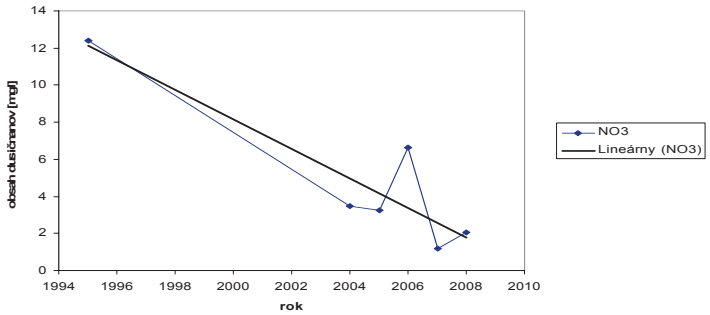
Obsah dusičnanov vo VN Blatné (obrázok 1) sa v priebehu sledovaného obdobia pohyboval v intervale od nemerateľného množstva (<1 mg.l^{-1}) až po hodnotu 23,8 mg.l^{-1} (Tab. 1). Pokles dusičnanov v sledovanom období je pomerne výrazný.

Vo vodnej nádrži Budmerice (Obr. 2) bol obsah dusičnanov v intervale od nemerateľného množstva až po 17,7 mg.l^{-1}. Silný pokles bol zaznamenaný hlavne v prvých troch rokoch sledovania potom sa pokles zmiernil.

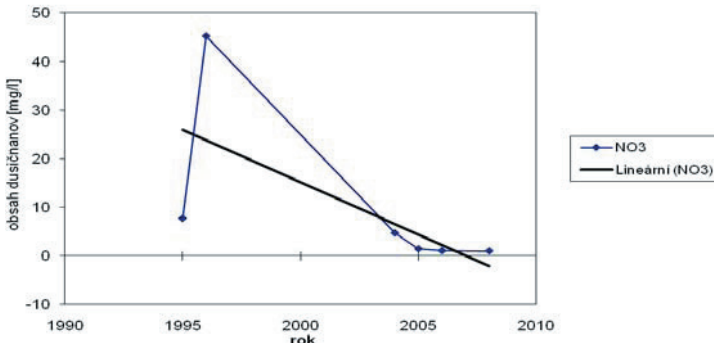
Vo vodnej nádrži Lazany bol nameraný v priemere nízky obsah dusičnanov (2,71 mg.l^{-1}). Celkovo sa ich obsah pohyboval v intervale od nemerateľného množstva po 18,4 mg.l^{-1}. Obsah dusičnanov bol pomerne variabilný.



Obr. 5: Trend vývoja obsahu dusičnanov v štrkovisku Bernolákovo



Obr. 6: Trend vývoja obsahu dusičnanov v štrkovisku Mliečno



Obr. 7: Trend vývoja obsahu dusičnanov v štrkovisku Šamorín

Štrkoviská sa od vodných nádrží odlišujú najmä vyšším obsahom dusičnanov. V sledovaných lokalitách bol vo vodných nádržiach priemerný obsah dusičnanov 5,70 mg.l^{-1} a v štrkoviskách 21,5 mg.l^{-1}. V štrkovisku Bernolákovo bol nameraný najvyšší priemerný obsah dusičnanov (46,2 mg.l^{-1}). Obsah dusičnanov sa pohyboval v intervale od 14,1 mg.l^{-1}po 78,6 mg.l^{-1}. V tomto štrkovisku bol zaznamenaný najvyšší pokles dusičnanov (Obr. 5).

Najnižší priemerný obsah dusičnanov zo štrkovísk bol zaznamenaný v Mliečne. Pohyboval sa v intervale od nemerateľného množstva po 12,4 mg.l^{-1} s priemernou hodnotou 4,84 mg.l^{-1} (Obr. 6). Trend vývoja obsahu dusičnanov bol výrazne klesajúci.

Podobne ako v predchádzajúcom štrkovisku Mliečno aj v štrkovisku Šamorín bol zaznamenaný výrazne klesajúci trend obsahu dusičnanov. Priemerná hodnota bola 10,2 mg.l^{-1} s maximom 85,3 (Obr. 7).

Všetky hodnotené štrkoviská a vodné nádrže sa nachádzajú v oblastiach s intenzívnym poľnohospodárstvom a aj toky, na ktorých sú tieto nádrže vybudované takýmito oblasťami pretekajú. Koncentrácie dusičnanov vo vodných nádržiach nie sú vo všeobecnosti vysoké. Okrem jediného prípadu, keď bol nameraný obsah dusičnanov 54,8 mg.l^{-1} (3. 9.1997) nebol ani raz ich obsah vyšší ako 25 mg.l^{-1}. V štrkoviskách je rozptyl obsahu dusičnanov väčší s maximom až 107,4 mg.l^{-1}.

4. Závery

Obsah dusičnanov v povrchových vodách, odoberaných a využívaných na závlahové účely, bol vyhodnotený za päťnásťročné obdobie rokov 1995-2009. Spolu bolo analyzovaných 5742 vzoriek vody. Rozsiahlu údajovú databázu možno hodnotiť aj z pohľadu záverov zo všeobecných údajov a aj z pohľadov vybraných aspektov. Tu sú niektoré hodné povšimnutia.

- Priemerné hodnoty obsahu dusičnanov, podľa povodí kolíšu od 5,91 do 8,00 mg.l^{-1}, čo sú veľmi pozoruhodné údaje, pretože sú v protiklade s často prezentovanými hodnoteniami vplyvu poľnohospodárstva na kvalitu vôd. Napr. pri hodnotení stavu vôd Európska únia konštatuje (Oznámenie komisie Európskemu parlamentu a Rade z 22. 3. 2007), že je horší ako sa očakávalo a súčasné percento vodných útvarov, spĺňajúcich cieľ Rámcovej smernice o vode je nízke. Okrem iných konštatovaní pretrvávajúcim problémom vraj zostáva difúzne znečistenie podzemných vôd dusičnanmi z poľnohospodárskych aktivít.
- Ďalej z výsledkov vyplýva, že priemerný obsah dusičnanov v štrkoviskách je vyšší ako vo vodných nádržiach. Tým sa dá vysvetliť aj to, že celkovo najnižší obsah dusičnanov bol nameraný v povodí Hrona, resp. Bodrogu a Hornádu, pretože v tomto povodí nebol ani jeden monitorovaný zdroj závlahovej vody zo štrkoviska (Obr.1)
- Posudzované výsledky ďalej poukazujú na skutočnosť, že závlahové vody, či už vo vodných nádržiach alebo v štrkoviskách, sú oveľa menej znečistené dusičnanmi ako sa často vo verejnosti interpretuje. Avšak vidieť, že štrkoviská ako otvorené podzemné zdroje závlahových vôd, sú potenciálne väčším zdrojom znečistenia dusičnanmi ako povrchové vody. Treba dodať , že prevažná väčšina údajov sa pohybuje pod 25 mg.l^{-1} dusičnanov, čo je mimoriadne uspokojivý údaj. Ďalej je zrejmé, že v porovnaní s vodnými tokmi majú VN nižší obsah dusičnanov. Je známe, že samočistiacou schopnosťou získava voda vo vodných nádržiach často lepšiu kvalitu ako voda riečna.
- Treba však podotknúť, že pri nekvalitnom a nekvalifikovanom aplikovaní závlahovej vody (vysoké jednorazové závlahové dávky), najmä na plochách s vyššou hladinou podzemnej vody, môže dôjsť k vyplavovaniu dusičnanov z vody a z pôdy. Ale takéto prípady sú extrémne zriedkavé , ak zvážime, že proti tomuto možnému javu stoja ekonomické a ekologické snahy vcelku kvalifikovaného manažmentu odberateľov závlahovej vody o aplikáciu takých postupov, ktoré šetria vodu a teda aj náklady a nakoniec aj ochraňujú pôdu. Takými sú napr. aplikácia technológií mikrozávlah a ich prvkov alebo aplikácia presného závlahového hospodárstva, kde sa dosahujú výrazné vodoúsporné a pôdoochranné efekty.

- Špecifikom monitoringu závlahových vôd je neustále prispôsobovanie sa objemovej, časovej a priestorovej premenlivosti odberov vody na zavlažovanie. Od toho sa odvíja variabilita výberu monitorovacích bodov, frekvencia odberov a analýz. Interpretácia výsledkov merania je sťažená vysokou sezónnou premenlivosťou kvality vody. Potrebu zavlažovania primárne určuje aktuálna dynamika vývoja meteorologických prvkov a definovanie vlahového deficitu. O spotrebovaných objemoch však sekundárne rozhoduje manažment agropodnikateľských subjektov. Tu do rozhodovania o zavlažovaní alebo nezavlažovaní vstupujú pestovateľské, technicko-technologické a najmä ekonomické aspekty. Výsledkom pôsobenia všetkých faktorov sú ťažko predvídateľné skutočné objemy odobranej vody , aktuálne meniaca sa lokalizácia a počet odberných miest a stanovovanie potrebných analýz, čo všetko spolu znásobuje nároky na operatívnosť riadenia a priebehu monitoringu.
- Závažnosť monitoringu je aj v napĺňaní úlohy verejnej informovanosti, z pohľadu najvyššieho princípu a to ochrany zdravia ľudí, paralelne aj zvierat a pôdy , pričom dôsledky nedostatočného uplatňovania informovanosti môžu byť najzávažnejšie. Pod zníženie kvality vôd sa pri analýze trendov podpisujú zvýšené hodnoty pH, rozpustných látok a mikrobiálne znečistenie, ktoré je súčasne najčastejšou a najrizikovejšou príčinou. Ide najmä o prieniky fekálnych kolimorfných baktéií do vôd určených na zavlažovanie
- Kvantifikácia dlhodobých trendov poklesu obsahu dusičnanov potvrdzuje pozitívne zistenia smerovania trendov. Napríklad pri prezentovaných výsledkoch zo štrkovísk sú evidované poklesy obsahu dusičnanov od 50 % do 95 % v porovnaní so stavom na začiatku monitoringu. Pri malých vodných nádržiach poklesli obsahy dusičnanov 55 % až 90 %.

Kontakty na autora

1 Výskumný ústav pôdoznalectva a ochrany pôdy, Bratislava,
e-mail: j.hribik@vupop.sk, v.pis@vupop.sk

OPTIMALIZÁCIA PROTIPOVODŇOVEJ OCHRANY

Martin Orfánus[1], Andrej Šoltész[1], Peter Šulek[1], Ján Rumann[1]

Abstrakt

Práca "Optimalizácia protipovodňovej ochrany" sa pokúša ponúknuť nový pohľad na protipovodňovú ochranu oblastí, ktoré to potrebujú. Mala by pokryť relatívne rozsiahlu škálu procesov a javov, ktoré vznikajú počas povodne a stanoviť optimálne opatrenia, alebo opatrenia blízke optimálnym. Keďže predpokladom výstupu by malo byť aj priestorové rozmiestnenie hydrotechnických objektov v teréne a ich základná geometria, jedným zo vstupov je digitálny model terénu.

V štádiu pre-processingu bola určená počiatočná podmienka stavu povodia a vytvorený digitálny model terénu z mapových podkladov. V nasledujúcom kroku bol zostavený hydrodynamický model s celkovou geometriou oblasti. Po prepočte hladinového režimu modelom, boli parametre podrobené regresnej analýze, aby sa vylúčili tie, ktoré proces ovplyvňujú len málo alebo vôbec. Tento krok je dôležitý predovšetkým s pohľadu skrátenia času optimalizácie. V štádiu processingu prostredníctvom možností numerického modelu exportovať výsledky respektíve prepojiť výstupy programu s inými aplikáciami je výstup podrobený optimalizačnému procesu, ktorý parametre vyhodnotí a zoptimalizuje v rámci stanovených limitov. Takto zmenené parametre vráti späť do hydrodynamického modelu a nanovo prepočíta hladinový režim pre rovnaké okrajové podmienky. Výberom najlepšej stratégie s množstva potenciálnych alternatív v tejto oblasti a oblasti plánovania je komplexný multikriteriálny proces výberu. Ideálnym sa javí využitie optimalizačných algoritmov so skupiny evolučných, čo umožňuje, aby proces rozhodovania bol viac efektívny. V súvislosti s adaptáciou viackriteriálneho rozhodovania vo vodnom hospodárstve je táto metóda relevantným a účinným optimalizačným prostriedkom s efektívnym prepojením na GIS systémy.

Kľúčové slová: optimalizácia, hydrodynamický model, digitálny model terénu

1. Úvod

Pri tvorbe metodiky optimalizácie protipovodňových opatrení sa vychádzalo zo základnej filozofie celej problematiky a to, že návrhový prietok v profile na úrovni hornej hranice ochraňovanej oblasti nesmie byť väčší ako kapacitný prietok profilu. Na takýto prietok má vplyv celá škála procesov prebiehajúcich v povodí či už na úrovni hydrauliky alebo hydrológie. Parametre vstupujúce do procesu a ich vplyv na skúmaný prietok sa pokúsime priblížiť v ďalších kapitolách podrobnejšie rovnako ako software použitý pri analýzach a optimalizácii.

Vo všeobecnosti sa dá povedať, že optimalizácia bude spočívať v zmenách parametrov vplývajúcich na proces v rámci stanovených limitov a nastavení týchto zmien tak, aby sme v celkovom efekte znížili prietok na požadovaný. Metodika bude rozdelená do dvoch častí s pohľadu miery zásahu opatrení do prirodzeného charakteru krajiny.

2. Metodický postup

V štádiu pre-processingu sa zameriame predovšetkým na určene začiatočnej podmienky stavu povodia, teda hydrologickej charakteristiky popisujúcej stav povodia, vytvoríme zo zhromaždených mapových podkladov digitálny model terénu respektíve model GIS. V nasledujúcom kroku zostavíme hydrodynamický model s celkovou geometriou oblasti. Hydrologické vstupy akými sú napríklad laterálne prítoky a ich vývoj v čase získame zo zrážkovo odtokového modelu.

Po kalibrácii modelu prepočítame návrhovú povodňovú vlnu a v stanovenom priečnom profile zistíme vypočítaný prietok Qn a porovnáme ho s kapacitným prietokom profilu Qkap. Rozdiel medzi týmito prietokmi ΔQ = Qn - Qkap bude po derivácii podľa času objem vody, ktorý chceme v krajine zadržať.

Po prepočte hladinového režimu modelom, podrobíme parametre, ktoré sa zúčastňujú na procese, regresnej analýze aby sme vylúčili tie, ktoré proces ovplyvňujú len málo alebo vôbec. Tento krok je dôležitý predovšetkým s pohľadu skrátenia času optimalizácie. Regresnej analýze sa budeme venovať v ďalších kapitolách podrobne.

V štádiu processingu prostredníctvom možností HEC-RASu exportovať výsledky respektíve prepojiť výstupy programu s inými aplikáciami podrobíme výstup optimalizačnému procesu, ktorý parametre vyhodnotí a zoptimalizuje v rámci stanovených limitov. Takto zmenené parametre vrátime späť do hydrodynamického modelu a nanovo prepočítame hladinový režim pre rovnaké okrajové podmienky. Tento proces nazvime optimalizačný cyklus.

Cyklus bude prebiehať dovtedy pokiaľ sa konvergencia výstupov nebude približovať k požadovanému prietoku. V prípade, že konvergencia nedosiahne požadované výsledky pristúpime k druhému stupňu procesu a to k invazívnym opatreniam.

3. Prostredie GIS a numerické modely

Správnym skombinovaním respektíve prepojením Geografických informačných systémov a numerických modelov budeme schopný analyzovať vplyvy jednotlivých parametrov na celkový výsledok optimalizácie. Pre tieto účely sme sa rozhodli použiť softvéry ArcGIS 9.3 od spoločnosti ESRI a Hec–Ras od U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center´s River Analysis System.

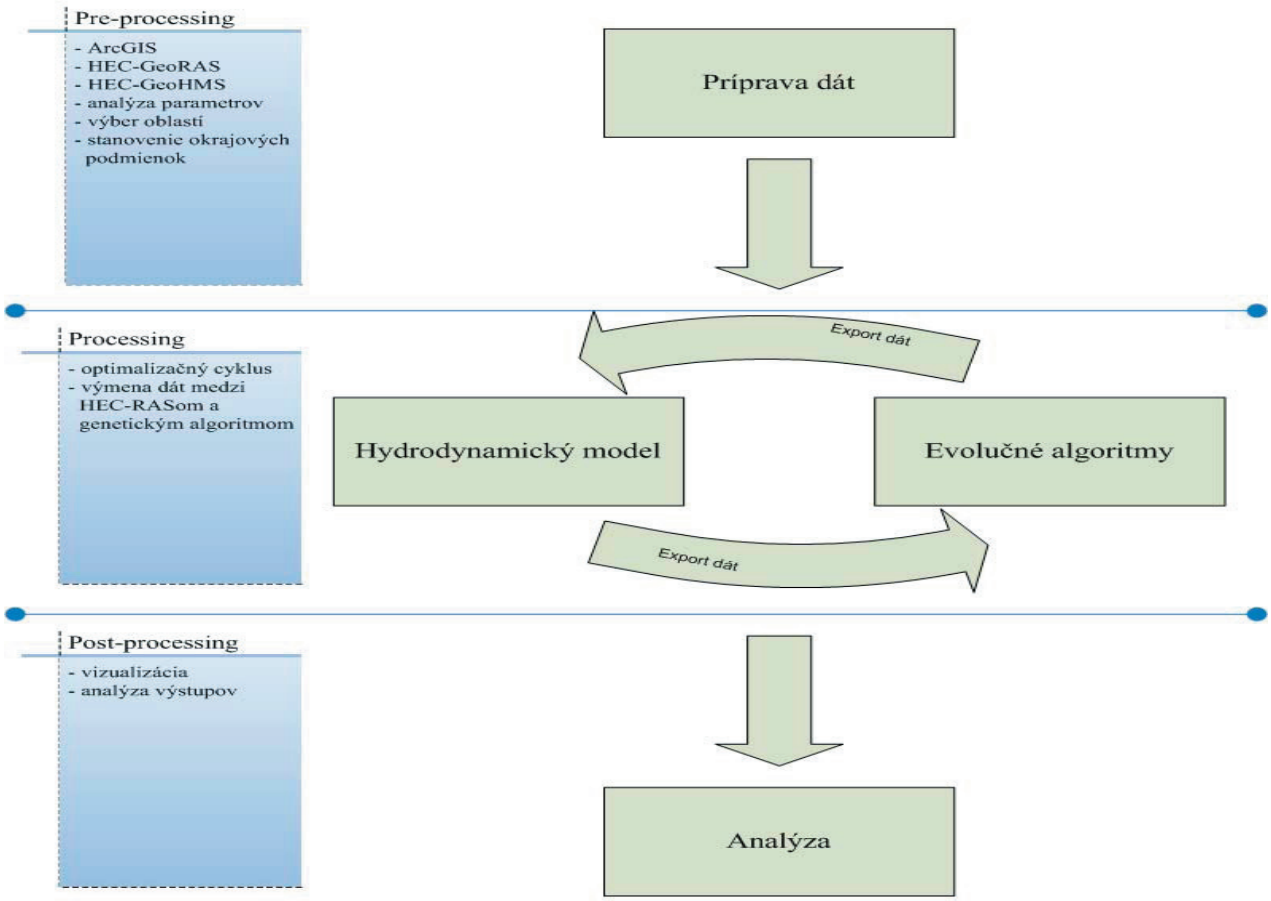
3.1 ArcGIS 9.3

Spoločnosť ESRI (Environmental Systems Research Institute) založili v roku 1969 Jack a Laura Dangermond ako inžiniersku a konzultačnú firmu pre krajinné plánovanie. Aplikácia ArcGIS ponúka niekoľko nástrojov na spracovanie, editovanie analýzu širokej škály mapových podkladov. ArcInfo je funkčne najsilnejším členom rodiny produktov ArcGIS Desktop a GIS najvyššej kategórie so všetkým, čo k nemu patrí. ArcInfo obsahuje všetky funkcie ArcEditora a ArcView a okrem nich ďalších asi 100 nástrojov pre geoprocesing, vrátane všetkých nástrojov pre dátový formát coverage. ArcGIS 3D Analyst je rozšírenie pre ArcGIS Desktop (ArcInfo, ArcEditor a ArcView) umožňujúce efektívnu vizualizáciu a analýzu povrchov. Umožňuje umiestniť rôzne rastrové dáta(ortofotosnímky, mapy využitia územia atď.), alebo vektorové dáta na povrch a vytvoriť scénu, ktorú je možné pomocou nástrojov na navigáciu dynamicky prehliadať. Súčasťou rozšírenia je aplikácia ArcScene určená pre tvorbu 3D vizualizácií a analýzu dát.[1]

4. Prepojenie GIS prostredia s numerickými modelmi

HEC-GeoRAS je nadstavba inštitútu „Hydrologic Engineering Center (HEC)“ pre ArcGIS aplikácie vyvinutými spoločnosťou „Enviromental Systems Research Institute, Inc. (ESRI)“so sídlom v Redlands, California. [1]

HEC-GeoRAS je štruktúra špecializovaných nástrojov slúžiacich na pre-processing a post-processing modelu pracujúcich pod prostredím ArcGIS, ktorý musí mať niektoré ďalšie rozširujúce nadstavby ako napríklad 3D Analysys a Spatial Analysys. Ako processingový hydrodynamický model je využívaný HEC-RAS [2].



Obr.1: Štruktúra metodiky

Aplikácia umožňuje prípravu predovšetkým geometrie modelu ako sú: priečne profily, brehové línie, drsnosti, osi korýt a hydraulických konštrukcií ako sú: mosty, dnové priepusty, hate, prehrádzky.

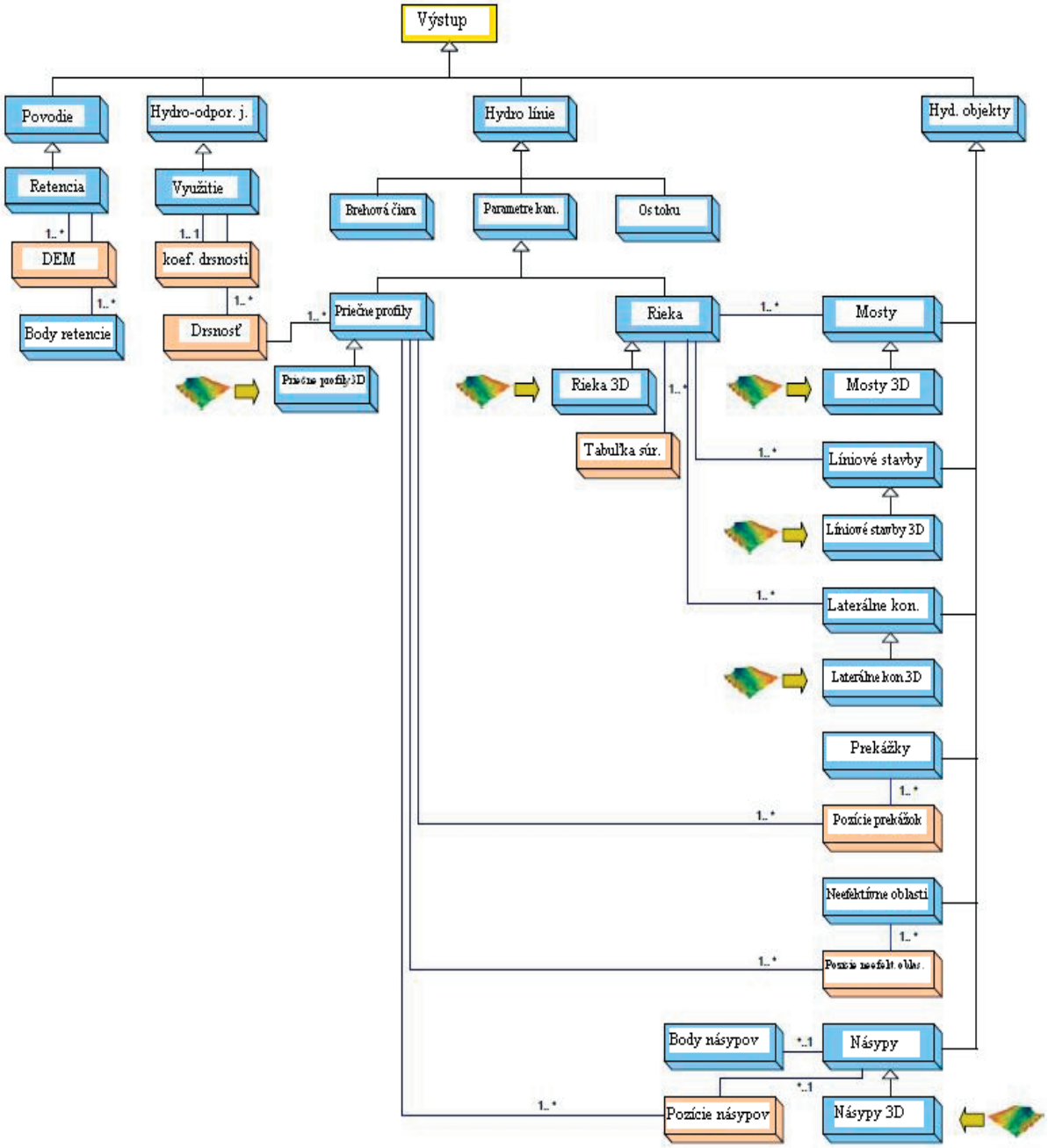
Výstupy hydrodynamického modelu HEC-RAS môžu byť exportované naspäť do ArcGIS prostredia, kde pomocou nadstavby HEC-GeoRAS dokážeme prezentovať výsledky.

5. Optimalizácia

Genetické algoritmy patria do triedy evolučných algoritmov, ktoré okrem nich zahrnujú aj evolučné programovanie, evolučnú stratégiu a genetické programovanie. Sú to vyhľadávacie algoritmy, založené na mechanizme prirodzeného výberu a princípoch genetiky. Ich veľkou výhodou je pomerná jednoduchosť. Ideovým vzorom pre genetické algoritmy boli princípy vývoja, ktoré sa uplatňujú v prírode. Genetický algoritmus definuje operátorovi kríženie, mutáciu a reprodukciu. Operátor kríženie znamená vytváranie nových jedincov podľa nasledujúceho pravidla: Z populácie vyberáme náhodné páry a náhodne zvolíme pozíciu k. Do prvého potomka skopírujeme gény 1 až k prvého rodiča a gény k + 1 až n druhého rodiča, kde n je počet génov, a do druhého potomka kopírujeme gény opačne [3].

6. Metodika

Záujmová oblasť sa nachádza na východe Slovenska v Prešovskom kraji, okres Bardejov s množstvom menších sídelných útvarov sústredených v bezprostrednej blízkosti tokov Sveržovka a Kamenec. Po povodniach v roku 2002 sa pristúpilo k úpravám toku najmä v intravilánoch obcí a výstavbe dvoch poldrov nad obcami Vyšný Tvarožec a Frička.

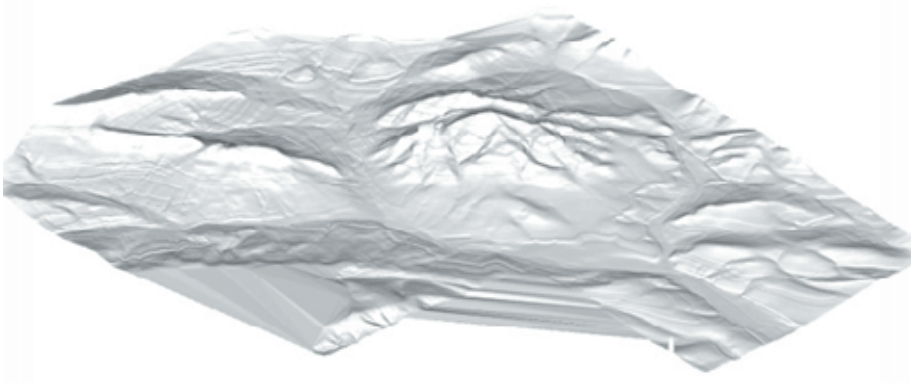


Obr. 2: Štruktúra nadstavby HEC-GeoRAS [4]

V prostredí ArcGIS sme všetky mapové podklady spracovali nasledovne. Importom ASCII textového súboru s vlastným špecifickým syntaxom sme načítali body so súradnicami X, Y, Z. Typ súradnicového systému ostal zachovaný a to v smere X-Y systém S-JTSK a v smere Z systém Balt po vyrovnaní. Zo siete načítaných bodov sme pomocou rozšírenia „3D analyst“ vygenerovali terén v podobe nepravidelnej trojuholníkovej siete TIN (Triangulated Irregular Network). Preložením ortofoto mapy cez digitálny model terénu sme získali relatívne presnú predstavu o polohách sídelných útvarov, charaktere a rozmiestnení vegetácie a mnohých ďalších.

Príprava vstupov prebiehala v prostredí ArcGIS pomocou nadstavby HEC-GeoRAS , ktorá nám umožňuje pripraviť zodpovedajúce modelu a vo veľkej miere vylučuje možnosť chyby pri prenášaní dát s jednej aplikácie do druhej. V tejto fáze sme sa rozhodli vybrať len časť povodia, ktorá by reprezentovala možnosti prípadne limity tohto postupu.

Všetky prvky boli zostavené ako nové hladiny prostredie ArcGIS pomocou polyline a polygónov priamo na mape. Následne automatizovanými nástrojmi HEC-GeoRASu prevedené do formy potrebnej na výpočet priradením staničenia priestorového rozmiestnenia a orientácie vzhľadom na tok. Po prevode týchto dát do .xml formátu sme ich mohli otvoriť priamo v prostredí HEC-RAS a upraviť ak to bolo potrebné.



Obr. 3: Aplikácia CAD, digitálny model terénu



Obr. 4: Aplikácia ArcGIS 9.3, plastický model terénu

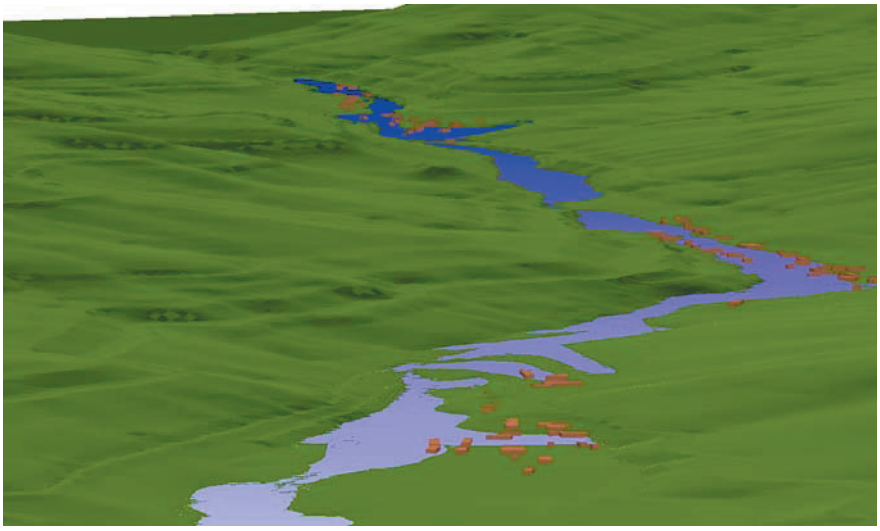
Výpočet v tomto kroku prebehol pre ustálené prúdenie, ktoré nie je také náročné na nastavenie modelu , ale v tomto štádiu postačujúce na ujasnenie možností programu. Výstupom pre povodňovú vlnu Q = 150 $m^3.s^{-1}$ bola záplavová čiara, mapa hĺbok, mapa rýchlostí v prostredí ArcGIS a samozrejme klasické výstupy v programe HEC-RAS ako sú napríklad pozdĺžny sklon s priebehom hladiny, priečne profily s priebehom hladiny, tabuľkové výstupy. Využitie tohto programu má svoje výhody predovšetkým pri prezentácií výsledkov, kde ponúka širokú škálu zobrazení či už v dvojrozmernom alebo trojrozmernom zobrazení.

7. Záver

Práca “Optimalizácia protipovodňovej ochrany” načrtáva metodiku optimalizácie vo vodnom hospodárstve. Výberom najlepšej stratégie s množstva potenciálnych alternatív v tejto oblasti a oblasti plánovania je komplexný multikriteriálny proces výberu. Môže zahŕňať protichodné kvantitatívne a kvalitatívne kritéria. Najideálnejším sa javí využitie optimalizačných algoritmov so skupiny evolučných čo umožňuje aby proces rozhodovania bol viac transparentný, racionálny a efektívny. Konvenčné metódy boli vo vodnom hospodárstve využívané v minulosti. V súvislosti s adaptáciou viackriteriálného rozhodovania vo vodnom hospodárstve je táto metóda relevantným a účinným optimalizačným prostriedkom. S efektívnym prepojením na GIS systémy a ďalšie podporné softvéry sa tento nástroj môže stať účinným v súvislosti s protipovodňovou ochranou.



Obr. 5: Mapa hĺbok



Obr. 6: Mapy záplavových čiar v trojrozmernom zobrazení

Literatúra

[1] ESRI (Environmental Systems Research Institute) – ArcGIS 9.3. Manual.

[2] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER´S RIVER ANALYSIS SYSTEM. HEC-RAS Manual.

[3] SEKAJ, I., 2005. Evolučné výpočty a ich využitie v praxi. IRIS, Bratislava.

[4] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER´S RIVER ANALYSIS SYSTEM. http://www.hec.usace.army.mil/SOFTWARE/hec-ras/hecras-download.html

Kontakty na autora

1 Katedra hydrotechniky, Stavebná fakulta, STU v Bratislave, e-mail: martin.orfanus@stuba.sk, andrej.soltesz@stuba.sk, peter.sulek@stuba.sk, jan.rumann@stuba.sk

MODELOVÉ HODNOTENIE ÚČINNOSTI POLDROV A REVITALIZÁCIE INUNDAČNÉHO ÚZEMIA

Ján Szolgay[1], Michaela Danáčová[1], Peter Šúrek[1], Jana Pastorová[1]

Abstrakt

Jedným z aktuálnych spôsobov riešenia protipovodňovej ochrany na aluviálnych tokoch je aj výstavba bočných poldrov (suché retenčné nádrže) a otváranie zahradzovaných inundačných území tokov. Hodnotenie účinnosti týchto opatrení sa stalo predmetom odbornej diskusie aj u nás. Cieľom tohto príspevku je príspevku je zhrnúť výsledky našich predošlých štúdií [pozri napr. 1, 2, 4, 6, 7], a ukázať možnosti ako hodnotiť efektívnosť takýchto alternatívnych spôsobov protipovodňovej ochrany v dolných častiach riek. Potenciál navrhovaného spôsobu hodnotenia ich účinnosti ilustrujeme na príklade riešenia koncepcie protipovodňovej ochrany územia dolnej Moravy. Pre tento účel boli navrhnuté jednoduché koncepčné hydrologické modely sústavy koryta toku, jeho inundácií a plánovaných poldrov. V rámci riešenia bola vykonaná simulácia transformácie radu historických povodňových systémom poldrov a dvomi modelmi koryta toku zodpovedajúcim prírodnému (historickému) a upravenému stavu koryta. Získali sme tak štatisticky reprezentatívny súbor transformovaných povodňových vĺn, na základe ktorých bola vyhodnotená účinnosť oboch opatrení.

Kľúčové slová: polder, povodňový režim, koncepčný hydrologický model, postupová doba

1. Úvod

Protipovodňová ochrana je stálou prioritnou úlohou vodohospodárov a dnes je snahou zintenzívniť hlavne prevenciu. Výskyt povodní vyvoláva nielen obavy v spoločnosti zo straty majetku či ľudských životov, ale i mnohé diskusie ohľadom voľby koncepcie riešenia protipovodňovej ochrany. Na aluviálnych tokoch môže byť riešením zvyšovanie retenčnej schopnosti inundačných území alebo technické opatrenia, prípadne kombinácia týchto dvoch prístupov. Cieľom tohto príspevku je zhrnúť výsledky našich predošlých štúdií [pozri napr. 1, 2, 4, 6, 7] a na základe analýzy zmien povodňového režimu veľkých vôd, ukázať ako sa dá hodnotiť efektívnosť takýchto alternatívnych spôsobov protipovodňovej ochrany v dolných častiach riek pomocou jednoduchých koncepčných modelov.

