VERIFIKACE METOD ODVOZENÍ HYDROLOGICKÝCH PODKLADŮ PRO POSUZOVÁNÍ BEZPEČNOSTI VODNÍCH DĚL ZA POVODNÍ STATISTICKÝMI PŘÍSTUPY

Bohuslava Kulasová, Miloň Boháč

V roce 2004 byl ukončen tříletý grantový projekt výzkumu a vývoje v programu Ministerstva zemědělství „Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní“, který tematicky navazoval na projekt VaV „Vývoj metod pro stanovení extrémních povodní“, řešený v letech 1997 až 2000 pod garancí Ministerstva životního prostředí. Nositelem a koordinátorem obou projektů byl Český hydrometeorologický ústav. Cílem řešení bylo vyvinout a ověřit nové metodiky pro odvozování extrémních teoretických povodňových vln statistickými a deterministickými přístupy sloužících k posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních.

*Výzkum **statistických přístupů** byl zaměřen na vícerozměrnou analýzu charakteristik povodňových vln. Výsledkem řešení je nový metodický postup založený na aplikaci vícenásobné nelineární regrese. Byly vyvinuty a ověřeny nové metodiky pro odvozování parametrů teoretických povodňových vln s využitím podmíněných pravděpodobností překročení objemu v závislosti na velikosti kulminačního průtoku a trvání povodňové vlny.*

Tato metoda s využitím podmíněné pravděpodobnosti překročení objemu umožňuje v porovnání s přiřazením „příslušného objemu“ ve smyslu normy ČSN 75 1400 „Hydrologické údaje povrchových vod“ exaktněji definovat vlastnosti teoretické povodňové vlny.

Metodika je adaptovaná na zpracování pozorovaných povodňových hydrogramů v denním kroku nebo v hodinovém kroku. Pro zavedení metodiky do praxe bylo nutné zpracovat odpovídající uživatelské programy a metodickou příručku.

Touto novou metodikou jsou odvozovány teoretické povodňové vlny pro vybraná vodní díla, u nichž je podle normy TNV 75 2935 posuzována bezpečnost při povodních.

Klíčová slova: extrémní povodeň, teoretická povodňová vlna, statistický přístup, podmíněná pravděpodobnost, bezpečnost přehrad

***Verification of methods of derivation of hydrological data for the assessment of dam safety during floods by statistical approaches.** In 2004, a three year grant development project in the program of the Ministry of Agriculture “Verification of methods of derivation of hydrological data for the assessment of dam safety during floods” was finished, which was connected theme-wise to the project VaV “Development of methods for the derivation of extreme floods”, which was being solved during 1997 to 2000 under the guarantee of the Ministry of Environment. The bearer and co-ordinator of both projects was the Czech Hydrometeorological Institute. The aim of the solution was to develop and verify new methods for the derivation of extreme design flood hydrographs by statistical and deterministic approaches, which would serve for the assessment of dam safety during floods.*

*The research of **statistical approaches** was aimed at multi-dimensional analysis of the parameters of flood hydrographs. The result of the solution is a new methodical procedure based on the application of a multiple non-linear regression. New methods were developed and verified for the derivation of parameters of design flood hydrographs, utilising conditional probabilities of volume exceedance in dependence on the size of peak discharge and flood hydrograph duration.*

This method with the utilisation of conditional probability of volume exceedance enables, in comparison with the annexing of “applicable volume” in the sense of standard ČSN 75 1400 “Hydrological data of surface waters”, to define more exactly the properties of the design flood hydrograph.

The method is adapted to the processing of observed flood hydrographs in a daily or hourly time step. For the introduction of the method into practice, it was necessary to adjust the corresponding user programs and the methodical handbook.

By this new method, design flood hydrographs are derived for selected dams, for which safety is assessed during floods according to standard TNV 75 2935.

Key words: extreme flood, design flood hydrograph, statistical approach, conditional probability, dam safety.

ÚVOD

V roce 2004 byl ukončen tříletý grantový projekt výzkumu a vývoje v programu Ministerstva zemědělství „**Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní**“ [1], který tematicky navazoval na projekt VaV „**Vývoj metod pro stanovení extrémních povodní**“ [2], řešený v letech 1997 až 2000 pod garancí Ministerstva životního prostředí. Nositelem a koordinátorem obou projektů byl Český hydrometeorologický ústav. Cílem řešení bylo vytvořit nové metodiky pro odvozování parametrů extrémních teoretických povodňových vln statistickými a deterministickými přístupy, které slouží k posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních.

Na základě výsledků rešerše bylo rozhodnuto vyvíjet **statistické metody** odhadu charakteristik extrémních povodňových vln novými přístupy s využitím **podmíněných pravděpodobností překročení objemu** v závislosti na velikosti kulminačního průtoku a trvání povodňové vlny.

Nové statistické přístupy využívají oproti stávajícím přístupům, u kterých je uvažována pouze pravděpodobnost kulminačního průtoku, navíc i pravděpodobnost objemu povodně zvoleného trvání. 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.

Metodika, která je založená na využití řad průměrných denních průtoků, je vhodná pro střední povodí (plocha A > cca 150 km^2) a velká povodí. Metodika vycházející z řad hodinových průtoků je vhodná i pro malá povodí. V tomto případě zpracování vyžaduje časově náročnou přípravu pozorovaných povodňových vln v hodinovém kroku. Odvozování se většinou provádí pro sezónní (letní, zimní) povodně. V rámci projektu byly vytvořeny dva programy (jeden pro vstupní údaje v denním kroku, druhý pro údaje v hodinovém kroku) sloužící k analýze pozorovaných hydrogramů a k odvození výsledných teoretických povodňových vln.

Extrémní povodňové vlny založené na statistickém zpracování je třeba, zvláště na malých a středních povodích, ověřovat z fyzikálního hlediska jednoduchými deterministickými přístupy.

Tato metoda s využitím podmíněné pravděpodobnosti překročení objemu umožňuje v porovnání s přiřazením „příslušného objemu“ ve smyslu normy ČSN 75 1400 „Hydrologické údaje povrchových vod“ exaktněji definovat vlastnosti teoretické povodňové vlny.

Hydrologické podklady odvozované novými metodickými postupy jsou již uplatněny v nové normě TNV 75 2935 „Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních“ [3] z roku 2003. Tato norma doporučuje odvozovat teoretické povodňové vlny variantním způsobem. Dle skupiny a kategorie vodního díla se odvíjí míra jeho bezpečnosti vyjádřená pravděpodobností překročení kulminačního průtoku až do hodnoty p = 0.0001.

Nově vyvinuté metodiky pro odvozování parametrů teoretických povodňových vln těmito statistickými přístupy včetně nově zpracovaných příslušných programů byly ověřeny na povodích vybraných vodních děl. V rámci projektu byly odvozeny teoretické povodňové vlny pro VD Vranov na Dyji a VD Husinec na Blanici. Po skončení projektu jsou na objednávku Povodí, s.p. postupně odvozovány teoretické povodňové vlny pro další vodní díla.

Text v následujících kapitolách bude členěn do tématických okruhů:

- Příprava datových souborů
- Zpracování metodiky včetně aplikace pro odvození teoretických povodňových vln
- Závěry.

PŘÍPRAVA DATOVÝCH PODKLADŮ

Objemy teoretických povodňových vln mohou být odvozovány buď z řad průměrných denních průtoků nebo z hodinových průtoků. Vzhledem k tomu, že ČHMÚ má k dispozici především řady průměrných denních průtoků ve vodoměrných stanicích, které jsou uloženy v centrální databázi, byly první zkušební a ověřovací výpočty založeny zejména na těchto řadách.

Při analýze vztahů mezi velikostí průtoku a objemem povodně by bylo výhodnější zkoumat vztahy mezi kulminačním průtokem na straně jedné a objemy zvoleného trvání na straně druhé. V rámci vytváření a ověřování metodiky na připravených datech tak nemohlo být postupováno, neboť kulminační průtoky nebyly běžně vyčísleny odděleně pro letní a zimní povodně (většinou byla vyhodnocena jen roční maxima). Jejich dodatečné vyhodnocení vyžaduje značné úsilí (vyhledání limnigramů v archivu, rekonstrukce měrných křivek průtoku, u zimních povodní přezkoumání, zda nebyla hladina vody vzduta ledem, atd.). Zpracování bylo nejprve založeno na rozboru vztahů mezi maximálním průměrným denním průtokem v příslušném pololetí a objemem odtoku za zvolené několikadenní trvání, následně i mezi maximálním hodinovým průtokem a objemem. Při odvozování teoretické povodňové vlny je nutné zabývat se vztahem mezi maximálními průměrnými denními (resp. hodinovými) průtoky ve dni kulminace a kulminačními průtoky (viz následující text).

