MOŽNOSTI PROPOJENÍ GIS S HYDROLOGICKÝMI A HYDROGEOLOGICKÝMI MODELY

Jan Unucka , Jiří Horák , Naďa Rapantová

GIS je tradičně spojován s představou zobrazení digitálních prostorových dat ve formě interaktivní mapy a s možností dotazování nad jejími objekty. Hlavní přínos GIS však spočívá v silných nástrojích automatizovaného zpracování prostorových dat, možnostech analytických operací, modelování a simulací. Výstupy pak mohou být velmi názorně prezentovány, což významně usnadňuje jejich interpretaci.

Tyto systémy mohou sloužit jako vhodný preprocesor pro předzpracování dat vstupujících do numerických modelů a současně i jako postprocesor pro zobrazení výsledků modelování.

Mezi hlavní hydrologické aspekty potenciálu GIS patří zejména zjednodušená či automatizovaná schematizace povodí, možnost generování speciálních map akumulace a drah odtoku, topografického indexu, infiltračního deficitu apod. Po vygenerování průběhu odtoku hydrologickým modelem skýtá GIS možnost vizualizace záplavových či jinak ohrožených zón.

V rámci projektu TRANSCAT byl připraven prototyp srážko-odtokového modelu pro povodí Bělé (číslo 2-04-04) v prostředí HEC-HMS. Rámcově lze metodiku schematizace shrnout do použití metody SCS (CN křivky), Clarkova jednotkového hydrogramu, kinematické vlnové aproximace pro 1D i 2D proudění v korytech a na plochách povodí a recesní metody (metody separace hydrogramu). Pro tání sněhu a odtok ze sněhu byl vytvořen program v prostředí Visual Studio .NET, který používá metody stupeň/den a Anderson, jelikož HEC-HMS metodiky výpočtů odtávání nepodporuje. V současnosti se využívá ArcGIS a GRASS GIS pro preprocesing, postprocesing a pro některé hydrologické výpočty.

Připravuje se také hydrogeologický model proudění podzemní vody v nasycené zóně pro kvartérní sedimenty u Mikulovic, který bude využívat i simulaci komunikace s povrchovým tokem Bělé. Model je vytvářen v prostředí GMS a rovněž využívá preprocesingu dat z ArcGIS.

Interakce s hydrologickými modely umožňuje věrohodnější kalibraci hydrogeologického modelu, neboť jednotlivé složky rovnice hydrologické bilance jsou vzájemně validovány. Komplexnosti může být dosaženo při zapojení modelů proudění v nenasycené zóně (např. systém UNSAT Suite), které simulují i ostatní složky rovnice hydrologické bilance – tj. evapotranspiraci, povrchový odtok a efektivní infiltraci.

Vytvoření digitálního modelu území se správou všech významných faktorů v GIS přináší významné výhody v operativní možnosti předzpracování potřebných dat, výpočtu vhodných ukazatelů, využití škály výkonných prostorových analýz, zahrnutí většího počtu faktorů a samozřejmě i v prezentaci výsledků. Prostřednictvím GIS se rovněž otevírá možnost integrovaného využití aktuálních dat DPZ při hodnocení území.

Klíčová slova: GIS, ArcGIS, GRASS, HEC-HMS, GMS, MODFLOW, hydrologické modelování, hydrogeologické modelování, vizualizace dat

Possibilites of the linking GIS with hydrologic and hydrogeologic models. *GIS is traditionally put together with the notion of visualization of the spatial geographic data in mode of the interactive maps with possibilities of querying map objects. But the main contribution of GIS consists in the tools of the automatic spatial data processing, analysis, simulation and modeling. At last but not least the power of GIS lies in the practically unlimited possibilities of the data and modeling output visualization.*

So, these systems can serve as suitable preprocessor of the data incoming in the common numerical models equally as postprocessor for the visualization in the form of maps, 3D models, cross-sections and others.

The support of the catchment schematization, creating of the special maps (flow accumulation, flow direction, topographical index, infiltration deficit etc.) is among the main hydrological aspects of the GIS potential. After model computation of the discharge volume and water stage level GIS can visualize flood or endangered zones on the digital terrain model.

The prototype of hydrological model was prepared in the framework of TRANSCAT project with using of the rainfall-runoff modeling software HEC-HMS. Methodic of prototype schematization uses SCS method (CN curves), Clark's unit hydrograph, kinematic wave approximation in 1D (channel routing) and 2D (overland flow) and recession method for the baseflow. In Visual Studio .NET was developed program for snowmelt computations, which uses degree/day and Anderson methods, because snowmelt computations aren't supported in HEC-HMS itself. Studying of the potential of GRASS GIS for the hydrological modeling runs nowadays. Now this GIS system runs as pre- and postprocessor.

Integration of GIS (both ESRI and GRASS platform), hydrological models (HEC-HMS), hydrogeological models (MODFLOW) and landscape ecology models in the integrated client-server system with open source software utilization (Linux, Apache) that will allows decision making of its users.

Hydrogeological model is prepared now. Model will use the solution of water routing in the saturated zone in the quartenary sediments nearby Mikulovice. It is developed in GMS software with using of ArcGIS preprocessing.
Interaction of the hydrological and hydrogeological models brings possibility of the comparision and validation of the model outputs and better calibration of the both models itself. Complex solution can be achieved by implementing of model of routing in the unsaturated zone (f.e. UNSAT suite). The connected pack of such models can bring the complete solution of the hydrologic balance equation.
Creation of the digital model of the whole area with the possibility of managing all important factors in GIS environment brings the possibility of the operative data preprocessing, calculation of the efficient indicators, utilization of the scale of the spatial analysis tools, including of the bigger amount of indicators and substantial data visualization refinement. Using of GIS also brings possibility of the remote sensing utilization.