Príklad takéhoto hodnotenia uvedieme na prípadovej štúdii na dolnej Morave. Prietokové pomery na dolnej Morave sa v minulom storočí značne zmenili v súvislosti s úpravou koryta na tomto území. Dôsledkom týchto zásahov bolo aj zrýchlenie postupu povodňových vĺn riečnymi úsekmi a zníženie transformačného účinku koryta a inundačných území. Následkom čoho sa zvýšilo riziko a frekvencia výskytu extrémnych povodní v poslednom období (napr. leto 1997, leto 2002, jar 2006, leto 2010), čo vzbudilo pozornosť vodohospodárov a verejnosti ako u nás, tak aj v susedných štátoch. Revitalizáciou koryta toku resp. výstavbou bočných poldrov by sa dala časť jeho transformačnej schopnosti prinavrátiť do stavu blízkeho pôvodnému.

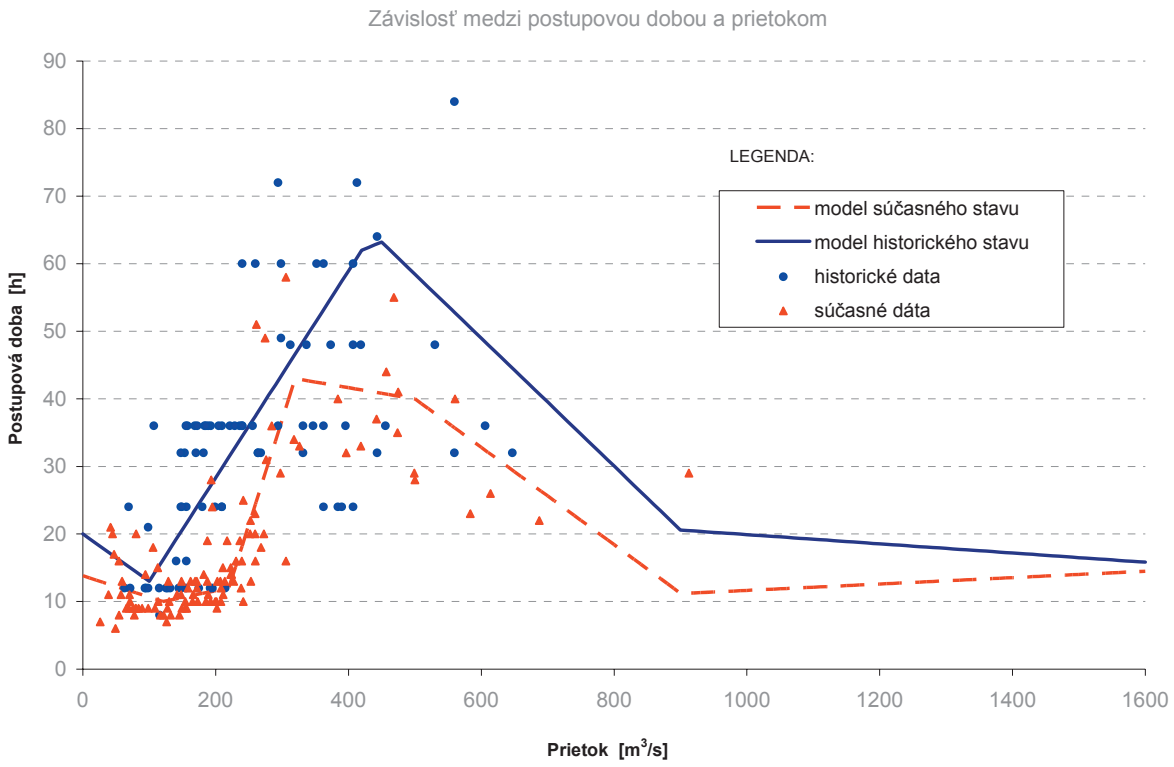
2. Zmeny povodňového režimu na dolnom úseku Moravy

Činnosť vodohospodárov na dolnej Morave v minulom storočí prispela ku zmene povodňového režimu. Pri úpravách koryta a zmenách trasy toku došlo taktiež ku zmene celkovej retenčnej kapacity inundačného územia. Tieto zmeny ovplyvnili transformačný účinok koryta a inundačných území a zrýchlil sa tak postup povodňových vĺn. Toto zrýchlenie tu dokumentujeme analýzou postupových dôb vrcholov povodňových vĺn z obdobia pred rozsiahlymi úpravami koryta a po nich, podrobnejší popis je uvedený napr. v [7].

Podkladové údaje pre štúdiu [7] boli získané z archívov SHMÚ, VITUKI Budapešť a Katedry vodného hospodárstva Technickej univerzity vo Viedni. Boli získané všetky dostupné denné a hodinové prietoky na všetkých vodomerných staniciach na toku Morava z obdobia 1923 až 2002, denné a dvanásťhodinové vodné stavy z obdobia 1901-1916, súčasné merné krivky prietokov a historické merné krivky z obdobia 1886-1920, údaje o hydrometrovaniach na slovenskom úseku Moravy z obdobia okolo roku 1900, hydrologické podklady pre projektovanie úpravy koryta z prelomu predminulého storočia vrátane pozdĺžnych profilov viacerých hladín a záplavových čiar. Ďalej boli k dispozícii kulminačné prietoky 80tich maximálnych ročných prietokov z minulého storočia.

Po prvotnej analýze zmien inundačného územia a dostupnosti hydrologických dát, bol pre riešenie úlohy vybraný úsek medzi vodomernými stanicami Moravský Svätý Ján (5040) – Záhorská Ves (5085). Dĺžka toku medzi stanicami je 34,76 km, sklon toku je 0,2 ‰. Iné úseky museli byť vylúčené v dôsledku krátkeho resp. prerušovaného časového radu hydrologických údajov ako i pre nedostatok údajov (podkladov) z historického obdobia.

Na základe výberu vodomerných staníc došlo k ďalšiemu spracovaniu údajov, ktoré boli použité pre hodnotenie povodňového režimu. Boli overené a rekonštruované merné krivky prietokov a vytvorený časový rad hodinových prietokov vo vodomernej stanici Moravský Svätý Ján z obdobia 1922-1989 (podrobnejší popis rekonštrukcie dát viď v [2]).



Obr. 1: Závislosť medzi postupovou dobou a kulminačným prietokom získaná zo spracovania prietokových vĺn z období 1901 – 1916 a 1992 – 2002 a po častiach lineárne závislosti použité na modelovania koryta v multilineárnom modeli v [7].

Vzťah postupovej doby od vrcholového prietoku povodňových vĺn bol zisťovaný empiricky pre súčasné obdobie i obdobie spred rozsiahlych úprav koryta (ďalej historické obdobie) viz Obr. 1. Porovnanie závislostí medzi postupovou dobou a kulminačným prietokom pre stavy koryta pred a po jeho úprave dobre ilustruje charakter zmien povodňového režimu (zrýchlenie postupu povodní) ale aj fakt, že interakcia akumulačnej funkcie inundačného

územia a povodňovej vlny je hydraulicky zložitý jav. Miera transformácie povodní s rovnakým kulminačným prietokom je silne premenlivá a závisí ako od sezóny a stavu inundačného územia tak aj od tvaru povodňovej vlny.

3. Hodnotenie účinnosti protipovodňových opatrení

3.1 Koncepčný model poldra resp. sústavy poldrov

V rámci riešenia projektu AVPT „Ochrana revitalizáciou: Stratégia a manažment riečneho systému dolnej Moravy“ sa vykonávalo aj modelové hodnotenie účinnosti bočných poldrov na zníženie kulminačných prietokov. Boli navrhnuté tri umiestenia poldrov na slovenskej strane v lokalitách Moravský Svätý Ján, Gajary a Záhorská Ves [3]. Ich výber vychádzal z topografických podmienok a zo súčasného využitia územia. Snahou bolo, aby periodickým zaplavovaním boli čo najmenej ohrozené objekty infraštruktúry, poľnohospodársky využívaná pôda, priemyselné objekty a ekologicky cenné lokality. Prihliadalo sa tiež na to, aby boli minimalizované investičné náklady na výstavbu poldrov a preto ich hranice z veľkej časti tvoria už existujúce líniové stavby (ľavostranná ochranná hrádza Moravy, cestné komunikácie, železnica) a využívajú sa prirodzené terénne depresie.

Približné objemy poldrov v uvažovaných lokalitách, ktoré boli vyhodnotené z digitálneho modelu reliéfu na slovenskej strane Moravy sú nasledovné:

– polder Moravský Sv. Ján – 4 mil. m^3,

– polder Gajary – 8 mil. m^3,

– polder Záhorská Ves – 17 mil. m^3.

Rakúskymi riešiteľmi podobnej úlohy boli na dolnej Morave navrhnuté ďalšie dva poldre v lokalitách Hohenau a Drősing. Ich umiestnenie vychádzalo tiež z topografických podmienok a za predpokladu už spomínaných požiadaviek. Približné objemy poldrov v rakúskych lokalitách sú nasledovné:

– polder Hohenau – 7,5 mil. m^3,

– polder Drősing – 33,5 mil. m^3.

Pre hodnotenie účinnosti týchto sústav poldrov bol v [2] navrhnutý jednoduchý koncepčný model, lebo použitie detailných hydraulických modelov nebolo pre daný účel vhodné. Navrhnutý model poldra má nasledovné vlastnosti:

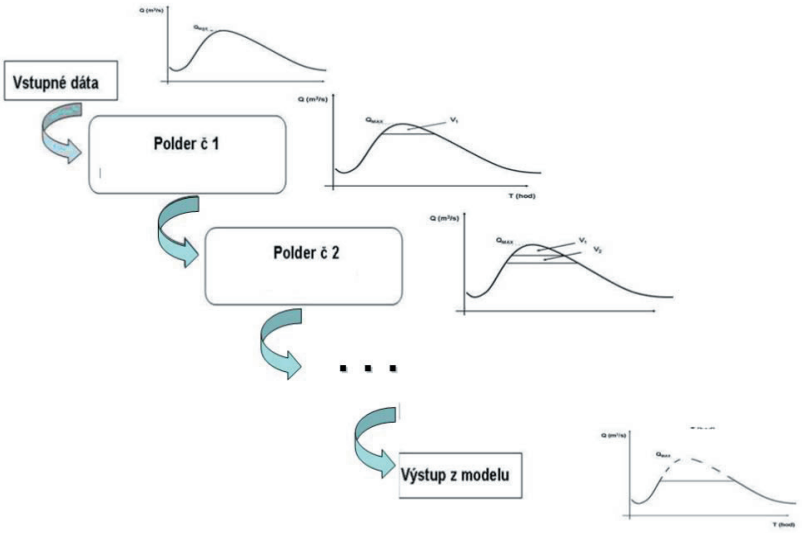
– zanedbávajú sa hydraulické vlastnosti napúšťacieho a vypúšťacieho objektu,

– uvažuje sa s dokonalou manipuláciou účinnosťou regulačných objektov pri napúšťaní a vypúšťaní poldra,

– počíta sa s existenciou ideálnej predpovede prietoku pri povodňových situáciach,

– pri simulácii transformácie jednotlivých povodňových vĺn sa uvažuje s prázdnym poldrom.

Model sústavy poldrov simuluje ideálne zníženie vrcholu povodňovej vlny využitím zmenšenia objemu vlny objemom jednotlivých poldrov. Uvažuje s možnosťou zohľadnenia využitia vplyvu bočného prítoku medzi jednotlivými poldrami a transformácie koryta medzi poldrami. Funkciu poldrov v modely ilustrujeme na obrázku 2 a podrobnejšie popisujeme v [2].



Obr. 2: Ukážka simulácie prechodu povodňovej vlny jednoduchým modelom sústavy poldrov

Pre hodnotenie účinnosti navrhovaných poldrov na zmenu povodňového režimu sme použili simuláciu transformácie radu 80 najväčších ročných povodňových vĺn z obdobia 1923-2002, pretože je známe, že tvar (priebeh a objem) jednotlivých povodňových vĺn má zásadný vplyv na účinnosť ich transformácie počas prechodu poldrom [1].

3.2 Multilineárny model transformácie povodňových vĺn

Používanie lineárnych hydrologických transformačných modelov v riečnych úsekoch s premenlivou postupovou dobou prietokov je problematické aj vzhľadom k tomu, že tieto modely implicitne predpokladajú konštantnú postupovú dobu prietokov. Riešením tohto problému je aj používanie multilineárnych modelov, teda niekoľkých lineárnych modelov odpovedajúcich rôznym odtokovým situáciám. Tento princíp sme aplikovali aj napr. v štúdiách na Hrone [7] a Dunaji [4]. Riečny úsek sa modeluje kaskádou *n* rovnakých lineárnych nádrží zapojených v sérii s časovou konštantou *k*. Každá nádrž mimo prvej má okrem prítoku z hornej nádrže ešte samostatný (bočný) vstup I_i. Vstupy do modelu sa považujú za konštantné počas vzorkovacieho intervalu *(a, a+1)* o dĺžke *T*. Vychádzajúc z rovnice kontinuity a statickej relácie lineárnej nádrže formuloval stavové rovnice modelu Szolgay [5]. Zmenu časovej konštanty *k* je možné viazať na charakteristické zmeny prúdenia, ako vybreženie do inundácií, na zmenu postupovej doby s prietokom a podobne. V prípade, že bude viazaná na vstup do modelu, je celkový model pozostávajúci zo série lineárnych modelov nelineárny. Spôsob identifikácie multilineárneho modelu, ktorý sa používa, je viazať zmenu parametra *k* priamo na zmenu postupovej doby charakteristických bodov hydrogramu [5].

Pre účel modelového hodnotenia zmien povodňového režimu v dôsledku vylúčenia inundačného územia úpravami koryta boli pre potreby multilineárneho modelovania transformácie povodní vytvorené dva jednoduché empirické modely závislosti medzi postupovou dobou vrcholu povodí a kulminačným prietokom, ktoré pozostávali z viacerých úsečiek. Pre oba stavy koryta ich tiež uvádzame na obrázku 1. Jednotlivé lomové body týchto modelov sa určili subjektívne na základe hodnôt vybrežovacieho prietoku (cca 220 $m^3.s^{-1}$) a boli modifikované metódou pokus-omyl na základe výsledkov transformácie prietokových vĺn použitých pri ich odvodení [7].

3.3 Štatistické porovnanie protipovodňových opatrení

Pre štatistické hodnotenie účinnosti protipovodňových opatrení boli vybrané prietokové vlny prislúchajúce k maximálnym ročným kulminačným prietokom v reprezentatívnom období 1923-2002. Potreba použitia dlhého časového radu vychádzala z faktu, posúdenie zmeny povodňového režimu na jednej návrhovej povodňovej vlne, ako je to obvyklé pri návrhu poldrov v SR nie je výpovedné z hľadiska zmien povodňového režimu [1] .

Hodnotenie zmeny prechodu povodní bolo vykonané v nasledujúcich krokoch:

– simulácia transformácie série 80 prietokových vĺn oboma modelmi koryta a následné štatistické hodnotenie zmien transformácie povodní v dôsledku úpravy koryta,

– simulácia transformačného účinku alternatívnych sústav poldrov na sérii 80 vĺn a následné štatistické hodnotenie zmien transformácie povodní.

Modelové hodnotenie účinnosti navrhovaných poldrov na dolnej Morave sa vykonalo v troch základných alternatívach, keď sa hodnotili návrhy sústavy poldrov:

– na slovenskej strane,

– na rakúskej strane,

– na oboch brehoch.

Na odhad N-ročných hodnôt maximálnych prietokov sa aplikovala metodika DVWK (1999) (pozri napr. v [2], [7]). Z troch najvhodnejších teoretických rozdelení bolo na základe testov v tejto metodike vybrané Weibullovo rozdelenie pravdepodobnosti 3. typu. Následne boli výsledky porovnané. V nasledujúcich tabuľkách sú uvedené hodnoty prietokov znížených napustením sústavy poldrov a hodnoty prietokov získané simuláciou historického koryta.

V tabuľke 1 sú výsledky odhadu N-ročných maximálnych prietokov pre vodomernú stanicu Záhorská Ves slovenskou sústavou poldrov pre ich rôzne kombinácie.

Tab. 1: Odhad N-ročných maximálnych prietokov v modelovanom úseku (Moravský Sv. Ján - Záhorská Ves) slovenskou sústavou poldrov

Odhad Q_N ($m^3.s^{-1}$)	Doba opakovania N (roky)						
	2	5	10	20	25	50	100
Po simulácii poldra (1)	455	716	889	1050	1100	1250	1390
Po simulácii poldrami (1+2)	407	662	834	996	1050	1200	1350
Po simulácii poldrami (1+3)	382	632	801	960	1010	1160	1300
Po simulácii poldrami (2+3)	371	619	786	943	992	1140	1280
Po simulácii poldrami (1+2+3)	371	618	782	935	982	1130	1260

Označenie poldrov : Moravský Sv. Ján (1), Gajary (2), Záhorská Ves (3)

Tab. 2: Odhad N-ročných maximálnych prietokov v modelovanom úseku (Moravský Sv. Ján – Záhorská Ves) rakúskou sústavou poldrov

Odhad Q_N ($m^3.s^{-1}$)	Doba opakovania N (roky)						
	2	5	10	20	25	50	100
Po simulácii poldra Hohenau (4)	425	684	858	1020	1070	1220	1370
Po simulácii poldra Drösing (5)	355	599	765	920	968	1110	1260
Po simulácii poldra poldrami (4+5)	339	578	740	893	940	1080	1220

Označenie poldrov: Hohenau (4), Drösing (5)

Z výsledkov vyplýva, že najúčinnejšia je kombinácia poldrov Gajary a Záhorská Nová Ves. Z porovnania taktiež vyplýva, že pri použití všetkých troch poldrov sa dosiahol pri storočnom prietoku zníženie len o 20 $m^3.s^{-1}$ väčšie, ako pri prevádzke dvoch poldrov Gajary a Záhorská Ves. Podobne sa vykonalo hodnotenie sústavy na rakúskej strane toku, kde pri hodnotení sa tiež uvažovalo s účinnosťou jednotlivých poldrov zvlášť a spolu (Tab. 2). Z ďalších možností hodnotenia účinností kombinácií najvýhodnejšie vychádza možnosť výstavby poldrov Drösing a Záhorská Ves. Ide o najobjemnejšie poldre z rakúskej a slovenskej strany, ktoré sú zaujímavé i z hľadiska ich umiestnenia (Tab. 3).

Tab. 3: Odhad N-ročných maximálnych prietokov v modelovanom úseku (Moravský sv. Ján – Záhorská Ves) oboma sústavami poldrov, kombinácia

Odhad Qn ($m^3.s^{-1}$)	Doba opakovania (roky)						
	2	5	10	20	25	50	100
Po simulácii poldra (1)	455	716	889	1050	1100	1250	1390
Po simulácii poldra poldrami (1+4)	422	676	843	998	1050	1190	1330
Po simulácii poldrami (1+4+5)	342	580	739	887	933	1070	1210
Po simulácii poldrami (1+4+5+2)	325	551	715	880	923	1060	1200
Po simulácii poldrami (1+4+5+2+3)	298	516	678	843	894	1060	1200
Po simulácii poldrami (5+3)	331	567	726	875	921	1060	1200

Následne boli vybrané výsledky porovnané v tabuľke 4 s N-ročnými prietokmi získanými simuláciou účinku historického koryta [7], ktoré simuluje úplné otvorenie pôvodných inundácii popri toku. Simulácia bola realizovaná multilineárnym transformačným modelom na základe analýzy prechodu prietokových vĺn korytom prostredníctvom vzťahu medzi postupovou dobou a veľkosťou kulminačného prietoku pre oba stavy koryta.

Tab. 4: Odhad N-ročných maximálnych prietokov v modelovanom úseku v Záhorskej Vsi

Odhad Q_N ($m^3.s^{-1}$)	Doba opakovania N (roky)						
	2	5	10	20	25	50	100
Slovenská úplná sústava poldrov	361	618	782	935	982	1130	1260
Rakúska úplná sústava	339	578	740	896	940	1080	1220
Obe sústavy spoločne	298	516	678	843	894	1060	1200
Historický stav koryta	450	704	875	1040	1090	1240	1380

Z dosiahnutých výsledkov vyplýva, že z hľadiska zníženia N-ročných prietokov by mohla byť výstavba uvažovaných poldrov účinnejšia v porovnaní možnou úplnej revitalizáciou toku. Toto sa však dá tvrdiť len za predpokladu, že budeme mať k dispozícii kvalitné predpovede prietokov v danom úseku a ideálnu manipuláciu na objektoch poldrov. Treba poznamenať, že reálna účinnosť poldrov bude vždy nižšia ako tu uvažovaná, na druhej strane k úplnej revitalizácii pôvodných inundačných prietokov tiež nemôžeme pristúpiť. Prezentovaná metodika však najmä ukazuje s akými hodnotami zníženia N-ročných prietokov môžeme reálne uvažovať, čo sa dá využiť pri rozhodovaní či a ako s nimi uvažovať v porovnaní napr. so zvyšovaním protipovodňových hrádzí.

4. Záver

Cieľom tejto práce bolo zhrnúť doterajšie výsledky pri riešení problémov účinnosti koncepcií protipovodňovej ochrany na dolnej Morave. Nemali sme za cieľ hľadanie optimálnych závislosti medzi postupovou dobou a prietokom a podať vyčerpávajúcu kvantifikácia účinnosti pôvodného inundačného územia a plánovaných poldrov, ale najmä prezentovať vývoj a overenie metodiky riešenia a náčrt teoretického potenciálu jednotlivých riešení.

Dosiahnuté výsledky ukázali priechodnosť navrhovanej metodiky. Podarilo sa preukázať, že koncepcia multilineárneho modelu je použiteľná pre transformáciu povodňových vĺn aj na dolnej Morave. Parametrizácia modelu pomocou množiny lineárnych závislostí medzi postupovou dobou a prietokom sa ukázala ako spoľahlivá metóda, čo potvrdila verifikácia modelu ako pre súčasný, tak aj pre historický stav koryta. Prvotné porovnania rozdielnosti transformácie vybraných prietokových vĺn zo súčasného obdobia preukázali známy fakt, že pri rozvinutej inundácii sa postup vĺn spomaľuje a kulminácia znižuje. Po následnom spracovaní dostatočného počtu modelových situácii bola vykonaná podrobnejšia štatistická analýza zmien povodňového režimu v dôsledku úpravy toku, ktorá je už použiteľná aj na hodnotenie účinnosti vytvorenia umelých inundačných území (poldrov), pre ktorú sme tiež navrhli jednoduché riešenie.

Poďakovanie

Článok vznikol vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Centrum excelentnosti protipovodňovej ochrany územia ITMS 26240120004 spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

[1] BAČÍK, M. – SZOLGAY, J. – KOHNOVÁ, S. – OPATOVSKÁ, G., 2002. Vplyv tvaru povodňovej vlny na účinnosť poldra. In: *Vodohospodársky spravodajca*, Roč. 45, č. 6.

[2] KOVÁČ, P. – DANÁČOVÁ, M. – SZOLGAY, J., 2006. Hodnotenie účinnosti poldrov navrhovaných na dolnej Morave, ÚH SAV – Acta Hydrologica Slovaca, Ročník 7, No. 2, 252 – 259. ISSN 1335-6291.

[3] LUKÁČ, M. – HOLUBOVÁ, K. – MRAVCOVÁ, K., 2005. Alternatívne riešenie protipovodňovej ochrany dolnej Moravy. Hydrologické dni, s. 730-742.

[4] MITKOVÁ, V. – KUBEŠ, R. – SZOLGAY, J. – PEKÁROVÁ, P., 2004. Simulácia transformácie historických povodňových vĺn Dunaja z roku 1899 a 1954 v úseku Kienstock – Bratislava za súčasných odtokových pomerov. ÚH SAV – Acta Hydrologica Slovaca, Ročník 5, No.1, s. 43-52. ISSN 1335-6291.

[5] SZOLGAY, J., 1981. Adaptívne modely v hydrologických predpovediach. [Kandidátska dizertačná práca]. Bratislava, UHH SAV. 130 s.

[6] SZOLGAY, J. – KUBEŠ, R., 2005. Multilineárny model transformácie prietokov v korytách tokov. In: *Scenáre zmien vybraných zložiek hydrosféry a biosféry v povodí Hrona a Váhu v dôsledku klimatickej zmeny* (Pekárová a kol.), s. 170–215.

[7] SZOLGAY, J. – DANÁČOVÁ, M. ,2006. Hodnotenie zmien v transformácii prietokových vĺn na dolnej Morave z údajov obdobia 1922-2002, Acta Hydrologica Slovaca, Ročník 7, No. 2, 2006, s. 252 – 259, ISSN 1335-6291.

Kontakty na autora

1 Stavebná fakulta, Katedra vodného hospodárstva krajiny, Bratislava, e-mail: jan.szolgay@stuba.sk, michaela.danacova@stuba.sk, peter.surek@stuba.sk, jana.pastorova@stuba.sk

GLOBÁLNÍ VLIVY NA NAVRHOVÁNÍ HYDRAULICKÝCH OBJEKTŮ PŘEHRAD V ČESKÉ REPUBLICE

Ladislav Satrapa[1]

Abstrakt

Následující příspěvek se zabývá posledními dílčími výsledky výzkumného úkolu NAZV 71201 Spolehlivost a bezpečnost vodohospodářských děl v měnících se klimatických podmínkách. Otázkami dopadů klimatické změny na vodní režim, vodní zdroje a vodní bilanci v České republice se zabývají zejména specialisté z Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka. Ti se ve svých publikovaných pracích zabývají zejména analýzami klimatické změny při sledování jednotlivých scénářů v intervalu od optimistických po pesimistické s využitím modelu chronologické hydrologické bilance BILAN. V tomto příspěvku jsou prezentovány výsledky analýz trendů provedených výhradně na pozorovaných řadách průměrných denních průtoků. Ambicí těchto analýz je snaha o získání informací o vývoji v hydrologických řadách, zejména o charakteru trendů v oblasti nízkých, průměrných a vysokých průtoků. Následně budou výsledky řešení uplatněny v doporučeních pro navrhování objektů vodních děl v souvislosti s adaptačními opatřeními.

Klíčová slova: klimatická změna, bezpečnost vodních děl, sucho, povodeň

1. Úvod

Grantový projekt NAZV 71201 “Spolehlivost a bezpečnost vodohospodářských děl v měnících se klimatických podmínkách” je zaměřen na problematiku provozu a funkce přehrad a nádrží s uvažováním možných budoucích trendů v hydrologických podmínkách. Z větší části projekt vychází z analýzy skutečně pozorovaných časových řad. V rámci řešení projektu nejsou využívány pro hodnocení klimatických aspektů a pro prognózy žádné modelovací postupy založené na známých klimatických scénářích. Postupně prohlubovanými statistickými analýzami a rozšiřováním rozsahu analyzovaných dat se ukazuje, že v odtocích (průtocích k korytech) nejsou zřejmé žádné jednoznačné trendy. Je možné i konstatovat, že trendy v chování řad jsou všesměrné a i protichůdné. Vzhledem k tomu, že se veškeré základní testy provádějí na řadách v profilech neovlivněných nádržemi v horních oblastech toků, je nesourodost výsledků výpočtů způsobena nějakými zatím neprobádanými přírodními aspekty. Snaha o jejich analýzu bude následovat.

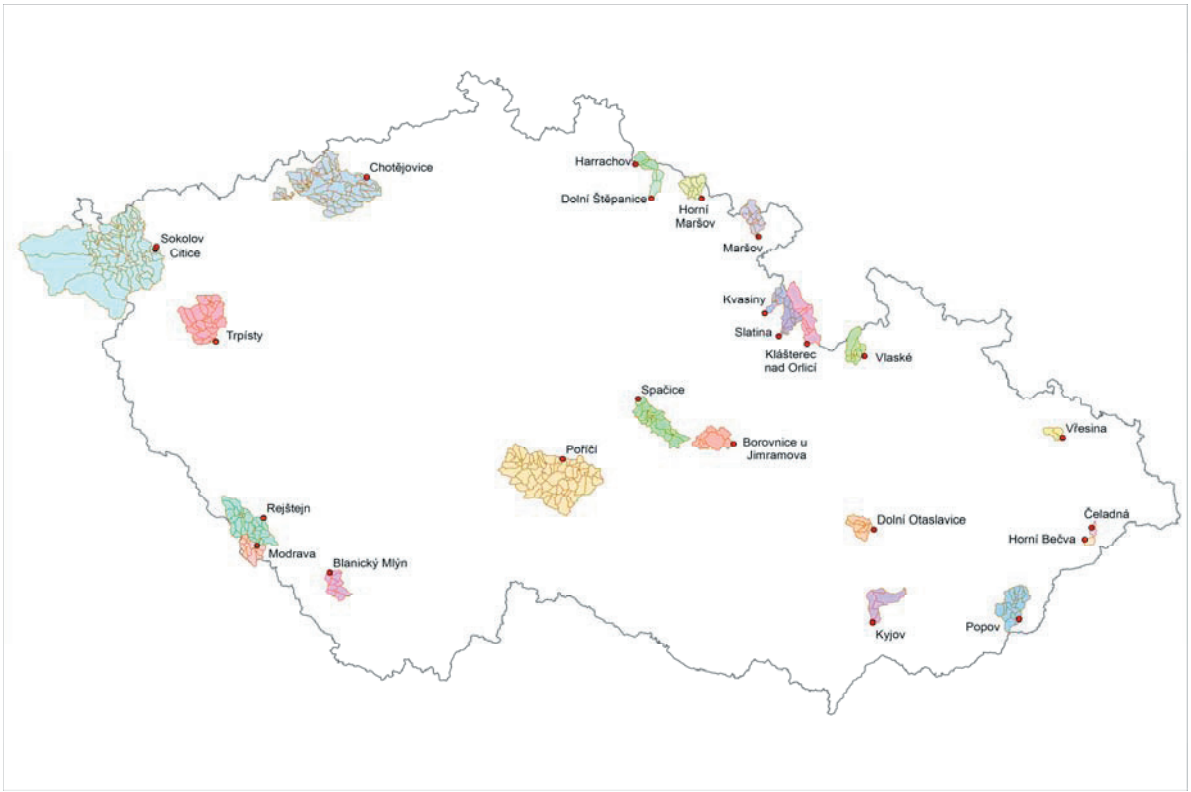
2. Data

Jak již bylo zmíněno, jsou pro řešení použita primární data pozorování na tocích – časové řady průměrných denních průtoků. Pro základní statistické testy jsou použity neovlivněné řady dlouhého trvání (minimálně 60 let, většinou 70 let a více), takže nejčastěji v profilech uzavírajících málo urbanizovaná povodí na horních tocích.

Dosud byly provedeny testy řad pozorovaných v následujících stanicích:

0130 Horní Maršov (Úpa) - výhl. VD Lata; 0170 Maršov nad Metují (Metuje) - výhl. VD Vlčinec; 0240 Klášterec nad Orlicí (Divoká Orlice) - výhl. VD Klášterec; 0640 Spačice (Doubrava) - VD Pařížov; 1625 Poříčí (Želivka) - VD Želivka; 4410 Borovnice (Svratka) - výhl. VD Borovnice; 0270 Slatina nad Zdobnicí (Zdobnice) - výhl. VD Pěčín; 0290 Kvasiny (Bělá) - výhl. VD Skuhrov; 1350 Modrava (Vydra) - výhl. VD Modrava; 1370 Rejštejn (Otava) - výhl. VD Rejštejn; 4010 Otaslavice (Brodečka) - výhl. VD Otaslavice; 2790 Čeladná (Čeladenka) - VD Šance; 1750 Hracholusky (Úterský potok) - VD Hracholusky; 2072 Citice (Ohře); 2073

Citice (Ohře - nová stanice); 2230 Chotějovice (Bílina); 0830 Harrachov (Mumlava); 0850 Dolní Štěpanice (Jizera); 1450 Blanický Mlýn (Blanice); 3410 Vlaské (Morava); 2560 Vřesina (Porubka); 3830 Horní Bečva (Rožnovská Bečva); 4860 Kyjov (Kyjovka); 4870 Popov (Vlára).



Obr. 1: Mapa analyzovaných profilů a jejich povodí.

V rámci testů byly hodnoceny jednak dostupné řady v celé délce a dále řady rozdělené na dvě části rokem 1980. V druhém případě byly provedeny testy v řadě do tohoto roku a od roku 1980 odděleně.

V případě denních průtoků v hydrologickém roce byly vypočteny popisné charakteristiky: průměr, směrodatná odchylka, šikmost, součinitel variace a suma hodnot průtoků v hydrologickém roce. Pro tyto parametry byly analyzovány trendy v kompletních a dělených řadách, jak bylo zmíněno výše.

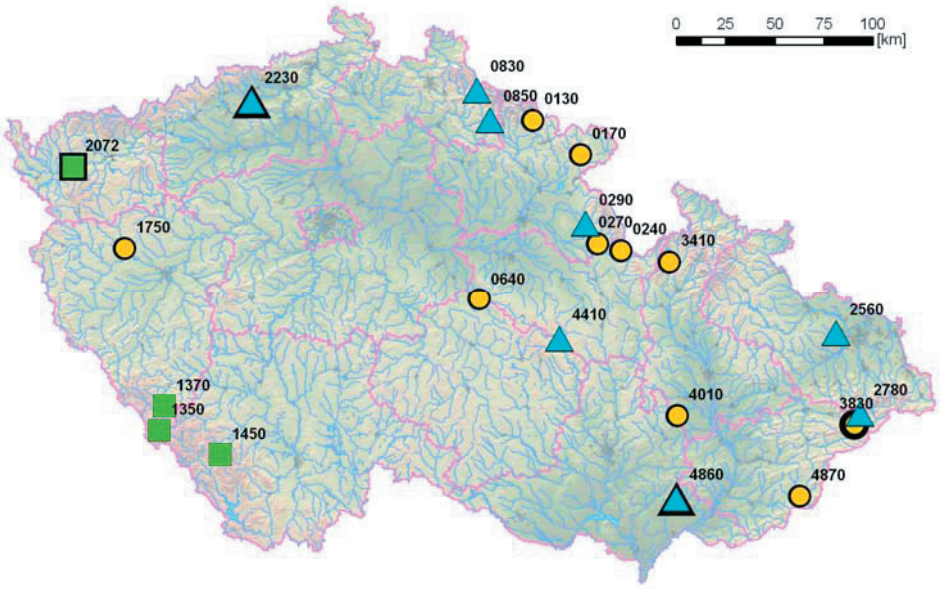
Pro analýzu nízkých a vysokých extrémů v denních řadách byly hledány vhodné postupy, které by byly dostatečně prokazatelné. Po delších úvahách a testech byl zvolen postup založený na analýze trendu počtu výskytů nízkých a vysokých hodnot v hydrologickém roce (viz dále v příslušných částech příspěvku). Hodnocení podle hodnot průtoků v pozorované řadě se ukázalo jako méně vhodné.

3. Analýza nízkých průtoků v denních řadách

Pro analýzu vývoje výskytu nízkých hodnot průtoků byly využity počty výskytů hodnot denních průtoků nižších než jedna třetina a jedna polovina průměru průměrných denních průtoků v hydrologickém roce. Počty výskytů hodnot nízkých průtoků byly kromě výše zmíněných dvou hranic hodnocení (třetina a polovina průměrné hodnoty) vztaženy ke třem hodnotám průměrů, a to k průměru příslušného hydrologického roku, k průměru celé řady za dobu pozorování a k průměru sledujícímu vývoj trendu průměru.

Výsledky testů lze shrnout následujícím způsobem:

- počet výskytů nízkých hodnot průtoků se zvyšuje v 10 pozorovacích profilech (kroužky v mapě na Obr. 2),
- počet výskytů nízkých hodnot průtoků se snižuje v 8 pozorovacích profilech (trojúhelníky v mapě na Obr. 2),
- velmi nízké průtoky se posouvají od dolních extrémů výše směrem k průměru ve 4 profilech (čtverečky v mapě na Obr. 2).



Obr. 2: Mapa profilů – nízké průtoky - trendy četnosti výskytu v celé řadě

Z výsledků analýz je zřejmé, že se četnost nízkých průtoků zvyšuje v 10 profilech a snižuje ve 12 profilech. Jednoznačný obecný trend tedy nelze ze statistických výsledků vypozorovat.