Příprava datových souborů pro odvozování teoretické vlny formou hydrologické studie spočívá zejména v těchto činnostech:

- Vytvoření řady průměrných denních průtoků (z databanky hydrofondu, popř. prodloužení stávající řady na základě archivních materiálů)
- Vyhodnocení sezónních kulminačních průtoků za letní a zimní pololetí (doplnění stávajících řad ročních maxim)
- Příprava pozorovaných hydrogramů ve vodních stavech v hodinovém kroku za letní a zimní pololetí
- Kontrola vodních stavů uložených v registru extrémních fází odtoku (REFO) s limnigramy
- Kompletace měrných křivek průtoku, jejich ověření a případná extrapolace, rekonstrukce měrných křivek průtoku na základě starých hydrometrických měření, příp. vyhodnocení historických povodní (pro období, pro která nejsou k dispozici)
- Vyhodnocení hydrogramů v průtocích v hodinovém kroku za letní a zimní sezónu
- Výpočet průměrných denních průtoků z vyhodnocených hodinových průtoků; jejich porovnání s průměrnými denními průtoky uloženými v databázi ČHMÚ (pokud vyplynou větší rozdíly, dochází k přehodnocení hodinových průtoků včetně kulminace, příp. přehodnocení průměrných denních průtoků)

POPIS METODIKY

Metodický přístup je založen na aplikaci vícenásobné nelineární regrese pro vyjádření vztahu mezi kulminačním průtokem a trváním odtoku (nezávislé proměnné) a objemem odtoku (závislá proměnná). Jako prostředek pro vyjádření podmíněné pravděpodobnosti překročení určitého objemu (při daném trvání odtoku a kulminačním průtoku) slouží statistická analýza reziduálních odchylek pozorovaných objemů od regresních odhadů.

V rámci řešení výše uvedených projektů bylo třeba:

- Nalézt **vhodný tvar nelineárního regresního vztahu** mezi objemy odtoku daného trvání a výškou odtoku ve dni kulminace.
- Navrhnout a ověřit **vhodnou metodu transformace odchylek** pozorovaných objemů od regresních odhadů.
- Vybrat **vhodné teoretické rozdělení pravděpodobnosti** k vyrovnání a extrapolaci transformovaných odchylek.

- Odhadnout **průběh povodňové vlny** v hodinovém intervalu na základě odvozených průměrných denních průtoků.
- Sestavit systém **zkušebních programů**, výstupních souborů a grafických výstupů pro ověření metodiky.
- Vytvořit a odladit **profesionální programové vybavení** pro analýzu pozorovaných povodňových vln a odvozování teoretických povodňových vln s využitím podmíněných pravděpodobností překročení objemu v denním a v hodinovém kroku.

Vzhledem k tomu, že ČHMÚ má k dispozici dlouhé řady průměrných denních průtoků a průtoky v hodinovém kroku pouze v omezené míře, byla prvotní metodika založena na vstupních řadách průměrných denních průtoků. V dalším řešení byla metodika aplikována i na řady pozorovaných (příp. rekonstruovaných) povodňových vln v hodinovém kroku. Použitý algoritmus vychází z odděleného zpracování odtokových výšek na vzestupné větvi a na poklesové větvi hydrogramu. Zpracování se provádí samostatně ze souborů povodní za letní (květen až říjen) a zimní sezónu (listopad až duben), případně z maximálních ročních povodní.

Postup zpracování teoretických povodňových vln lze rozdělit do šesti částí:

1. Analýza **sezonality** průtokového režimu.
2. Odvození **kulminačních průtoků** pro zvolené pravděpodobnosti překročení.
3. Určení **vztahu mezi kulminačním průtokem a maximálním** (denním, hodinovým) **průtokem.**
4. Výpočet **parametrů regresního vztahu** mezi objemy odtoku daného trvání RT a výškou odtoku R1 ve dni, v hodině kulminace. Odvození teoretických povodňových vln s objemem dle regresního vztahu (denní průtoky, hodinové průtoky).
5. Analýza **reziduálních odchylek** pozorovaných odtokových výšek od regresních odhadů, jejich transformace, vyrovnání teoretickým rozdělením. Odvození teoretických povodňových vln s objemem zvolené **podmíněné pravděpodobnosti překročení** (denní, hodinové průtoky).
6. Odhad **průběhu teoretické povodňové vlny** v hodinovém intervalu.

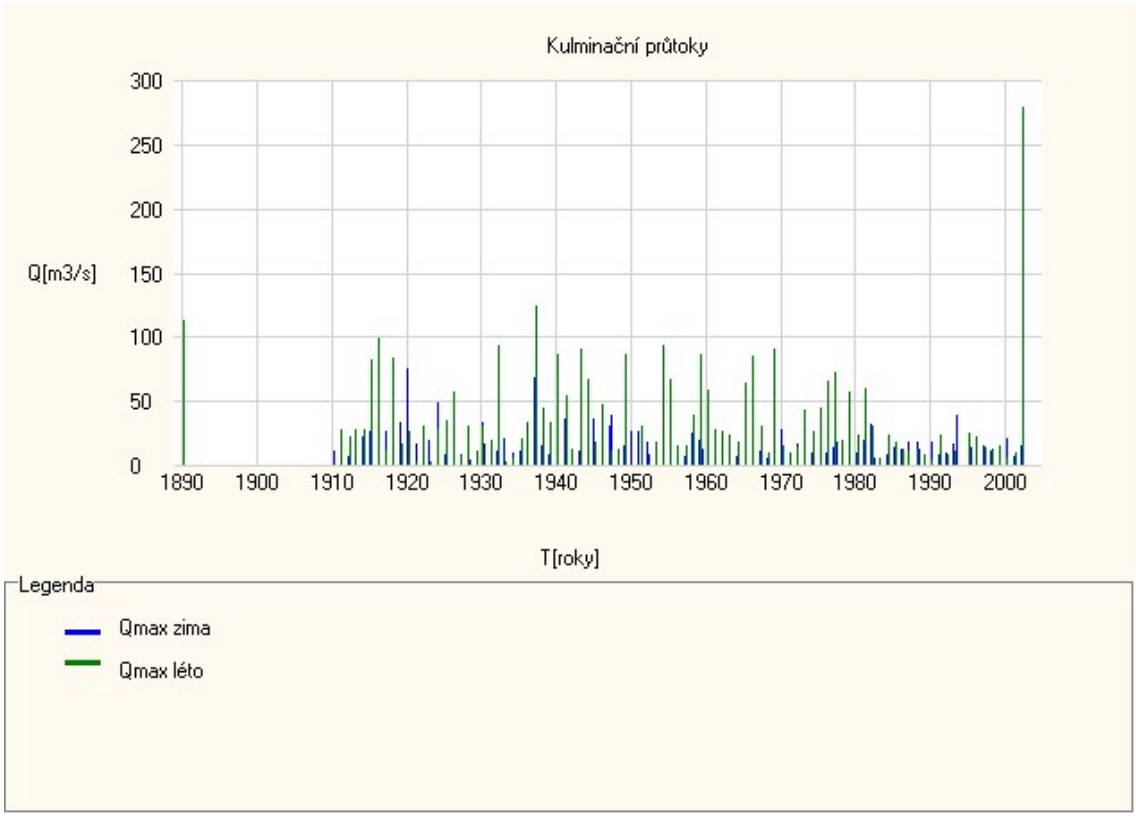
ad 1. Analýza sezonality průtokového režimu

Nejprve se provede za zimní a letní pololetí grafické porovnání časových řad kulminačních průtoků, maximálních jednodenních odtokových výšek a maximálních odtokových výšek (objemů) za zvolená trvání. Následně se posoudí sezonalita průtokového režimu. Porovnání velikosti letních a zimních povodní může vést k následujícím variantám hodnocení:

- Letní povodně jsou, co do velikosti kulminačních průtoků, maximálních jednodenních i několikadenních odtoků, podstatně větší než zimní, nejen v průměru, ale i v maximálních případech.
- Letní a zimní povodně jsou přibližně rovnocenné z hlediska průtoků i objemů.
- Letní povodně mají větší kulminační průtoky a maximální jednodenní průtoky, ale menší několikadenní objemy odtoku.
- Zimní povodně jsou výrazně větší než letní povodně.