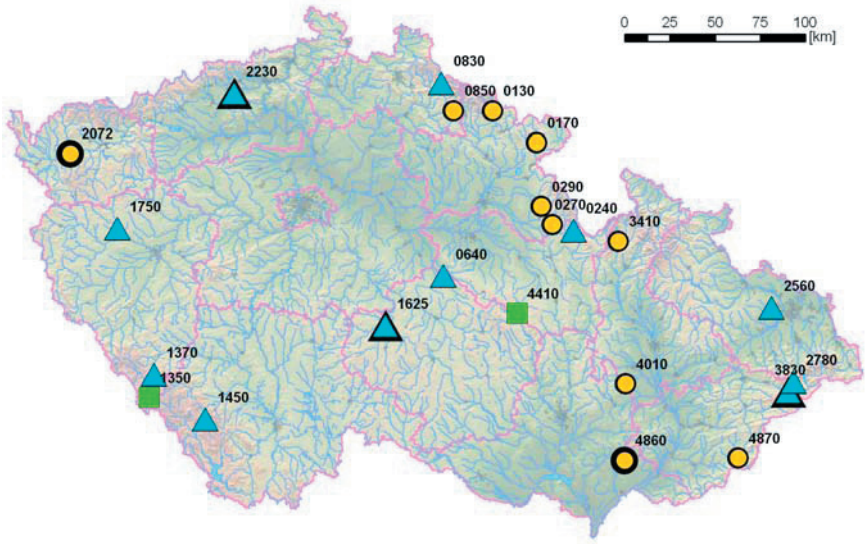
4. Analýza průměrných průtoků v denních řadách

Současně s vývojem průměrných ročních průtoků v kompletní pozorované řadě byly sledovány trendy ve dvou řadách po rozdělení základní řady rokem 1980. Kromě vývoje hodnot průtoků byly v řadách pro každý hydrologický rok vyhodnoceny hodnoty a následně trendy statistických charakteristik – směrodatná odhylka, šikmost, součinitel variace.

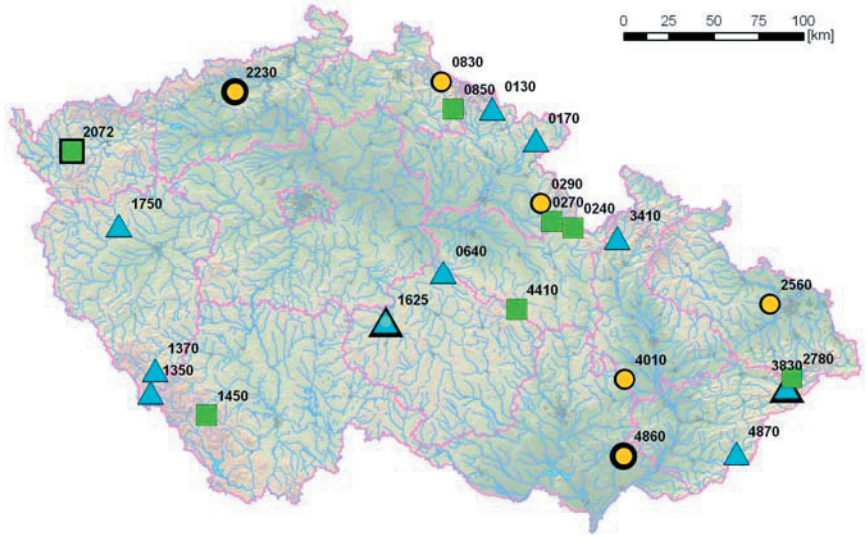
Z analýz kompletních řad průměrných denních průtoků vyplývá, že se vodnost toku (průměrný průtok, roční proteklé množství) zvyšuje v 11 stanicích (trojúhelníky v mapě na Obr. 3), snižuje v 10 stanicích (kroužky v mapě na Obr. 3) a stagnuje ve 2 stanicích (čtverečky v mapě na Obr. 3).

V řadách od roku 1980 se vodnost toků zvyšuje v 9 stanicích (trojúhelníky v mapě na Obr. 4), snižuje ve 13 stanicích (kroužky v mapě na Obr. 4) a stagnuje v 1 stanici (čtverečky v mapě na Obr. 4).

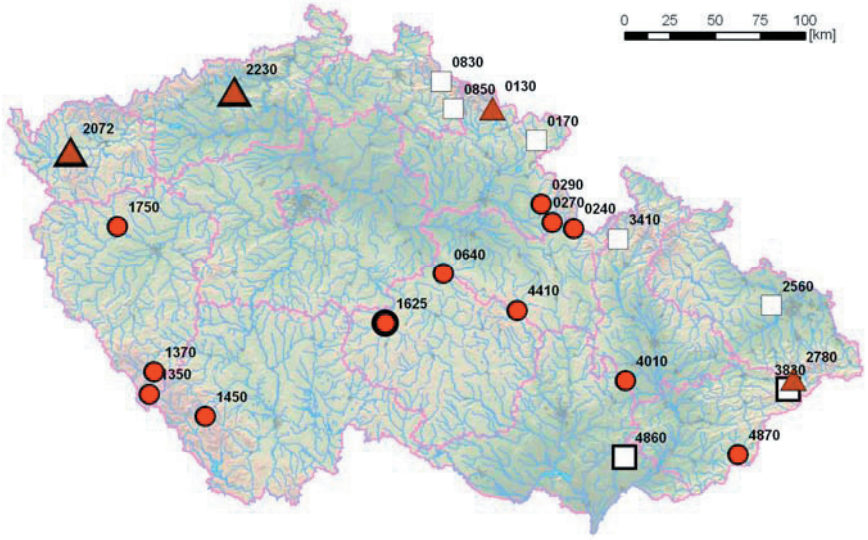
Ze statistických charakteristik popisuje rozložení pozorovaných hodnot kolem průměru směrodatná odchylka. Ta se v řadách po roce 1980 postupně zvyšuje ve 12 profilech (kroužky v mapě na Obr. 5), klesá ve 4 profilech (trojúhelníky v mapě na Obr. 5) a na prakticky konstantní hodnotě je v 7 profilech (čtverečky v mapě na Obr. 5).



Obr. 3: Mapa profilů – průměrné průtoky v celých pozorovaných řadách – trendy



Obr. 4: Mapa profilů – průměrné průtoky v řadách od roku 1980 – trendy



Obr. 5: Mapa profilů – směrodatná odchylka v řadách od roku 1980 – trendy

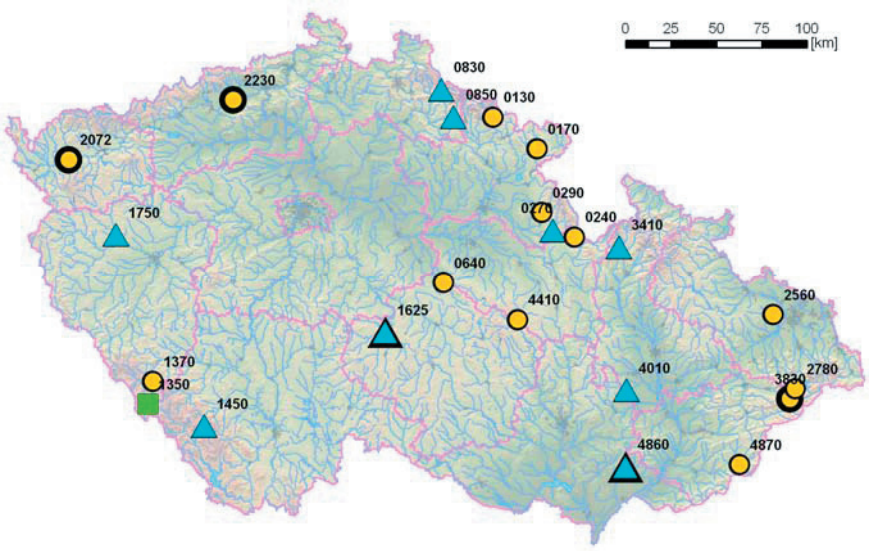
5. Analýza vysokých průtoků v denních řadách

Pro analýzu vývoje výskytu vysokých hodnot průtoků byly využity počty výskytů hodnot denních průtoků vyšších než dvojnásobek a trojnásobek průměru průměrných denních průtoků v hydrologickém roce. Počty výskytů hodnot nízkých průtoků byly kromě výše zmíněných dvou hranic hodnocení (dvojnásobek a trojnásobek průměrné hodnoty) opět vztaženy ke třem hodnotám průměrů, a to k průměru příslušného hydrologického roku, k průměru celé řady za dobu pozorování a k průměru sledujícímu vývoj trendu průměru.

Výsledky testů lze shrnout následujícím způsobem:

- počet výskytů vysokých hodnot průtoků se zvyšuje v 10 pozorovacích profilech (trojúhelníky v mapě na Obr. 6),
- počet výskytů vysokých hodnot průtoků se snižuje v 6 pozorovacích profilech (kroužky v mapě na Obr. 6),
- počet výskytů vysokých hodnot průtoků se nemění v 6 pozorovacích profilech (čtverečky v mapě na Obr. 6).

Z výsledků analýz je zřejmé, že se četnost vysokých průtoků zvyšuje v 10 profilech, snižuje v 6 profilech a nemění se v 6 profilech. Jednoznačný obecný trend tedy nelze ze statistických výsledků vypozorovat.



Obr. 6: Mapa profilů – vysoké průtoky - trendy četnosti výskytu v celých řadách

6. Závěr

Po provedení statistických analýz řad průměrných denních průtoků je zřejmé, že očekávané změny klimatu se dosud v odtocích jednoznačně neuplatňují.

V publikovaných pracích je prezentováno vzájemné vyrovnání zvýšených srážek jevy souvisejícími se zvýšenými teplotami. Tento vztah jistě výrazně ovlivňuje odtoky říční sítí, nicméně některé výše popsané trendy nejsou vysvětlitelné vyrovnáním zvýšených srážek zvýšenými teplotami.

Zejména je nutné se dále zabývat výraznou protichůdností trendů ve vodnosti toků a ve výskytech nízkých i vysokých průtoků. Z hodnocení řad průměrných denních průtoků je vidět minimální počet lokalit bez trendů ke zvyšování nebo snižování vodnosti, nízkých a vysokých průtoků. Hydrologické podmínky ve velké většině stanic se mění, avšak podle trendů sledujících i odporujících představám o dopadech klimatické změny na vodní zdroje.

Podíl souhlasných i odporujících linií vývoje je přibližně stejný, tedy statisticky významný. Je tedy pravděpodobné, že v našich podmínkách vstupují do hry i jiné faktory, které jsou významné nebo i významnější než globální vlivy změny klimatu. Odhalením a kvantifikací vlivu "dalších" faktorů se dále zabýváme v naší výzkumné práci.

Pokud jde o spolehlivost a bezpečnost vodních děl a o adaptační mechanizmy je možné na základě dosud provedených analýz konstatovat, že přijetí obecnějších adaptačních pravidel pro vodní díla není možné vzhledem k nesourodosti projevů klimatické změny v hydrologickém režimu toků. Případná adaptační opatření podložená dosud provedenými analýzami, které jsou zřejmě výrazně na straně bezpečnosti, by vedla k neefektivním a finančně náročným projekčním a investičním aktivitám.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory výzkumného úkolu NAZV 71201 "Spolehlivost a bezpečnost vodohospodářských děl v měnících se klimatických podmínkách".

Mapové prezentace tohoto příspěvku zpracovali v rámci řešení projektu: L. Brožová (Obr.1) a M. Horský (Obr. 2 až 6).

Literatura

[1] KAŠPÁREK, L. – NOVICKÝ, O. – PELÁKOVÁ, M., 2006. Climate Change and Water Regime in the Czech Republic. VÚV TGM. 80 s. ISBN 80-85900-63-7

[2] NOVICKÝ, O. – VYSKOČ, P. – VIZINA, A. – KAŠPÁREK, L. – PICEK, J., 2008. Klimatická změna a vodní zdroje v povodí Vltavy. VÚV TGM. 29 s. ISBN 978-80-85900-79-8

[3] VTEI, roč. 51, mimořádné číslo 2009, s. 1-28. ISSN 0322 – 8916

[4] VIZINA, A. – KAŠPÁREK, L. – KNĚŽEK, M. – KAŠPÁREK, J. – UHLÍK, J., 2009. Vodní bilance v podmínkách klimatické změny v povodí horní Metuje.

Kontakty na autora

1 Fakulta stavební ČVUT v Praze, Katedra hydrotechniky, e-mail: satrapa@fsv.cvut.cz

MOŽNÉ NEPŘÍZNIVÉ VLIVY PŘEDPOKLÁDANÉ KLIMATICKÉ ZMĚNY V POVODÍ MORAVY

Martin Borák[1], Miroslav Foltýn[1]

Abstrakt

Příspěvek se zabývá možnými nepříznivými vlivy prognózované klimatické změny v oblastech povodí Moravy a Dyje na množství vody ve vodních tocích. Seznamuje se závěry studie „Posouzení dopadů klimatické změny na vodohospodářskou soustavu v povodí Moravy“, tedy porovnání vodohospodářské bilance současného stavu s vodohospodářskou bilancí při ovlivnění zvoleným scénářem klimatické změny. Nastínění možných nepříznivých dopadů na současná užívání vody a na společenstva vodních ekosystémů. Diskuse k možnostem obnovy, případně rozšíření zemědělských závlah jako jednoho z možných kompenzačních opatření k odstranění vláhových deficitů, které mohou nepříznivě ovlivňovat produkci tradičních zemědělských plodin.

Klíčová slova: klimatická změna, vodohospodářská bilance, nádrž, závlahy

1. Úvod

V dnešní době velkých technologických pokroků a nových objevů a zároveň častých přírodních výkyvů, se velmi často skloňují slova „vliv člověka na zemské klima“. V souvislosti s tím se hned rozebírá, jaký dopad bude mít změna klimatu na přírodu, člověka, lidskou společnost a jejich potřeby. Jedním ze základních přírodních prvků, kde se vlivy projeví nejdříve bude voda, a to v podobě jejího nadbytku či nedostatku.

Matematické modely popisující předpokládané scénáře klimatické změny na našem území nepředpokládají zásadnější změny, co se týká ročních srážkových úhrnů, ale celkem významně by se mělo změnit rozložení srážek v průběhu roku. To by se následně mělo projevit ve změně sezónních průtoků. V zimním období (listopad - březen) bude průtok pravděpodobně značně rozkolísaný, s vyšším průměrem, případně dosažením extrémně vysokých hodnot. V letním období (duben-říjen) bude asi proměnlivost hodnot průtoků malá, s nižšími průměry a dosahováním extrémních minim, hlavně na konci tohoto období, [3].

2. Vodohospodářská bilance řešená pro průtoky dotčené předpokládanou klimatickou změnou

Nejenom pro potřeby plánování v oblasti vod si v roce 2008 nechalo Povodí Moravy, s.p., zpracovat vodohospodářskou bilanci v povodí Moravy, řešenou pro průtoky ve vodních tocích v oblasti povodí Moravy a oblasti povodí Dyje pro současný stav (vycházející z hydrologických řad průtoků 1931-1960 a užíváním vody z roku 2005) a pro průtoky ve vodních tocích ovlivněných předpokládanou klimatickou změnou pro období 2071-2097. Zahrnutí vlivu klimatické změny v nich bylo provedeno za použití regionálních scénářů změny klimatu na území ČR zpracovaných na základě výsledků projektu PRUDENCE (projekt EU, kde byla použita časová úroveň 2071 – 2100) pomocí modelu RCAO za předpokladu vývoje emisí podle scénáře IPCC SRES A2, tedy tzv. „průměrného scénáře“ (tzn. ani výrazně optimistického, ale ani výrazně pesimistického). Kritériem pro posouzení plnění kvantitativních cílů pro užívání vody ve stanovených bilančních profilech je tzv. zabezpečenost minimálních zůstatkových průtoků (MZP) podle trvání (Pt) v %. Pro vyhodnocení záporného bilančního stavu je využito zařazení do tříd významnosti zdrojů vody podle ČSN 73 6815.

3. Bilanční profily a vodohospodářská bilance

V oblasti povodí Moravy bylo zvoleno 30 vhodných bilančních profilů, v oblasti povodí Dyje 37 bilančních profilů. Profily byly řešeny samostatně nikoliv v soustavě. Umístění bilančních profilů bylo zvoleno pokud možno tak, aby se dalo posoudit předpokládané ovlivnění již vybudovaných vodních nádrží, simulace soustav nádrží, ucelené části (dílčí povodí) v hodnocených oblastech povodí, umožňující posoudit zejména vybrané lokality vhodné pro výhledovou akumulaci povrchových vod.

Pro výpočet bilance při vlivu klimatické změny byla použita průtoková řada 2071-2097 (vychází z řady průtoků 1931-1960, která byla použita pro výpočet bilance současného stavu) a údaje o stavu oděrů a vypouštění vod k roku 2005 očištěné od srážek a balastních vod a minimální zůstatkové průtoky (MZP) určené podle průtokové řady 1931-1960. Jisté zjednodušení bylo v tom, že i při výpočtu bilance za klimatické změny se uvažovalo s úrovní současných požadavků na užívání vody, které by mělo být i podle prognóz zpracovaných pro plány oblastí povodí přibližně stejné až do roku 2015, ale otázkou zůstává, jak se budou požadavky vyvíjet v dlouhodobém výhledu. Při stanovení výše uvedených bilancí bylo provedeno očištění dat od srážkových a balastních vod.

4. Výsledky a vyhodnocení

Jak již bylo uvedeno, bilance byla sestavena pro stav za zvoleného scénáře předpokládané klimatické změny (podle řady průtoků 2071-2097) a pro srovnání byla použita vodohospodářská bilance současného stavu (podle řady průtoků 1931-1960). Porovnání obou bilancí je patrné z následující tabulky:

Tab. 1: Počty a procentuální zastoupení profilů pro jednotlivé bilanční stavy.

Bilanční stav	Pt [%]	Třída	Oblast povodí Moravy - 1931-1960, počet/procent	Oblast povodí Moravy - 2071-2097, počet/procent	Oblast povodí Dyje - 1931-1960, počet/procent	Oblast povodí Dyje - 2071-2097, počet/procent
záporný	≥ 99,5	A	6 / 20,2	3 / 10,0	20 / 54,1	3 / 8,1
záporný	99,5 - 98,5	B	4 / 3,3	1 / 3,3	2 / 5,4	1 / 2,7
záporný	98,5 - 97,5	C	6 / 20,0	3 / 10,0	3 / 8,1	3 / 8,1
záporný	97,5 - 95,0	D	3 / 10,0	1 / 3,3	6 / 16,2	4 / 10,8
záporný	< 95,0	X	11 / 36,7	22 / 73,3	6 / 16,2	26 / 70,3
		součet	30 / 100	30 / 100	37 / 100	37 / 100

Bilanční stav	Pt [%]	Třída	Oblast povodí Moravy - 1931-1960, počet	Oblast povodí Moravy - 2071-2097, počet	Oblast povodí Dyje - 1931-1960, počet	Oblast povodí Dyje - 2071-2097, počet
záporný	≥ 75,0	X	11	14	4	18
záporný	50,0 - 75,0	X	0	6	1	6
záporný	< 50,0	X	0	2	1	2

Oblast povodí Moravy

Podle bilance současného stavu patří mezi vodní toky zařazené do třídy X převážně přítoky Moravy včetně Vláry (povodí Váhu). Samotné řeky Morava a Bečva mají zabezpečenost vyšší než 97 %. Pod většinou vodních nádrží (Horní Bečva, Bystřička, Plumlov, Opatovice, Fryšták) je zabezpečenost vyšší než 95 %. Při zahrnutí vlivu klimatické změny klesá zabezpečenost na třídu X u 73 % hodnocených profilů bez ohledu na to, zda se jedná o řeku Moravu nebo její přítoky. Vyšší zabezpečenost zůstává pouze v bilančních profilech přímo pod nádržemi.

Oblast povodí Dyje

Podle bilance současného stavu je nižší zabezpečenost v horních částech vodních toků Moravské Dyje, Jihlavy, Rokytné, Svratky a Svitavy (třídy D, X). Pod nádržemi na uvedených tocích ve střední a dolní části povodí je zabezpečenost v bilančních profilech převážně ve třídě A. Důsledkem klimatické změny by byl pokles zabezpečenosti na třídu X u 70 % bilančních profilů. Pouze pod některými vodními nádržemi zůstane zabezpečenost vyšší než 95 % (Landštejn, Mostiště, Vír, Brno a Nové Mlýny).

5. Vodohospodářská bilance a stávající nádrže

Vliv modelované klimatické změny se projeví na jednotlivé nádrže v povodí. U nich se může porovnat změna jejich nadlepšovacího účinku pro hydrologickou řadu 1931-1960 a 2071-2097.

Tab. 2: Změny nalepšovacího průtoku pro uvedené nádrže a zabezpečenost v jejich bilančních profilech pro klimatickou změnu v oblasti povodí Moravy (VN – vodárenská nádrž, Wz – zásobní objem nádrže, Op – velikost nalepšení), [3].

TOK - NÁDRŽ	Wz [mil.m^3]	Op 1931-1960 [m^3.s^{-1}]	Op 2071-2097 [m^3.s^{-1}]	Op - snížení kapacity na [%]
Povodí Moravy nad Bečvou				
NEMILKA - NÁDRŽ NEMILKA	1,218	0,088	0,024	27
TŘEBŮVKA - NÁDRŽ MORAVSKÁ TŘEBOVÁ	0,110	0,062	0,015	25
Povodí Bečvy				
STANOVNICE - VN KAROLINKA	5,904	0,229	0,197	86
BYSTŘIČKA - NÁDRŽ BYSTŘIČKA	0,852	0,134	0,121	90
ROŽNOVSKÁ BEČVA - NÁDRŽ HORNÍ BEČVA	0,395	0,057	0,041	71
Povodí Moravy mezi Bečvou a Dřevnicí				
HLOUČELA - NÁDRŽ PLUMLOV	2,730	0,172	0,154	90
MALÁ HANÁ - VN OPATOVICE	7,784	0,144	0,105	73
Povodí Dřevnice				
DŘEVNICE - VN SLUŠOVICE	7,245	0,369	0,161	44
FRYŠTÁCKÝ POTOK - VN FRYŠTÁK	0,900	0,082	0,038	46
Povodí Olšavy				
KOLELAČ - VN BOJKOVICE	0,770	0,042	0,018	43
LUHAČOVICKÝ POTOK - NÁDRŽ LUHAČOVICI	0,846	0,097	0,045	46
LUDKOVICKÝ POTOK - VN LUDKOVICE	0,498	0,030	0,027	88

V oblasti povodí Moravy je procentuální snížení kapacity nádrží rozdílné. V dílčím povodí řeky Dřevnice, se na průtocích dotčených klimatickou změnou výrazně snižuje zabezpečenost vodárenské nádrže Slušovice, která by nepokryla ani relativně nízké požadavky na vodu realizované v roce 2005. Další vodárenské nádrže, Karolinka a Opatovice, by i při požadavcích na vodu v úrovni roku 2005 požadavky na dodávky vody těsně zvládly.

V oblasti povodí Dyje, která patří k nejsušším v ČR, je situace složitější. U největších vybudovaných nádrží (Vranov, Vír, Dalešice), které mají regionální význam, by se na průtocích dotčených klimatickou změnou snížil jejich nalepšovací účinek pod cca 66 % hodnot z období 1931-1960. Takové snížení kapacity by znamenalo významné omezení odběrů vody pro odběrů surové vody pro oblastní vodovody, snížení současné rezervy chladící vody pro JE Dukovany a případné velkoplošné závlahy. Rovněž u menších vodních nádrží by se snížil jejich nalepšovací účinek. Nádrž Letovice by nezlepšila režim minimálních průtoků Svitavy, ochuzený odběry podzemní vody z prameniště Březová, vodárenská nádrž Nová Říše by nestačila zajistit ani odběr surové vody realizovaný v roce 2005 a další vodárenské nádrže by pokryly nejvýš realizované požadavky roku 2005. Otázkou je také, zda by bylo možné odběry z podzemních zdrojů v Březové nad Svitavou uskutečňovat v potřebné výši.

Tab. 3: Změny nalepšovacího průtoku pro uvedené nádrže a zabezpečenost v jejich bilančních profilech pro klimatickou změnu v oblasti povodí Dyje (VN – vodárenská nádrž, nádrž Brno a Nové Mlýny jsou nádrže ovlivněné v kaskádě nadřazenou nádrží, Wz – zásobní objem nádrže, Op – velikost nalepšení), [3].

TOK - NÁDRŽ	Wz [mil.m^3]	Op 1931-1960 [m^3.s^{-1}]	Op 2071-2097 [m^3.s^{-1}]	Op - snížení kapacity na [%]
Povodí Pstruhovce a Moravské Dyje				
ŘEČICE - VN NOVÁ ŘÍŠE	2,237	0,099	0,032	32
PSTRUHOVEC - VN LANDŠTEJN	2,592	0,044	0,049	111
Povodí Dyje nad Svratkou				
DYJE - NÁDRŽ VRANOV	79,668	4,277	2,256	53
-	-	-	-	-
JEVIŠOVKA - NÁDRŽ VÝROVICE	3,364	0,2	0,059	30
Povodí Svratky nad Svitavou				
SVRATKA - VN VÍR I.	44,056	2,468	1,639	66
SVRATKA - NÁDRŽ BRNO	10,8	2,027	1,445	71
Povodí Svitavy				
KŘETÍNKA - NÁDRŽ LETOVICE	9,015	0,428	0,149	35
BĚLÁ - VN BOSKOVICE	6,375	0,196	0,187	95
Povodí Jihlavy				
MARŠOVSKÝ POTOK - VN HUBENOV	2,395	0,105	0,104	100
JIHLAVA - NÁDRŽ DALEŠICE	54,047	3,449	2,124	62
OSLAVA - VN MOSTIŠTĚ	9,339	0,709	0,304	43
Povodí Dyje mezi Svratkou a ústím do Moravy				
DYJE - NÁDRŽ NOVÉ MLÝNY	43,826	11,116	7,153	64
KYJOVKA - VN KORYČANY	2,13	0,071	0,052	74

6. Vodohospodářská bilance řešená pro průtoky dotčené klimatickou změnou při využívání závlah

Podle informací z Plánů oblastí povodí Moravy a Dyje bylo v celém povodí Moravy v roce 1990 zavlažováno kolem 3,3 % celkové plochy území. V roce 2007 bylo zavlažováno kolem 0,4 % území, přičemž funkčních závlah je kolem 0,8 %.

Tab. 4: Rozpis zavlažovaných ploch v jednotlivých oblastech povodí [2].

Závlahy	Celková plocha [ha]	Zavlažovaná plocha [%] - evidovaná ZVHS k r. 1990 vztažená k celkové ploše oblasti povodí	Možně zavlažovatelná plocha [%] - podle ČSÚ k r. 2007 vztažená k celkové ploše oblasti povodí	Zavlažovaná plocha [%] - podle ČSÚ k r. 2007 vztažená k celkové ploše oblasti povodí
v oblasti povodí Moravy	997 303,0	1,1	0,2	0,1
v oblasti povodí Dyje	1 116 470,0	5,4	1,4	0,7
v celém povodí Moravy	2 113 773,0	3,4	0,8	0,4

Pro vybrané profily byl v rámci úlohy proveden výpočet bilance doplněný o závlahy. Jedná se o profily na vodních tocích u kterých je známo množství skutečné odebrané závlahové vody v referenčním roce 1990. V rámci používaného simulačního modelu se vliv závlah projevoval odběrem k danému profilu. Následné nalepšení průtoků vrácením části odebrané vody do toku se neuvažovalo.

Data o závlahách byla vzata z roku 1990, kdy byly zaznamenány nejvyšší známé odběry pro zavlažování. Do roku 2005 zavlažování zemědělských pozemků v oblasti povodí Moravy prakticky vymizely. V oblasti povodí Dyje odběry poklesly pod 10 % závlah z roku 1990, jak je uvedeno v následující tabulce. Závlahy v oblasti povodí Dyje jsou vázány zejména na vodní nádrže Vranov nad Dyjí, Výrovice, Vír, Brno, Dalešice a Nové Mlýny.

Tab. 5: Průměrný odběr povrchové vody pro závlahy v jednotlivých oblastech povodí v letech 1990 a 2005 [3].

Oblast povodí Moravy		Průměrný odběr povrchové vody pro závlahy [$m^3.s^{-1}$]			Oblast povodí Dyje		Průměrný odběr povrchové vody pro závlahy [$m^3.s^{-1}$]		
Název profilu	**Vodní tok**	1990	2005	2005 / 1990 [%]	**Název profilu**	**Vodní tok**	1990	2005	2005 / 1990 [%]
Olomouc, Nové Sady	Morava	0,073	0,001	1,4	nad Svratkou	Dyje	1,462	0,117	8,0
Kroměříž	Morava	0,101	0,001	1,0	nad Jihlavou	Svratka	0,314	0,010	3,2
Spytihněv	Morava	0,102	0,004	3,9	nad Svratkou	Jihlava	0,071	0,005	7,0
Strážnice	Morava	0,198	0,005	2,5	Břeclav (Ladná)	Dyje	2,292	0,178	7,8
nad Myjavou	Morava	0,243	0,007	2,9					

Následující tabulka ukazuje pro vybrané bilanční profily porovnání zabezpečení podle času Pt [%] se závlahami i bez závlah pro současný stav (1931-1960) i pro klimatickou změnu (2071-2097) v jednotlivých oblastech povodí Moravy.

Tab. 6: Porovnání zabezpečení podle času Pt [%] se závlahami i bez závlah pro současný stav (1931-1960) i pro klimatickou změnu (2071-2097) v oblasti povodí Moravy [3].

Oblast povodí Moravy		1931-1960			1931-1960 - závlahy			2071-2097			2071-2097 - závlahy		
Název profilu	**Vodní tok**	$Q_{a,QOV}$ [$m^3.s^{-1}$]	Pt_{QOV} [%]	**Třída**	$Q_{a,QOV}$ [$m^3.s^{-1}$]	Pt_{QOV} [%]	**Třída**	$Q_{a,QOV}$ [$m^3.s^{-1}$]	Pt_{QOV} [%]	**Třída**	$Q_{a,QOV}$ [$m^3.s^{-1}$]	Pt_{QOV} [%]	**Třída**
Dlouhá Loučka	Oslava (Loučka)	0,73	88,98	X	0,72	87,04	X	0,49	84,99	X	0,48	82,83	X
Olomouc, Nové Sady	Morava	25,24	97,31	D	25,20	97,31	D	21,13	79,75	X	21,09	79,44	X
Kroměříž	Morava	48,68	98,70	B	48,63	98,70	B	40,32	85,30	X	40,27	84,99	X
Spytihněv	Morava	52,79	98,70	B	52,74	98,70	B	44,96	98,86	B	44,91	98,55	B
Strážnice	Morava	57,04	98,70	B	56,94	98,70	B	49,02	97,93	C	48,92	97,93	C
nad Myjavou	Morava	57,84	97,59	C	57,72	97,59	C	49,53	83,75	X	49,40	82,83	X

Tab. 7: Porovnání zabezpečení podle času Pt [%] se závlahami i bez závlah pro současný stav (1931-1960) i pro klimatickou změnu (2071-2097) v oblasti povodí Dyje [3].

Oblast povodí Dyje		1931-1960			1931-1960 - závlahy			2071-2097			2071-2097 - závlahy		
Název profilu	**Vodní tok**	$Q_{a,QOV}$ [$m^3.s^{-1}$]	Pt_{QOV} [%]	**Třída**	$Q_{a,QOV}$ [$m^3.s^{-1}$]	Pt_{QOV} [%]	**Třída**	$Q_{a,QOV}$ [$m^3.s^{-1}$]	Pt_{QOV} [%]	**Třída**	$Q_{a,QOV}$ [$m^3.s^{-1}$]	Pt_{QOV} [%]	**Třída**
Travní Dvůr	Dyje	12,20	99,81	A	11,66	97,59	C	10,51	91,15	X	9,97	85,30	X
Božice	Jevišovka	0,86	92,87	X	0,77	93,15	X	0,68	58,48	X	0,59	48,00	X
pod UKC Brno	Svratka	13,55	99,81	A	13,39	99,81	A	12,74	97,01	D	12,58	97,01	D
Židlochovice	Svratka	15,55	99,81	A	15,39	99,81	A	14,82	93,62	X	14,66	93,31	X
pod nádrží Nové Mlýny	Dyje	40,31	99,81	A	39,31	99,81	A	35,04	97,93	C	34,04	97,32	D
Břeclav (Ladná)	Dyje	40,92	99,81	A	39,70	99,81	A	35,18	97,01	D	33,96	96,39	D
nad Moravou	Dyje	43,25	99,81	A	41,97	99,81	A	40,45	97,93	C	40,45	97,63	C

U všech uvedených profilů je patrný pokles průměrných průtoků ($Q_{a,QOV}$) a následně pokles zabezpečenosti Pt [%]. V budoucnu (při modelované klimatické změně) a velikosti závlah v rozsahu roku 1990 by se projevil nejvyšší pokles zabezpečenosti na řece Dyji vlivem závlah zabezpečovaných ze soustavy vodních nádrží Nové Mlýny (a to za předpokladu, že budou mít současnou kapacitu). Pokles průměrného průtoku je podle bilance patrný i pro současný stav.

7. Závlahy a výhledové lokality akumulace povrchových vod

Při vzniku dnes již neplatného Směrného vodohospodářského plánu (SVP) v 80. letech 20. století byly závlahy považovány za jednu z priorit, jak ukazuje množství plánovaných vodních nádrží a uvažované způsoby jejich využití. Podle uvedených údajů (pokud byla informace uvedena) lze zhruba určit počet lokalit se závlahovým účelem (jako primárním i jako dalším) – viz. Tab. 8. Aktualizovaný seznam tzv. výhledových lokalit akumulace povrchových vod v návrhu Plánu hlavních povodí České republiky již vodohospodářské účely neobsahoval, a proto jsou převzaty z SVP. V současné době připravovaný Generel lokalit pro akumulaci povrchových vod již obsahuje pouze lokality vhodné pro účely zásobování vodou

a protipovodňovou ochranu, ale pro zavlažovaní už nikoliv. Počet lokalit uvedený v Tab. 8 v závorce obsahuje lokality, jejichž původní účel byl převážně závlahový podle SVP.

Tab. 8: Počet výhledových lokalit pro akumulaci povrchových vod s původním zaměřením na závlahy a jejich sumární objem.

Výhledové lokality akumulace povrchových vod	Oblas povodí Moravy			Oblast povodí Dyje		
	počet		objem [mil. m^3]	počet		objem [mil. m^3]
	všechny	pro závlahy		všechny	pro závlahy	
SVP (1988)	78	21	672,10	44	23	596,68
PHP (1. návrh)	49	13	633,95	23	14	376,59
Generel ...	14	- (4)	- (194,58)	9	- (7)	- (233,24)

8. Závěr

Modelovaný vliv klimatické změny na oblasti povodí Moravy a Dyje se projevuje snížením zabezpečeností minimálních zůstatkových průtoků v jednotlivých bilančních profilech na vodních tocích a i poklesem nalepšovacích průtoků u uvedených nádrží v suchých částech roku. Vzroste tím důraz na vodu akumulovanou v nádržích, která bude zabezpečovat vodu pro své odběry, ale i pro samotné vodní toky, jejich odběry a vodní ekosystémy v nich žijící a podzemní vodu, která je povrchovou vodou dotována. Vzroste i potřeba vody pro závlahy jako dalšího zdroje vody pro udržení zemědělství a vzhledu zemědělské krajiny, ve které žijeme. Této potřebě napomůže budování nádrží, které je v současnosti vnímáno rozporuplně. Tento rozpor nelze řešit ryze odborným přístupem, ale je nezbytným politickým rozhodováním.

Nedávno se nám dostal do rukou článek z Nového prostoru s názvem Posedlost počasím [1]. Autor pojednává o čem jiném, než o počasí a jeho vlivu na nás. V jedné kapitolce s názvem Boj o zrno je mj. uvedeno, cituji: „… (dřívější) *přepjatý přístup* (k zemědělství) *dnes nahradil opačný extrém. Stesky venkovanů nad suchem či naopak záplavami způsobenou neúrodou se berou jako výmluvy a nátlak mající za cíl vymámit nějakou tu dotaci a kompenzaci navíc. Vliv počasí na dostatek a cenu potravin dnes veřejnost nevnímá. Vždyť nás už nic nenutí k soběstačnosti. Místní neúrodu je snadné kompenzovat dovozem třebas z opačné strany zeměkoule a ceny dnes netvoří zemědělci, nýbrž prodejní řetězce. Spotřebitel se nanejvýš podiví, že letos jsou banány levnější než brambory.*“

Literatura

[1] BUDKA, A., 2010. Posedlost počasím. Nový prostor, č. 352. s.10 - 11.

[2] POVODÍ MORAVY, s. p., 2009. Plán oblasti povodí Moravy a Plán oblasti povodí Dyje. Kapitola D. Povodí Moravy, s.p., Brno, 56 s. <http://www.pmo.cz/pop/2009/morava/end/index.html> a <http://www.pmo.cz/pop/2009/dyje/end/index.html>

[3] POVODÍ MORAVY, s. p., 2008. Posouzení dopadů klimatické změny na vodohospodářskou soustavu v povodí Moravy. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i. – pobočka Brno. 37 s.

[4] POVODÍ MORAVY, s. p., 2009. Studie posouzení dopadů klimatické změny na vodohospodářskou soustavu v povodí Moravy pro oblast povodí Moravy a oblast povodí Dyje. Shrnutí na základě studie zpracované VÚV T. G. Masaryka, v.v.i. - pobočka Brno. Povodí Moravy, s. p. 8 s. <http://www.pmo.cz/projekty/planovani-oblasti-vod/klimaticka-zmena/>

Kontakty na autora

1 Povodí Moravy, s.p., e-mail: borak@pmo.cz, foltyn@pmo.cz

EXTREMITA ODTOKU V PRAMENNÉ OBLASTI OTAVY (ŘEŠENÍ NEGATIVNÍCH DOPADŮ KLIMATICKÉ ZMĚNY)

Jan Kocum[1], Bohumír Janský[1], Jakub Čurda[1], Julius Česák[1]

Abstrakt

Příspěvek shrnuje poznatky o odtokovém režimu v povodí horní Otavy (jz. Česko) vč. její zdrojnice Vydry, přičemž zvláštní zřetel je věnován formování a průběhu pozorovaných povodňových situací. Hlavní pozornost je soustředěna na objasnění závislosti dynamiky odtoku na fyzicko-geografických poměrech povodí jednotlivých toků. Zvláštní důraz je v tomto ohledu kladen na posouzení hydrologické funkce rašelinišť. Výzkum je založen na analýze dlouhodobých časových řad Českého hydrometeorologického ústavu a dat získaných více než tříletým monitoringem, který je v zájmové oblasti prováděn Katedrou fyzické geografie a geoekologie PřF UK v Praze.

Klíčová slova: odtokový režim, Otava, extremita odtoku, povodeň, hydrologická funkce rašelinišť

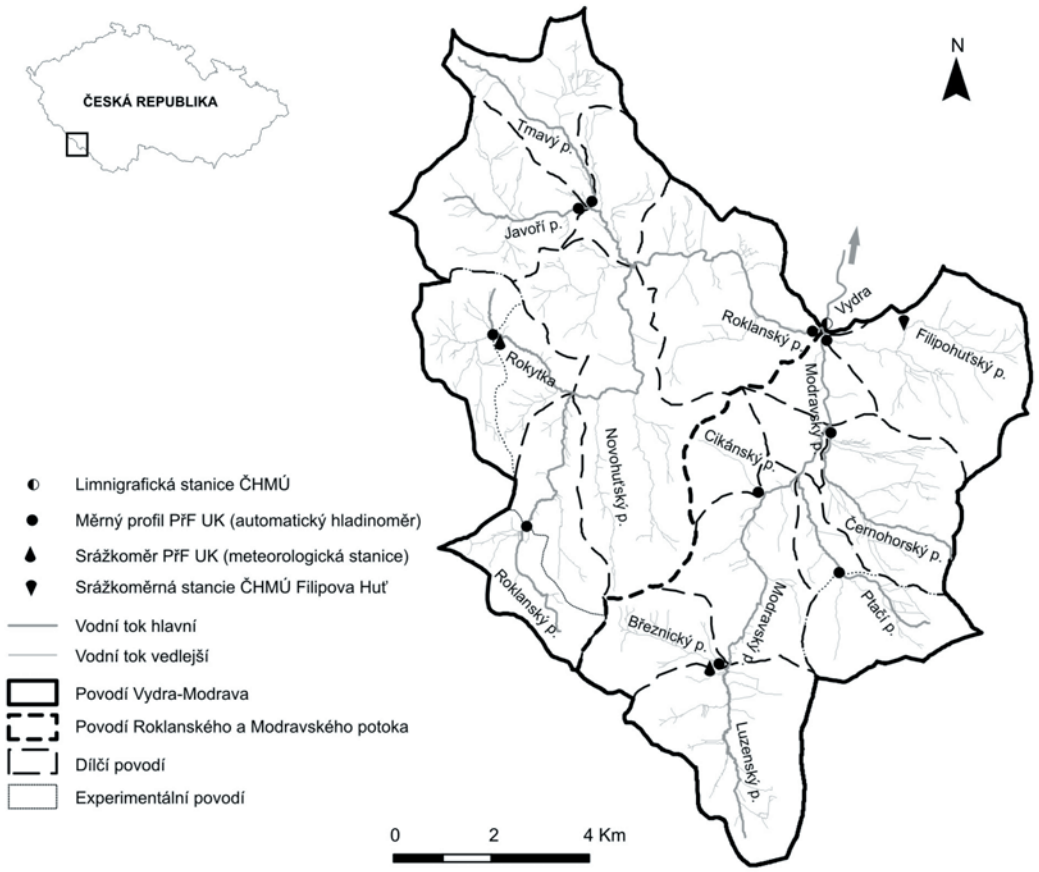
1. Úvod

Zvyšující se frekvence bleskových povodní a extrémně suchých období v posledních letech má za následek naléhavou potřebu řešení širokého komplexu otázek protipovodňové ochrany a opatření ke zvýšení vodnosti v periodách sucha. Vyrovnávání odtoku souvisí s využitím netradičních postupů jakožto vhodných doplňků klasických inženýrských metod. Postupné zvyšování retenční kapacity pramenných oblastí vodních toků by mělo být součástí těchto opatření vzhledem k faktu, že tato území reprezentují zdrojové oblasti formování extrémních odtokových epizod.

Pro pochopení a objasnění procesu tvorby odtoku a míry účinku jednotlivých fyzicko-geografických faktorů na jeho dynamiku v pramenné oblasti Otavy (jz. Česko) bylo v roce 2005 ve vybraných dílčích povodích započato s detailní analýzou jejího odtokového režimu na základě sítě automatických hydrologických a klimatických stanic s telemetrickým přenosem dat. Pro zvýšení retenčního potenciálu zdrojových částí povodí Otavy bylo třeba podrobně analyzovat vliv fyzicko-geografických charakteristik jednotlivých povodí na formování odtoku vč. posouzení hydrologické funkce zdejších horských vrchovišť [2]. Vhodné podmínky pro realizaci tohoto výzkumu poskytuje zejména povodí Vydry, které reprezentuje oblast s častým výskytem povodňových událostí a vysokou mírou heterogenity ve smyslu fyzicko-geografických aspektů [3]. Jednotlivé režimové analýzy a studium tvorby odtoku ve vybraných experimentálních povodích byly prováděny s využitím moderních metodických přístupů vč. geostatistických metod a bilančních analýz iontů, uhlíku a izotopů kyslíku. Dílčí řešené úkoly jsou klíčové pro korektní posouzení retenčního potenciálu jednotlivých modelových povodí, a to především v periodách vysokých či nízkých vodností. Geochemický přístup a izotopová hydrologie poskytla zajímavé výsledky z hlediska málo prostudované hydrologické funkce rašelinišť. Vzhledem k nedostatečné přesnosti odhadu množství vody akumulované ve sněhové pokrývce na základě nereprezentativnosti dat ze staničních měření byla vytvořena metodika jejího monitoringu s přihlédnutím k zásadním faktorům ovlivňujícím její charakter. Optimalizace této metodiky by měla významně napomoci zpřesnění odhadu zásob vody ve sněhu a zdokonalení předpovědi jarního odtoku [4]. Pedologický průzkum jednotlivých půdních typů a druhů vyskytujících se v zájmové oblasti byl uskutečněn pro potřeby precizace určení jejich vodní kapacity [5]. Pro zvýšení retenčního potenciálu pramenných oblastí českých toků je třeba uvážit rovněž možnou obnovu někdejších akumulačních nádrží využívaných v minulosti pro plavení dřeva a využití potenciálních

retenčních prostor vázaných na vhodnou konfiguraci zdejšího reliéfu. Systém těchto malých retenčních nádrží (podobných suchým poldrům s dočasným zadržením vody) by mohl fungovat jako alternativa a doplněk větších vodních nádrží. Moderní přístroje a metody jsou schopny zhodnotit efektivnost takového systému.

Získané poznatky mohou významnou měrou přispět k pochopení povodňového mechanismu v pramenné oblasti Otavy. Svou roli mohou sehrát při návrhu a případné budoucí realizaci konkrétních opatření protipovodňové ochrany, souvisejících se zvyšováním retenční schopnosti zdejší krajiny. Výsledky práce mohou rovněž napomoci při budoucí implementaci vybraných profilů PřF UK v rámci varovného protipovodňového systému v povodí Otavy.



Obr. 1: Lokalizace zájmového území povodí Vydry se státními profily ČHMÚ a experimentálních povodí s instalovanými automatickými zařízeními pro monitoring hydroklimatických jevů a fyzikálně-chemických parametrů (závěrový profil Vydra-Modrava).

2. Materiál a metody

Povodí Vydry se svými dvěma zdrojnicemi, Roklanským a Modravským potokem, reprezentuje území s častým výskytem povodňových událostí a vysokou mírou heterogenity ve smyslu fyzicko-geografických aspektů. Sledované území je situováno v centrální části Šumavy v oblasti tzv. Modravských plání. Z hydrologického hlediska je v širším pohledu součástí pramenné oblasti Otavy. Zájmová oblast o celkové výměře 89,675 km^2 je vymezena rozvodnicemi výše zmíněných povodí a jejím závěrovým profilem je limnigrafická stanice ČHMÚ Vydra-Modrava (1-08-01-013; data ČHMÚ) situovaná přibližně 100 m pod soutokem těchto dvou zdrojnicových toků (viz Obr. 1).

2.1 Datové zdroje

K základní analýze charakteru odtokového režimu a vlastností povodňového mechanismu v povodí horní Otavy vč. Vydry bylo využito datové řady průměrných denních průtoků ze státního profilu ČHMÚ Vydra-Modrava v období 1. 11. 1930 - 31. 10. 2009. Pro určení vzájemné komparace dat z profilu ČHMÚ a vlastních stanic při vybraných extrémních odtokových situacích byla využita data o průměrných hodinových průtocích během vytipovaných epizod v hydrologickém roce 2007, 2008 a 2009. U stejných epizod byla analyzována data o hodinových úhrnech srážek a pro určení sněhových poměrů a indexu UPS data o výšce sněhové pokrývky, vodní hodnotě sněhu a denním úhrnu srážek ve stanici Filipova Huť.

Dílčí statistické analýzy odtoku vč. detailního hodnocení extrémních epizod ve vybraných sub-povodích v rámci zájmového území byly provedeny s využitím vlastních dat z automatických ultrazvukových a tlakových hladinoměrných zařízení (viz kap. 2.2.1), která byla v povodí horní Otavy v posledních čtyřech letech postupně nainstalována. Jedná se o řady okamžitých desetiminutových průtoků, které byly statisticky zpracovány dle ČSN pro další analýzy.

2.2 Použité metody

2.2.1 Monitoring hydro-meteorologických jevů

Za účelem pochopení a objasnění procesu formování odtoku v povodí horní Otavy byla v zájmové oblasti od roku 2006 postupně vybudována vlastní monitorovací síť šestnácti automatických stanic, které umožňují kontinuální sledování odtoku vč. průběhu povodňových vln a minimálních průtoků při konkrétních příčinných hydrometeorologických situacích. Vzhledem k faktické absenci stanic ČHMÚ v nejexponovanějších částech zájmovém území, které jsou klíčové pro formování odtoku, nebyla dosud k dispozici relevantní data o míře vodnosti jednotlivých zdrojnic. Monitoring vodního stavu, resp. průtoku, je založen na systému automatických měřících zařízení od firmy Fiedler-Mágr. Sestava je složena z řídící a registrační jednotky typu M4016 a čidla pracujícího na principu ultrazvuku či hydrostatického tlaku. Kromě toho lze k jednotce připojit další měřící kanály pro monitoring fyzikálně-chemických parametrů povrchových vod. Většina přístrojů je doplněna o GSM modul pro telemetrický přenos dat sítí GPRS na internetový server. Automatický transfer dat na server umožňuje operativní prohlížení, editaci a konfiguraci měřených hodnot i parametrů včetně operativního řešení nastalé extrémní hydrologické situace a kontroly funkčnosti celých měřících sestav. Odesílání dat probíhá v pravidelném intervalu nebo při dosažení limitních či strmostních (gradientních) hodnot. Síť stanic je možno použít i jako varovný systém zasíláním až 30 nastavitelných SMS pro každý záznamový kanál nezávisle na ostatních. Přístroje provádí kontinuální měření v intervalu 10 minut s přesností na 1 mm [1]. Vybrané stanice byly dále doplněny přístrojovým vybavením pro sledování meteorologických prvků. Tyto stanice tak vhodně doplňují nedostatečné pokrytí zájmového území klimatickými stanicemi v rámci sítě ČHMÚ. V lokalitě Březník (viz Obr. 1) byla nainstalována kompletní meteorologická stanice, v oblasti Rokyteckých slatí člunkový srážkoměr SR03. Data z těchto stanic výrazně přispěla k detailní analýze srážko-odtokových vztahů v rozdílných typech povodí.

Pro korektní převedení dat o vodním stavu na odpovídající průtok v jednotlivých profilech v rámci vlastní monitorovací sítě byla v zájmovém území od konce roku 2005 pravidelně prováděna hydrometrická měření. Hlavním záměrem tohoto monitoringu bylo sestavení konzumpčních křivek, které by v kombinaci s prováděným kontinuálním sledováním vodního stavu utvořily základní představu o chodu, charakteru a plošném rozložení odtoku v povodí. Celkem bylo v povodí horní Otavy doposud provedeno téměř 300 hydrometrických měření.

2.2.2 Kritéria pro hodnocení povodňových epizod

Jako hlavní kritérium pro výběr hydrologických epizod označených za povodňovou událost byl zvolen průtok, který na Vydře v profilu Modrava dosáhl v kulminaci úrovně 1letého průtoku (Q_1= 29 $m^3.s^{-1}$; údaj ČHMÚ). Výběr probíhal za použití řady průtoků v profilu Vydra-Modrava (suma průtoků Roklanského a Modravského potoka; vlastní data) v období 1. 11. 2006 - 16. 7. 2009. V případě vícevrcholových vln byly za samostatné povodně považovány ty, jejichž kulminace byly od sebe vzdáleny alespoň 3 dny, během nichž okamžitý průtok poklesl na polovinu kulminačního průtoku první vlny. Vzhledem k tomu, že uvedené parametry splnily ve sledovaném období pouze 3 epizody (7. 12. 2007, 1. 3. 2008, 18. 4. 2009), byla do hodnocení zařazena i další epizoda z roku 2009, která sice úrovně 1letého průtoku na Vydře nedosáhla, významně se však projevila na ostatních tocích horní Otavy a její popis by vzhledem k získaným datům mohl pomoci objasnit některé specifické prvky povodňového mechanismu zájmového území.

K identifikaci jednotlivých dnů povodně byl využit způsob, kdy se den výskytu kulminace nazývá jako DD, dny, které mu předcházely, jsou D-1, D-2..., D-8, a dny, které následovaly, D+1, D+2..., D+5. Hodnocení bylo vždy v hodinovém kroku podrobeno období D-8 až D+5. Ke kategorizaci odtokových epizod byla použita metodika Vlasáka [6].

2.2.3 Postup hodnocení extremity odtoku

U každé z uvedených povodňových situací byla věnována pozornost popisu konkrétní hydrometeorologické příčinné situace, předchozímu nasycení povodí, popř. aktuálnímu stavu sněhové pokrývky. Klíčový byl pak popis hydrologické situace a její kategorizace dle metodiky ČHMÚ. Ve vybraném případě byl popis doplněn korelační analýzou variability a extremity odtoku ve vztahu k fyzicko-geografickému prostředí. Pro posouzení variability odtoku se zvláštním zřetelem na zhodnocení míry extremity při vzestupu povodňové vlny byla pro tento případ využita metoda spočívající ve vzájemném srovnání variability průtoků (vyjádřených variačním koeficientem) v období před vzestupem povodňové vlny (Cv1) a v průběhu povodně (Cv2). Hodnoty variačního koeficientu (Cv2) tedy vyjadřují míru variability povodňových průtoků od jejich normálního průběhu, který by byl teoreticky dosažen bez povodňového případu. Vzájemné porovnání takto získaných variačních koeficientů poskytuje korektní představu o míře extremity povodňové vlny jednotlivých toků ve vztahu k jejich průměrnému průtoku před nástupem povodně. Pro kontrolu a eliminaci možného zkreslení hodnot variačního koeficientu v závislosti na době trvání kulminačního průtoku a délce vlny na jednotlivých tocích byla následně použita metoda spočívající ve vyjádření hodnoty vzájemného podílu maximální dosažené hodnoty desetiminutového průtoku v období D-1 až DD (označena KP) a průměrného průtoku v období před vzestupem povodňové vlny (označován jako PP). Takto získaná hodnota je označována jako index extremity kulminačního průtoku I_{EKP} (I_{EKP} = KP / PP). K odhalení vazeb mezi vypočtenými ukazateli variability a vybranými fyzicko-geografickými parametry jednotlivých povodí byla využita korelační analýza. Stanovené hypotézy byly posléze testovány jednovýběrovým t-testem.

3. Výsledky

3.1 Analýza odtokového režimu

Režim odtoku v povodí Vydry má mírně nevyrovnaný chod způsobený zejména významným zvýšením vodnosti v období jarního tání sněhové pokrývky (Obr. 2). Během tohoto období vykazují výraznou rozkolísanost průtoky nejen v měsíčním a denním chodu, velmi variabilní je jejich velikost zejména v hodinovém chodu. Např. během procesu tání sněhu na jaře 2009 kolísaly průměrné hodinové průtoky Vydry v profilu na Modravě v průběhu jediného dne i v rozmezí 6 $m^3.s^{-1}$, tedy v hodnotách téměř dvojnásobně přesahujících hodnotu dlouhodobého průměrného průtoku. Denní maxima průtoku, která nastávají v tomto období nejčastěji kolem 21:00-22:00, se přitom významně zpožďují za denními maximy teploty, jež vrcholí kolem 13:00-14:00. V režimu ročních průtoků je možné sledovat jistou periodicitu v opakování mimořádně vodných roků, zejména pak v období od počátku 80. let 20. století. Na základě

analýzy dlouhodobé řady ročních průtoků lze konstatovat, že se zde výskyt mimořádně vodného roku (dle klasifikace pravděpodobnosti překročení p%) opakuje v průměru jednou za 7 let. Míra vodnosti daného roku je v případě Vydry nejčastěji ovlivněna množstvím akumulované sněhové pokrývky během zimního období, která při jarním tání dosaženými průtoky určuje charakter vodnosti daného roku [2].

V rámci popisu odtokových poměrů v dílčích povodích bylo zjištěno, že nejvyšší rozkolísanost z hlediska odtoku vykazovaly ve sledovaném období Březnický potok a Rokytka (Obr. 2). Březnický potok odvodňuje oblast, kterou nejvíce zasáhla kůrovcová kalamita. Povodí Rokytky je pak význačné zejména vysokým podílem ploch horských vrchovišť. Naopak velmi nízkou rozkolísanost vykazovaly potoky Černohorský a Cikánský. Oba tyto toky se vyznačují značným podílem plochy rašelinišť a především vysokou mírou lesnatosti. V obou povodích byla v nedávné době provedena revitalizace horských vrchovišť, kterou realizoval NP Šumava. Tyto revitalizace spočívají v hrazení původních meliorační kanálů systémem dřevěných hrází. Významné rozdíly ve variabilitě odtoku těchto dvou toků vede k hypotéze, že uvedené revitalizační úpravy mohou stabilizovat chod průtoků z hlediska jejich ročního průběhu a pozitivně ovlivňují odtok během průměrně vodných období.

3.2 Hodnocení extremity povodní

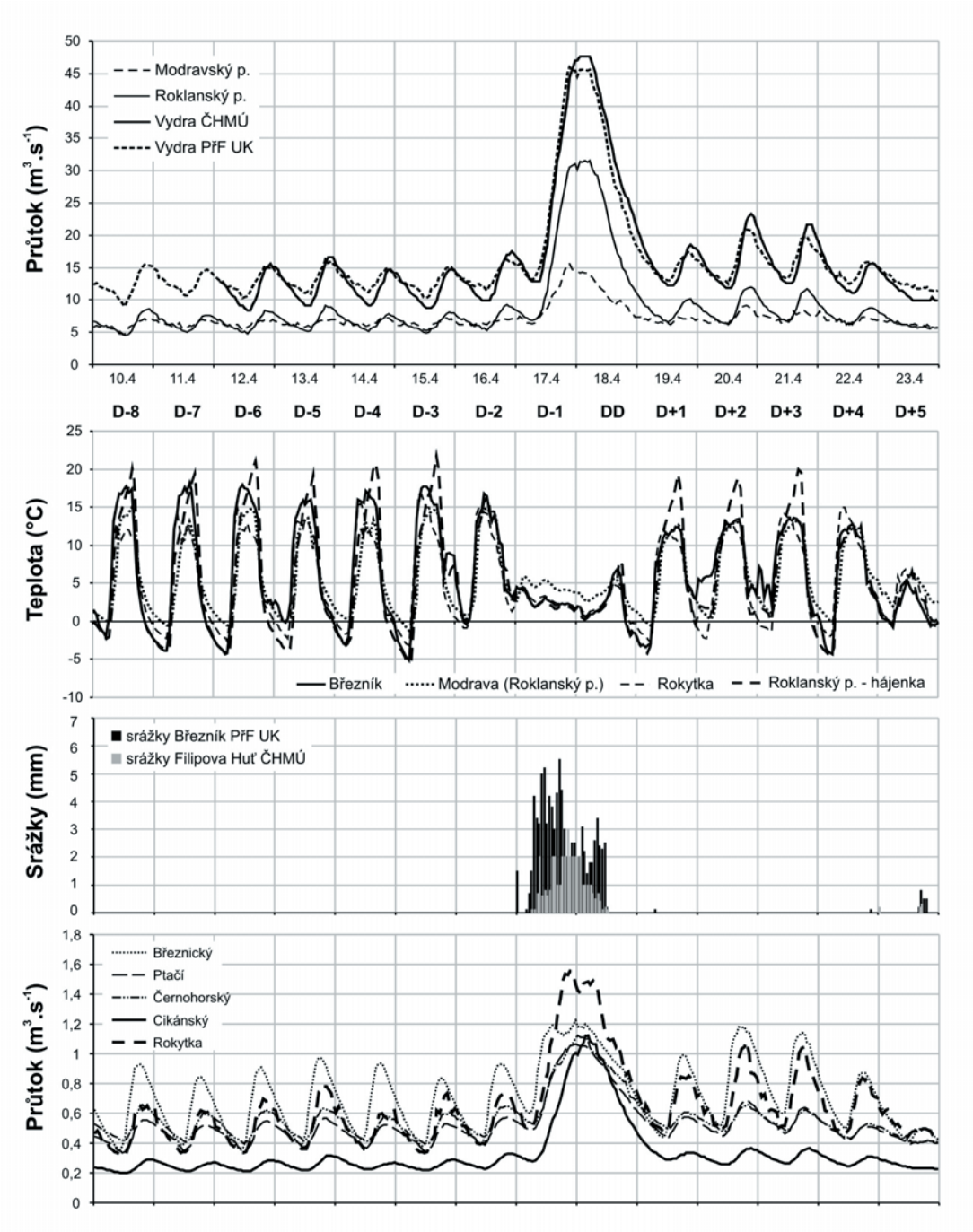
Závislost extremity povodně na specifických fyzicko-geografických podmínkách jednotlivých povodí byla testována na případové studii povodně ze dne 18. 4. 2009. Tato povodeň vytvořila velmi vhodné podmínky pro posouzení chování odtoku jednotlivých toků v zájmové oblasti v reakci na příčinnou situaci. Pomocí popsané metodiky (viz kap. 2.2.3) byla určena míra extremity povodně ve vybraných profilech jednotlivých toků (Tab. 1 a 2). Ta byla, společně s vyjádřenými fyzicko-geografickými parametry území, základem pro korelační analýzu. Potvrzena byla velmi silná závislost extremity povodně na podílu plochy rašelinišť v povodí. Výraznou extremitu vykazovaly při této povodni zejména Cikánský potok a Rokytka. Povodí obou těchto toků jsou význačná vysokým podílem ploch horských vrchovišť. Cikánský potok však, na rozdíl od Rokytky, vykazoval ze všech sledovaných toků vůbec nejnižší rozkolísanost průtoků v době před vznikem povodně. Nabízí se tedy hypotéza, že významný vliv na průběh povodně na tomto toku má již zmíněná revitalizace. Tyto revitalizační úpravy tedy pravděpodobně stabilizují rozkolísanost průtoku v období průměrné vodnosti. Statistické výstupy ale poukazují rovněž na fakt, že při povodňových událostech ovlivňují tato opatření odtokové poměry negativně, tzn. že dokážou vyrovnávat průtoky pouze do určité úrovně extremity, resp. N-letosti. Tyto závěry jsou však formulovány pouze na základě rozboru několika konkrétních událostí a vyžadují podporu analýzy dalších epizod. Výše zmíněné hypotéze však nahrává i průběh průtoku před a během hydrologické události z června a července 2009 na dalším revitalizovaném toku, Černohorském potoce.

Tab. 1: Vypočtené hodnoty ukazatelů variability v období 10. 4. - 18. 4. 2009 ve vybraných experimentálních profilech.

Tok	Cv1	Cv2	PP	KP	I_{EKP}
	Variabilita D-8 až D-2 (10.4.-16.4.)	Variabilita D-1 až DD (17-18.4.)	Průměrný průtok D-8 až D-2 ($m^3.s^{-1}$)	Maximální dosažený průtok D-1 až DD ($m^3.s^{-1}$)	KP/PP
Březnický p.	0,29	0,31	0,637	1,243	2,0
Ptačí p.	0,14	0,43	0,459	1,072	2,3
Černohorský p.	0,14	0,36	0,516	1,278	2,5
Cikánský p.	0,12	1,12	0,251	1,168	4,7
Rokytka	0,25	0,69	0,505	1,607	3,2

Tab. 2: Hodnoty výsledných korelačních koeficientů pro vybrané fyzicko-geografické parametry.

Ukazatel extremity	Podíl rašelinišť (%)	Lesnatost podíl %	Charakteristika povodí (α)	Plocha povodí (km^2)	Délka toku (km)	Střední sklon toku (‰)	Průměrný sklon svahů povodí (stupně)	Hustota (km/km^2)
Cv1	-0,150	-0,756	-0,461	-0,100	-0,250	0,178	0,189	0,265
Cv2	0,962	0,655	0,904	-0,690	-0,591	-0,842	-0,602	-0,692
I_{EKP}	0,943	0,748	0,862	-0,596	-0,482	-0,828	-0,658	-0,630



Obr. 2: Chod průměrných hodinových průtoků, teploty vzduchu a srážkových úhrnů v období 10. - 23. 4.2008 ve vybraných profilech (zdroj: vlastní data 1. 11. 2008 - 16. 7. 2009).

4. Závěry

Tento příspěvek přináší a shrnuje původní analýzy a poznatky o odtokovém režimu jednotlivých toků v povodí Vydry, se zvláštním zřetelem na formování a průběh povodňových situací. Pozornost je soustředěna především na nalezení souvislostí v ovlivnění extremity povodňového průtoku v závislosti na fyzicko-geografickém prostředí v povodí jednotlivých toků. Zvláštní důraz je v tomto ohledu kladen na posouzení hydrologické funkci horských vrchovišť. Práce vychází z dat získaných více než tříletým monitoringem, který je v této oblasti realizován v rámci projektů zabývajících se využitím retenčního potenciálu pramenných oblastí v protipovodňové ochraně.

Provedené analýzy potvrdily značnou vzájemnou korelaci extremity povodňových průtoků a podílu plochy rašelinišť v povodí. Zvlášť významná je pak zvýšená extremita povodní u toků, které prošly revitalizačními opatřeními. Ty spočívají v hrazení původních melioračních kanálů, které vrchovištní komplexy odvodňují. Tyto úpravy tak dle stanovených hypotéz do jisté míry stabilizují rozkolísanost odtoku z hlediska jeho ročního průběhu a vykazují vyrovnávací účinek v období průměrných vodností. Zjištěné poznatky ale rovněž poukazují na fakt, že při povodňových událostech představují revitalizační opatření ve většině povodí z hlediska ovlivnění odtoku negativní jev. Jejich existence v povodí a korytě toku dokáže vyrovnávat průtoky pouze do určité úrovně extremity, resp. N-letosti. Jakmile je určitá úroveň vodního stavu, resp. průtoku, překročena, dochází ve většině případů naopak ke zvýšení odtokové extremity.

Původní výsledky příspěvku představují cenná vstupní data pro následné matematické modelování odtoku v konkrétním území povodí horní Otavy. Mohou též výrazně přispět k pochopení srážko-odtokových vztahů v povodí, jež je možno využít pro precizaci hydrologických předpovědí. Využití těchto poznatků by mohlo napomoci i při budoucí implementaci vybraných profilů PřF v rámci varovného protipovodňového systému ČHMÚ v povodí Otavy. Zájmová oblast poskytuje optimální podmínky pro realizaci rozličných opatření ke zvýšení retenčního potenciálu, ať už se bude jednat o plošná opatření v povodí, tak o využití potenciálních přirozených i antropogenně vytvořených prostorů k zadržení vody. Implementace těchto nenásilných opatření realizovaných v pramenných oblastech by mohla v budoucnu přispívat nejen k redukci kulminačních průtoků během povodňových událostí, ale rovněž k zadržení dostatečného množství vody pro eventuální suché epizody.

Poděkování

Tento výstup vznikl v rámci projektu Specifického vysokoškolského výzkumu 2010- 261 201, projektu GA UK 2371/2007 „Retence vody v pramenných oblastech řek jako nástroj integrované protipovodňové ochrany a řešení problému sucha“, Výzkumného záměru MSM 0021620831 “Geografické systémy a rizikové procesy v kontextu globálních změn a evropské integrace“ a projektu VaV SM/2/57/05 „Dlouhodobé změny poříčních ekosystémů v nivách toků postižených extrémními záplavami“.

Literatura

[1] ČESÁK, J. – KOCUM, J. – KLIMENT, Z. – JENÍČEK, M., 2008. Monitoring odtokového režimu v pramenných oblastech toků. In: Langhammer, J. (Ed.). *Změny v krajině a povodňové riziko. Sborník příspěvků semináře Povodně a změny v krajině*. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, s. 80-85.

[2] JANSKÝ, B. – KOCUM, J., 2008. Peat bogs influence on runoff process: case study of the Vydra and Křemelná River basins in the Šumava Mountains, southwestern Czechia. Geografie - Sborník ČGS, roč. 113, č. 4. Praha, s. 383-399. ISSN 1212-0014.

[3] KOCUM, J. – JANSKÝ, B., 2009. Retence vody v pramenných oblastech Vydry a Křemelné – případová studie povodí Rokytky. In: Černý, D. – Dvořák, L. (Eds.). *Weitfällerské slatě. Sborník referátů ze semináře 21. 1. 2009*. Vimperk: Správa NP a CHKO Šumava, s. 26-48. ISBN 978-80-87257-00-5, ISSN 1803-4470.

[4] KOCUM, J. – JELÍNEK, J. – JENÍČEK, M., 2009. Monitoring sněhové pokrývky a vyhodnocení sněhových zásob na Šumavě a v Krušných horách. In: Hanková, R. – Klose, Z. – Pavlásek, J. (Eds.). *XIV. Medzinárodné stretnutie snehárov. Sborník příspěvků ze semináře 18. - 20. 3. 2009*. Česká zemědělská univerzita v Praze, s. 105-113. ISBN 978-80-213-2027-7.

[5] ŠEFRNA, L., 2004. Pedologická charakteristika povodí Otavy ve vztahu k povodním. In: *Hodnocení vlivu změn přírodního prostředí na vznik a vývoj povodní. Sborník příspěvků semináře grantu GAČR 205/Z052/03* [online]. [cit. 2009-07-08], s. 196-212. <http://hydro.natur.cuni.cz/zmeny_povodni/html/cd_obsah.html>

[6] VLASÁK, T., 2008. Návrh databanky povodní Otavy a její využití v protipovodňové ochraně. [Disertační práce]. Praha: Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, 144 s.

Kontakty na autora

1 Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, e-mail: kocum1@natur.cuni.cz, jansky.b@seznam.cz, kubik.curda@seznam.cz, julekc@natur.cuni.cz

POROVNANIE ZABEZPEČENOSTI VODOU POĽNOHOSPODÁRSKY OBRÁBANÝCH PÔD A LESNÝCH EKOSYSTÉMOV V LOKALITÁCH ŽITNÉHO OSTROVA A SZIGETKOZU (MR)

Viliam Nagy[1], Vlasta Štekauerová[1], Miklós Neményi [2]

Abstrakt

Vodný režim pôdy závisí od prítoku a odtoku vody do, resp. z nenasýtenej oblasti pôdy. Priamo je zásoba vody v nenasýtenej oblasti pôdy ovplyvnená prenosom vody cez jej hornú a dolnú hranicu. Dolná hranica nenasýtenej oblasti pôdy je zvyčajne vymedzená hladinou podzemnej vody. Hornú hranicu tvorí povrch pôdy s porastom alebo bez porastu a reaguje priamo na meteorologické a klimatické podmienky, resp. je miestom, ktoré umožňuje vtekanie vody zo zrážok do nižších vrstiev pôdneho profilu. Vlyv týchto javov na vodný režim pôd, resp. na zásobu vody v nenasýtenej oblasti pôdy, možno kvantifikovať monitorovaním vlhkosti pôdy v celom profile nenasýtenej oblasti pôdy. Oblasti na obidvoch stranách Dunaja podliehajú rovnakým meteorologickým a klimatickým vplyvom a vykazujú určitú podobnosť. V práci boli z monitorovaných vlhkostí pôdy vypočítné integrálne obsahy vody v rôznych vrstvách pôdneho profilu a pomocou hydrolimít bolo určené, či bol pôdny profil dostatočne zásobený vodou pre potreby rastlín v roku 2002 v dvoch lokalitách Žitného ostrova a a k nim pridružených dvoch lokalitách Szigetkozu. Jedna dvojica na rôznych stranách Dunaja je poľnohospodársky obrábaná pôda a druhá dvojica na obidvoch stranách Dunaja patrí do lesného ekosystému.

Klíčová slova: vodný režim, pôda, retenčná krivka, hydrolimity

1. Úvod

Oblasti okolo Dunaja, Žitný ostrov (ľavá strana Dunaja) a Szigetkoz (pravá strana Dunaja), sú podobné. Obidva útvary sú ohraničene prirodzeným tokom – Žitný ostrov Malým Dunajom, Szigetkoz – Mosonským Dunajom. Sú prepletené hydromelioračnými kanálmi, ktorých úlohou je regulácia hladiny podzemnej vody. Časť územia obidvoch útvarov je poľnohospodársky intenzívne využívaná a ďalšiu časť územia pokryvajú lesné ekosystémy

Vodný režim pôdy, ktorý determinuje produkčnú schopnosť pôdy, závisí od prítoku a odtoku vody do, resp. z nenasýtenej oblasti pôdy. Priamo je zásoba vody v nenasýtenej oblasti pôdy ovplyvnená tokom vody cez jej hornú a dolnú hranicu. Dolná hranica nenasýtenej oblasti pôdy je zvyčajne vymedzená hladinou podzemnej vody. Hornú hranicu tvorí povrch pôdy s porastom alebo bez porastu a reaguje priamo na meteorologické a klimatické podmienky prostredníctvom evapotranspirácie, resp. je miestom, ktoré umožňuje vtekanie vody zo zrážok do nižších vrstiev pôdneho profilu. Vlyv týchto javov na vodný režim pôd, resp. na zásobu vody v nenasýtenej oblasti pôdy, možno kvantifikovať buď monitorovaním vlhkosti pôdy v celom profile nenasýtenej oblasti pôdy [4], resp. simuláciou pohybu vody v pôde matematickými modelmi [1], [2] a [3].

Nenasýtená oblasť pôdy tvorí jednu z najdôležitejších a pre hodnotenie pohybu vody určite najkomplikovanejších častí hydrologického cyklu. Medzi základné hydrofyzikálne vlastnosti pôdy patrí vlhkostná retenčná krivka. Využitie vlhkostných retenčných kriviek je výhodné pri výpočte hydrolimít. V prípade, že pôdny profil vo vertikálnom smere nie je homogénny, ale pozostáva z vrstiev rôzneho zloženia a rôznych vlastností, je potrebné určiť vlhkostnú retenčnú krivku všetkých vrstiev.