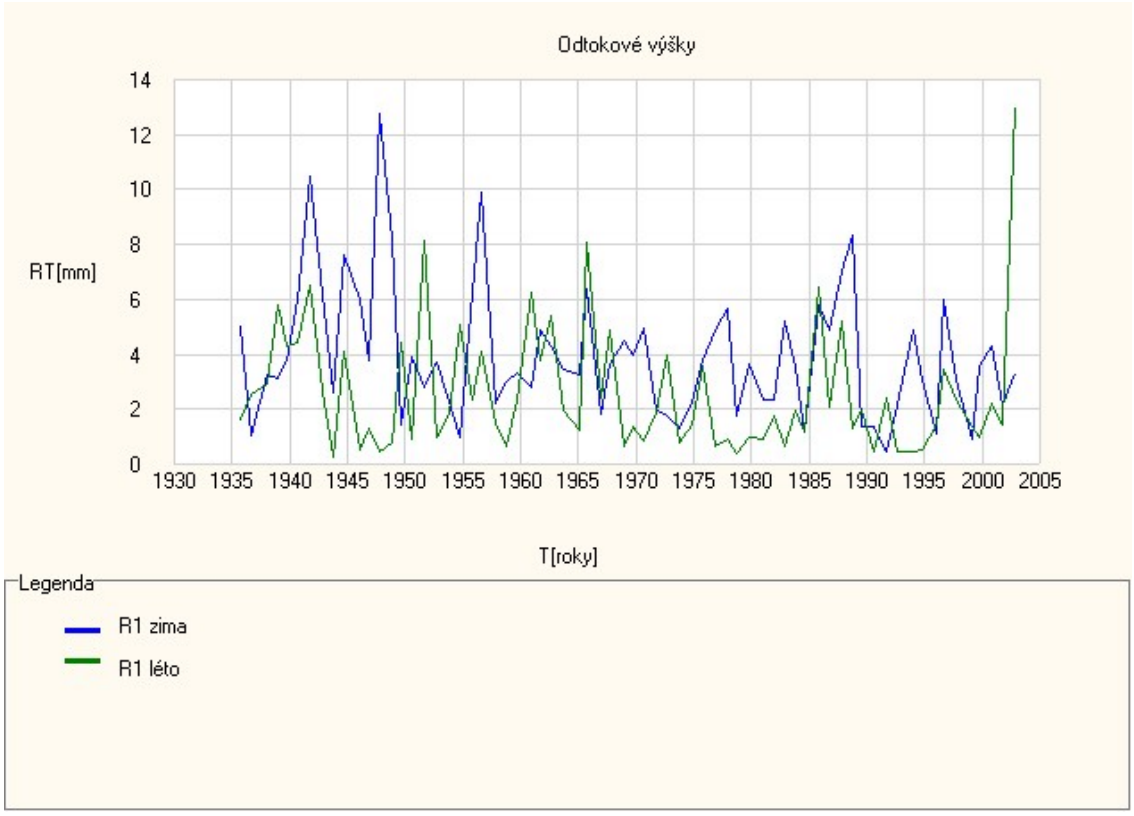
V prvém případě se další zpracování bude provádět jen pro povodně v letním období, ve druhém, třetím a čtvrtém případě se doporučuje samostatně zpracovat letní i zimní teoretické povodňové vlny.

Příklady porovnání kulminačních průtoků a jednodenních odtokových výšek za zimní a letní sezónu jsou uvedeny na obr. 1 a obr. 2.



Obr. 1 Porovnání sezónních kulminačních průtoků ve stanici Podedvorský Mlýn – Blanice

Fig. 1 Comparison of seasonal peak discharges in station Podedvorský Mlýn – Blanice



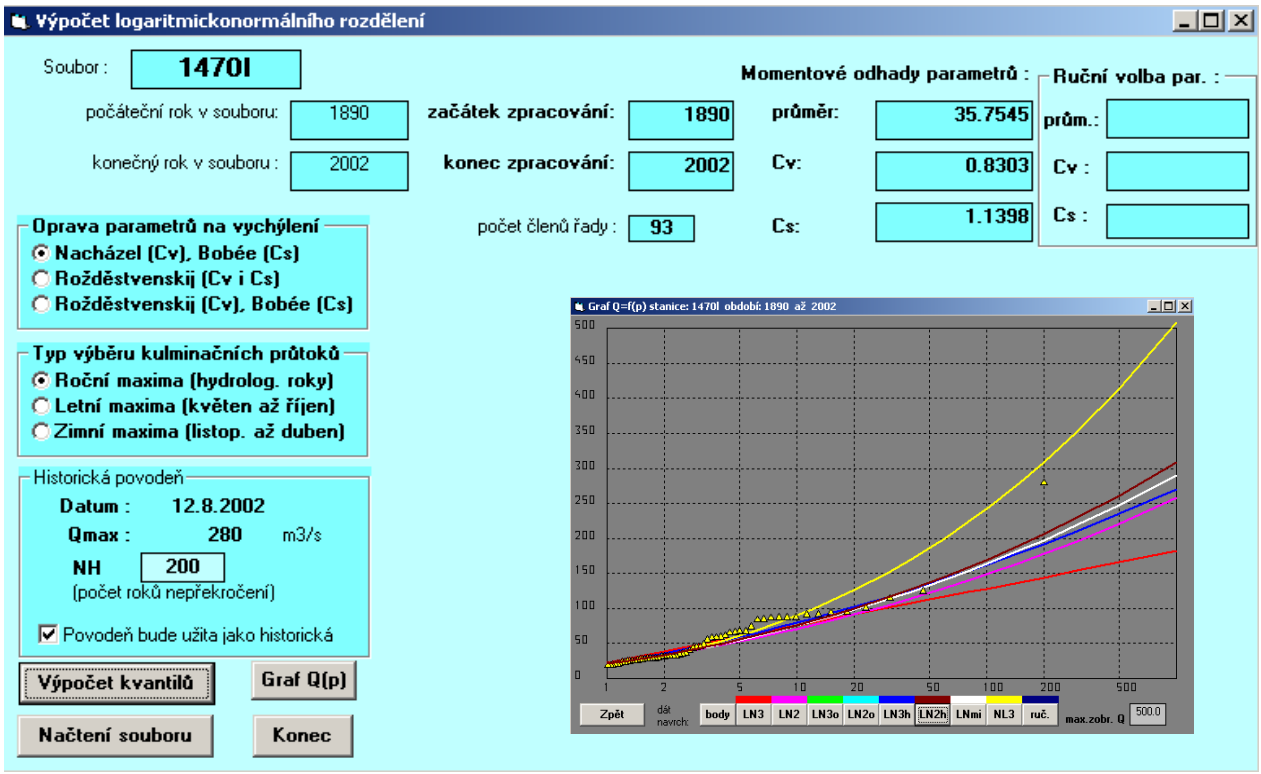
Obr. 2 Porovnání sezónních jednodenních odtokových výšek ve stanici Podhradí – Dyje.

Fig. 2 Comparison of seasonal oneday runoff depths in station Podhradí – Dyje

ad 2. Odvození kulminačních průtoků pro zvolené pravděpodobnosti překročení

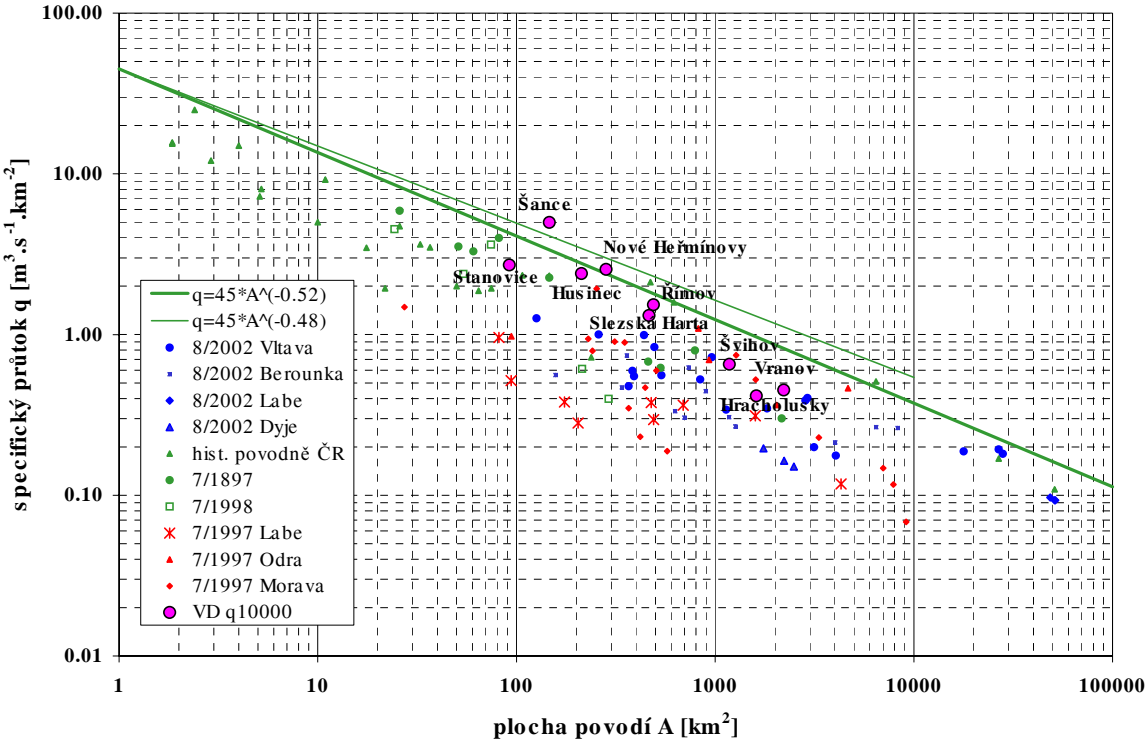
Ve vhodném analogonu (vodoměrná stanice s dostatečně dlouhou dobou pozorování) se vytvoří řada sezónních (letních a zimních) kulminačních průtoků za co možná nejdelší období pozorování, včetně historických povodní. Ve vodoměrných stanicích ovlivněných vodními díly se pro zachování homogenity průtoků uvažuje řada končící rokem uvedení nádrže do provozu, případně lze pozorované průtoky opravit o vliv transformace a manipulace a stanovit „přirozené“ kulminační průtoky.

Z takto vytvořených souborů kulminačních průtoků jsou vypočítány pomocí samostatného programu průměry Q_{max}, koeficienty variace Cv_{max} a koeficienty asymetrie Cs_{max} a odvozeny kulminační průtoky až do požadované hodnoty pravděpodobnosti překročení $pQ = 0.0001$ (tedy s dobou opakování N=10 000 let), zvlášť za zimní a letní pololetí, nebo jen z ročních řad. V ČHMÚ používaný program LNWin (viz obr. 3) umožňuje využívat momentové odhady parametrů s možností oprav systematických vychýlení koeficientů *Cv* a *Cs* u kratších pozorovaných řad a dále umožňuje volit ve variantách různou pravděpodobnost překročení historické povodně. Pro extrapolaci se používá teoretické logaritmicko-normální rozdělení dvouparametrické (LN2) i tříparametrické (LN3). Jako variantní metoda odhadu parametrů je pro oba typy rozdělení používána i metoda momentů logaritmicky transformovaných veličin popsaná v článku [4], příp. Johnsonovo rozdělení uvedené v příručce [5].



Obr. 3 Příklad odvození N-letých průtoků pomocí programu LNWin
Fig. 3 Example of derivation N-year flood peak discharges by LNWin program

Takto odvozené extrémní kulminační průtoky jsou porovnávány s obalovou křivkou znázorňující vztah specifických kulminačních průtoků velkých povodní (vyskytnuvších se na různých místech a různém čase) na ploše povodí (viz obr. 4). Obalová křivka byla původně odvozena v rámci úkolu [6] v roce 1996, postupně je doplňována o nové extrémní povodně v ČR (např. z roku 1997, 1998, 2002).



Obr. 4 Porovnání $q_{10\,000}$ odvozených pro vybraná vodní díla s obalovou křivkou

Fig. 4 Comparison $q_{10\,000}$ derivated for selected dams with envelope curve

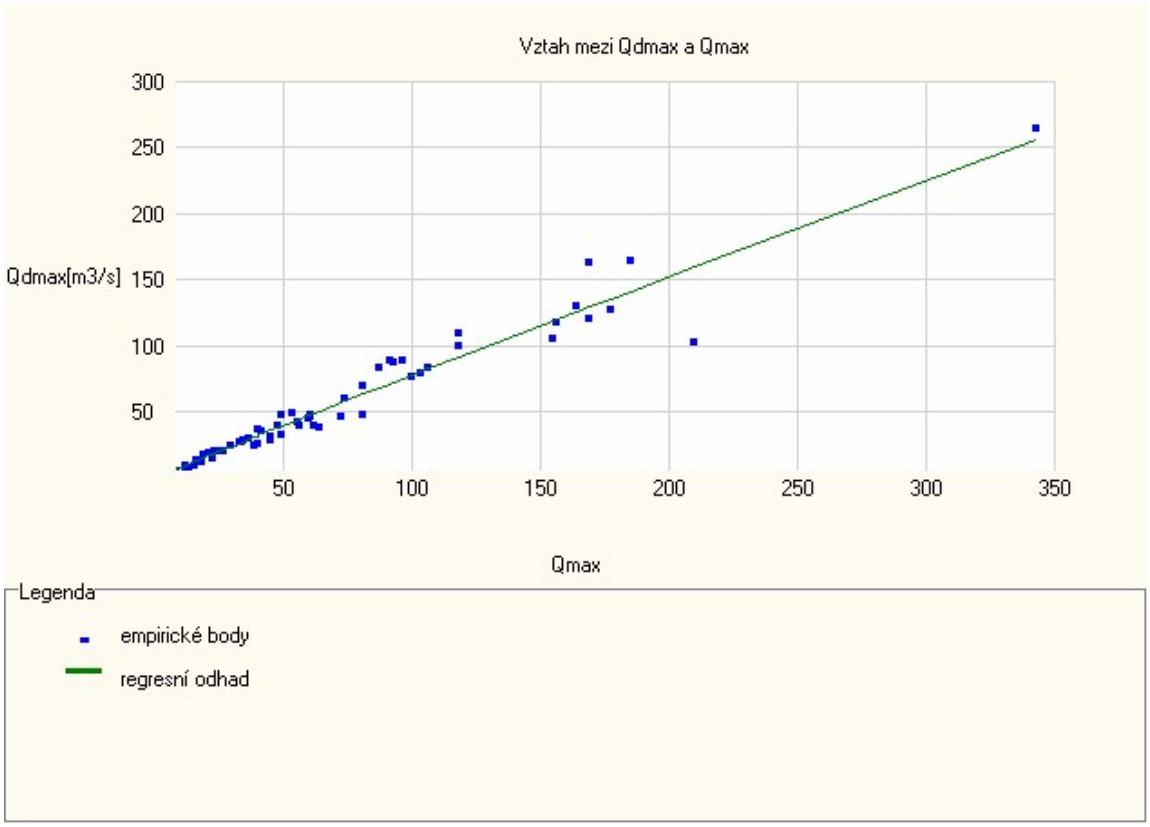
ad 3. Určení vztahu mezi kulminačním průtokem a maximálním (denním, hodinovým) průtokem

V případě využívání řad průměrných denních průtoků je nutné odvodit korelační vztah mezi maximálními jednodenními průměrnými průtoky ve dni kulminace a kulminačními průtoky. Pokud pozorované maximální průtoky neumožňují dostatečně spolehlivě extrapolovat korelační vztah do oblasti požadovaných extrémně malých pravděpodobností překročení průtoků, mohou být pro stanovení vztahu použity i odvozené N-leté kulminační průtoky a N-leté maximální jednodenní průměrné průtoky. Je žádoucí odvodit oboje N-leté průtoky ze stejného období a pro extrapolaci použít stejné teoretické rozdělení.

Příklad korelačního vztahu mezi kulminačním a maximálním denním průtokem odvozeného na základě pozorovaných průtoků je pro stanici Podhradí na Dyji vynesen na obr. 5.

V případě využití pozorovaných povodňových vln v hodinových průtocích není pro střední a větší povodí nutné odvozovat korelační vztah mezi maximálními hodinovými průtoky v hodině kulminace a kulminačními průtoky. Pro malá povodí se doporučuje tento vztah odvodit vždy.

Odvozený korelační vztah slouží k odvození odtokové výšky R1 [mm] ve dni nebo v hodině výskytu kulminace, která vstupuje do dalšího zpracování.



Obr. 5 Vztah mezi kulminačním a maximálním denním průtokem (stanice Podhradí – Dyje)

Fig. 5 Relation between peak discharge and max. daily discharge (station Podhradí – Dyje)

ad 4. Výpočet parametrů regresního vztahu mezi objemy odtoku daného trvání RT a výškou odtoku R1 ve dni, v hodině kulminace. Odvození teoretických povodňových vln s objemem dle regresního vztahu (denní průtoky, hodinové průtoky).

Závislost odtokové výšky *RT* na trvání odtoku *T* a na velikosti odtokové výšky ve dni (resp. hodině) kulminace *R1* je vhodné vyjádřit nelineárním regresním vztahem $RT = f(R1,T)$. V první fázi řešení byla používána rovnice **mocninného typu**

$$RT = b_1 \,.\, R1^{b2} \,.\, T^{b3} \qquad (1)$$

kde, *R1* [mm] je odtoková výška ve dni kulminace (z řad průměrných denních průtoků) nebo v hodině kulminace (z řad hodinových průtoků)
RT [mm] je odtoková výška za trvání *T* ve dnech nebo v hodinách
b_1, b_2, b_3 jsou regresní parametry.

Mnohonásobná regresní funkce popisuje nárůst objemu odtoku s časem a v závislosti na velikosti kulminačního průtoku. Nárůst je vyjadřován odděleně pro vzestupnou větev a pro poklesovou větev povodňové vlny, směr nárůstu se uvažuje vždy směrem od kulminace.

Na základě analýz a zkušebních výpočtů provedených během řešení byly vyzkoušeny další regresní rovnice mocninného a exponenciálního typu. Podstatou rozdílu mezi nimi je, zda tvar nárůstu odtoku s trváním *T* je dán výrazem T^b (mocninná funkce), nebo b^T (exponenciální typ), kde *b* je regresní parametr.