Hydrolimity sú vlhkosti pôdy, ktoré boli dosiahnuté za určitých podmienok. Väčšinou nemajú presný fyzikálny význam a nemôžu reprezentovať dynamické procesy prúdenia. Je výhodné

ich použiť pri bilanciách vody v pôdnom profile, napríklad pri zisťovaní obsahu vody prístupnej pre rastliny. Poľná vodná kapacita Θ_{PVK} je hydrolimit, ktorý je charakterizovaný vlhkosťou pôdy na hranici medzi kapilárnou a gravitačnou vodou a vyjadruje maximálne množstvo zavesenej vody v skutočnom pôdnom profile, odmerané v poľných podmienkach. Je definovaný pre vlhkostný potenciál pôdy z intervalu pF_{PVK} є (2.0;2.9). Bod zníženej dostupnosti Θ_{BZD} je hydrolimit charakterizovaný vlhkosťou pôdy, pri ktorej sa už podstatne znižuje pohyblivosť pôdnej vody a jej prístupnosť pre rastliny. Je definovaný pre vlhkostný potenciál pôdy z intervalu pF_{BZD} є (3.1;3.5). Bod vädnutia Θ_{BV} je hydrolimit charakterizovaný vlhkosťou pôdy pri ktorej sú rastliny trvale nedostatočne zásobované pôdnou vodou, pretože intenzita absorpcie vody koreňmi rastlín je podstatne nižšia, ako je intenzita transpirácie, v dôsledku čoho rastliny vädnú a hynú. Je definovaný pre vlhkostný potenciál pôdy pF_{BV} = 4,18. Jednou z metód ako určiť zásobu vody v pôde je monitoring vlhkosti v pôdnom profile. Pomocou hydrolimít je možné určiť či zásoby vody v pôde vypočítané z monitorovaných vlhkostí sú dostatočné napríklad pre zásobovanie porastu vodou.

Cieľom práce je z monitorovaných vlhkostí pôdy vypočítať zásoby vody v jednotlivých vrstvách pôdneho profilu a pomocou hydrolimít určiť, či bol pôdny profil dostatočne zásobený vodou pre potreby rastlín v roku 2002 v dvoch lokalitách Žitného ostrova a k nim pridružených dvoch lokalitách Szigetkozu a navzájom ich porovnať. Jedna dvojica na rôznych stranách Dunaja je poľnohospodársky obrábaná pôda a druhá dvojica na obidvoch stranách Dunaja patrí do lesného ekosystému.

2. Popis lokalít

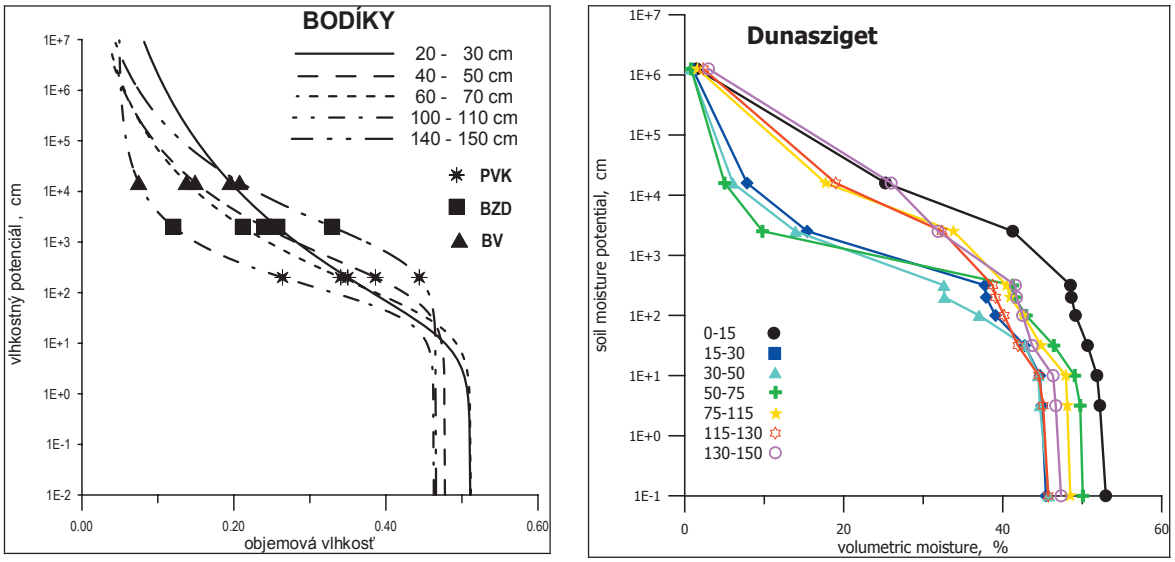
Počas roku 2002 boli neutrónovou sondou monitorované vlhkosti pôdy v lokalitách Žitného ostrova a Szigetkozu: Bodíky a Dunasziget, Báč a Halaszi.

V lokalite Báč je pôda poľnohospodársky využívaná a lokalita Bodíky patrí do lesného ekosystému. Pôda v lokalite Báč je na povrchu hlinitá, prechádza do piesočnatohlinitej a v hĺbke asi 90 až 100 cm do piesočnatej a neskôr do štrkového podložia. Bodíky sú do hĺbky 100 cm zvrstvené a čo sa týka pôdneho druhu skôr hlinité. V hĺbke asi 120 cm začína piesočnatá pôda, ktorá tiež prechádza do štrkového podložia. Pôdny profil v Báči je podstatne viac zvrstvenný ako v Bodíkoch.

V lokalitách v Maďarsku je pôdny profil v obidvoch lokalitách odlišný. Piesočnaté, resp. štrkovopiesočnaté podložie začína v hlbších vrstvách. V lokalite Dunasziget je pôda poľnohospodársky obrábaná. Pôda je zvrstvená, od povrchu skôr hlinitá a v hĺbke 190 cm prechádza do pieskov zmiešaných s hlinou, v hĺbke 280 cm do štrkopiesku zmiešaného s hlinou a od 345 cm sa nachádza štrkopiesok. Lokalita Halaszi patrí do lesného ekosystému. Pôdny profil je zvrstvený, do hĺbky 180 cm skôr hlinitý, od 180 cm je piesok miešaný s hlinou, vo vrstve 240 až 300 cm sa nachádza jemný piesok. Štrk v tejto lokalite sa do 400 cm nenachádza.

2.1 Lesné ekosystémy – Bodíky a Dunasziget

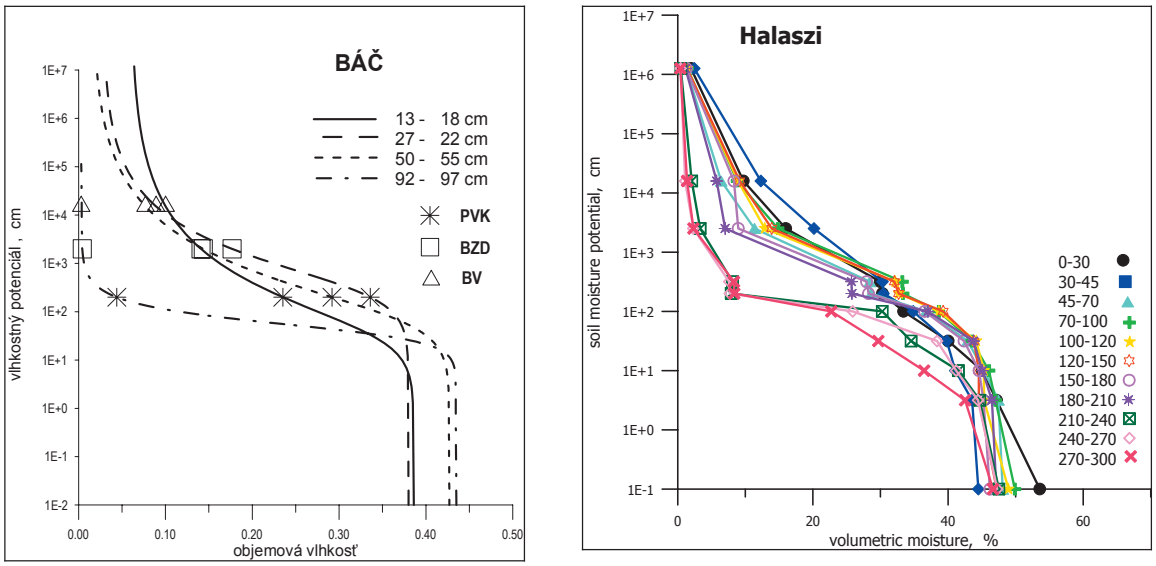
Odvodňovacie vetvy vlhkostných retenčných čiar pôd v lokalitách Bodíky a Dunasziget sú na obrázku 1. Hydrolimity boli určené pre vlhkostné potencialy pF_{PVK} = 2,3 - poľná vodná kapacita, pF_{BZD} = 3,3 - bod zníženej dostupnosti a pF_{BV} = 4,18 - bod vädnutia. Pre lokalitu Bodíky sú hydrolimity uvedené priamo v grafe. Pre lokalitu Dunasziget sú hodnoty vlhkostí hydrolimít v objemových percentách uvedené v tabuľke 1. Obidve lokality sa vyznačujú veľkou nehomogenitou, ktorá sa prejavuje zvrstvenosťou pôdneho profilu.



Obr. 1: Odvodňovacie vetvy vlhkostných retenčných kriviek v lokalitách Bodíky (na merané a aproximované vzťahom Van Genuchtena [5]) a Dunasziget (namerané).

2.2 Poľnohospodársky obrábané pôdy – Báč a Halaszi

Odvodňovacie vetvy vlhkostných retenčných kriviek pôd v lokalitách Báč a Halaszi sú na Obr. 2. Hydrolimity PVK, BZD a BV sú pre lokalitu Báč uvedené priamo v grafe. Pre lokalitu Halaszi sú hodnoty vlhkostí hydrolimít uvedené v tabuľke 1. Podobne ako pre lokalitu Dunasziget, sú aj pre lokalitu Halaszi vlhkosti hydrolimít uvedené v objemových percentách.



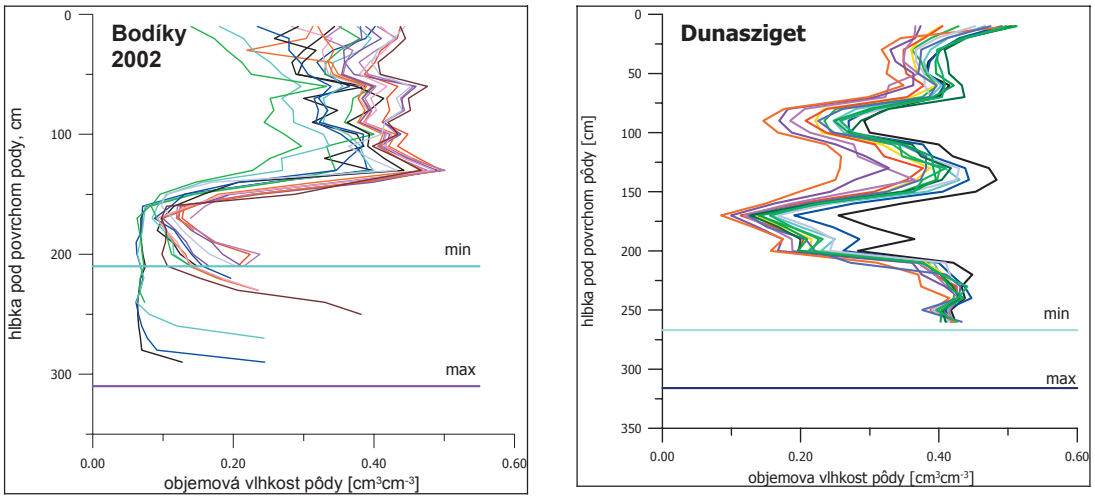
Obr. 2: Odvodňovacie vetvy vlhkostných retenčných kriviek v lokalitách Báč (namerané a aproximované vzťahom Van Genuchtena [5]) a Halaszi (namerané).

Tab.1: Hodnoty hydrolimít PVK, BZD a BV v lokalitách Dunasziget a Halaszi.

Horizont [cm]	PVK pF = 2,3 [obj. %]	BZD pF = 3,4 [obj. %]	BV pF = 4,2 [obj. %]
Dunasziget			
0-15	48,63	41,26	25,25
15-30	37,91	15,39	7,84
30-50	32,66	13,92	6,05
50-75	41,49	9,78	5,01
75-115	40,93	33,80	17,72
115-130	39,09	32,36	18,99
130-150	41,47	31,86	25,96
Halaszi			
0-30	30,29	15,98	9,71
30-45	30,44	20,16	12,28
45-70	28,61	11,35	6,42
70-100	33,34	14,84	8,78
100-120	32,73	12,88	8,91
120-150	32,69	13,90	9,17
150-180	28,23	8,94	8,30
180-210	25,78	6,99	5,75
210-240	7,90	3,31	2,06
240-270	7,70	2,28	1,09
270-300	8,35	2,30	1,36

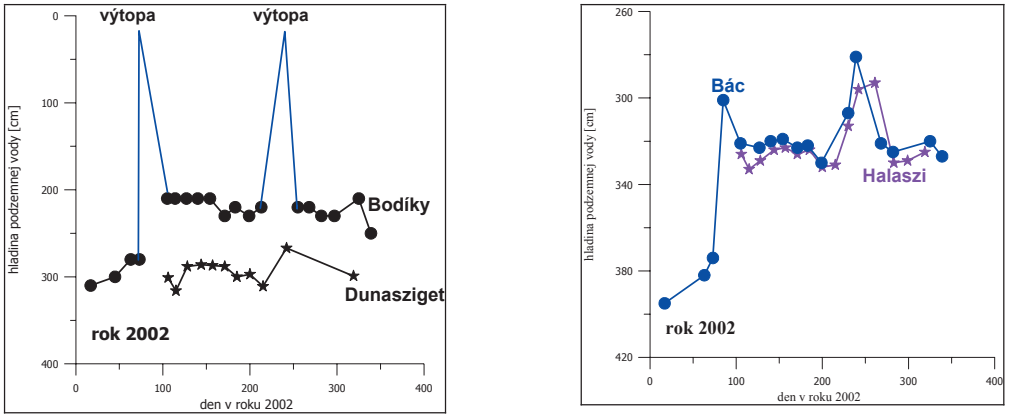
3. Výsledky a diskusia

Na obrázku 3 je zobrazený vývoj vlhkostných profilov počas roku 2002 v lesných ekosystémoch Bodíky a Dunasziget. Tvar vlhkostných profilov svedčí o rôznorodosti jednotlivých lokalít a nehomogenite pôdnych profilov, podobne ako bolo popísané v predchádzajúcej kapitole.

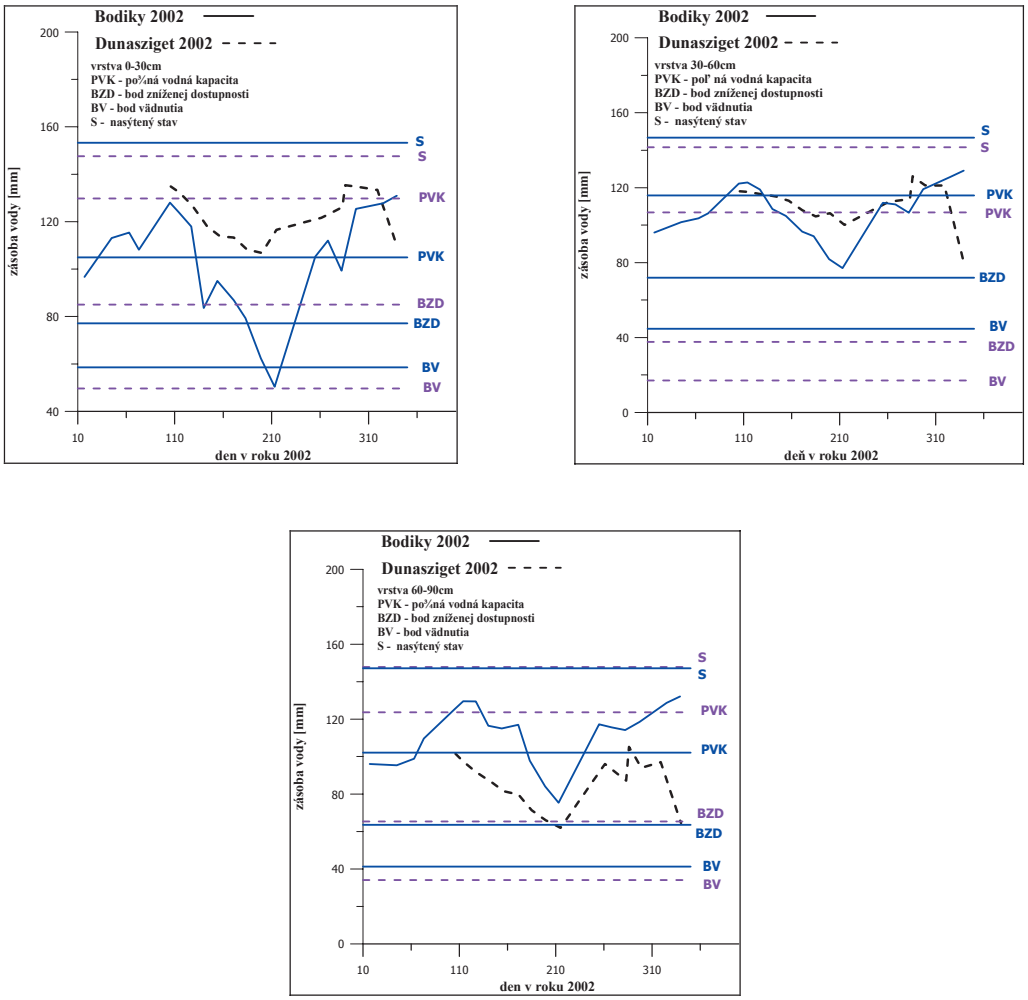


Obr. 3: Vývoj vlhkostných profilov v lokalitách Bodíky a Dunasziget v roku 2002. V jednotlivých obrázkoch sú vyznačené hraničné hĺbky hladín podzemných vôd, ktoré boli namerané v roku 2002.

Hladiny podzemných vôd sa v roku 2002 pohybovali v rozmedzí HPV-max a HPV-min, Obr. 4. Hladina podzemnej vody sa v lokalite Bodíky nachádza hlboko v piesočnatom až štrkovom horizonte. Jej fluktuácia sa pohybovala v rozmedzí 210 až 310 cm, ak neuvažujeme výtopu. Rozkyv hladín podzemných vôd v lokalite Dunasziget bol v porovnaní so slovenskou lokalitou podstatne menší, 267 až 316 cm, a hladina sa pohybovala väčšinou vo vrstve piesku miešaného s hlinou.



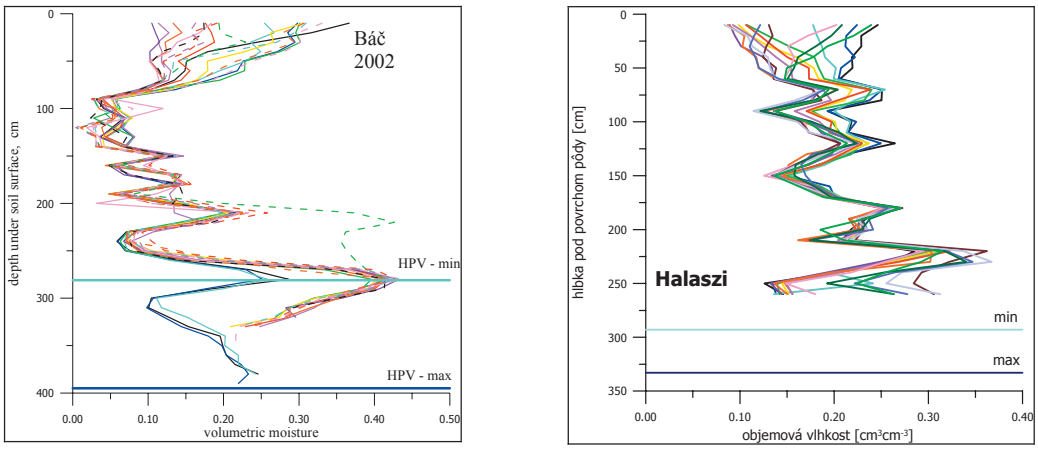
Obr. 4: Priebeh hladín podzemných vôd namerané v lokalitách Bodíky - Dunasziget a Báč - Halaszi v roku 2002.



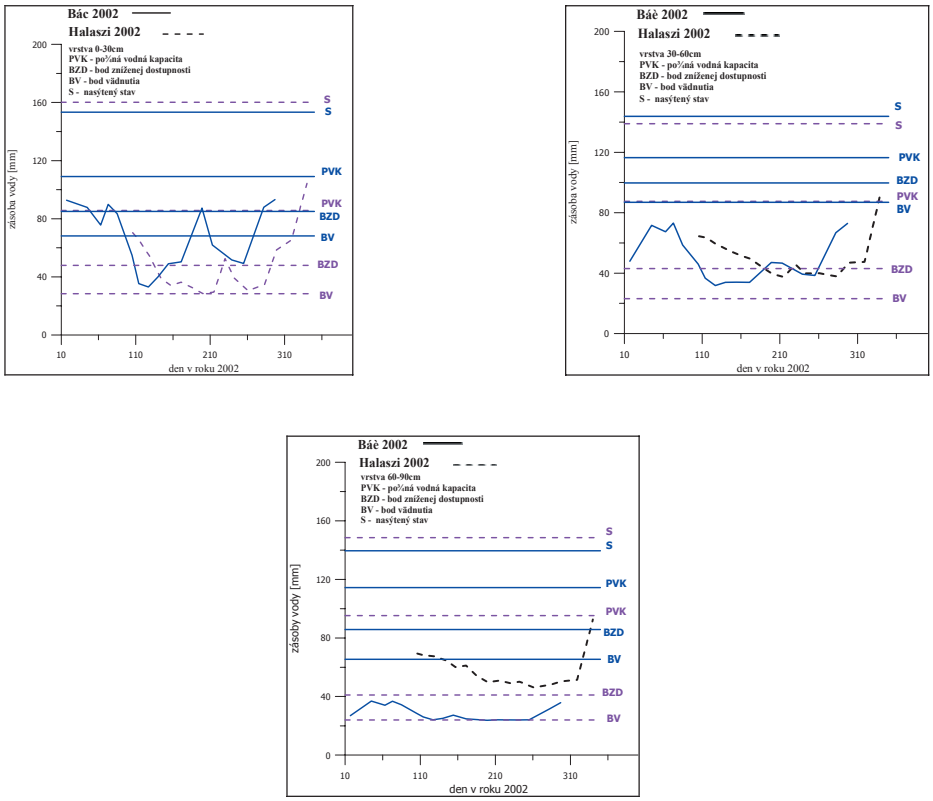
Obr. 5: Porovnanie skutočných zásob vody (vypočítaných z monitorovaných vlhkostí pôdy) s obsahmi vody vypočítanými pre jednotlivé hydrolimity (PVK-poľná vodná kapacita, BZD-bod zníženej dostupnosti, BV-bod vädnutia) v pôdnych vrstvách 0 – 30 cm, 30 – 60 a 60 – 90 cm v lokalitách Bodíky a Dunasziget v roku 2002.

Na obrázku 5 sú postupne zobrazené zásoby vody vypočítané pre vrstvy pôdy 0 – 30 cm, 30 – 60 cm a 60 – 90 cm pre lokality Bodíky a Dunasziget. Z obrázku vidieť, že v priebehu roku 2002 bola vrstva 0 – 30 cm v Bodíkoch podstatne suchšia ako rovnaká vrstva pôdneho

profilu v Dunaszigete. Dokonca v letných dňoch klesla až pod bod zníženej dostupnosti a v krátkom letnom období pod bod vädnutia. Vrstvy 30 – 60 cm boli čo do zásob vody vyrovnanejšie v obidvoch lokalitách a neklesli pod bod zníženej dostupnosti. Vrstva 60 – 90 cm bola v Bodíkoch dokonca vlhkejšia a zásoby vody neklesli pod bod zníženej dostupnosti, aj keď sa tomuto bodu v krátkom období na maďarskej strane priblížili.



Obr. 6: Vývoj vlhkostných profilov v lokalitách Báč a Halaszi v roku 2002. V jednotlivých obrázkoch sú vyznačené hraničné hĺbky hladín podzemných vôd, ktoré boli namerané v roku 2002.



Obr. 7: Porovnanie skutočných zásob vody (vypočítaných z monitorovaných vlhkostí pôdy) s obsahmi vody vypočítanými pre jednotlivé hydrolimity (PVK-poľná vodná kapacita, BZD-bod zníženej dostupnosti, BV-bod vädnutia) v pôdnej vrstvách 0 – 30 cm, 30 – 60 a 60 – 90 cm v lokalitách Báč a Halaszi v roku 2002.

Na obrázku 6 je zobrazený vývoj vlhkostných profilov v lokalitách Báč a Halaszi a na obrázku 4 priebeh hladín podzemných vôd počas roku 2002. Ako vidieť z Obr. 4, priebeh hladín podzemných vôd má v uvažovaných lokalitách podobný charakter (pokiaľ boli hladiny merané). Na slovenskej strane je opäť rozkyv hladín podzemných vôd väčší ako na maďarskej strane.

Na Slovensku sa hladina pohybovala opäť v štrkovom štrkopieskovom podloží na rozdiel od pohybu hladíny podzemnej vody na maďarskej strane. Z vývoja vlhkostných profilov na obrázku 6 možno posúdiť, že obidva pôdne profily sú pomerne zvrstvené.

Na obrázku 7 sú postupne zobrazené integrálne obsahy vody vypočítané pre vrstvy pôdy 0 – 30 cm, 30 – 60 cm a 60 – 90 pre obidve lokality. Z obrázku vidieť, že v priebehu roku 2002 boli zásoby vody vo vrstvách 0 – 30 cm a 30 – 60 cm porovnateľnejšie ako v dvoch lesných ekosystémoch. Obive vrstvy však boli aj podstatne suchšie v obidvoch lokalitách. V lokalite Báč zásoby vody týchto vrstiev klesol až pod bod vädnutia. V lokalite Halaszi boli tieto vrstvy vlhkejšie, ak ich zrovnáme s uvažovanými hydrolimitmi. Výplýva to z iného zloženia pôdneho profilu a z toho, že hladina podzemnej vody v Báči sa nachádzala v štrkovom podloží a neovplyvňovala vodný režim pôd povrchových vrstiev na rozdiel od lokality Halaszi.

4. Záver

Boli monitorované vlhkostí pôdy v dvoch lokalitách patriacich k poľnohospodársky obrábaným pôdam (Báč a Halaszi) a na dvoch lokalitách partriacich k lesným ekosystémom (Bodíky a Dunasziget) na rôznych brehoch Dunaja (SR a MR) v roku 2002. Boli vypočítané zásoby vody v jednotlivých vrstvách pôdneho profilu vo všetkých štyroch lokalitách a pomocou hydrolimít bolo určené, či boli pôdne profily dostatočne zásobené vodou pre potreby rastlín v roku 2002 v uvedených lokalitách Žitného ostrova Szigetkozu. Hĺbka štrkového podložia na maďarskej strane Dunaja je väčšia než na slovenskej strane Dunaja. To vplýva na zásoby vody v jednotlivých vrstvách pôdneho profilu.

Poďakovanie

Autori ďakujú za finančnú podporu z projektov VEGA č. 2/0120/08 a č. 1/0319/09 a z projektov APVT 51-019804 a APVV-0271-07.

Literatúra

[1] BENETIN, J. – ŠOLTESZ, A. – ŠTEKAUEROVÁ, V., 1985. Bilančný matematický model na podrobnú analýzu časovej variability zložiek vodného režimu pôd. Vodohosp. čas., roč. 33, č. 6 585 – 609. ISSN 0042-790X.

[2] MAJERČÁK, J. – NOVÁK, V., 1994. Global a numerical model for water movement in the soil root zone. ÚH SAV, Bratislava. 75 s.

[3] ŠIMŮNEK, J. – HUANG, K. – ŠEJNA, M. – VAN GENUCHTEN, M. T. – MAJERČÁK, J. – NOVÁK, V. – ŠÚTOR, J.,1997. The HYDRUS-ET Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 1.1. U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California and Institute of Hydrology, SAS, Bratislava, Slovakia. 184 s. ISBN 80-967808-0-8.

[4] ŠÚTOR, J.,1999. Water storage monitoring in the aeration zone of soil and its interpretation. Environmental protection of soil and water resources (Ed. G. J. Halasi-Kun). Columbia University seminar proceedings, Vol. XXX, 152-159, ISBN 80-967808-7-5.

[5] VAN GENUCHTEN, M., TH., 1980. A closed – form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 987 – 996, ISSN 0361-5995.

Kontakty na autora

1 Ústav hydrológie SAV, Račianska 75, 83102 Bratislava,
e-mail: nagy@uh.savba.sk, stekauer@uh.savba.sk

2 University of West Hungary, Faculty of Agricultural and Food Sciences, Institure of Agricultural, Food and Environmental Engineering, H-9200 Mosonmagyaróvár, Vár.2, Hungary,
e-mail: nemenyim@mtk.nyme.hu

HYDRAULICKÉ ASPEKTY TVORBY MOKRADE V SENIANSKEJ DEPRESII

Andrej Šoltész[1], Dana Baroková[1], Lea Čubanová[1]

Abstrakt

V centrálnej časti Východoslovenskej nížiny (VSN), južne od nádrže Zemplínska Šírava, sa nachádza rozsiahla terénna depresia Senné, na ktorej boli v minulosti za cieľom odvodnenia vykonané rozsiahle vodohospodárske úpravy [1], [3], [7]. V Senianskej depresii sa nachádza lokalita, ktorá bola v minulosti rozsiahlou sezónne zaplavovanou mokraďou Východoslovenskej roviny, na významnej migračnej trase vodných vtákov. Spomínané územie, ktoré bolo zaradené medzi ramsarské lokality, je chránené ako národná prírodná rezervácia. V súčasnosti prebieha projekt UNDP pod názvom „Integrácia princípov a praktík ekologického manažmentu do krajinného a vodohospodárskeho manažmentu na Východoslovenskej nížine“, riešený aj na Katedre hydrotechniky SvF STU v Bratislave [8]. Cieľom projektu je posúdenie možností opätovného zamokrenia niektorých častí depresie, ktoré by mohlo viesť k obnoveniu pôvodných lokálnych mokraďných systémov, k zlepšeniu vodného režimu pôd a má aj pomerne veľký ekologický význam pre rôzne živočíchy ako sú hniezdiace vtáctvo či rastlinné spoločenstvá.

Kľúčové slová: kanálová sústava, matematický model povrchových a podzemných vôd, vnútorné a vonkajšie vody, návrh hydrotechnických opatrení

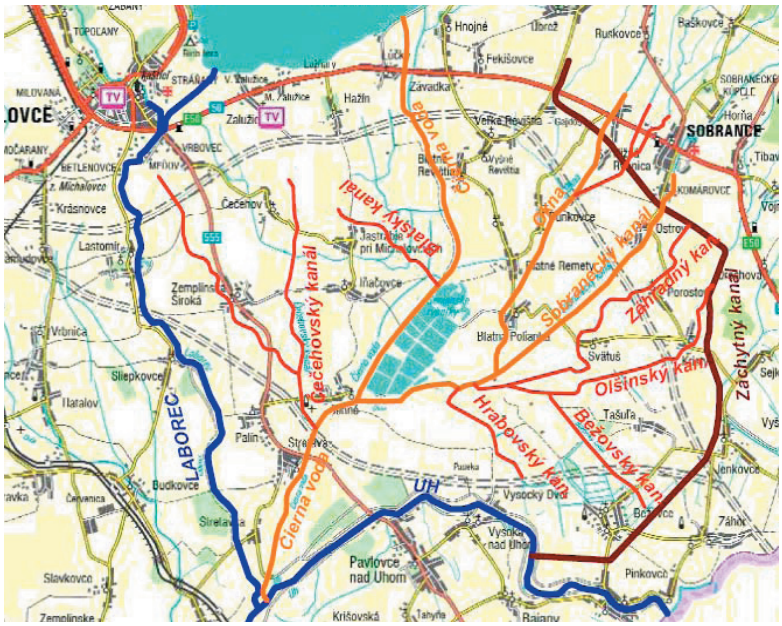
1. Úvod

Senianska depresia je rozsiahla terénna depresia ležiaca na Východoslovenskej nížine, ktorá je približne vymedzená trojuholníkom tvoreným obcami Drahňov - Závadka – Kristy [2]. Nadmorská výška depresie sa pohybuje medzi 97 – 106 m n. m. Pred vykonaním rozsiahlych vodohospodárskych úprav na Východoslovenskej nížine boli v týchto miestach dve rozsiahle prirodzené akumulačné oblasti v podobe mokraďných systémov. Tieto oblasti boli historicky známe aj ako Horné a Dolné Blatá. Vonkajšie vody do depresie pritekali z východu potokmi z pohoria Popričné, zo severu tokom Čierna Voda vytekajúcim z miesta mokrých lúk (v súčasnosti poloha Zemplínskej Šíravy) a tokom Okna vytekajúcim z južnej časti Vihorlatských vrchov.

Odvodnenie Senianskej depresie bolo v minulosti riešené rozsiahlymi vodohospodárskymi úpravami komplexne, tak pre vody vonkajšie ako aj vnútorné (Obr. 1). Regulovanie prítoku vonkajších vôd do oblastí depresie bolo dosiahnuté vybudovaním vodného diela Zemplínska Šírava a vybudovaním Záchytného kanála. Vodná nádrž Zemplínska Šírava akumuluje povodňové vody z Laborca a vodu pritekajúcu tokmi z južných svahov pohoria Vihorlat. Nádrž má dva výpusty. Jedným sa voda dostáva späť do pôvodného koryta Laborca. Druhý dnový výpust slúži na nadlepšovanie prietokov v toku Čierna voda, čím reguluje množstvo pritekajúcej vody do oblasti depresie. Záchytný kanál, ktorý oblasť ohraničuje z východu a čiastočne zo severu, začína pri obci Veľké Revištia a končí pri obci Bežovce, má dve úlohy. Jeho hlavnou úlohou je zachytenie vonkajších vôd pritekajúcich do depresie prítokmi Okny, Žiarovnického a Sobraneckého potoka a ďalších menších ľavostranných prítokov z pohorí Vihorlat a Popričné. Druhou úlohou Záchytného kanála je regulovanie prirodzených prítokov do oblasti depresie pomocou funkčných objektov – hrádzových priepustov. Tým je zabezpečená možnosť nadlepšovania prietokov v kanáloch a tokoch vstupujúcich do depresie.

Vnútorné vody sú z depresie odvádzané ich koncentráciou v 3 hlavných tokoch - Čierna voda, Okna, Sobranecký kanál (na Obr. 1 sú vyznačené oranžovou farbou, niekedy označované aj ako “odpad“, Obr. 2). Do týchto tokov je voda zvádzaná sústavou drénov a melioračných kanálov. Tok Okna, ktorý po sútoku so Sobraneckým odpadom má názov

Cibavka, ako aj všetky vnútorné vody v južnej časti depresie sa koncentrujú v Čiernej vode, odkiaľ sa voda prečerpáva na čerpacej stanici Stretávka do Uhu. Uh sa následne vlieva do Laborca.



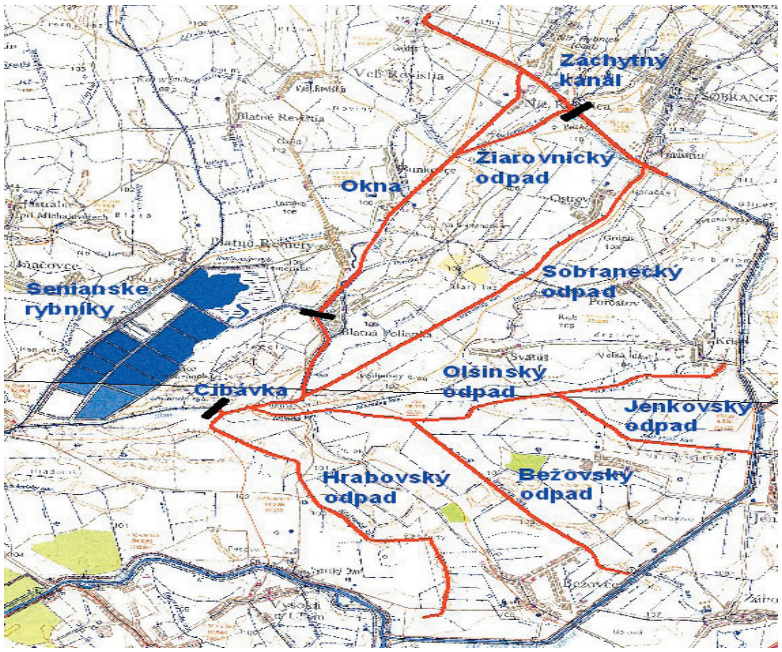
Obr. 1: Oblasť Senianskej depresie vybraná pre opätovné zamokrenie

2. Metodický postup analýzy hladinového režimu povrchových vôd

Systém odvádzania vnútorných a vonkajších vôd depresie slúži tiež na nadlepšovanie prietokov v čase sucha. Na niektorých tokoch sa v súčasnosti nachádzajú nefunkčné stavidlá, ktoré v minulosti vzdúvali hladinu a tým regulovali hladinu nielen vo vlastnom koryte, ale aj v tokoch a kanáloch, ktoré do nich ústia (na Obr. 2 sú niektoré z nich naznačené čiernou úsečkou). Takýmto regulovaním sa zvyšovala hladina podzemnej vody v okolí kanálov a zároveň sa udržiavala dostatočná hladina pre poľnohospodárske využitie vody pre závlahy.