Osvědčil se upravený mocninný typ, a to pro případ vstupních denních průtoků, a to na poklesové i vzestupné větvi hydrogramu, který obsahuje hodnotu průměrného denního průtoku ve dni kulminace (*R1*) nejen v mocninném tvaru, ale i jako aditivní člen.

$$RT = b_1 \,.\, R1^{b2} \,.\, T^{b3} + R1 \qquad (2)$$

Během následného řešení byly vyzkoušeny i dva tvary **exponenciální** regresní rovnice:

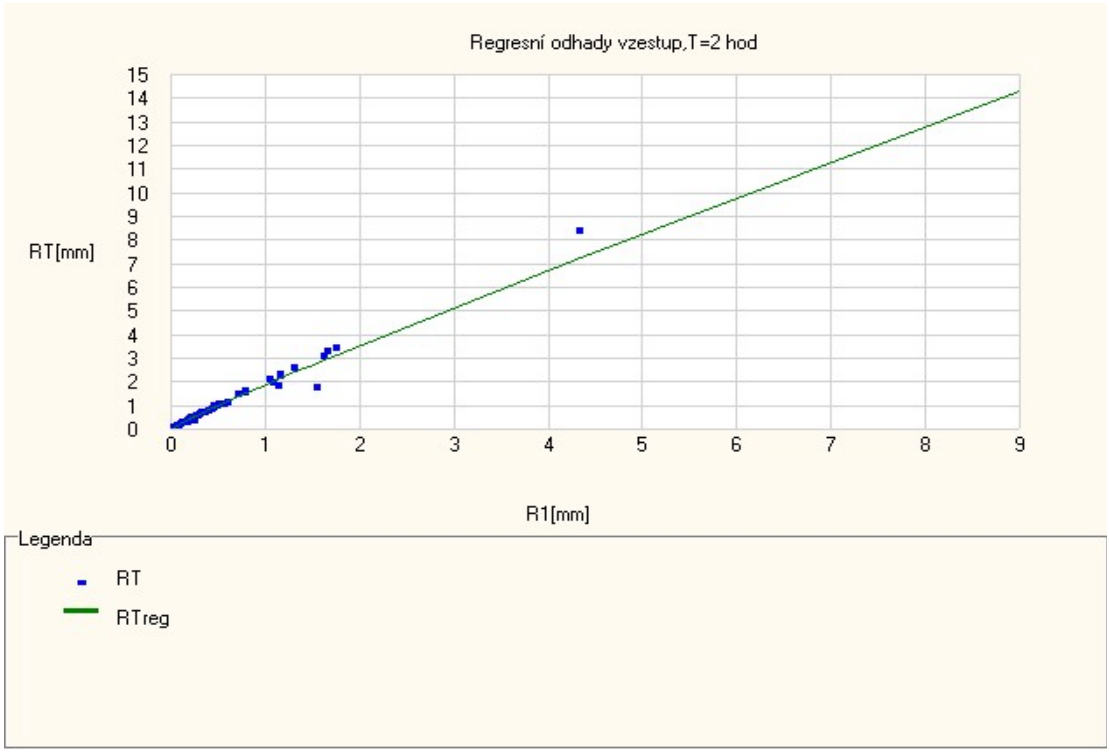
$$RT = b_1 \,.\, R1^{b3} \,.\, (-1 / \ln b_2) \,.\, (b_2 - b_2^T) \qquad (3)$$

$$RT = R1 + R1^{b3} \,.\, (T\text{-}1) \,.\, b_2^T \qquad (4)$$

V rámci řešení projektu se prokázalo, že:

- při výpočtu z průměrných denních průtoků lze použitelné výsledky získat jak z rovnice mocninného tvaru, tak z rovnic exponenciálního tvaru, pro vzestupnou větev se dobře uplatňuje mocninný typ (rovnice 2), pro poklesovou větev je většinou vhodnější exponenciální typ (rovnice 4)
- při výpočtu z hodinových průtoků je vhodnější užívat exponenciální typ závislosti jak pro vzestupnou tak i poklesovou větev a to s aditivním členem R1 (rovnice 4).

Na obr. 6 je uveden příklad vztahu mezi odtokovými výškami R1 a RT (pro T = 2 hodiny) na vzestupné větvi odvozeného za letní sezónu ve stanici Podedvorský Mlýn na Blanici. Vztah byl určen pomocí exponenciální rovnice (4).



Obr. 6 Vztah mezi odtokovými výškami RT a R1, letní sezóna (Podedvorský Mlýn – Blanice)

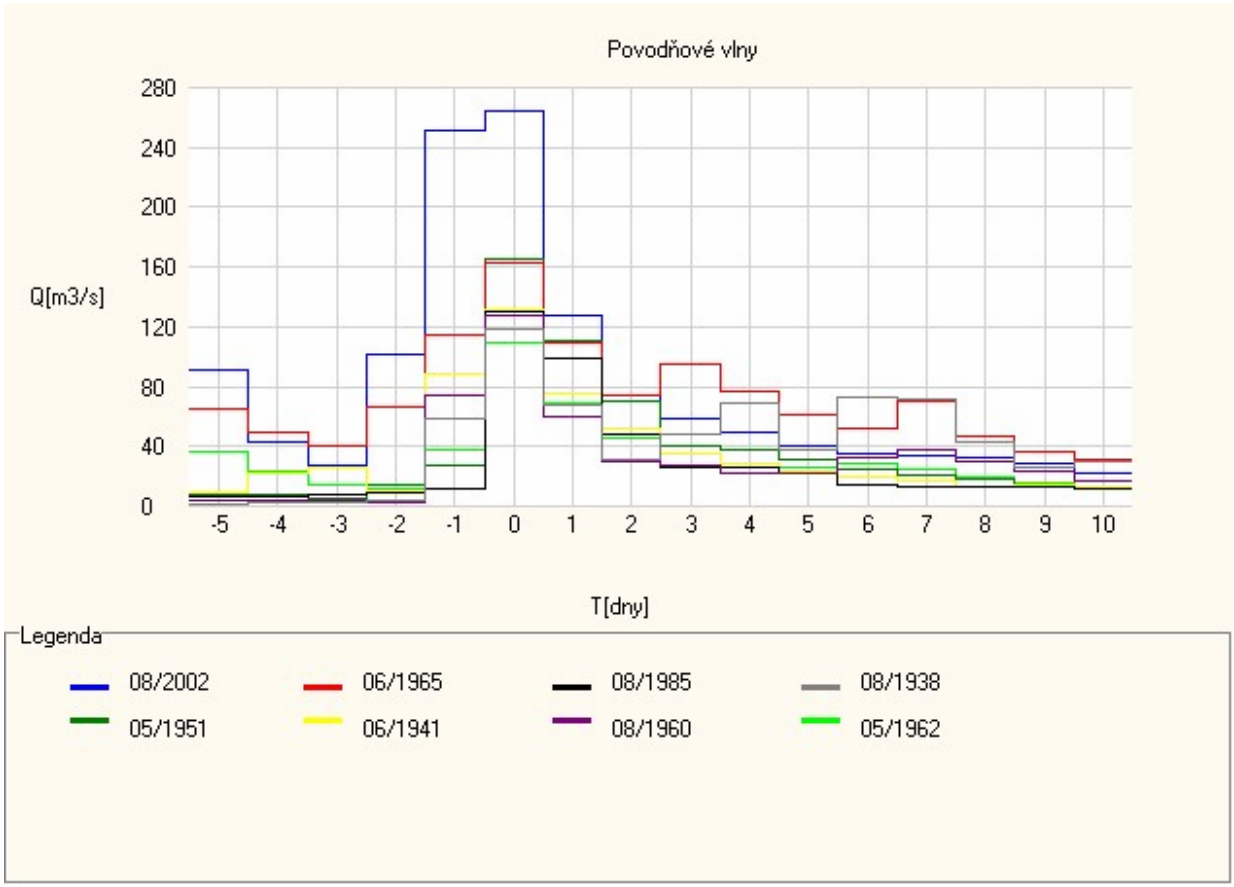
Fig. 6 Relation between runoff depths RT and R1, summer season (Podvorský Mlýn – Blanice)

Před výpočtem parametrů regresního vztahu je třeba určit trvání T pro vzestupnou a poklesovou větev povodňové vlny na základě největších pozorovaných vln. Ukázka je na obr. 7.

Rovněž je před aplikací regresních vztahů vhodné posoudit, zda regresní odhady zásadně nevybočují z rozmezí hodnot odvozených pro stanice na posuzovaném toku a příp. v příslušném povodí.

Princip výpočtu průběhu teoretické povodňové vlny z průměrných denních průtoků (odděleně pro vzestupnou a poklesovou větev) spočívá v dosazení do příslušných regresních vztahů velikosti

odtokové výšky ve dni kulminace *R1* a postupně pro zvolené trvání *T* . Tato trvání začínají ve dni kulminace, pro poklesovou větev narůstají ve směru času a pro vzestupnou větev proti směru času. Tím se získá velikost odtoku za intervaly *T* dní, zahrnující také den kulminace. Postupným odečítáním odtokových výšek za narůstající dobu trvání se vypočítají odtokové výšky v jednotlivých dnech, po přepočtu na průtoky se získá hydrogram povodňové vlny určený řadou průměrných denních průtoků.



Obr. 7 Určení trvání T pro vzestupnou a poklesovou větev letní povodňové vlny na základě pozorovaných vln (stanice Podhradí – Dyje)

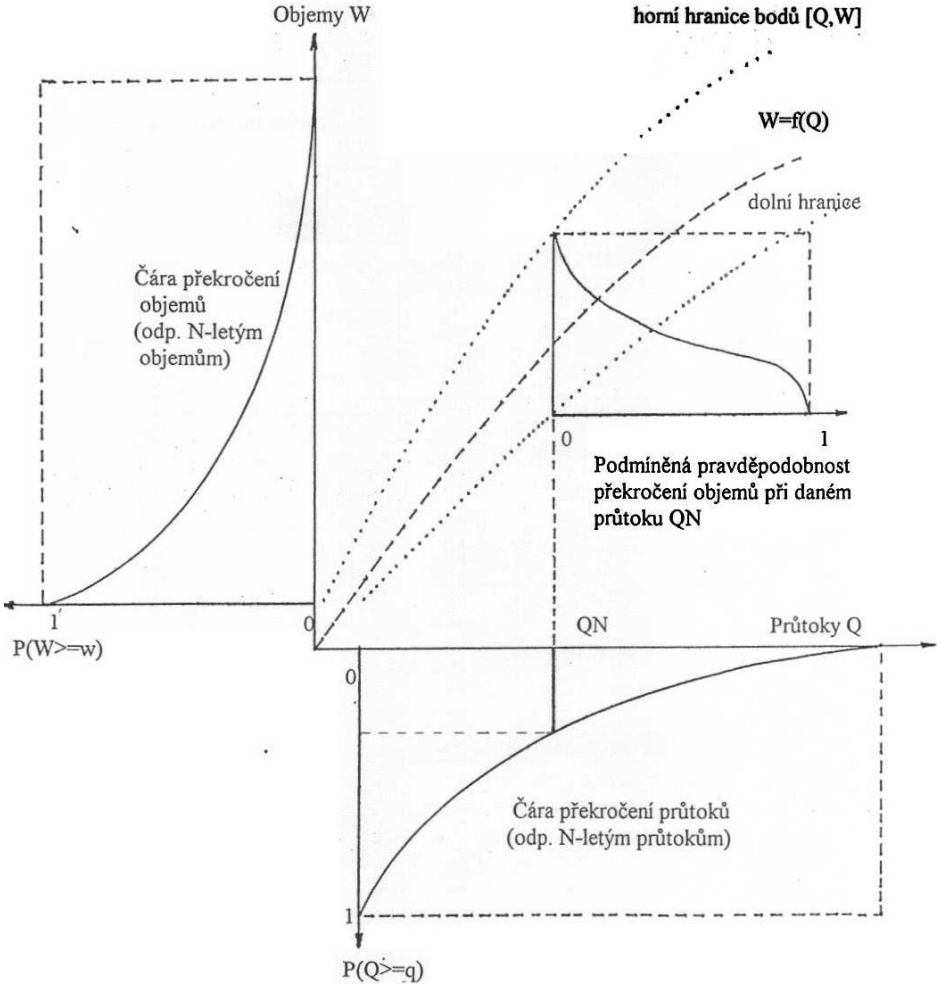
Fig.7 Determination of duration T for summer flood hydrograph on basis of observed flood hydrographs (station Podhradí – Dyje)

ad 5. Analýza reziduálních odchylek pozorovaných odtokových výšek od regresních odhadů, jejich transformace, vyrovnání teoretickým rozdělením. Odvození teoretických povodňových vln s objemem zvolené podmíněné pravděpodobnosti překročení (denní, hodinové průtoky).

Pozorované odtokové výšky se nacházejí v určitém rozmezí okolo regresních odhadů. Rozdělení těchto odchylek můžeme charakterizovat statistickými metodami a vyjádřit tak **podmíněnou pravděpodobnost** překročení odtokové výšky za zvolené trvání (viz obr. 8), podmínkou je výskyt určitého maximálního průtoku.

Potíž spočívá v tom, že případů extrémních odtoků je vždy nedostatečný počet, takže pouze podle nich nelze identifikovat rozdělení podmíněných pravděpodobností v oblasti mimořádně velkých odtoků. Proto se reziduální odchylky pozorovaných odtokových výšek od regresních odhadů transformují tak, aby byla eliminována jejich závislost na velikosti kulminačního průtoku. Pro odhad charakteristik podmíněného rozdělení pravděpodobnosti lze použít odchylky vyhodnocené z povodní s odlišnou velikostí kulminačních průtoků v jednom souboru.

Jako účinná se prokázala transformace, při které jsou rezidua odděleně pro kladné a záporné odchylky od regresních odhadů vyjádřena v měřítku vzdálenosti fyzikálně daných mezí odchylek od regresního odhadu. Tyto meze lze odvodit ze skutečnosti, že pro určitou hodnotu maximálního průtoku Q_{max} musí objem povodňové vlny W za dobu T být menší, než hodnota $Q_{max}.T$, zdola je teoreticky omezen pouze podmínkou $W > 0$.



Obr. 8 Podmíněná pravděpodobnost překročení objemů za zvolené trvání

Fig. 8 Conditional probability of volume exceedance for elected duration

Transformaci popíšeme pro případ, kdy jako měřítko velikosti kulminace povodně použijeme odtokovou výšku ve dni kulminace *R1*, odtoková výška za *T* dní je označena *RT* a její regresní odhad *RTE*. Transformovaná proměnná *TRES* je v případech, kdy

$$RT \geq RTE$$

$$TRES = (RT - RTE) / (R1 \,.\, T - RTE) \qquad (5)$$

a v případech, kdy $RT < RTE$

$$TRES = (RT - RTE) / (RTE - R1). \qquad (6)$$

Transformovaná rezidua *TRES* jsou tedy odděleně pro kladné a záporné odchylky od regresních odhadů vyjádřena v měřítku vzdálenosti mezí (*R1* . *T* = horní mez pro kladné odchylky, *R1* = dolní mez pro záporné odchylky) od regresní křivky *RTE* = f (*R1*,*T*). Transformovaná rezidua se mohou vyskytovat v rozmezí -1 až 1.

Pro zvolené trvání a proměnnou pravděpodobnost lze empirická rezidua vyrovnat vhodným teoretickým rozdělením. Na základě provedených výpočtů bylo zvoleno Johnsonovo rozdělení, které svými vlastnostmi odpovídá fyzikálně daným vlastnostem rozdělení reziduí (má konečnou horní i dolní mez). Ze čtyř parametrů Johnsonova rozdělení jsou dva (horní a dolní mez) dané, zbývající dva se vypočtou postupem uvedeným v příručce [5], která obsahuje i postup výpočtu kvantilů tohoto rozdělení.

Reziduální odchylky jsou do značné míry tvořeny i náhodnou složkou, která odpovídá zejména nejistotě přiřazení empirických pravděpodobností jednotlivým pozorovaným hodnotám odtokových výšek. Podíl náhodné složky se zvětšuje s klesající délkou pozorované řady. Při odvození teoretických povodní se snažíme vliv náhodné složky reziduí zmenšit na přijatelnou míru. K tomu je vhodné použít výsledků zpracování z několika stanic v povodí.

Výpočet odtokových výšek RT_{pp} zvolené podmíněné pravděpodobnosti překročení *pp* podle odhadnuté vyrovnané transformované reziduální odchylky x_{pp} spočívá v dosazení do následujících rovnic:

pro hodnoty $x_{pp} \geq 0$

$$RT_{pp} = x_{pp} \,.\, (R1 \,.\, T - RTE) + RTE \qquad (7)$$

a pro hodnoty $x_{pp} < 0$

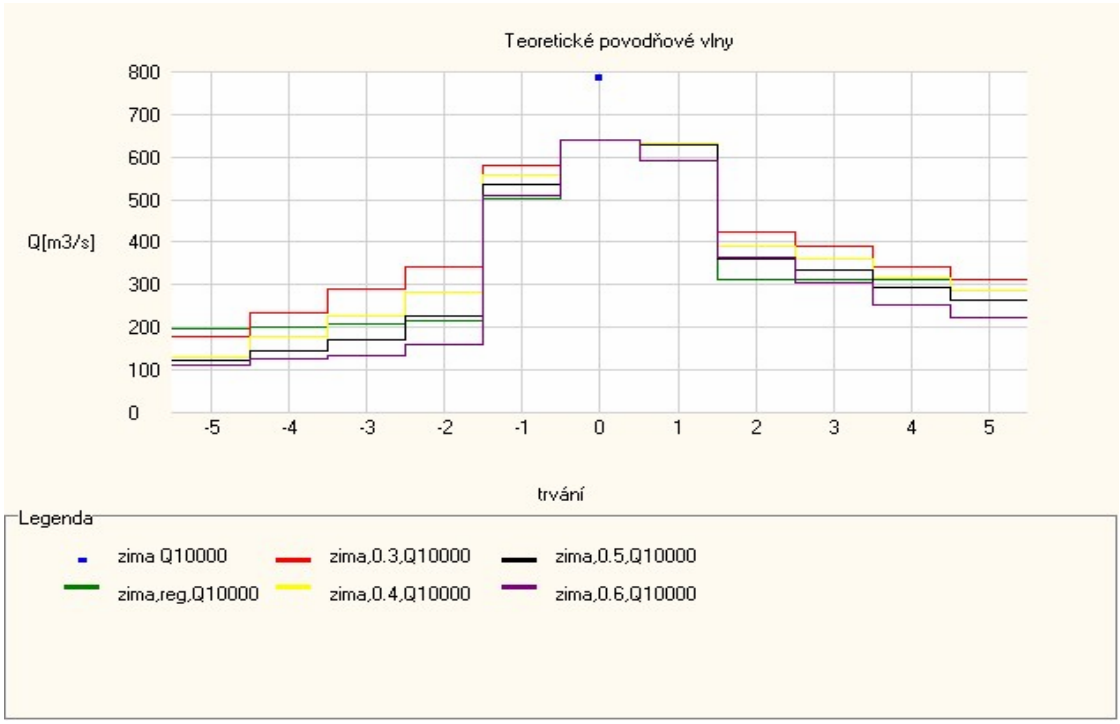
$$RT_{pp} = x_{pp} \,.\, (RTE - R1) + RTE. \qquad (8)$$

Výsledkem výpočtů pro vzestupnou i sestupnou větev hydrogramu je průběh teoretické povodňové vlny ve formě průměrných denních průtoků s danou pravděpodobností překročení kulminačního průtoku a s objemem odpovídajícím podmíněné pravděpodobnosti překročení. Hydrogram v této formě popisuje základní charakteristiky tvaru povodňové vlny, trvání vzestupné větve, strmost poklesu průtoků, atd. Na povodích, kde se často vyskytují povodně s podružnými vrcholy, se může častější výskyt takových povodní projevit pozvolnějším poklesem, případně pozvolnějším vzestupem odvozených teoretických hydrogramů.

Na obr. 9 je ukázka odvozených teoretických zimních povodňových vln ve formě průměrných denních průtoků pro různé pravděpodobnosti překročení objemu za zimní sezónu ve stanici Podhradí na Dyji.

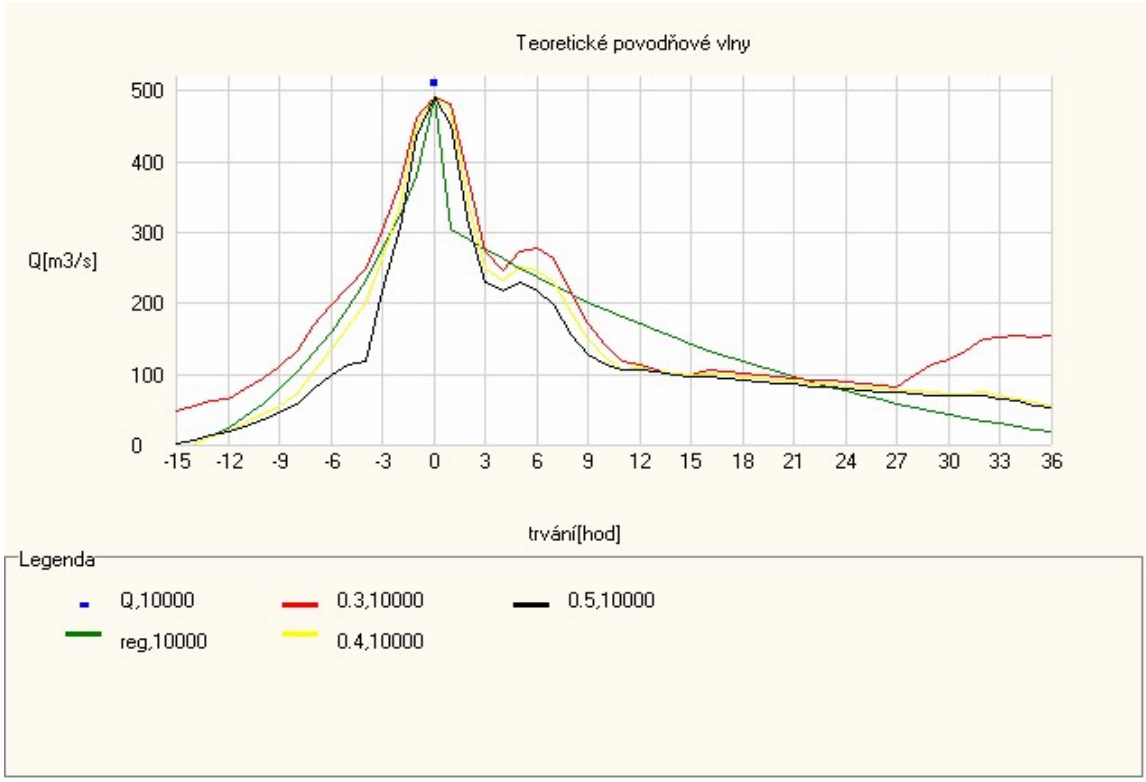
V případě odvození teoretických extrémních vln na základě vstupních řad hodinových průtoků byl učiněn výzkum se závěrem, že lze použít pouze soubor vybraných největších (cca 15) povodní (které mohou být odlišné od průběhů povodní vyskytujících se častěji). Není tedy nezbytně nutné mít k dispozici soubor všech sezónních, příp. ročních maximálních povodní za celé období pozorování. Tento poznatek má velmi praktické důsledky, neboť příprava vstupních podkladů (pozorovaných hydrogramů v hodinovém kroku) bude časově méně náročná.

Teoretické letní povodňové vlny odvozené z hodinových průtoků pro různé pravděpodobnosti překročení ve stanici Podedvorský mlýn na Blanici jsou znázorněny na obrázku 10.



Obr. 9 Teoretické zimní povodňové vlny ve formě průměrných denních průtoků (Podhradí – Dyje)

Fig. 9 Design winter flood hydrographs in form mean daily dischares (Podhradí – Dyje)



Obr. 10 Teoretické letní povodňové vlny ve formě hodinových průtoků (Podedvorský Mlýn – Blanice)

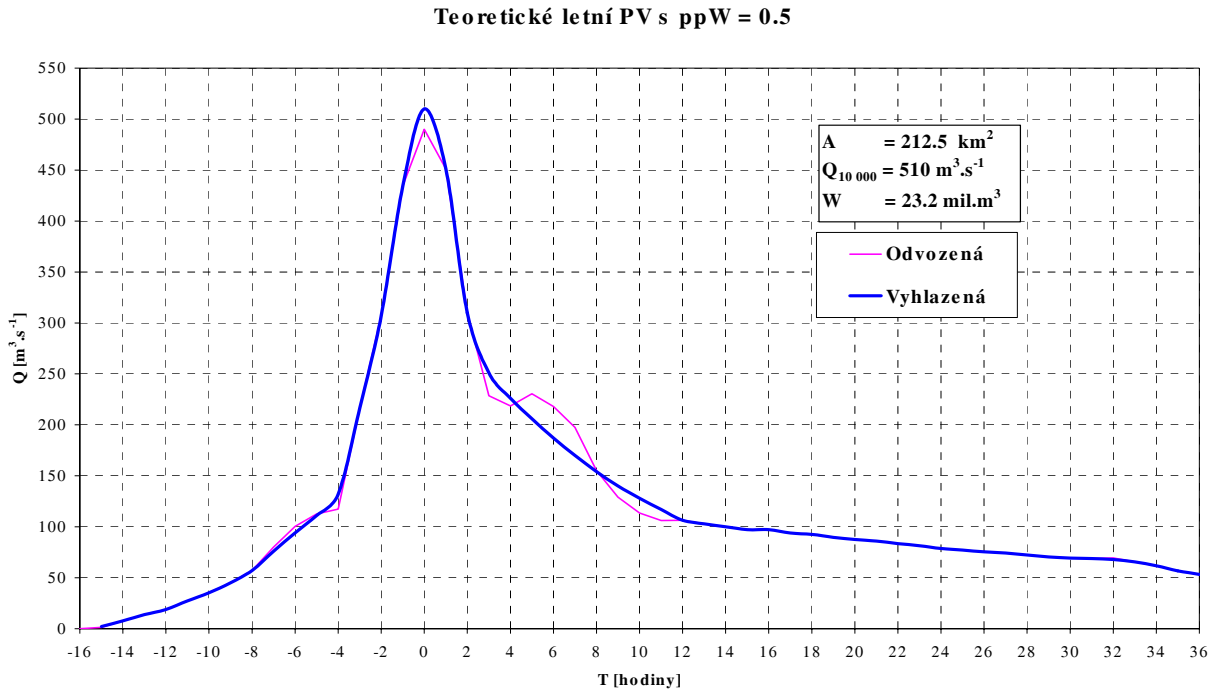
Fig. 10 Design summer flood hydrographs in form hourly dischares (Podedvorský Mlýn – Blanice)

ad 6. Odhad průběhu teoretické povodňové vlny v hodinovém intervalu.