Z dôvodov veľmi priaznivých morfologických pomerov boli v rámci vodohospodárskych úprav nížiny vybudované i Senianske rybníky v strede depresie. Do sústavy rybníkov v oblasti Senné je voda privádzaná cez Žiarovnický kanál a tok Okna. Odber z Okny do Senianskych rybníkov je zabezpečovaný vzdúvacím objektom na tomto kanále (Obr. 2, v strede), pričom prietoky v Okne sú nadlepšované vodou zo Záchytného kanála. V Záchytnom kanále, v rkm 19,423 pri obci Nižná Rybnica, je vybudovaný vzdúvací dvojpoľový objekt so stavidlovými uzávermi (Obr. 2, na severe), ktorý slúži na vzdutie vody, potrebnej pre dodávku vody do Senianskych rybníkov. Ďalší vzdúvací objekt je na pokračovaní Okny, na Cibavke v rkm 3,225. Je to trojpoľová hať hradená stavidlovými uzávermi (Obr. 2).

Ako už bolo spomenuté v úvode, v oblasti južne od nádrže Zemplínska Šírava sa uvažuje so zlepšením vodného režimu pôd, ktoré by v niektorých depresiách mohlo viesť k obnoveniu lokálnych mokraďných systémov. Po viacerých terénnych obhliadkach, po analýze výsledkov nesystematického geodetického zamerania a po preverení možností dlhšie trvajúcej dotácie vody do záujmového územia, najmä v suchých obdobiach, boli na realizovanie tohto cieľa pre projekt „Hydroekologický návrh tvorby mokradí na poľnohospodársky nevyužívaných plochách riadenými záplavami“ [5], vybraté oblasti v okolí kanála Cibavka nad stavidlom na tomto kanále a v oblastiach spätného vzdutia od stavidla do odpadov Hrabovský, Bežovský a Olšinský (Obr. 2).



Obr. 2: Poloha stavidiel na tokoch Cibavka, Okna a Záchytný kanál

Na dodávku vody do týchto oblastí bola využitá existujúca kanálová sústava [8], ktorej pôvodný účel podľa projektovaných a realizovaných vodohospodárskych zásahov bol zamedzenie prítoku povrchových vôd z Vihorlatských vrchov do skúmanej oblasti. Kanálová sústava plní spolu s plošnou drenážou na vymedzenej oblasti odvodňovaciu funkciu a Záchytný kanál zachytáva prítoky z Okny, Žiarovnického a Sobraneckého potoka do tejto oblasti. Využitím týchto prvkov, s realizáciou čo najmenších technických zásahov na dodávku vody do záujmového územia sa zmení funkcia celej sústavy z odvodňovacej na dotačnú.
Ďalšou - nemenej dôležitou úlohou riešenia bolo poukázať na možnosti zlepšenia vodného režimu pôd podmokom - zvýšením hladiny podzemnej vody, prostredníctvom zvýšenia vzdutia na objekte v toku Cibavka v rkm 3,225 zo súčasnej kóty 99,77 m n. m. na kótu 101,10 m n. m. [8]. Berúc do úvahy tieto skutočnosti a limitujúce podmienky pre prietoky bol zostavený pre každý z m–denných prietokov (pre prípady 30, 90, 180, 270 a 330denných vôd) reálny scenár prietokov v Záchytnom kanále a v relevantných odpadoch. Pre tieto scenáre boli simuláciou na matematickom modeli stanovené hladiny v celej sústave, aby bolo možné predpokladať miesta vyliatia vody na terén.
Na simuláciu hladinového režimu v tokoch a zistenie dosahu vzdutia v jednotlivých odpadoch bol využitý softvérový produkt HEC-RAS, pričom boli zostavené dva samostatné modely ustáleného nerovnomerného prúdenia. Simulačné výpočty boli realizované pre päť prietokových scenárov. Z jednotlivých priebehov hladín vyplýva, že dosah vzdutia veľmi málo závisí od prietoku, a v maximálnej miere závisí od hladiny na stavidlovej hati na Cibavke, ktorú je možné regulovať zvyšovaním alebo znižovaním kóty koruny priepadovej hrany na tejto hati.

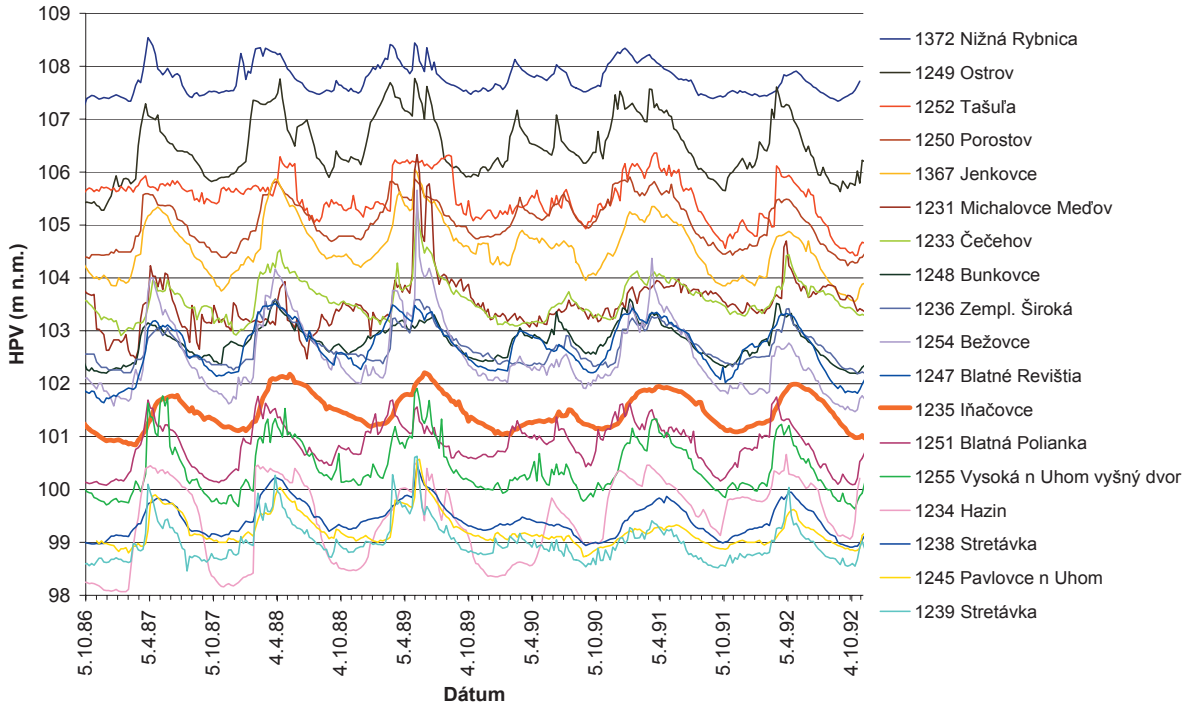
3. Metodický postup analýzy hladinového režimu podzemných vôd

V tejto časti sme navrhli, na základe obhliadky terénu a analýzy spracovaných údajov, koncepciu modelovania hladinového režimu podzemných vôd.

Hydrogeologické a geologické podklady spracované z archívnych prác Geofondu ŠGÚDŠ boli základom geologickej a hydrogeologickej charakteristiky záujmového územia. Podľa výsledkov čerpacích pokusov sa priepustnosť zvodnených materiálov pohybuje od $2{,}52.10^{-6}$ $m.s^{-1}$ do $3{,}5.10^{-5}$ $m.s^{-1}$, ojedinele rádovo 10^{-4} $m.s^{-1}$ v závislosti od druhu zeminy a stavu

zahlinenia, či zaílovania. Ide o veľmi málo priepustné horniny. Koeficient filtrácie pre nepriepustné horizonty je rádovo až 10^{-7} m.s^{-1}, opäť záleží od pomeru pieskovej frakcie [4].

Pri analýze hladinového režimu podzemných vôd bolo použitých 51 sond SHMÚ z celého povodia Laborca. Z týchto sond sme pre kalibráciu vybrali len 17 sond, ktoré sa nachádzajú priamo v skúmanej oblasti. Obdobie meraní v jednotlivých sondách SHMÚ sa veľmi líši, ale vo všeobecnosti ide o pomerne dlhý časový interval. Pre potreby modelovania sme preto vybrali homogénny časový rad údajov meraní HPV v trvaní od 5. XI. 1986 do 28. X. 1992. Časový priebeh HPV týchto sond sa nachádza na Obr. 3.

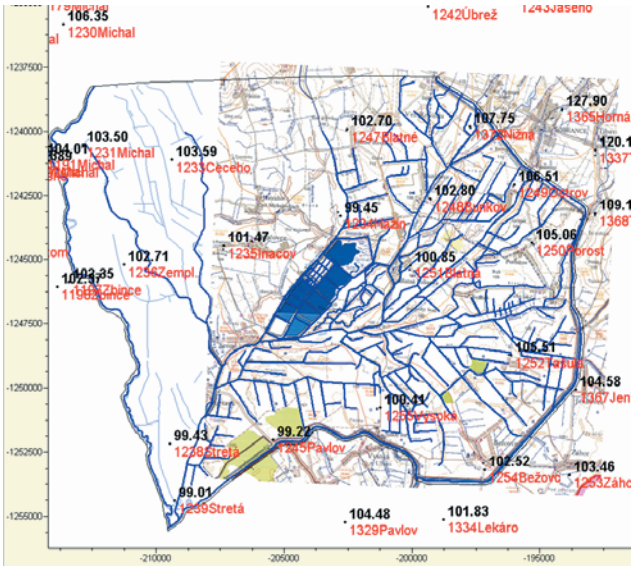


Obr. 3: Časový priebeh HPV v sondách SHMÚ od 5. XI. 1986 do 28. X. 1992

Po zadaní okraja oblasti filtrácie a polohy tokov sme pristúpili k automatickej tvorbe siete konečných prvkov, s ktorou pracuje program TRIWACO [6]. Sieť sme zjemnili v okolí stavidla, ktorým je naplánované ďalšie vzdutie hladiny vody v Cibavke. Veľkosť väčších elementov je 100 m, menších 50 m. Postupovali sme na základe hydrogeologickej charakteristiky územia a prvý zvodnenec sme odhadli - do hĺbky rádovo 20 m pod terénom. V oblasti Senianskej depresie, kde sú typické íly a hliny, je zadaný koeficient filtrácie k = 0,01 m.d^{-1} (čo je asi 1,16.10^{-7} m.s$^{-1)}$, v ostatnej oblasti bol zadaný koeficient filtrácie k = 1 m.d^{-1} (t. j. 1,16.10^{-5} m.s^{-1}) [9].

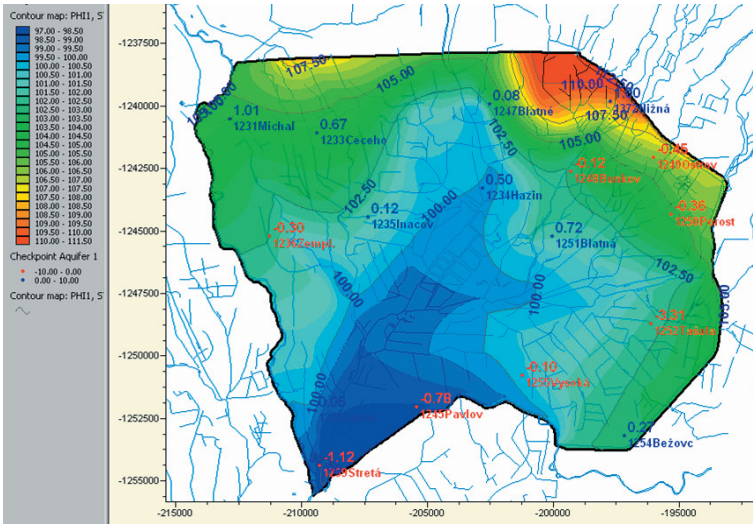
Hladinu v tokoch [8] sme do modelu podzemnej vody zadávali na základe simulácie hladinového režimu v tokoch. Na kanáloch, kde hladinový režim povrchových vôd nebol k dispozícii, sme pristúpili k istému zjednodušeniu a hladinu vody v tokoch sme na základe obhliadky terénu odhadli na 0,5 m nad dnom v kanále, zistenom z pasportu (Technický pasport VSN, In: [8]). Takéto zjednodušenie je na mieste, pretože cieľom modelu bolo nasimulovať v prvom rade zvýšenie HPV a dosah vzdutia hladiny pomocou stavidla na Cibavke (t j. vzdialenosť vplyvu vzdutia v Cibavke na HPV resp. piezometrickú výšku), ale aj hĺbku HPV pod terénom. Určenie presného priebehu HPV pred vzdutím a po vzdutí bolo až druhoradé. Poloha kanálov a odpadov zadávaných do modelu podzemných vôd je znázornená na Obr. 4.

Numerická simulácia a kalibrácia bola ďalším krokom pri zostavovaní konkrétneho modelu. Model podzemných vôd sme kalibrovali na hodnoty HPV v sondách SHMÚ (Obr.3). Výsledky simulácie ustáleného stavu – hydroizohypsy piezometrických výšok pre ustálené prúdenie sú zobrazené na Obr. 5 spolu s vyznačením rozdielu medzi vypočítanou a nameranou HPV.



Obr. 4: Okraj oblasti filtrácie. Poloha sond SHMÚ a priemerné kóty HPV, znázornenie polohy hlavných a vedľajších kanálov

Zo štatistického vyhodnotenia výsledkov v 16 sondách SHMÚ vyplýva, že súčet kladných a záporných diferencií (priemerná odchýlka vypočítanej a nameranej HPV) je 0,07 m, štvorec priemernej absolútnej odchýlky je 0,48 m a maximálna odchýlka v oboch smeroch je od +1,01 do -1,12 m. Dokonca v sondách SHMÚ, na území ktoré môže byť ovplyvnené vzdutím hladiny v Cibavke, vyšiel rozdiel vypočítanej a nameranej HPV max. 0,7 m. V našom prípade je nutné si uvedomiť, že modelovaná oblasť je veľmi veľká, jej plocha je viac ako 18 tisíc ha, a preto možno nasimulované výsledky piezometrických výšok považovať za uspokojivé.



Obr. 5: Priebeh hydroizohýps pre ustálené prúdenie spolu s uvedením rozdielov po kalibrácii modelu – výsledok po kalibrácii modelu

4. Zavedenie navrhnutých technických opatrení do modelu

Na zlepšenie vodného režimu pôd a opätovného zamokrenia častí Senianskej depresie bol vypracovaný návrh technických zásahov podrobne popísaných v [8], ktorý má zmeniť funkciu sústavy kanálov v oblasti Senné z odvodňovacej na dotačnú. Predpokladáme, že v suchých obdobiach, najmä v okolí kanála Cibavka nad stavidlom na tomto kanále a v oblastiach spätného vzdutia od hate do odpadov Hrabovský, Bežovský a Olšinský sa po čase naplnia i vedľajšie kanále. Na realizovanie tohto cieľa boli navrhnuté technické opatrenia, ako je

dotácia vody do oblasti odberom zo Záchytného kanála a zvýšenie vzdutia na stavidle na Cibavke v rkm 3,225 z kóty 99,77 m n. m. na kótu 101,10 m n. m.

5. Vyhodnotenie výsledkov a záver

Prezentované výsledky projektu UNDP „Integrácia princípov a praktík ekologického manažmentu do krajinného a vodohospodárskeho manažmentu na Východoslovenskej nížine“ dosiahnuté v rámci riešenia na základe morfologických, hydrogeologických a hydrologických pomerov v oblasti Senianskej depresie, dávajú dostatočný podklad pre analýzu možnosti dotácie vody pre obnovenie mokraďných systémov prostredníctvom zvýšenia dotácie do podzemnej vody a následného zamokrenia podmokom. Na základe hydraulického modelu, ktorý sme vypracovali pomocou programu TRIWACO a numerickej simulácie prezentovanej v tejto správe, možno považovať zamokrenie podmokom v oblasti Sennianskej depresie za nevhodné a neúčinné. Modelom bolo preukázané, že vzdutím vody na stavidle na toku Cibavka o 1,33 m a vzduté povrchové toky budú v čase sucha dotovať vodou len svoje najbližšie okolie na vzdialenosti kratšej ako 200 m od osi toku Cibavka a po pol roku nastane zvýšenie hladiny podzemnej vody v tejto vzdialenosti maximálne o 15 cm.

Ak by sa v budúcnosti pristúpilo k opätovnému zamokreniu oblasti Senné, toto zamokrenie sa musí vykonať ako zamokrenie povrchové - zamokrenie zátopou a nemožno sa spoliehať na zátopu podmokom.

Literatúra

[1] BELLA, V. a kol., 1971. Vodohospodárske úpravy Východoslovenskej nížiny. Alfa, Bratislava. 120 s.

[2] GOMBOŠ, M. – IVANČO, J., 1994. Vplyv zmien hladín vody v povrchových tokoch na hladiny podzemných vôd v Sennianskej depresii Východoslovenskej nížiny. J. Hydrol. Hydromech. 42, 4 - 5, s. 336 – 352.

[3] GOMBOŠ, M. – ŠÚTOR, J. – TALL, A. – BURGER, F., 2006. Odhad klimatického ukazovateľa zavlaženia na Východoslovenskej nížine z klimatických scenárov. Acta Hydrologica Slovaca. roč. 7, č. 2. ISSN 1335-6291.

[4] GOMBOŠ, T., 2009. Hydraulický návrh tvorby mokraďných systémov na poľnohospodársky nevyužívaných plochách, [Diplomová práca], SvF STU v Bratislave.

[5] PAPČO, J., 2008. Určenie polohy a nadmorskej výšky podrobných bodov pre určenie digitálneho modelu reliéfu, Technická správa k projektu „Hydroekologický návrh tvorby mokradí na poľnohospodársky nevyužívaných plochách riadenými záplavami“.15 s.

[6] Royal Haskoning, 2002. TRIWACO a Simulation Package for Groundwater. Version 3. 0 internal release RH. Royal Haskoning division Water, Rotterdam, Netherlands.

[7] ŠOLTÉSZ, A., 2006. Hydrologicko-hydraulická analýza odvedenia vnútorných vôd na Východoslovenskej nížine. STU v Bratislave. 109 s. ISBN 80-227-2427-0.

[8] ŠOLTÉSZ, A. – KAMENSKÝ, J. – ČUBANOVÁ, L. – BAROKOVÁ, D., 2009. Hydraulická analýza dotácie vody na úpravu vodného režimu pôd v oblasti SENNÉ. Čiastková správa projektu UNDP „Integrácia princípov a praktík ekologického manažmentu do krajinného a vodohospodárskeho manažmentu na Východoslovenskej nížine“. SvF STU,Bratislava. 44 s.

[9] ŠOLTÉSZ, A. – BAROKOVÁ, D., 2009. Geologická a hydrogeologická charakteristika územia Senianskej depresie, Čiastková správa projektu UNDP „Integrácia princípov a praktík ekologického manažmentu do krajinného a vodohospodárskeho manažmentu na Východoslovenskej nížine“. SvF STU, Bratislava. 37 s.

Kontakty na autora

1 Katedra hydrotechniky, Stavebná fakulta, STU v Bratislave,
e-mail: andrej.soltesz@stuba.sk, dana.barokova@stuba.sk, lea.cubanova@stuba.sk

GEOGRAFICKÝ VÝZKUM ČESKÝCH JEZER

Miroslav Šobr[1], Bohumír Janský[1], Tomáš Hrdinka[2], Julius Česák[1], Jan Kocum[1]

Abstrakt

Na území České republiky se nevyskytují velká jezera jako v jiných částech Evropy. Je zde však zastoupeno několik genetických typů jezer, jejichž pánve byly vytvořeny rozmanitými přírodními procesy ale též činností člověka. Podle původu vzniku dělíme jezera v ČR na ledovcová, fluviální, rašeliništní, krasová, hrazená sesuvem a antropogenní, přičemž poslední zmiňovaná dále členíme podle typu nerostné suroviny, kterou je v současné době tvořena jezerní pánev. Z limnologického hlediska byla věnována pozornost zejména jezerům v pánvích po těžbě nerostných surovin. Tato jezera vykazují ve srovnání s jezery přírodního původu řadu zajímavých fenoménů, které jsou dány jak odlišnou morfologií jezerní pánve, tak často specifickými chemickými a biologickými vlastnostmi jejich vody. U některých jezer dochází k tzv. permanentní meromixii, kdy se voda v období homotermie nepromíchává až do dna, ale pouze do určité hloubky.

Klíčová slova: jezero, genetické typy jezer, limnologické charakteristiky

1. Úvod

V České republice, v porovnání např. s územím Evropy, se nachází velmi málo jezer přírodního původu. Nemáme vysoké hory se sítí glaciálních jezer ani plošně rozsáhlé nížiny severského typu s jezerními oblastmi. Nejsou zde žádné rozsáhlé, plnohodnotně rozvinuté krasové oblasti, žádné aktivní vulkanické oblasti ani mořské pobřeží. Na druhou stranu územím České republiky prochází hlavní evropské rozvodí a pramení zde evropsky významné řeky. Na poměrně krátké vzdálenosti zde dochází k významné změně sklonu koryta toku a tím je vytvořen předpoklad pro proces meandrování vodního toku s následným vznikem fluviálních jezer, která jsou jedním z nejčetnějších typů jezer na našem území. Se vznikem rozsáhlé nivy a následnou těžbou štěrkopískových náplavů souvisí výskyt dalšího typu jezer, kterým jsou jezera antropogenní. Ta jsou též velmi četná v oblastech těžby hnědého uhlí a dalších nerostných surovin. A konečně posledním početnějším typem jezer jsou menší vodní plochy v rašelinných a slatinných oblastech, které jsou roztroušeny téměř po celém horském hraničním pásmu [6].

Naše jezera jsou vzhledem ke světovým jezerům daleko menších plošných a objemových dimenzí. Vyskytují se převážně v chráněných územích přírody – národních parcích, chráněných krajinných oblastech a přírodních rezervacích. Pozornost zasluhují zejména s ohledem na zachování ekologické stability chráněného území, zachování charakteristických biotopů, geobiocenóz apod. Proto zpravidla představují mimořádně cenné a jedinečné přírodní útvary [7]. Jedním z cílů výzkumu bylo provést detailní genetickou klasifikaci jezer České republiky v kontextu klasifikace jezer ve světové literatuře. Zvláštní zřetel byl kladen na podrobnější rozdělení jezer antropogenního původu podle typu nerostné suroviny, která se na místě současného jezera dříve těžila.

2. Definice jezera

„Jako jezero je označována stojatá stagnující vodní hmota, která se nachází v prohlubni zemského povrchu, na všech stranách uzavřené a nemající spojení s mořem.“ Takto široce definuje jezero významný německý limnolog F. A. Forel v roce 1901 [1]. Podle této definice lze za jezero považovat každou vodní plochu (louže, rybníky, močály), která nemá spojení s mořem bez ohledu na její velikost. Po rozboru další limnologické literatury [5, 11, 8] jsme s přihlédnutím na specifické podmínky Česka formulovali vlastní definici jezera [7] : „Jezero je přírodní či antropogenní deprese na zemském povrchu nebo pod ním, trvale nebo

dočasně vyplněna vodou. Oproti rybníkům a vodním nádržím se jezera nedají jednoduchým způsobem vypustit.“.

Vedle jezer přírodního původu se v Česku vykytují rovněž četné stojaté vodní akumulace v prostorách po těžbě nerostných surovin. Vzhledem k malému počtu přírodních jezer mají pro naši zemi význam a je třeba jim věnovat pozornost v rámci badatelského výzkumu. Jeho poznatky mohou napomoci úvahám o jejich racionálním budoucím využití, ať už v rámci záměrů ochrany přírody a krajiny, k vodohospodářským účelům či rekreačnímu využití. Vodní akumulace vzniklé těžební činností člověka označujeme jako jezera antropogenní. Název „jezera“ přitom užíváme i přes to, že nevznikla přírodními procesy. Mnohá z nich však přírodní jezera vlastnostmi svých vod připomínají. Zvláště ta antropogenní jezera, která vznikla po dávné těžební činnosti, vytvářejí často cenné přírodní ekosystémy, jež je třeba zachovat pro budoucí generace.

3. Genetické typy jezer na území Česka

Jezera ledovcového původu nalezneme na Šumavě. Jedná se o pět jezer (Černé, Čertovo, Plešné, Prášilské a Laka), která leží v karech hrazených morénami Würmských ledovců. Kromě jezera Laka, jehož hráz byla uměle zvýšena, se vyznačují velkou hloubkou. V Krkonoších nalezneme malé ledovcové jezírko ležící v moréně pod Kotelními jamami, které se nazývá Mechové.

Fluviální jezera se nacházejí na dolních a středních tocích našich řek. Jsou svědectvím dřívějšího vývoje říční sítě. Mnoho těchto „mrtvých ramen“ bylo odškrceno uměle při rekultivacích vodních toků. Vyskytují se zejména podél toků Labe, Moravy, Dyje, Lužnice, Orlice a Odry.

Krasová jezera vznikají akumulací srážkové či podzemní vody v dutinách či depresích krasových hornin, jsou tedy vázána na vápencové případně dolomitické oblasti. Drobná krasová jezírka se vyskytují prakticky v každé české krasové oblasti. Většími krasovými vodními plochami jsou jezera na dnech propastí - Macocha a Hranická propast.

Nejmladším českým jezerem je Mladotické (Odlezelské) jezero, vzniklé zahrazením údolí Mladotického potoka v roce 1872. Menší sesuvem hrazená jezera se nacházejí také v moravských flyšových pohořích.

Jezera organogenního původu vznikají nadržením srážkové či podzemní vody v mělkých depresích za spoluúčasti procesů rašelinění či tvorby slatin. Rašelinná jezera jsou obecně malých rozměrů a vyskytují se téměř ve všech našich pohraničních pohořích. Nejvíce se jich nachází v chráněném území Modravské slatě v centrální části Šumavy.

Antropogenní jezera lze rozdělit na tři základní skupiny. Rybníky, vodní nádrže a vodní plochy vzniklé v souvislosti s těžební činností člověka. Jak plyne z naší upravené definice pro česká jezera, zajímají nás antropogenní jezera vzniklá po těžbě nerostných surovin. Dělíme je podle druhu nerostné suroviny, po jejíž těžbě jsou pozůstatkem. Jedná se o: 1) písek a štěrkopísek, 2) kaolin, 3) hnědé a černé uhlí, 4) vápenec, břidlice a droby, 5) žulu, diorit a čedič, 6) cihlářskou hlínu, jíl a 7) jiné nerostné suroviny [3, 6, 7, 9].

4. Fyzikálně-limnologické charakteristiky zkoumaných jezer

4.1. Glaciální jezera

Glaciální jezera jsou vzhledem k morfometriím svých pánví holomiktická s vyvinutým hypolimniem. Výjimku tvoří mělká jezera Laka a Mechové. Velmi podstatná je pro formování fyzikálních vlastností vysoká nadmořská výška, která ovlivňuje klimatické charakteristiky v oblastech výskytu těchto jezer. Oproti níže ležícím jezerům je zde daleko menší průměrná teplota vzduchu a vyšší množství srážek, takže dochází k posunu období jarního promíchávání na pozdější dobu, naopak podzimní promíchávání nastává dříve. Šumavská jezera jsou i přes rapidní pokles atmosférických depozicí síry stále acidifikována (Čertovo,

Černé a Plešné lze označit za silně acidifikovaná, Prášilské a Laka jsou ovlivněna méně), což mělo v minulosti za následek výrazný úbytek zooplanktonu a vymizení ryb [2]. Barvu a průhlednost vody výrazně ovlivňují sezónní změny výskytu fytoplanktonu a zooplanktonu. Většinou mají jezera barvu hnědo-zelenou, výjimku tvoří Plešné jezero, které má vodu zeleně zakalenou, což je dáno nejvyšší biomasou fytoplanktonu ze všech šumavských jezer [10]. Hodnoty konduktivity a množství rozpuštěného kyslíku byly sledovány pouze ve vodě Černého a Čertova jezera. Nízké hodnoty konduktivity ukazují na velmi malé množství rozpuštěných látek ve vodách glaciálních jezer. Pro málo produktivní jezera, jako jsou Černé a Čertovo jezero, je typická přibližně ortográdní distribuce rozpuštěného kyslíku s mírným poklesem obsahu směrem ke dnu. U Černého jezera byla v době vrcholného léta nalezena pozitivní heterográdní distribuce kyslíku ve vertikálním sloupci, u Čertova jezera tomu bylo naopak, zde byla naměřena negativní heterográdní distribuce kyslíku.

4.2 Fluviální jezera

Fyzikálně-limnologické parametry fluviálních jezer jsou rovněž dány morfologií jejich pánví. Všechny zkoumané lokality jsou velmi mělké, hodnoty maximálních hloubek nebyly u žádné lokality vyšší než 3 m. Teplotní režim těchto jezer je ovlivněn jejich nižší nadmořskou výškou, takže období zámrzu těchto jezer je v porovnání s ostatními typy nejkratší. Vzhledem k malé hloubce není u jezer vyvinuta typická letní stratifikace s metalimniem a hypolimniem. Povrchové teploty dosahují v letním období hodnot kolem 23–25 °C, u dna se pohybují nejčastěji kolem 18 °C. Většinou se jedná o eutrofní jezera, fytoplanktonní a zooplanktonní organismy ovlivňují jednak produkci a spotřebu kyslíku, rovněž mají za následek nejnižší průhlednost ze zkoumaných jezer, která nebyla vyšší než 1 m. Barva vody zkoumaných fluviálních jezer je bez výjimky zeleno-hnědá. Kyslíkové poměry fluviálních jezer jsou typické klinográdním průběhem vertikálního profilu. Hodnoty konduktivity se na sledovaných lokalitách pohybovaly v rozmezí 400-2200 $\mu S.cm^{-1}$.

4.3 Jezera hrazená sesuvem

Sesuvem hrazené Mladotické (Odlezelské) jezero lze charakterizovat jako holomiktické jezero, ve kterém podobně jako u jezer fluviálních není vzhledem k malé maximální hloubce vyvinut metalimnion a hypolimnion. Zde je však na rozdíl od fluviálních (ale i dalších genetických typů) jezer potřeba hledat příčinu i v relativně vysoké průtočnosti jezera a s tím související kratší dobou zdržení vody. Teplota u dna se v době letní stagnace pohybuje kolem 11 °C, v zimním období je teplota vody při dně 3,7 °C. Kyslíkové poměry lze charakterizovat klinográdní vertikální stratifikací, u dna panují anoxické podmínky. Podmínky pro průhlednost a barvu vody jsou ovlivňovány jako na ostatních jezerech oživením vody, zde však vstupuje do hry ještě další významný faktor a tím je zákal nerozpuštěnými látkami, který lze pravidelně pozorovat v souvislosti se zvýšeným průtokem vody na přítoku do jezera. Jezero vlivem tohoto zákalu dostává krátkodobě oranžovo-hnědou barvu vody.

4.4 Organogenní jezera

Fyzikálně-limnologické poměry organogenních jezer jsou opět dány jejich morfometrickými parametry, způsobem a místem jejich vzniku. Vysoká nadmořská výška značně ovlivňuje teplotní režim těchto jezer, zvláště pak období, kdy jsou jezera ukryta pod velmi mocnou vrstvou sněhu a ledu, která může dosahovat i několika metrů (v zimním období 2004 byla na jezeru v Úpském rašeliništi naměřena mocnost sněhu 1,5 m a tloušťka vrstevnatého ledu byla 0,7 m). Některé mělčí vodní plochy mohou zamrzat až do dna. Vody rašelinných jezírek jsou velmi slabě mineralizované, jejich konduktivita je společně s glaciálními jezery nejnižší ze všech genetických typů. Velmi významný je roční chod konduktivity, který je závislý na objemu vody v jezeře, ten je zpravidla nejvyšší na jaře po odtání sněhové pokrývky, kdy je konduktivita na svém ročním minimu. Průhlednost vody dosahuje zpravidla až na dno, výjimkou je pouze jezero v Chalupské slati, kde se hodnoty průhlednosti pohybovaly kolem 0,5 m. Organogenní jezera jsou vlivem obsahu huminových látek typická barvou akumulované vody. Podle Forel-Uleovy stupnice se vždy jednalo o odstíny 19–21, což jsou světle až tmavě hnědé odstíny stupnice. Vzhledem k tmavé barvě vody dochází k pohlcování

tepla a teplota vody v letním období je vyšší než 20 °C prakticky v celém vodním sloupci, který není výrazně teplotně stratifikovaný. S relativně vysokou teplotou vody a spotřebou rozpuštěného kyslíku na chemickou oxidaci souvisí celkově malé koncentrace O_2 ve vodě. Organogenní jezera charakterizuje klinográdní distribuce rozpuštěného kyslíku.

4.5 Antropogenní jezera

Nejvíce rozmanité vlastnosti akumulovaných vod mají jezera antropogenní. Rovněž zde se uplatňuje vliv morfometrie jezerní pánve, dalším velmi důležitým faktorem je původně těžená surovina (geologické podloží). Drtivá většina antropogenních jezer je zásobována pouze podzemní a srážkovou vodou, trvalé povrchové přítoky pro tento typ jezer nejsou typické. Závislost některého ze zkoumaných ukazatelů na stáří jezera nebyla zjištěna. Stáří jezera hraje roli spíše v biologické sukcesi jezera, přičemž některá jezera se stala chráněnými územími s refugii pro nejrůznější druhy rostlin a živočichů. Mnoho lokalit antropogenních jezer by bylo možno pro jejich vysokou kvalitu vody využít jako potenciální zdroj pitné vody.

Antropogenní jezera jsou stejně jako ostatní genetické typy českých jezer dimiktická, na rozdíl od jezer přírodního původu zde nalezneme lokality, které nejsou holomiktické, tj. nepromíchávají se v celém vodním sloupci, ale pouze do určité hloubky (jezera meromiktická). Hlavní příčinou vzniku meromixie je přítomnost specifického geologického podloží, kdy druh těžené horniny ovlivňuje množství rozpuštěných látek ve vodě. U některých jezer je meromixie způsobena převážně specifickými morfometrickými podmínkami jezerní pánve, ostatní faktory se uplatňují sekundárně (např. před větrem chráněná poloha Hromnického jezera) [4].

Typické letní teplotní zvrstvení je vyvinuto pouze u některých jezer. To, zda se vyvinou typické vrstvy epilimnion, metalimnion a hypolimnion, je závislé na morfometrii jezerní pánve (dostatečná maximální hloubka), v některých případech i na topografii okolního terénu. Například jezera na lokalitách Jílové (u Železného Brodu), Lhotský vrch (u Jesenice na Plzeňsku), Stříbrné j. (u Fulneku) a jezírko u Kyzu (u Churáňova) mají typické letní zvrstvení i přes menší hodnotu maximální hloubky. To je v těchto případech způsobeno polohou jezer v zakrytých místech (vysoké lomové stěny, lesní porost), což má za následek velmi rychlé promíchání vody, které není dostatečně podporováno větrem, k promíchávání tak dochází na velmi krátkou dobu za teplot blízkých 4 °C. Epilimnion těchto jezer je velmi málo mocný, jeho hloubka je obvykle do dvou metrů. U dalších jezer, kde je vyvinuta letní stratifikace, je tato podmíněna velkou maximální hloubkou jezerní pánve, která je obvykle větší než 10 m.

Průhlednost a barva vody úzce souvisí s podložím, ve kterém se nachází pánev antropogenního jezera a s jeho trofií. Nejvyšší hodnoty průhlednosti byly zaznamenány u jezer v lomech po těžbě vápence (Velká Amerika u Mořiny, Jasenice u Valašského Meziříčí), droby (Výkleky u Přerova), břidlice (Svobodné Heřmanice u Opavy) hnědého uhlí (lom u Litvínova) a žuly (Srní u Hlinska). Barva těchto jezer se pohybuje v odstínech od modré po žluto zelenou. Byla nalezena velká závislost na celkovém objemu akumulované vody. Lokality menších objemových parametrů mají průhlednost mnohem menší, barva se stává více zelenou až zeleno hnědou. Průhlednost u ostatních typů jezer se pohybuje průměrně okolo 1-3 m. Roční chod průhlednosti v podstatě kopíruje teoretické poznatky, u většiny lokalit byla nejvyšší průhlednost naměřena na jaře nebo v zimě, případně při podzimním promíchávání vody. Např. u oligotrofního jezera na lokalitě Svobodné Heřmanice se při podzimní homotermii dostává k povrchu čistá voda z hloubky. Minimální průhlednost byla naopak ve většině případů zaznamenána v letním období, což souvisí s rozvojem oživení jezera. Velmi malé hodnoty průhlednosti byly zaznamenány u lokalit v bývalých kaolinových resp. sádrovcových lomech (lokalita Čankov u Karlových Varů a Stříbrné jezero u Opavy), což je důsledkem velkého zákalu, který vzniká na nezpevněných březích jezer jejich omýváním vlnami.

Distribuce kyslíku ve vodách českých jezer je ve většině případů klinográdní, množství kyslíku s hloubkou klesá, ve velkých hloubkách jsou koncentrace velmi nízké, často zde panují anoxické podmínky. Ortográdní distribuce kyslíku byla pozorována ze zkoumaných

jezer na lokalitách Velká Amerika a Výkleky. U některých lokalit byl zaznamenán odklon od klinográdní křivky distribuce kyslíku a byla nalezena metalimnetická maxima, ve kterých jsou nejvyšší koncentrace rozpuštěného kyslíku. Tyto vrstvy jsou způsobené výskytem fotosyntetizujících řas a sinic. Hodnoty průhlednosti u jezer s pozitivní heterográdní distribucí se vždy nacházely těsně nad hranicí maximálního nasycení kyslíkem, stejně tak platí, že se tato vrstva nacházela ve spodní části metalimnia, což plně odpovídá teoretickým poznatkům, tj. že se zde vyskytují druhy organismů, které potřebují chladnější vodu a jsou méně náročné na příjem světelného záření [4].

5. Závěr

Pro potřeby geografického výzkumu jezer na území Česka byla na základě studia geografické a limnologické literatury upravena definice jezera. Na základě studia literatury a na základě terénního výzkumu byla provedena genetická klasifikace jezer ČR. Předcházelo jí studium různých genetických klasifikací používaných ve světové literatuře. Zvláštní zřetel byl kladen na doposud neprávem opomíjená antropogenní jezera, která byla podrobně rozdělena do skupin podle druhu nerostné suroviny, která se původně těžila v místě současného jezera a lze u nich předpokládat podobné vlastnosti akumulovaných vod. Morfometrické parametry jezer ale i vodních nádrží a rybníků mají velký význam pro fyzikální, chemické či biologické vlastnosti vody. Pro potřeby výzkumu jezer byla vyvinuta nová metodika, která umožňuje přesnější a rychlejší mapování vodních ploch. Využívají se při ní nejmodernější přístroje, naměřená data jsou kompletně zpracována pomocí počítačů. Na základě hodnocení naměřených hodnot teploty vody, konduktivity, obsahu rozpuštěného kyslíku, průhlednosti a barvy vody ve čtyřech ročních obdobích, byly hodnoceny fyzikální parametry jednotlivých genetických typů jezer. Výsledky všech těchto měření dokumentují rozmanitost fyzikálních vlastností českých jezer. Byla vysledována přímá závislost těchto parametrů na způsobu vzniku jezera resp. na morfometrických poměrech jezera. Jezera byla rozdělena na základě naměřených dat do skupin podle promíchávání vody a podle vertikální distribuce rozpuštěného kyslíku. Velmi podrobně byly zkoumány anomálie meromiktických jezer na lokalitách Srní, Čankov, Hromnické a Zelené jezero.

Poděkování

Příspěvek byl vypracován s finanční podporou výzkumných projektů: výzkumný záměr MŠM 0021620831 „Geografické systémy a rizikové procesy v kontextu globálních změn a evropské integrace“, GAČR : 205/03/1264 “Atlas jezer České republiky – morfometrické, sedimentologické a limnologické poměry jednotlivých genetických typů jezer“.

Literatura

[1] FOREL, F. A., 1901. Handbuch der Seenkunde. Algemeine Limnologie. Stuttgart.

[2] FOTT, J. – KOHOUT, L. – PRAŽÁKOVÁ, M., 2001. Zooplankton šumavských jezer: 130 let změn a perspektivy dalšího vývoje. Aktuality šumavského výzkumu. Správa NP a CHKO Šumava, Vimperk, s. 58-59.

[3] HRDINKA, T., 2005. Antropogenní jezera Česka. Geografie, 109, 3, str. 210-228. ISSN 1212-0014.

[4] HRDINKA, T. – ŠOBR, M., 2010. Projevy a příčiny meromixie jezer po těžbě nerostných surovin v Česku. Geografie, 115, č. 1, s. 96-112. ISSN 1212-0014.

[5] HUTCHINSON, E. G., 1957. A Treatise on Limnology. Volume I. Geography, physics and chemistry. John Wiley & Sons, Inc., New York. 1015 pp.

[6] JANSKÝ, B. – ŠOBR, M. et al., 2003. Jezera České republiky. PřF UK, katedra fyzické geografie a geoekologie, Praha. 216 s. ISBN 80-86561-05-4.

[7] JANSKÝ, B. – ŠOBR, M., 2004. Genetic classification of lakes in the Czech Republic. Geografie, 109, č. 2, ČGS, Praha, s. 117-128. ISSN 1212-0014.

[8] KALFF, J., 2002. Limnology. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 592 pp.

[9] ŠOBR, M., 2007. Jezera České republiky – fyzickogeografické a fyzikálně-limnologické poměry. [Disertační práce]. Katedra fyzické geografie a geoekologie, PřF UK, Praha. 235 s.

[10] VRBA, J. – KOPÁČEK, J. – FOTT, J., 2002. Šumavská ledovcová jezera na přelomu tisíciletí. Živa, 6/2002, s. 265-269.

[11] WETZEL, R. G., 2001. Limnology. Lake and River Ecosystems. Third Edition. Academic Press, Elsevier Science (USA), San Diego. 1006 pp.

Kontakty na autora

1 Katedra fyzické geografie a geoekologie, PřFUK v Praze, e-mail: sobr@natur.cuni.cz, jansky.b@seznam.cz, julekc@natur.cuni.cz, kocum1@natur.cuni.cz

2 VÚV Praha, e-mail: hrdinka@vuv.cz

MINIMÁLNÍ PRŮTOKY ŘEKY OSTRAVICE

Jana Bohdálková[1], Jiřina Vontorová[2]

Abstrakt

Příspěvek se zabývá výskytem minimálních průtoků řeky Ostravice, která je pravostranným přítokem Odry. Ostravice pramení v Beskydech, jejími hlavními přítoky jsou pravostranné Morávka a Lučina a levostranná Olešná. Na samotné řece Ostravici se nachází 4 vodoměrné stanice, a to Staré Hamry (od roku 1969), Šance (1926), Sviadnov (1955) a Ostrava (1926).

Výskyt minimálních průtoků byl zjišťován na těchto stanicích od začátku měření do roku 2009 a to podle jednotlivých let, měsíců a sezón, což je ukázáno na přehledných grafech. Ve výsledcích je zejména patrný vliv údolní nádrže Šance – rozdíl výskytu minimálních průtoků mezi stanicí ve Starých Hamrech (nad nádrží) a stanicí Šance (pod přehradou).

Údolní nádrž Šance je vodárenská nádrž, která byla vybudována v letech 1964 až 1969. Napouštění nádrže začalo 1. dubna 1969, do průběhu napouštění zasáhla povodeň v červenci 1970. Do trvalého provozu byla nádrž uvedena v roce 1973. Kromě hlavního účelu dodávky pitné vody je také účelem nádrže zajištění minimálních průtoků v řece Ostravici pod Šancemi, nadlepšování průtoků v profilech níže na tocích pro zajištění odběrů pro průmysl a pro zajištění minimálních průtoků, snížení povodňových průtoků a dodávka vody k energetickému využití.

Znalost výskytu minimálních průtoků, jako jednoho z extrémů hydrologického režimu, má velký význam při řešení zásobování pitnou i užitkovou vodou, ale také z hlediska kvality vody, kdy při malých vodnostech dochází k menšímu naředění znečištěných vod.

Klíčová slova: minimální průtok, povodí Ostravice, přehradní nádrž Šance

1. Úvod

Hodnocení režimu minimálních průtoků řeky Ostravice je zpracováno podle výskytu minimálních průtoků v jednotlivých letech, měsících a ročních obdobích. Minimální průtok je vymezen pomocí metody, při které je za mezní hodnotu zvolen Q_{355d} (průtok, který je překročen 355 dní v roce) [1]. Hodnoty Q_{355d} byly vypočítány za standardní období 1931 – 1980.

Na řece Ostravici se nachází 4 vodoměrné stanice, jejich vybrané charakteristiky jsou uvedeny v Tab. 1. Protože jsou všechny výskyty minimálních průtoků zjišťovány v hydrologických rocích, jsou data zpracována ve stanici Staré Hamry od hydrologického roku 1970, Šance 1927, Sviadnov 1956 a Ostrava 1927. Posledním celým hydrologickým rokem je k dnešnímu datu hydrologický rok 2009.

Pro zpracování výskytu minimálních průtoků byly využity průměrné denní průtoky ve zvolených stanicích, které poskytl ČHMÚ Ostrava.

Tab. 1: Vybrané vodoměrné stanice a jejich charakteristika [2], ČHMÚ

Stanice	Plocha povodí [km^2]	Nadm. výška nuly vodočtu [m n.m.]	Q_a [m^3.s^{-1}]	Q_{355d} [m^3.s^{-1}]
St. Hamry	73,33	511	1,50	0,131
Šance	147,08	440	3,23	0,292
Sviadnov	482,05	276	11,0	1,260
Ostrava	821,07	202	15,5	2,265

K základním průtokovým charakteristikám minimálních průtoků patří minimální průtok Q_{min} neboli nejmenší průměrný denní průtok za sledované období. Tento je i se svým výskytem uveden v Tab. 2.

Tab. 2: Nejmenší denní průtok ve vybraných stanicích za celé období pozorování

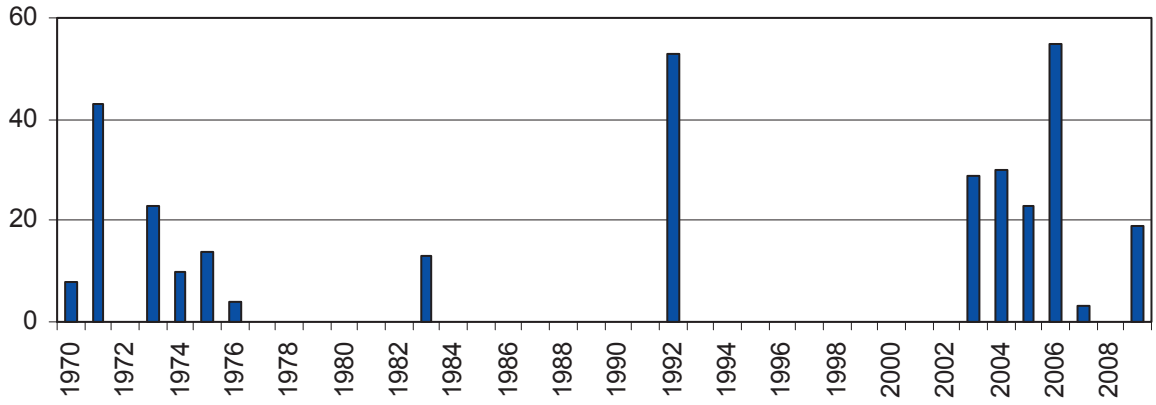
Stanice	Q_{min} [m^3.s^{-1}]	Hydrologický rok	Datum
St. Hamry	0,010	1971	27. - 28. 7.1971
Šance	0,001	1970	14. - 15. 7. 1970
Sviadnov	0,094	1959	21. 10. 1959
Ostrava	0,750	1950	22. 7. 1950

2. Výskyt minimálních průtoků v jednotlivých letech

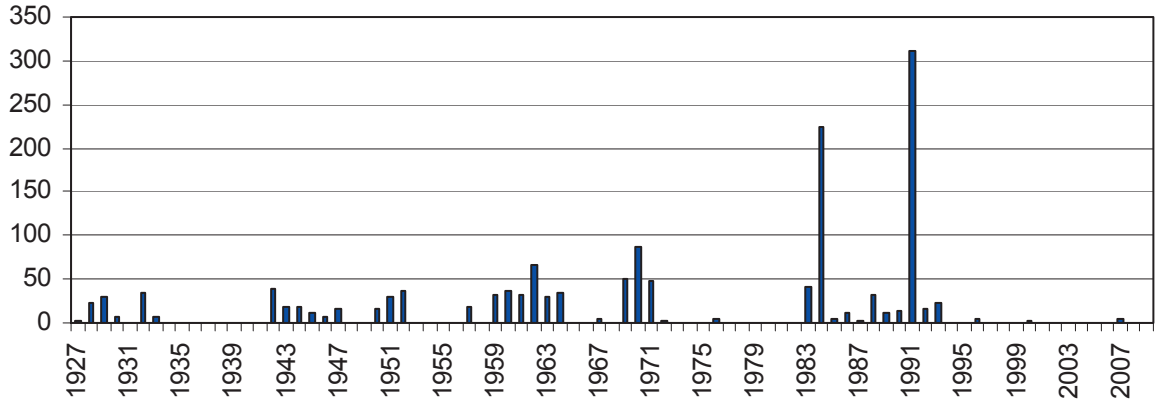
Na následujících grafech (Obr. 1 – 4) je patrný počet dní s průtokem pod danou mez (Q_{355d}) v jednotlivých hydrologických rocích za celé sledované období.

Na obr. 5 je znázorněn výskyt v jednotlivých letech ve všech stanicích za stejné období. Pro přehlednost grafu jsou dvě nejvyšší hodnoty (224 dní v roce 1984 a 310 dní s Q_{min}. ve stanici Šance v roce 1991) uvedeny pouze číslem.

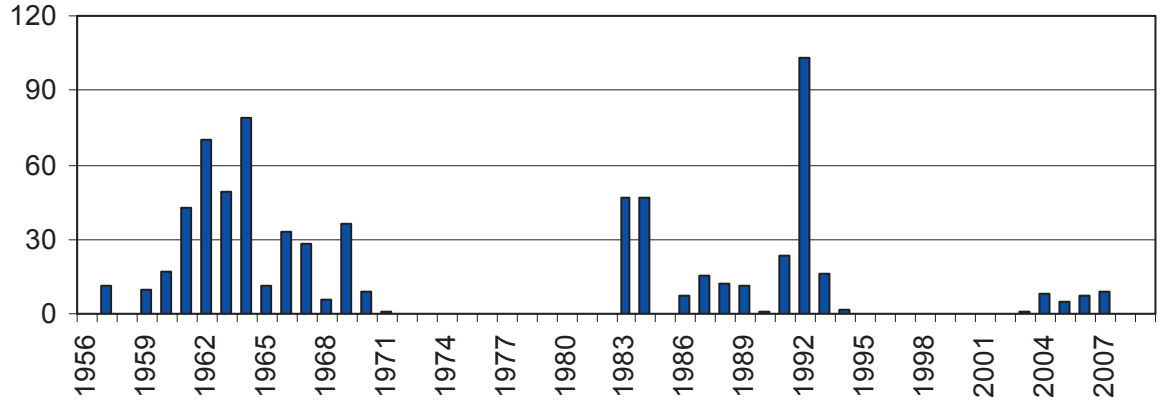
Ze všech grafů je možno vymezit suchá a vodná období. Výrazným suchým obdobím bylo v povodí Ostravice období let 1983 až 1993. Naopak vodná období (bez výskytu dní s minimálními průtoky) byla v letech 1977 až 1982 a 1994 až 2002. Podle měření z dřívějších let bylo vodné období také v letech 1934 až 1941.



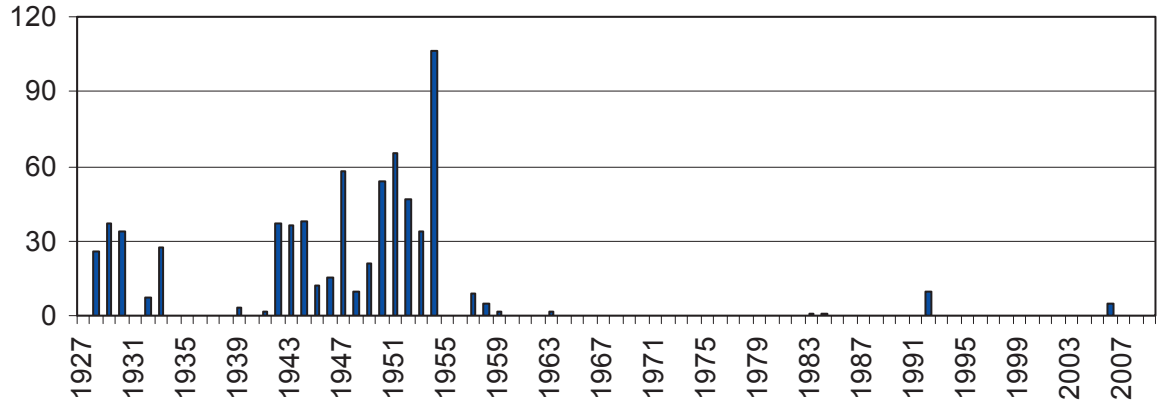
Obr. 1: Výskyt min. průtoků v jednotlivých hydrologických rocích ve stanici Staré Hamry



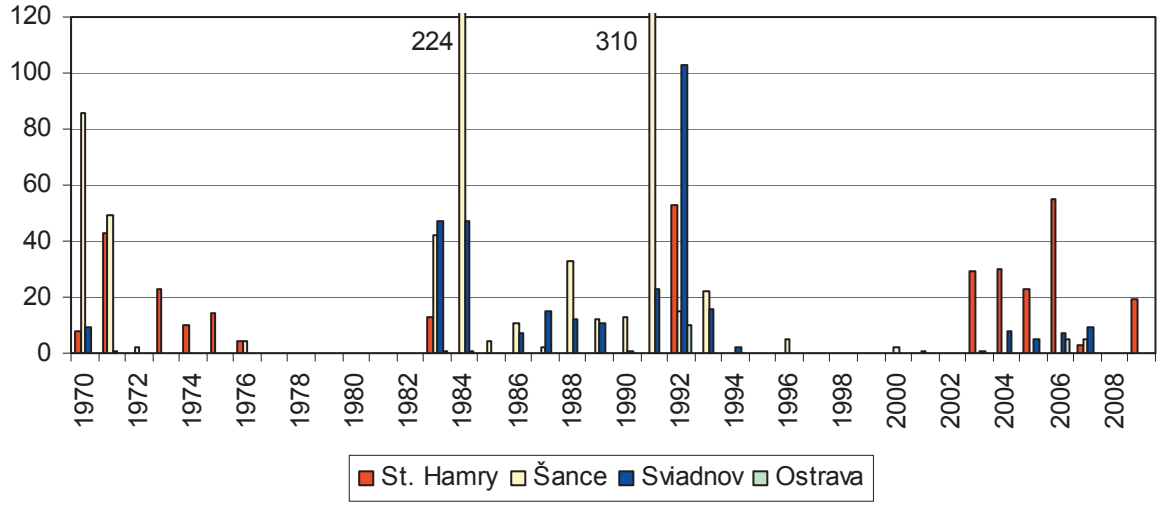
Obr. 2: Výskyt min. průtoků v jednotlivých hydrologických rocích ve stanici Šance



Obr. 3: Výskyt min. průtoků v jednotlivých hydrologických rocích ve stanici Sviadnov



Obr. 4: Výskyt min. průtoků v jednotlivých hydrologických rocích ve stanici Ostrava



Obr. 5: Výskyt min. průtoků v jednotlivých hydrologických rocích ve vybraných stanicích

Tab. 3: Počet let a dní s výskytem minimálních průtoků ve vybraných stanicích

Stanice	Počet let s min. Q		Počet dní s min. Q		Prům. počet dní s min.Q	
	celé období	1970-2009	celé období	1970-2009	celé období	1970-2009
St. Hamry	14	14	327	327	8,2	8,2
Šance	44	19	1446	842	17,4	21,1
Sviadnov	30	18	717	324	13,5	8,1
Ostrava	28	4	705	17	8,6	0,4

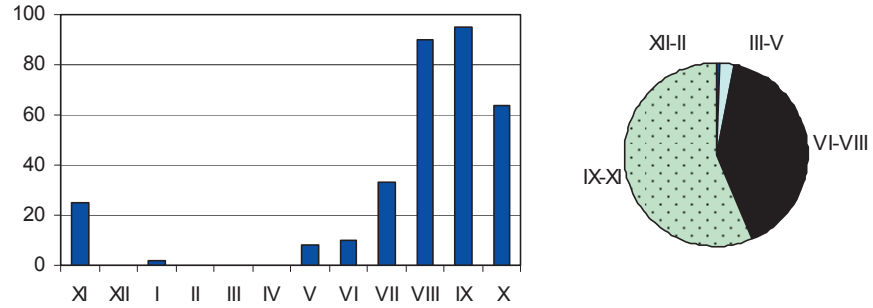
Tabulka 3 uvádí, v kolika hydrologických rocích se vyskytly minimální průtoky, kolik dní byl průtok pod stanovenou mezí a průměrný počet dní s minimálními průtoky vždy za celé období sledování a také pro porovnání za období 1970 – 2009. Toto období je vybráno podle stanice Staré Hamry, kde začalo měření až od hydrologického roku 1970.

Nejvíce let i dní s minimálními průtoky se vyskytuje ve stanici Šance a je zde patrný vliv údolní nádrže.

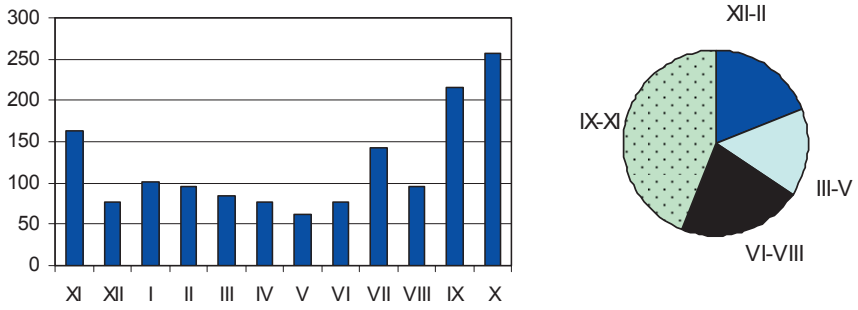
3. Výskyt minimálních průtoků v jednotlivých měsících a ročních obdobích

Výskyt minimálních průtoků v jednotlivých měsících a ročních obdobích je pro vybrané stanice znázorněn na Obr. 6 – 9. Za roční období je považováno období tří měsíců. Za zimní období měsíce XII-II, jarní III-V, letní VI-VIII a podzimní IX-XI. Výskyt je sledován za celé měřené období ve všech stanicích.

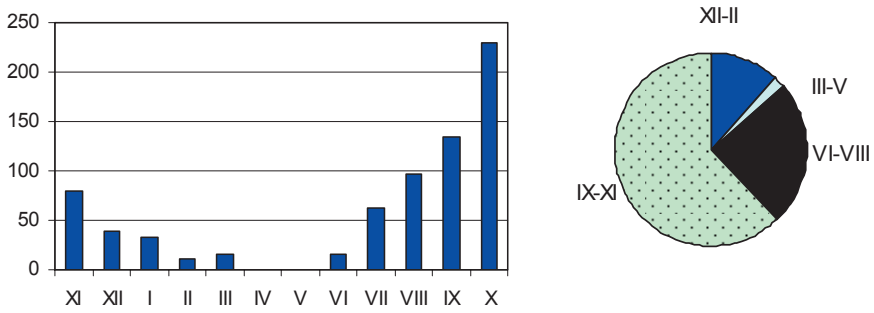
Ve stanici Staré Hamry se minimální průtoky vyskytují nejvíce v měsících září, srpen a říjen, ve stanici Šance říjen, září a listopad, ve stanici Sviadnov říjen, září a srpen a v Ostravě září, říjen a červenec. Tomu odpovídá také výskyt v jednotlivých ročních obdobích – největší výskyt je v podzimním období, a to na všech stanicích, kromě stanice Šance i více než 50 %. Ve stanici Šance je výskyt v jednotlivých obdobích vyrovnán, což patří k běžným vlivům údolní nádrže, kdy je málo vodné období v toku pod hrází prodlouženo a je stírán původní sezónní výskyt.



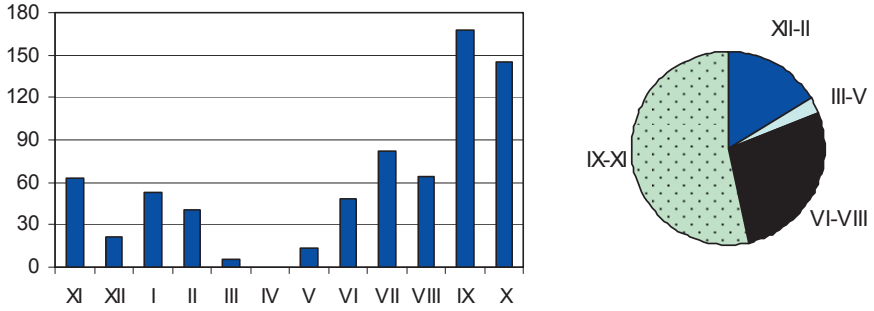
Obr. 6: Výskyt minimálních průtoků v jednotlivých měsících (počet) a ročních obdobích (%) ve stanici Staré Hamry



Obr. 7: Výskyt minimálních průtoků v jednotlivých měsících (počet) a ročních obdobích (%) ve stanici Šance



Obr. 8: Výskyt minimálních průtoků v jednotlivých měsících (počet) a ročních obdobích (%) ve stanici Sviadnov



Obr. 9: Výskyt minimálních průtoků v jednotlivých měsících (počet) a ročních obdobích (%) ve stanici Ostrava

Pro porovnání výskytu minimálních průtoků v jednotlivých ročních obdobích (v Tab. 4) bylo vybráno stejné období od roku 1970, tj. od začátku měření ve stanici Staré Hamry.

Tab. 4: Počet a výskyt [%] minimálních průtoků v jednotlivých ročních obdobích v hydrologických letech 1970 – 2009

Stanice	XII-II		III-V		VI-VIII		IX-XI	
St. Hamry	2	1 %	8	2 %	133	41 %	184	56 %
Šance	199	24 %	194	23 %	165	20 %	284	34 %
Sviadnov	25	8 %	10	3 %	84	26 %	205	63 %
Ostrava	1	6 %	0	0 %	14	82 %	2	12 %

4. Závěr

Pro hodnocení výskytu minimálních průtoků byly vybrány 4 vodoměrné stanice v povodí Ostravice, a to Staré Hamry od hydrologického roku 1970, Šance 1927, Sviadnov 1956 a Ostrava 1927. Jako mezní hodnota pro minimální průtoky bylo zvoleno Q_{355d} (za standardní období 1931 – 1980).

Výrazným suchým obdobím bylo v povodí Ostravice období let 1983 až 1993. Naopak vodná období (bez výskytu dní s minimálními průtoky) byla v letech 1977 až 1982 a 1994 až 2002. Ve vybraných stanicích se minimální průtoky vyskytují nejvíce v měsících říjen, září a srpen. Tomu odpovídá také výskyt v jednotlivých ročních obdobích – největší výskyt je v podzimním období, druhý největší výskyt je v letním období.

Výskyt minimálních průtoků je na řece Ostravici ovlivněn zejména údolní nádrží Šance, která je vodárenskou nádrží. Další vodárenskou nádrží je Morávka na pravostranném přítoku – Morávce, nádrž Olešná na levostranném přítoku – Olešné a nádrž Žermanice na pravostranném přítoku – Lučině. V povodí Ostravice se nachází také převody vody (mezi Ostravicí a Olešnou a mezi Morávkou a Lučinou). Zejména ve stanici Ostrava je výskyt minimálních průtoků ovlivněn vypouštěním odpadních a důlních vod.

Literatura

[1] HMÚ, 1970. Hydrologické poměry ČSSR III. Praha: HMÚ, Praha. 305 s.

[2] ČHMÚ, 2009. Hydrologická ročenka České republiky 2008. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČHMÚ. 175 s. ISBN 978-80-86690-74-2.

Kontakty na autora

1 Katedra fyzické geografie a geoekologie, Ostravská univerzita v Ostravě, e-mail: jana.bohdalkova@osu.cz

2 Katedra analytické chemie a zkoušení materiálu, Vysoká škola báňská Technická univerzita Ostrava, e-mail: jirina.vontorova@vsb.cz

ROLE ZASTAVĚNÝCH OBLASTÍ NA PROUDĚNÍ VĚTRU, SRÁŽKY A SRÁŽKOVÝ STÍN V PŘÍPADĚ AGLOMERACE BRNO - MĚSTO A JEHO OKOLÍ

Jindřich Kynický [1], Radka Bartošová [2], Jaroslav Rožnovský [3], Jitka Novotná [4], Hana Cihlářová [5], Martin Brtnický [6]

Abstrakt

Dlouhodobé problémy srážkového stínu v přímém i vzdálenějším okolí jižně od Brna jsou vážným tématem, které jsme se rozhodli podrobit studiu se zaměřením na možné příčiny snížení srážek v dané oblasti a celkový vývoj v průběhu minulého století. Naše výsledky a statistická šetření srážkového stínu v přímém i vzdálenějším okolí jižně od Brna dokazují výrazně zvýšené tření vzduchu v rámci zástavby intravilánu Brna a to až o 50 % ve srovnání s otevřenými přiléhajícími oblastmi. Stresové podmínky proudění vzduchu a povrchové napětí na návětrné straně Brna má jednoznačně vliv na rychlý pokles proudění větru. Navíc studium směru proudění větru ukazuje, že v městských částech Brna je proudění vzduchu výrazně provázáno se stoupajícími proudy vzduchu ve vztahu s teplými zastavěnými plochami obytných čtvrtí a průmyslových zón. Zvýšené množství srážek (až o 30 %) na návětrné straně Brna (hranice Moravského krasu a Líšně) je statisticky zdokumentováno a naproti tomu pokles množství srážek (běžně až o 25 %) do 50 km na závětrné straně Brna je doložitelný se zvyšujícím trendem v druhé polovině 20. a na počátku 21. století.

Klíčová slova: srážkový stín, množství srážek, ohřívání městských sídelních oblastí, Brno - město

1. Úvod

Výzkum dlouhodobých změn klimatu v globálním měřítku je v posledních desetiletích stále důležitějším tématem. Nicméně velmi důležitým a novým atraktivním směrem je i studium lokálních problémů interakce člověk-krajina-klima-voda, který se dostává do popředí zájmů nejen krajinně - ekologického výzkumu. Zatímco v České republice představuje hodnocení vlivu zástavby velkých měst nový směr a významné téma, v zahraniční literatuře je vliv tepelných ostrovů na srážky v okolní krajině diskutován již několik let. V odborné literatuře již najdeme pojmy „městské klima“ nebo „klimatologie měst“. Jde o obor klimatologie, který se významně rozvíjí asi od poloviny minulého století [1; 2]. Studium městského klimatu je zaměřeno hlavně na procesy v mezní vrstvě atmosféry měst, v mikroklimatu – zvláště radiační a energetickou bilanci. Z hlediska energetické bilance, ale i dynamiky mezní vrstvy atmosféry hraje významnou roli skladba materiálů a jejich rozsah, např. vozovky, střechy domů, parkoviště a zelené plochy. Právě zelené plochy postupně při rozvoji měst ustupují. Významnou roli však hrají i budovy, pokud tvoří bloky budov, potom se v ulicích projevuje tzv. městský kaňon, ovlivňující i proudění vzduchu. Klima měst je však měněno i znečištěním ovzduší, kde v posledních desetiletích hraje významnou roli automobilová doprava. Velký význam má i odvádění srážkových vod z intravilánů měst. Je nutné zdůraznit, že růst měst neznamená jen změnu jejich klimatu, ale také ovlivnění okolní krajiny. Dochází k dílčím změnám i v proudění vzduchu, výskytu srážek apod. S ohledem na rozlohu města Brna jsou vyjádřeny rozdíly v hodnotách klimatických prvků, např. průměrných ročních úhrnů srážek apod. i na mapách v Atlasu podnebí Česka [3].

Abychom zjistili a pochopili chování obdobných systémů v České republice a měli možnost statistického srovnání s vývojem v zahraničí, rozhodli jsme se pro tento nový směr výzkumu. Důvodem je také lokální potřeba poznání reakcí krajiny na probíhající mezoklimatické a mikroklimatické tlaky v průběhu 20. století a zejména pak jeho druhé poloviny, jež bylo na události a plochu výstavby velkých měst nejdůležitější. Tento příspěvek si klade za cíl

alespoň malé doplnění daného tématu v české odborné literatuře, kde jsou do dnešních dnů dostupné pouze zmínky o trendech teplot v rámci tepelného ostrovu Prahy [4; 5]. Dalším faktorem umožňujícím tuto studii je dostupnost unikátních datových podkladů.

Pohled do minulosti na vývoj krajiny konkrétního regionu může obohatit naše vidění současného stavu krajiny v dané oblasti a poskytnout určité podklady i pro predikci reakcí krajiny na určitý dlouhodobý vývoj.

2. Fyzickogeografické poměry studovaného území

Zájmové území je situováno na pomezí Českého masívu a Vnějších Západních Karpat mezi 48°51' s. š., 16°03' v. d. a 49°17' s. š., 17°00'. Reprezentují ho celky Bobravské vrchoviny, Dyjsko-svrateckého úvalu, jižních částí Drahanské vrchoviny (Hádecké planinky, Adamovské a Konické vrchoviny) a Boskovické brázdy. Pozice jednotlivých měřících stanic ČHMÚ se nachází v nadmořských výškách 230 – 350 m n.m. (Obr. 1), pozice stanic v městě Brně měřených Brněnskými vodárnami a kanalizacemi se nachází v nadmořských výškách 195 – 353 m n.m. Klimaticky vymezené území nejvíce vystihuje oblast mírně teplá (MT) 11. Ostatní oblasti (MT 10, MT 9, T 2) jsou zaujaty jen okrajově [6]. Nejteplejší a nejsušší jsou jihovýchodní části Dyjsko-svrateckého úvalu. Ve vyšších polohách se projevuje mírný srážkový stín Českomoravské vysočiny (Náměšť n. O. 7,7 °C; 594 mm; Tišnov 8,0 °C; 579 mm; Sloup 7,7 °C; 641 mm; Drahany 6,2 °C; 649 mm). V kolinních polohách se teploty pohybují mezi 8,7 – 7,5 °C, zatímco srážky dosahují 490 – 620 mm. V submontánních polohách teploty dosahují 7,8 – 6,5 °C, srážky dosahují 540 – 660 mm. Údaje z vybraných měřících stanic jsou shrnuty v Tab. 1 a 2 (BVK, 2009).

Většina území patří do mírně teplé oblasti MT 11, úvaly patří do teplé oblasti T 2 [7]. Srážky se pohybují mezi 500 až 600 mm [3]. Ve sníženinách převládají černozemě a hnědozemě. Na hřbetech převládají kambizemě, na strmých skalnatých svazích se vyskytují rankery, litozemě. Na vápencích se vyskytují rendziny. V tomto území převládá dubobukový vegetační stupeň. Nejvyšší polohy spadají do bukového stupně [7]. Reliktní postglaciální biota v prostoru Drahanské vrchoviny, předhoří Českomoravské vysočiny nebo Bobravské vrchoviny zůstala ojediněle zachována ve formě reliktních skalních borů [8]. Jejich výskyt je spjat zejména s exponovanými lokalitami bez možnosti kontinuálního vývoje půd ve zlomových říčních údolích.



Obr. 1: Pozice klimatologických stanic ČHMÚ ve výřezu mapy ČR na území města Brna [9]

Zájmovým územím prochází hranice dvou význačných středoevropských biogeografických podprovincií. Kolinní až submontánní polohy Českého masívu zastupují společenstva Hercynské podprovincie, úvalové oblasti v jihovýchodní části území jsou součástí Severopanonské podprovincie. Na tomto území je rozlišováno pět bioregionů s pestrou mozaikou potenciálních přírodních biocenóz. Dochází zde k přesahu karpatských geoelementů na území Českého masívu.

Tab. 1: Seznam srážkoměrných stanic umístěných na území města Brna a měřených Brněnskými vodárnami a kanalizacemi.