V případě, že do zpracování vstupují průměrné denní průtoky, je odvozená vlna rovněž ve formě denních průtoků. Při popisu povodně v kratším (hodinovém) intervalu je třeba odhadnout rozložení průtoků v jednotlivých dnech. Taková úloha sice nemá jednoznačné řešení, avšak podmínky zachování velikosti průměrných denních průtoků v jednotlivých dnech a velikosti kulminačního průtoku a zajištění spojitosti průběhu průtoku na rozmezí dnů vymezují dosti úzce možná řešení.

Tyto všechny podmínky splňuje samostatný program, využívající metodu spline. Pomocí tohoto programu je možno z odvozené teoretické povodňové vlny ve formě průměrných denních průtoků a hodnoty kulminačního průtoku odvodit teoretickou povodňovou vlnu v hodinových průtocích, což je cíl řešení.

Odvozené teoretické povodňové vlny z řad hodinových průtoků do určité míry kopírují průběh pozorovaných vln a mohou se na vzestupné i poklesové větvi vyskytnout nerovnosti („hrby“). Proto je vhodné výslednou teoretickou vlnu vyhladit, tak aby byl její průběh plynulý (při zachování stejné velikosti objemu). Na obrázku 11 je ukázán příklad průběhu teoretické povodňové vlny pro podmíněnou pravděpodobnost překročení objemu ppW = 0.5 ve stanici Podedvorský Mlýn na Blanici, kde „hrb“ na poklesové větvi je vyhlazen.



Obr. 11 Teoretická povodňová vlna ve formě hodinových průtoků - vyhlazená (Podedvorský Mlýn – Blanice)

Fig. 11 Design flood hydrographs in form hourly dischares - equaable (Podedvorský Mlýn – Blanice)

ZÁVĚRY

V rámci obou grantových projektů byla vyvinuta nová metodika pro odvozování teoretických povodňových vln sloužících k posuzování bezpečnosti přehrad za povodní statistickými přístupy. Projekty byly řešeny interdisciplinárně, byly integrovány klimatologické, hydrologické a

vodohospodářské postupy tak, aby výsledné metodiky odpovídaly současnému stavu poznání dané problematiky ve všech těchto oborech.

Výzkum statistických přístupů byl zaměřen na vícerozměrnou analýzu charakteristik hydrogramu povodňové vlny. Byly zkoumány metody statistické analýzy vztahů mezi kulminačním průtokem (resp. maximálním jednodenním průměrným průtokem nebo hodinovým průtokem) a trváním odtoku jako nezávislými proměnnými a objemem odtoku za toto trvání jako závisle proměnnou. Tato nová metoda slouží pro odvození teoretických povodňových vln **s podmíněnou pravděpodobností překročení objemu** pro daný kulminační průtok.

Metodika byla původně navržena jen na využití řad průměrných denních průtoků. Ze zkušeností vyplynulo, že není vhodná pro malá povodí (do cca 150 km^2). Proto byla metodika rozšířena i na využití řad hodinových průtoků; aplikace je vhodná pro malá povodí, zpracování je však vzhledem k přípravě vstupních dat v hodinovém intervalu časově velmi náročné.

Při zpracování se posuzuje sezonalita průtokového režimu. V rámci studií jsou odvozovány letní a zimní (příp. roční) teoretické povodňové vlny.

Závislost objemu odtoku na kulminačním průtoku a trvání odtoku je vyjádřena nelineárním regresním vztahem. Bylo vyzkoušeno několik regresních rovnic mocninného i exponenciálního typu. Při odvození z průměrných denních průtoků lze použít rovnice mocninného nebo exponenciálního tvaru. Při výpočtu z hodinových průtoků je vhodnější užívat exponenciální typ rovnice.

Výsledkem řešení určeným pro hydrologickou praxi jsou dva programy (jeden pro vstupní data v denním kroku, druhý pro data v hodinovém kroku) umožňující efektivně navržené statistické postupy použít až do úrovně výpočtu hydrogramů teoretických povodní. Programy mohou poskytovat řadu názorných výstupů, které umožňují posoudit dílčí výsledky výpočetního postupu.

Navrženou metodiku lze tedy používat pro odvození teoretických povodňových vln, nezbytnou součástí zpracování je regionální analýza a posouzení výsledků z pozorování z vodoměrných stanic na daném toku, příp. i v sousedních povodích. Jde o úlohu vyžadující hydrologické znalosti a zkušenosti, neboť spolehlivost výsledků z jednotlivých stanic nezávisí jen na délce použitých řad, ale i na kvalitě jejich pozorování, míře antropogenního ovlivnění i dalších vlivech. Zpracování teoretických povodňových vln tedy není a asi nikdy nebude úlohou, kterou by bylo možné zcela důsledně algoritmizovat.

Hydrologické podklady zpracovávané těmito novými metodickými postupy jsou již od správců toků požadovány v rámci nové technické normy TNV 2935 „Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních“ [3] z roku 2003. Výchozím podkladem je kontrolní povodňová vlna (KPV), zpravidla uvažovaná jako teoretická N-letá povodňová vlna. KPV se doporučuje odvozovat variantním způsobem. Pro jejich zpracování se předpokládá použití metod odpovídajících soudobé úrovni poznání a současným možnostem dostupného zpracování potřebných hydrologických a meteorologických podkladů. Dle skupiny a kategorie vodního díla se odvíjí míra jeho bezpečnosti vyjádřená pravděpodobností překročení kulminačního průtoku až do hodnoty p = 0.0001.

Konečné odvození extrémních povodňových vln umožňuje různé kombinace doby opakování kulminačního průtoku a podmíněné pravděpodobnosti překročení objemu povodňové vlny. Z dosavadních zkušeností se doporučuje kombinace pravděpodobnosti kulminačního průtoku pQ=0.0001 s podmíněnou pravděpodobností objemu ppW=0.5 a ppW=0.4 a kombinace pravděpodobnosti kulminačního průtoku pQ=0.001 s pravděpodobností ppW=0.5, ppW=0.4 a příp. ppW=0.3.

Pro volbu kombinací pravděpodobnosti kulminačního průtoku a podmíněné pravděpodobnosti objemu pro konkrétní vodní dílo se doporučuje spolupráce zpracovatele - hydrologa s objednatelem – vodohospodářem. Volba kombinace doby opakování kulminačního průtoku a podmíněné

pravděpodobnosti překročení objemu povodně překračuje rámec hydrologie a je již z podstatné míry záležitostí řídící sféry, jakou míru rizika pro konkrétní řešení zvolí.

Nově vyvinuté metodiky pro odvozování parametrů teoretických povodňových vln statistickými přístupy včetně nově zpracovaných příslušných programů byly v rámci grantového řešení ověřeny na povodích vybraných vodních děl. Byly odvozeny teoretické povodňové vlny z průměrných denních průtoků pro VD Vranov na Dyji a z hodinových průtoků pro VD Husinec na Blanici. Po skončení projektu byly na objednávku Povodí Vltavy, s.p. odvozeny teoretické povodňové vlny pro VD Římov na Malši a pro VD Klabava.

Extrémní povodňové vlny založené na statistickém zpracování průtoků je třeba, zvláště na malých a středních povodích, ověřovat z fyzikálního hlediska jednoduchými deterministickými přístupy (týká se zejména vztahu příčinných srážek k objemu odtoku).

Literatura

[1] Kulasová, B. – Šercl, P. – Boháč, M.: Projekt QD1368 „Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní“. Praha, ČHMÚ 2004.

[2] Kulasová, B., a kol.: Grantový projekt VaV 510/3/97. „Vývoj metod pro stanovení extrémních povodní“. DÚ 04 Statistické metody odhadu charakteristik extrémních povodní. Praha, ČHMÚ 2000.

[3] TNV 75 2935 Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních, Praha, VD-TBD, a.s., Hydroprojekt CZ a.s, 2003.

[4] Procházka, M.: Logaritmicko-normální rozdělení a možnosti jeho použití v hydrologii, Vodohospodářský časopis 34, 1986, č. 3, s. 243-256.

[5] Rožděstvenskij, A. V.et al: Meždunarodnoje rukovodstvo po metodam rasčota osnovnych gidrologičeskich charakteristik, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1984.

[6] Kulasová, B., a kol.: Metodické postupy odvozování návrhových extrémních povodní pro posuzování bezpečnosti přehrad. Praha, ČHMÚ 1996.

Autoři

Bohuslava Kulasová, ČHMÚ, Na Šabatce 17, 143 06 Praha 4 – Komořany, kulasova@chmi.cz

Miloň Boháč, ČHMÚ, Na Šabatce 17, 143 06 Praha 4 – Komořany, bohac@chmi.cz