ID	Jméno stanice	Přístroj	GAUSS1	GAUSS2	Zem. šířka	Zem. délka	Nadm. výška
01RE	VDJ Řečkovice	MR2	3615020	5459340	49.2557	16.5796	319.00
02PA	VDJ Palackého vrch	MR3H-F	3614558	5455920	49.2251	16.5723	291.00
03LE	VDJ Lesná	MR2	3618647	5457453	49.2381	16.6289	328.00
04PI	BVK Pisárky	MR2	3614491	5452397	49.1934	16.5704	214.00
05VS	TZ Brno	MR2	3616621	5450788	49.1785	16.5991	216.00
06BO	ZŠ Bohunice	MR2	3613516	5449387	49.1665	16.5562	230.00
07KH	VDJ Kraví Hora	MR2	3615644	5453413	49.2023	16.5865	276.00
08MZ	MZLU	MR2	3617761	5454457	49.2113	16.6158	230.00
09EL	MŠ Elišky Krásnohorské	MR2	3619112	5451856	49.1877	16.6336	200.00
10LI	VDJ Líšeň	MR2	3622827	5455019	49.2154	16.6855	353.00
11JU	VDJ Bílá Hora	MR2	3620957	5452793	49.1957	16.6592	256.00
12SL	Slatina	MR2	3622873	5450010	49.1703	16.6846	250.00
13MO	VDJ Moravany	MR2	3615969	5448116	49.1546	16.5894	256.00
14KR	BVK-OK Královka	MR2	3619297	5449047	49.1624	16.6353	195.00

Pozn. Základní data pro zpracování poskytly Brněnské vodárny a kanalizace.

3. Metodika

V průběhu přípravy článku jsme se pokusili shromáždit co nejdetailnější informace o daném území. Za tímto účelem byly shromážděny dostupné podklady zejména z druhé poloviny 20. a počátku 21. století a řešené území bylo studováno z mnoha aspektů a ve dvou úrovních lokální a regionální. Pro účely studie byla v zájmové oblasti vymezena modelová území měřících stanic, která mají ucelenou a nepřerušenou řadu měření minimálně za posledních 50 let - podklady pro zpracování studie tvořily zejména číselná data z období 1960-2010. Doplňujícím materiálem pak byla data popisná (textová, obrazová a tabelární) poskytnutá brněnskou pobočkou ČHMU, Brněnskými vodárnami a kanalizacemi (BVK) a společností GeotestBrno, a.s. Menší část dat u posledních 7 let měřili autoři osobně. Data byla zpracována na UGP LDF Mendelu v Brně a ČHMU v Brně.

4. Výsledky a diskuse

Důkladnou zprávu o stavu a vývoji klimatu ČR podává v širším regionálním měřítku již Třetí národní sdělení České republiky [10]. Teplota a atmosférické srážky jsou hlavní činitelé, ostatní prvky pak dokreslují celkové klima. V obdobném pojetí jsou předloženy níže diskutované výsledky v detailnějším měřítku pro Brno a jeho okolí.

4.1 Teplotní podmínky na území České republiky se zaměřením na okres Brno město

Průměrná roční teplota se pohybuje na území ČR v závislosti na geografických faktorech od 1,0 po 9,4 °C , průměrné teploty jarní sezóny leží v mezích -0,1 až 9,6 °C, letní sezóny v rozmezí 8,8 až 18,5 °C. Průměrné teploty podzimní sezóny se pohybují od 2,0 do 9,6 °C a zimní od -6,8 do 0,2 °C. Nejnižší teplotní průměry se vyskytují v horských oblastech na

severní, východní a jihozápadní hranici území. Naopak nejteplejší oblasti jsou v nadmořských výškách blízko 200 m m.n. (nížiny jižně od Brna a Polabí). Zde u průměrných ročních teplot a průměrných teplot jarní a podzimní sezóny plošně převládají teploty kolem 9 – 10 °C, u letní sezóny hodnoty 19 – 22 °C a u zimní sezóny průměrná teplota –1 °C. Specifickou oblastí je území aglomerace Brno město, jejíž tepelný ostrov zvyšuje průměrnou roční teplotu o 1–2 °C nad hodnoty odpovídající její geografické poloze. Lokální teplotní poměry závisí výrazně na konkrétní nadmořské výšce a na místních geomorfologických poměrech, zejména na expozici terénu.

Prostorovou proměnlivost teploty lze nejlépe vyjádřit jako lineární regresní závislost na nadmořské výšce a jedné nebo obou geografických souřadnicích. Všechny regresní závislosti jsou statisticky významné. Roční chod teploty vzduch na území ČR má tvar jednoduché vlny s minimem v lednu a maximem v červenci.

Zpracování teplotních trendů v období 1961 – 2010 ukázalo, že vyjádříme-li chování teplotních řad v období 1961 – 1990 lineárním regresním modelem, pak většina sledovaných českých stanic zaznamenala v tomto období růst ročních průměrů teploty, který v průměru představuje 0,23 °C/10 let. Na cca 18 % stanic lze tento růst teploty považovat za statisticky významný na hladině významnosti d = 0,05. Koeficienty determinace K2 jsou naopak velmi nízké u 15 % stanic – kde je K2 větší než 0,1 a pouze na třech přesahuje hodnotu 0,2.

Od roku 1990 je podle územních průměrů nejteplejším obdobím v historii ČR a citelně se projevuje právě na jižní Moravě s meziroční eskalací v rámci tepelného ostrova města Brna. Výrazné prohřátí aglomerace je patrné jak v teplé tak v chladné polovině roku, průměrné teploty zimního období překonávají všechna předcházející desetiletí s odstupem cca 1-2 °C a v letním období dokonce ještě dvakrát více.

4.2 Srážkové poměry na území České republiky se zaměřením na okres Brno město

Atmosférické srážky patří k nejproměnlivějším klimatickým prvkům. Rozhodujícími činiteli pro srážkové poměry ČR jsou především geografická poloha místa vůči proudění přinášejícímu vláhu a četnost výskytu povětrnostních situací, při nichž vypadne větší množství srážek. Vydatné srážky se u nás vyskytují především při výskytu tlakových níží nad střední Evropou a při brázdách nad střední Evropou, naopak v letním období se poslední desetiletí často projevuje vliv výběžku azorské tlakové výše, který zpravidla znamená delší suché období.

Obecně srážkami nejchudší oblastí je závětří Krušných hor (okolí měst Most, Chomutov, Kadaň a Žatec) a dále pás táhnoucí se podél řeky Ohře na severovýchod a úzký pás na jižní Moravě podél řeky Dyje. Průměrný roční úhrn srážek v těchto regionech dosahuje hodnot pod 450 mm.

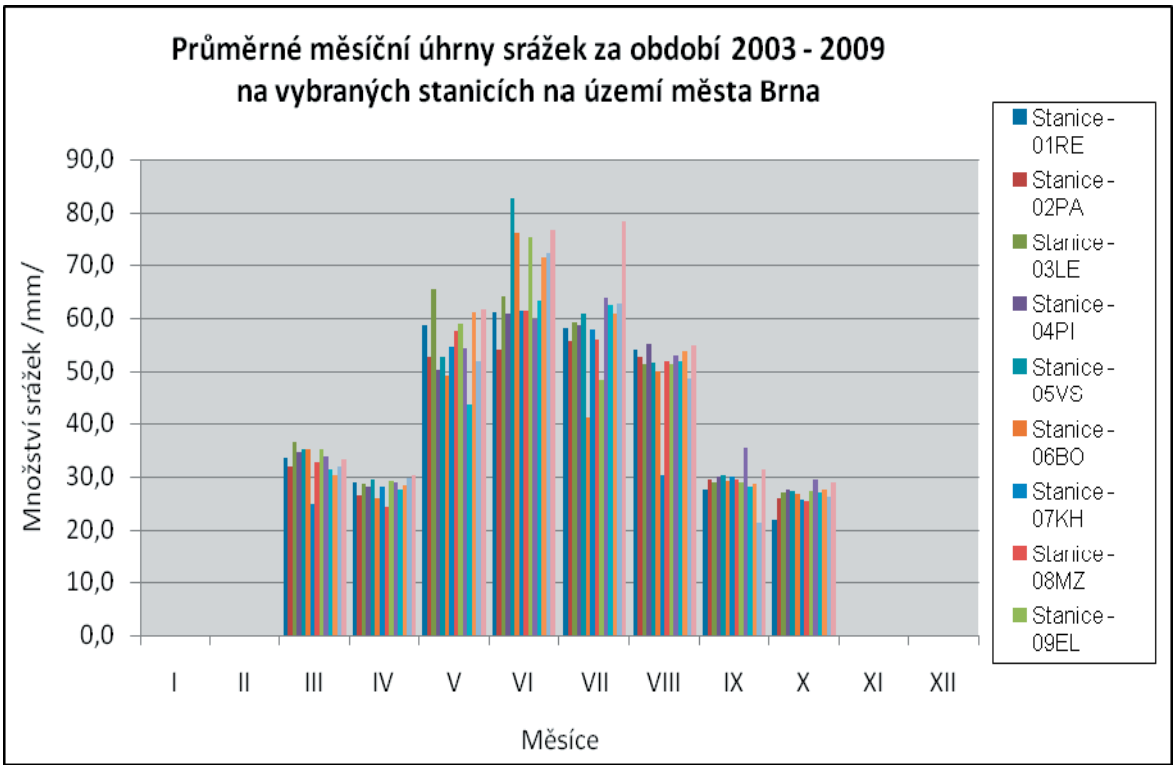
Hodnoty naměřené za posledních 50 let pro širší okolí brněnské aglomerace jasně naznačují jak velká je proměnlivost srážek nejen obecně na území ČR, ale i v rámci dílčích regionů. Roční chod srážek typický pro klima širšího okolí Brna v dřívějších obdobích, kdy míval tvar jednoduché vlny s maximem v červenci a minimem v únoru nebo v lednu se v průměrných úhrnech za sledované období 50 let výrazně utlumuje a diferencuje. Roční chod má jedno nebo dvě maxima v letních měsících (červen nebo srpen) a v posledních letech navíc lokální maximum pro Brno na přelomu květen/červen a listopad/prosinec. Z dlouhodobého pohledu celkové srážkové úhrny vykazují v posledních desetiletích pokles, který se nejvíce projevil v nejteplejší nížinné oblasti jižní Moravy, kde však kulminují i extrémní lokální srážkové úhrny, které se projevily i opakovaným výskytem povodní zejména v posledních 20 letech.

Z obr. 2 i 3 je patrný významný rozdíl v měřených úhrnech srážek na jednotlivých stanicích v rámci intravilánu města. Rozdíly jsou zvýrazněny především v obdobích (červen, červenec), kdy se významně uplatňuje efekt města jako tepelného ostrova.

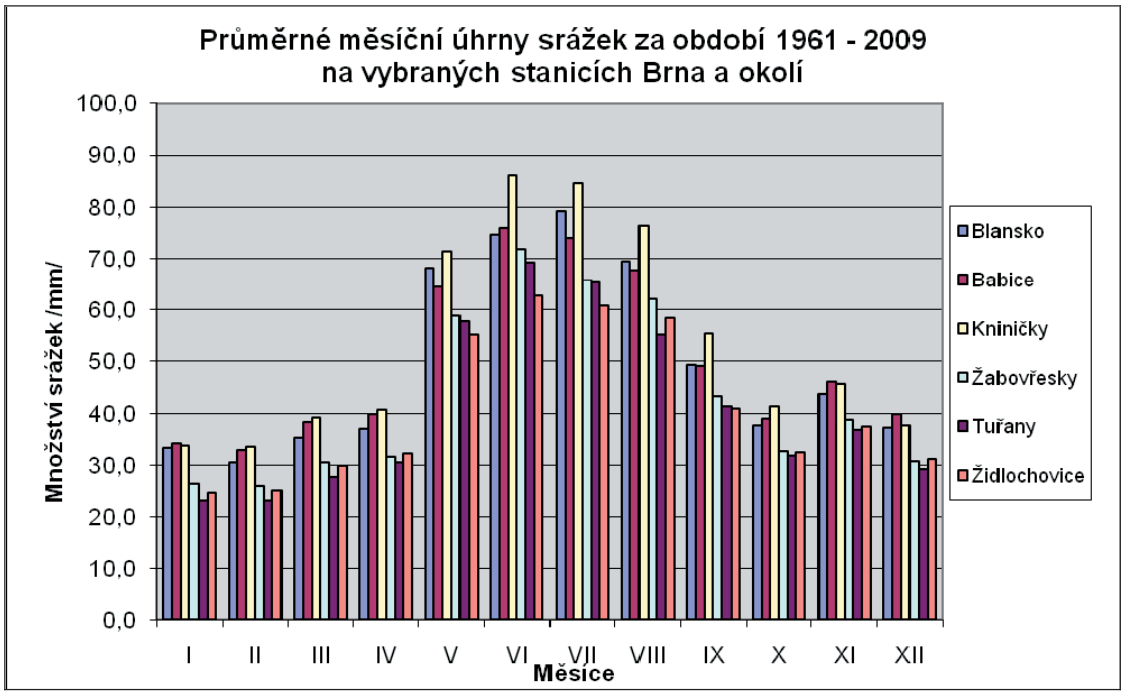
Tab. 2: Přehled srážkoměrných stanic na území města Brna s průměrnými měsíčními srážkami v měřených měsících od března do října za období let 2003 – 2009

	Stanice	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
1	VDJ Řečkovice	33,5	28,9	58,6	61,0	58,0	54,0	27,5	22,0
2	VDJ Palackého vrch	32,0	26,4	52,8	54,2	55,7	52,6	29,6	26,1
3	VDJ Lesná	36,5	28,7	65,4	64,0	59,3	51,4	29,0	27,0
4	BKV Pisárky	34,5	28,2	50,2	60,8	58,8	55,2	30,0	27,5
5	TZ Brno	35,1	29,4	52,6	82,8	60,7	51,6	30,3	27,3
6	ZŠ Bohunice	35,2	26,1	49,3	76,2	41,1	50,1	29,1	26,9
7	VDJ Kraví Hora	24,8	28,1	54,6	61,4	57,9	30,3	29,9	25,8
8	MZLU	32,7	24,4	57,7	61,3	56,1	51,8	29,4	25,5
9	MŠ Elišky Krásnohorské	35,1	29,1	58,9	75,3	48,3	51,4	28,9	27,4
10	VDJ Líšeň	33,9	28,9	54,3	59,8	63,7	53,0	35,3	29,5
11	VDJ Bílá Hora	31,3	27,5	43,6	63,2	62,4	51,9	28,0	27,1
12	Slatina	30,2	28,3	61,1	71,4	60,8	53,8	28,6	27,5
13	VDJ Moravany	31,9	29,7	51,9	72,3	62,6	48,8	21,4	26,3
14	BVK-OK Královka	33,2	30,2	61,6	76,7	78,4	54,8	31,3	28,9

Pozn. Srážkové údaje jsou uvedeny v mm za období 2003-2009. Základní data pro zpracování poskytly Brněnské vodovody a kanalizace.



Obr. 2: Průměrné měsíční úhrny srážek za období 2003 – 2009 na vybraných stanicích



Obr. 3: Průměrné měsíční úhrny srážek za období 1961 – 2009

4.3 Další klimatické prvky

Z dalších klimatických prvků je důležité trvání slunečního svitu a průměrná rychlost větru. Podobně jako na většině území ČR, i v případě Brna a jižní Moravy převládají četnosti směrů větru se západní složkou. Menší oblasti na východě a severu mají převládající četnost v jižním nebo severním sektoru a jen malé oblasti lze považovat za místa bez výrazně převládajícího směru větru. Rychlost větru je značně podmíněna a závisí zejména na lokálních geografických podmínkách. Obecně je v případě Brna vyšší ve vyšších nadmořských výškách severní části Brna přiléhající k Moravskému krasu a Drahanské vrchovině. Mnohaletý rozbor větroměrných dat pro stanice v okolí Brna ukázal, že trend v rychlosti větru v období 1960 – 2010 nelze jednoznačně prokázat, i když v časových řadách rychlostí větru většiny stanic v daném období lze najít statisticky významné trendy.

5. Závěr

Zabýváme-li se časovým vývojem konkrétního fenoménu jako například vývoj srážek v minulosti na základě dostupných pramenů různého stupně věrohodnosti, veškeré zobecňující závěry je nutno brát s rezervou. V případě řešeného území k tomu přistupuje i fakt, že se jedná o území relativně velké, a nutnost značného zobecnění sebou nese i zvýšené riziko chyby. Shrneme-li tedy informace, které jsme získali z jednotlivých podkladů, je možno konstatovat, že území katastru Brno město, které bylo v minulosti využíváno velmi cíleně k výstavbě sídlišť, průmyslových zón, obchodních center a podobně, a jeho potenciál daný přírodními predispozicemi, byl člověkem značně ovlivněn. Naše výsledky a závěry, ať již získané přepočtem přesných údajů či kvalifikovaným odhadem, poukazují na relativně jasně danou závislost zvyšování srážek v severních okrajových oblastech aglomerace a úbytek jižně od těchto hranic s působením tepelného ostrova města Brna. Právě zvýšené teploty zástavby a stoupání teplejšího vzduchu podmiňují vypadávání maximálních objemů srážek v okrajových částech města. Můžeme tedy shrnout, že antropogenní ovlivnění a vývoj městské zástavby Brna vede k postupné destrukci ve smyslu nevratného poškození řady významných přírodních fenoménů a to zejména ve spojitosti s rychlou novodobou zástavbou a výrazným růstem plochy tepelného ostrova města Brna v průběhu 20. a 21. století a zejména pak s výstavbou rozsáhlých betonových a živičných ploch od konce 60. let 20. století.

Poděkování.

Tento článek prezentuje výsledky spolupráce řešitelů a lektorů ESF projektu "Vzdělávání a týmová spolupráce v oblastech regenerace krajiny intenzivně narušené lidskou činností", CZ.1.07/2.3.00/09.0090. Autoři vyslovují poděkování zejména pobočce ČHMU v Brně, společnosti Geotest, a.s. a jmenovitě Ing. Habrovi z Brněnských vodáren a kanalizací za pomoc s ucelením získaných a naměřených souborů dat.

Literatura

[1] QUITT, E., 1957. Klima města Brna. Brněnská univerzita, Přírodovědecká fakulta, Brno. 253 s.

[2] LANDSBERG, H. E., 1981. The urban climate. New York, Academic Press, New York. 275 p. ISBN 0124359604.

[3] TOLASZ et al., 2007. Atlas podnebí Česka. Praha, Olomouc: Český hydrometeorologický ústav, Univerzita Palackého v Olomouci. 255 s. ISBN 978-80-86690-26-1 (CHMI), 978-80-244-1626-7 (UP).

[4] BRÁZDIL, R. – BUDÍKOVÁ, M., 1999. An urban bias in air temperature fluctuations at the Klementinum, Prague, the Czech Republic. Atmospheric Environment 33 (24-25): 4211 – 4217.

[5] BERANOVÁ, R., 2002. Pražský tepelný ostrov: intenzita a dlouhodobé změny za různých synoptických podmínek, [Diplomová práce], MFF UK, Praha, 86 s. <http://home.tiscali.cz/podnebi/diplomka.pdf>

[6] QUITT, E., 1971. Klimatické oblasti Československa. Academia, Studia Geographica 16, GÚ ČSAV v Brně. 73 s.

[7] PELÍŠEK, J., 1956. II. Stručná charakteristika stanovištních poměrů lesních oblastí ČSR. s. 401-415.

[8] KYNICKÝ, J., 2009. Srovnání přirozené a inkubované půdní enzymatické aktivity na stanovištích suchých borů v jihovýchodní části Českého masívu. [Diplomová práce]. Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta. 54 s.

[9] Mapa ČR s hranicemi poboček a krajů, 2008. <http://www.chmi.cz/meteo/ok/mapyst.html>

[10] Politika ochrany klimatu v České republice. Ministerstvo životního prostředí ČR, 2001. http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/news_tz091022pok/$FILE/POK_pro_mezirezort_web.pdf

[11] AMFIELD, A. J., 2003. Review – Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. International Journal of Climatology, 23, pp 1–26.

[12] MUNZAR, J., 1980. Příspěvek k hodnocení antropogenních vlivů na podnebí Brna. Zprávy Geografického ústavu ČSAV, 17, s.114–121.

[13] LITSCHMANN, T. – ROŽNOVSKÝ, J., 2005. Příspěvek ke studiu městského klimatu v Brně. In: *Transport vody, chemikálií a energie v systéme pôda-rastlina-atmosféra*. Ústav hydrologie a Geofyzikální ústav SAV, Bratislava, CD ROM, s. 331.

Kontakty na autora

1 Ústav geologie a pedologie, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 3, 613 00 Brno, e-mail: jindrak@email.cz

2 Ústav geologie a pedologie, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 3, 613 00 Brno; Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta, Ostravská univerzita v Ostravě, Chittussiho 10, 710 00 Ostrava, e-mail: Radka.Bartosova@osu.cz

3 Český hydrometeorologický ústav, Kroftova 43, 616 67 Brno, e-mail: roznovsky@chmi.cz

4 Ústav geologie a pedologie, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 3, 613 00 Brno; GEOtest, a.s., Šmahova 112, 627 00 Brno, e-mail: novotna@geotest.cz

5 Ústav geologie a pedologie, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 3, 613 00 Brno, e-mail: XCIHLARO@seznam.cz

6 Ústav agrochemie, půdoznalství, mikrobiologie a výživy rostlin, Agronomická fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 3, 613 00 Brno, e-mail: Martin.Brtnicky@seznam.cz

PREZENTACE POSTERŮ K SEKCI 6

VLIV KLIMATICKÉ ZMĚNY NA JEDNOTLIVÉ KOMPONENTY HYDROLOGICKÉHO CYKLU V POVODÍ MALŠE

Soňa Němečková[1], Václav Šípek[1]

Abstrakt

Dopady klimatické změny na hydrologický cyklus v regionálním měřítku jsou dnes stále aktuálnější otázkou, neboť je pravděpodobné, že klima na Zemi se v následujících dekádách bude postupně oteplovat. Cílem této studie bylo vyhodnotit vliv klimatické změny pomocí distribuovaného fyzikálního hydrologického modelu SWIM (Soil and Water Integrated Model) [1] jak na celkové odtokové poměry, tak na konkrétní komponenty hydrologického cyklu v povodí Malše.

Hydrologický model SWIM byl kalibrován na povodí Malše (437 km^2) pro profil Pořešín v denních chodu a bylo dosaženo Nash-Sutcliffe koeficientu 0,7 pro zájmové období 1987-1998. Pro popis změny klimatu byly zvoleny výstupy dvou globálních modelů ECHAM4 a HadCM2 podle dvou odlišných scénářů budoucího klimatického vývoje (optimistický B1 a pesimistický A2) podle IPCC. Tyto modely byly vyhodnoceny jako vhodné pro hodnocení dopadu klimatické změny na území ČR [2]. Výstupy odpovídající hypotetickému stavu v roce 2050 byly porovnávány s dlouhodobými průměrnými hodnotami z povodí za léta 1987- 1998.

Bylo zjištěno, že povodí Malše citlivě reaguje na předpovídané změny teplot a ročního chodu srážek. Hodnoty aktuální evapotranspirace (AET), jsou při použití všech scénářů vyšší v průběhu celého roku s výjimkou zimního období, kdy je AET naopak mírně nižší. Nárůst AET je v případě scénáře A2 čtyřikrát vyšší než u scénáře B1. Obsah vody v půdě, reprezentovaný indexem půdní vody (SWIND), poklesne v průměru o 1-2 %, přičemž v zimní období je tento pokles méně zřetelný. Perkolace je po celý rok v případě všech scénářů nižší a tudíž i podzemní odtok se úměrně snižuje. V důsledku uvedených změn jednotlivých komponent hydrologického cyklu dojde k snížení průměrných měsíčních průtoků v průběhu celého roku. Obecně je pokles nejvíce zřetelný v jarním období, a to zejména v dubnu, což lze přičíst nárůstu teplot v zimě, kdy by sněhová pokrývka nedosahovala normálních hodnot, a tedy by se snížilo množství sněhu dostupného pro jarní tání. V letním období lze snížení průtoků vysvětlit jak zvýšenými teplotami, tak sníženým množstvím srážek. Tento jev způsobuje zmíněný zvýšený vodní deficit v půdě, k jehož vyrovnávání dochází až v průběhu podzimu. V zimním období se již hodnoty obsahu půdní vody přibližují současné úrovni. Celkově poklesnou průměrné měsíční průtoky v případě scénáře B1 o 12 až 22 % v závislosti na klimatické citlivosti (nízká/vysoká) a v případě scénáře A2 o 15 % při nízké a 35 % při vysoké citlivosti.

Klíčová slova: klimatická změna, hydrologické modelování, změny hydrologického cyklu

Literatura

[1] KRYSANOVA, V. – BECKER, A. – MILLER-WOHLFEIL, D. I., 1998. Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. Ecological Modelling, 103, č. 2-3, s. 261–289. ISSN 0304-3800.

[2] KALVOVÁ, J. a kol. 2002. Zpřesnění scénářů projekce klimatické změny na území České republiky a odhadů projekce klimatické změny na hydrologický režim, sektor zemědělství, sektor lesního hospodářství a na lidské zdraví v ČR. Praha: Český hydrometeorologický ústav. 151 s. ISBN 80-8669-001-6.

Kontakty na autora

1 Ústav pro hydrodynamiku, Akademie věd České republiky v.v.i.,
e-mail: nemeckova@ih.cas.cz, sipek@ih.cas.cz

TLUMENÍ KLIMATICKÝCH A HYDROLOGICKÝCH EXTRÉMŮ POROSTY RYCHLE ROSTOUCÍCH DŘEVIN

Jan Weger[1], Miloslav Šír[2], Miroslav Tesař [2]

Abstrakt

Rostliny se podílejí na vytváření klimatu podstatnou měrou tím, že transpirují, tedy výparem převádějí vodu z půdy do atmosféry. Následkem toho ovlivňují skleníkový efekt atmosféry a množství tepla, které se vyzáří ze zemského povrchu do atmosféry [1]. Oba faktory podstatně rozhodují o vzniku klimatických a hydrologických extrémů ve formě přívalových srážek a dlouhodobého sucha. Mezi rostliny s vysokou úrovní transpirace (při dostatku dostupné vody) patří tzv. rychle rostoucí dřeviny (RRD). Mezi nejintenzivnější formy pěstování RRD na zemědělské půdě v našich podmínkách patří výmladkové plantáže pro energetickou štěpku příp. dřevařské nebo papírenské sortimenty [3]. Podle současných energetických strategií (Státní energetická politika, Akční plán biomasy aj.) by rozlohy výmladkových plantáží a dalších energetických plodin měly dosáhnout až 1 mil. ha do roku 2030, což je přibližně ¼ zemědělské půdy. Vzhledem k vysoké plánované výměře RRD je dlouhodobě testován jejich vliv na klimatické a hydrologické podmínky. V příspěvku je porovnávána hydrologická a klimatická účinnost porostu rychle rostoucích dřevin (RRD) a travního porostu na dvou stanovištích v rozdílné nadmořské výšce – Průhonice 332 m n. m. a Nová Olešná 561 m n. m. Bylo zjištěno, že na obou stanovištích porosty RRD ve srovnání s travním porostem: (1) vytváří mikroklima, které snižuje polední teploty přízemní vrstvy vzduchu v porostu v extrémně teplých dnech, (2) snižují rozkolísanost chodu teploty a vlhkosti vzduchu, (3) soustavně snižují teplotu půdy. V nižší nadmořské výšce je klimatická účinnost porostů RRD výraznější než ve větší nadmořské výšce. Prokázalo se tak, že výsadba RRD je příznivá z hlediska klimatizace krajiny, protože přispívá k tlumení výchylek v chodu teplot a vlhkosti vzduchu a snižování teplot půdy více než travní porost [2]. Lze proto očekávat, že plošně rozsáhlé porosty RRD budou též tlumit extrémy v chodu dešťových srážek. Příspěvek vznikl v rámci řešení grantů GAČR (526/08/1016), MŽP ČR (Vav Sp 1a6/151/07) a MŠMT 2B06132.

Klíčová slova: rychle rostoucí dřeviny, transpirace, klimatizace krajiny

Literatura

[1] ŠÍR, M. – WEGER, J. – TESAŘ, M. – LICHNER, L., 2007. Influence of plants on heat balance and entropy exchange. In: *The Tree and Flower – a Part of Life. The Silva Tarouca Res. Inst. of Landscape and Ornamental Gardening.* Průhonice 4.–5. 9. 2007, pp 177–180.

[2] ŠÍR, M. – WEGER, J. – VONDRKA, A., 2009. Klimatická účinnost porostů rychle rostoucích dřevin v krajině. Acta Pruhoniciana, roč. 92, s. 45–50.

[3] WEGER, J. – ŠÍR, M. – SYROVÁTKA, O., 2003. Výmladkové plantáže rychle rostoucích dřevin a možnosti jejich vodohospodářského využití v krajině. In: *Hydrologie půdy v malém povodí.* Ústav pro hydrodynamiku AVČR, Praha, s. 245–251.

Kontakty na autora

1 Výzkumný ústav Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, v. v. i., Květnové náměstí 391, 252 43 Průhonice, e-mail: weger@vukoz.cz

2 Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v.v.i., Pod Paťankou 30/5, 166 12 Praha 6, e-mail: milo_sir@yahoo.com, tesarihas@iol.cz

EKOHYDROMORFOLOGICKÝ PRŮZKUM ŘEKY BÍLINY

Jan Kyselka[1], Milada Matoušková[1], Martin Dvořák[2]

Abstrakt

Příspěvek prezentuje výsledky ekohydromorfologického průzkumu řeky Bíliny pomocí metod EcoRivHab [Matoušková, 2003] a HEM [Langhammer, 2007]. Povodí Hlavní tok řeky Bíliny je možno na základě získaných výsledků označit za velmi člověkem ovlivněný s vysokým podílem úseků ve IV. a V. ekohydromorfologickém stupni (ES). Protikladem je velmi nízký podíl úseků v I. a II. ES. Celkový stav fyzického habitatu je velmi špatný a souvisí rovněž s celkově pozměněným hydrologickým režimem.

Cílem komplexního ekohydrologického průzkumu je hodnocení míry antropogenního ovlivnění a využití výstupů v podobě udržitelného rozvoje vodních zdrojů a vhodných revitalizačních opatření. Základem pro hodnocení kvality vodních toků je tzv. ekologický statut, který je definován na základě hydromorfologických, hydrochemických a hydrobiologických parametrů. CEN EU formuloval návod pro hodnocení morfologických poměrů koryta, příbřežní zóny a údolní nivy a vytvořil směrnici pro hodnocení hydromorfologických parametrů vodních toků [EN 14614, 2004]. Zájmovým územím ekohydromorfologického průzkumu je povodí Bíliny. V souvislosti s budováním významných vodohospodářských děl (např. Ervěnický koridor, Mostecký koridor) došlo v horizontu 80 let ke zkrácení hlavního toku Bíliny o 3,9 %. K největším délkovým a polohovým změnám koryta došlo v oblasti mezi Jirkovem a Mostem. Přirozený charakter mají v povodí Bíliny obecně prameniště a horní části toků. Hlavní tok Bíliny byl mapován v délce 80,5 km od pramene po ústí v délkově heterogenních úsecích, které byly vymezeny na základě principu homogenity v základních charakteristikách habitatu. Celkově bylo vymezeno 133 úseků, které byly kompletně vymapovány pomocí metody EcoRivHab [Matoušková, 2003, 2008]. Metoda HEM [Langhammer, 2007] byla testována na tzv. prioritních úsecích, přičemž bylo vymezeno 53 úseků o celkové délce 32 km. Na základě získaných výsledků terénního průzkumu je možné povodí Bíliny označit jako silně antropogenně ovlivněné a to především z důvodu vysokého podílu úseků ve IV. a V. ekohydromorfologickém stupni (ES) a za výrazně nízkého podílu úseků v I. a II. ES. Podle detailního průzkumu pomocí metody EcoRivHab jsou přírodě blízké (I. ES) a mírně antropogenně (II. ES) ovlivněné úseky zastoupeny pouze 9 % délky toku (BIL001 – BIL019). Středním antropogenním ovlivněním III. ES (23 %) byly klasifikovány především úseky v Českém středohoří (od Českých Zlatníků po Kyselku (BIL068 – BIL078) a od Chudeřic po Nové Stadice (BIL085 – BIL120)). Úseky s ekomorfologickým stupněm IV. a V. dominují (46 %), jsou pak soustředěny v oblasti od Jirkova za Mostecký koridor (BIL026 – BIL067). Další úseky Bíliny se IV. a V. ES jsou rovněž v osídlených a průmyslově využívaných oblastech (Bílina, Chudeřice, Trmice, Ústí nad Labem a některé obce v Českém středohoří).

Klíčová slova: habitat, ekohydrologie, hydromorfologie, Bílina, EN 14614

Literatura

[1] EN 14614, 2004. Water quality – Guidance standard for assessing the hydromorphological features of rivers. November 2004.

[2] LANGHAMMER, J., 2007. Metodika pro monitoring hydromorfologických ukazatelů ekologické kvality vodních toků. HEM. PřF UK, Praha. 47 s.

[3] MATOUŠKOVÁ, M., 2003. Ekohydrologický monitoring jako podklad pro revitalizaci vodních toků. Modelová studie Rakovnického potoka. [Disertační práce], PřF UK, Praha. 219 s.

[4] MATOUŠKOVÁ, M. (ed.), 2008. Ekohydrologický monitoring vodních toků v kontextu evropské Rámcové směrnice o vodní politice EC/2000/60. PřF UK, GAČR, Praha. 209 s.

Kontakty na autora

1 Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie

2 Severočeská vodárenská společnost, a.s

DLHODOBÉ TRENDY MINIMÁLNYCH PRIETOKOV VO VYBRANÝCH TOKOCH VÝCHODNÉHO SLOVENSKA

Martina Zeleňáková[1], Pavol Purcz[1], Tatiana Soľáková[1], Beáta Demeterová[2]

Abstrakt

Cieľom príspevku je zistiť dlhodobé trendy minimálnych prietokov v povodiach východného Slovenska. Druhým cieľom je overenie vierohodnosti pomocou parametrického (Studentovho t-testu) aj neparametrického (Mann-Kendallovho) testu.

Dlhodobé trendy minimálnych prietokov sa zistia z trendovej priamky, alebo priamo z nameraných údajov o prietokoch na vybraných vodných tokoch, ktoré sú k dispozícii pre každú sledovanú vodomernú stanicu za každý mesiac hydrologického roka (známe boli údaje zo 66 staníc v období rokov 1975-2006, teda spolu 32 rokov). Trendové priamky, ako aj pôvodné namerané prietoky boli získané zo Slovenského hydrometeorologického ústavu. Vzhľadom k nerovnakej škále prietokov v jednotlivých staniciach boli údaje pred štatistickým spracovaním normované. Testovali sme oboma testami (parametrickým aj neparametrickým testom) základnú hypotézu H_0: "Nie je trend oproti alternatívnej hypotéze H_1: Je trend". Pri oboch testoch sme dosiahli rovnaké výsledky. Vo všetkých mesiacoch sledovaného obdobia bol na hladine významnosti α = 0,05 potvrdený trend zamietnutím základnej hypotézy H_0. Výsledky sú prehľadne zhrnuté v tabuľke 1. Najväčší deficit vody sa prejavuje v zimných mesiacoch, najmä v decembri a potom skoro na jar v marci. Aj v ďalších obdobiach roka je možné sledovať záporný trend v prietokoch s výnimkou konca leta, kde jedine mesiace august a september vykazujú v tomto smere slabý prírastok

.

Tab. 1: Testovanie trendov minimálnych prietokov vo vybraných staniciach

Mesiac	IX.	X.	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.
M-K test $u_{\alpha/2}$=1,96	3,56	13,41	19,72	23,46	23,45	7,73	16,94	20,83	17,94	14,90	12,54	7,52
t-test $t_{\alpha/2}$=1,98	12,68	12,93	17,95	13,05	7,21	38,96	26,72	13,44	7,86	17,77	27,24	30,04
trend/ smernica	-0,00	-0,00	-0,00	-0,00	-0,00	-0,00	-0,00	-0,00	-0,00	+0,00	+0,00	-0,00

Na základe overenia dvoma nezávislými testami možno jednoznačne určiť, že pokles hladiny vody v sledovaných vodomerných staniciach sa bude prejavovať hlavne v decembri a v marci. Zároveň sa zistilo, že na východnom Slovensku je pokles hladín vo všeobecnosti prevládajúcim trendom.

Klúčové slová: minimálne prietoky, parametrický test, neparametrický test

Kontakty na autora

1 Technická univerzita v Košiciach, Stavebná fakulta,
e-mail: martina.zelenakova@tuke.sk, pavol.purcz@tuke.sk, tanik@post.sk

2 Slovenský hydrometeorologický ústav, Regionálne stredisko Košice,
e-mail: beata.demeterova@shmu.sk