Key words: GIS, ArcGIS, GRASS, HEC-HMS, GMS, MODFLOW hydrological modeling, hydrogeological modeling, data visualization

---

GIS A JEHO POTENCIÁL PRO PODPORU HYDROLOGICKÉHO MODELOVÁNÍ

Pojem geografický informační systém je používán pro označení počítačových systémů, orientovaných na zpracování geografických dat, prezentovaných především ve formě různých map (Rapant 2002).

Analytické funkce GIS jsou zpravidla děleny do 4 skupin (upraveno podle Aronoff 1989):
1. Údržba a analýzy geometrické složky dat
2. Údržba a analýzy atributové složky dat
3. Integrované analýzy geometrické a atributové složky dat
4. Výstupní formátování

Hlavní přínos GIS spočívá ve schopnosti integrované analýzy prostorových dat, v silných nástrojích automatizovaného zpracování prostorových dat, možnostech analytických operací, modelování a simulací. Právě tyto schopnosti jsou tím hlavním, co GIS odlišuje od programů pro automatické mapování a CAD systémů. Rozsah analytických funkcí pro integrované analýzy prostorových dat je značně široký, jedna z možných kategorizací rozlišuje (Horák 96):
1) klasifikační operace
2) překryvné operace
3) analýzy okolí
4) analýzy spojitosti

Můžeme konstatovat, že všechny typy se uplatňují v hydrologických aplikacích. Protože naším cílem není podat úplný systematický přehled jednotlivých možností, uvedeme jen hlavní příklady.

Již v úvodu můžeme konstatovat, že GIS představuje vhodné prostředí pro komunikaci s hydrologickými a hydrogeologickými modely a současný trend u těchto modelů směřuje k vytváření distribuovaných a semidistribuovaných modelů s využitím pre- a postprocesingu v GIS software. Zvláště významná je možnost rozsáhlé přípravy vstupů pro hodnocenou oblast.

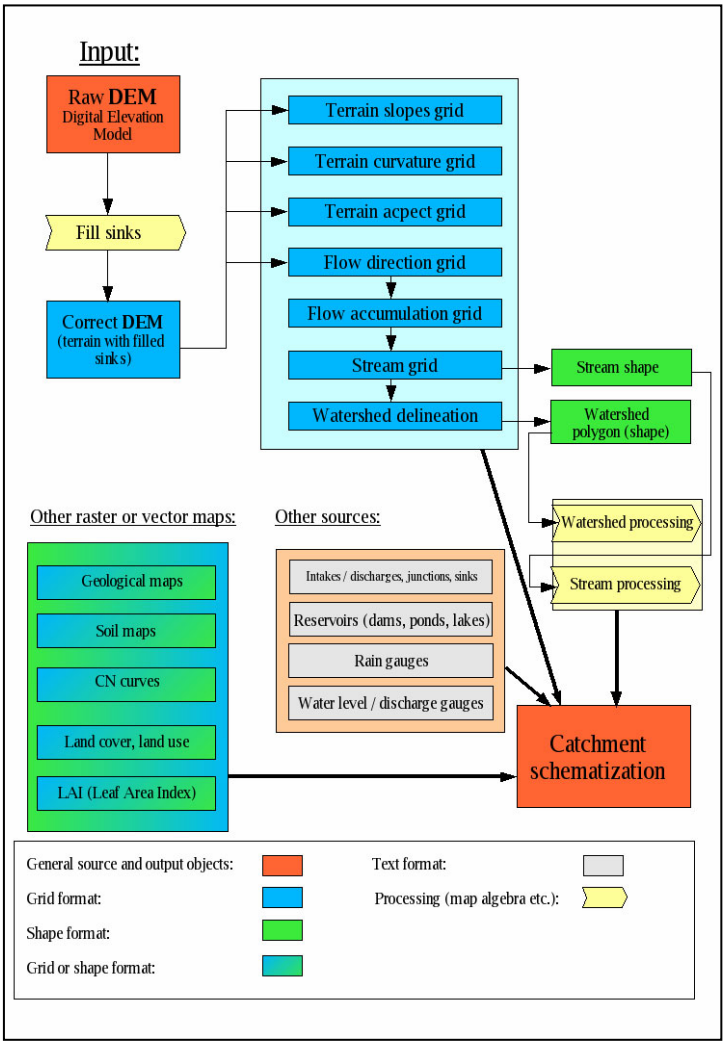
Oblast preprocesingu dat

Ad 2) Překryvné operace jsou založeny na překryvu vrstev či jednotlivých geoprvků (v objektovém modelu), geometrickém vyřešení úlohy (např. rozklad polygonů) a následné logické či aritmetické operace s atributy.
Tyto operace se uplatňují např. při stanovování infiltračního deficitu, popis faktorů a jejich adjustace v oblasti pedologie, vegetačního pokryvu a dalších. Může být provedena klasifikace infiltračních zón na základě charakteristik typů pokryvu zpracováním katastrálních map a letecké ortofotomapy, dat bonitovaných půdně-ekologických jednotek (BPEJ), geomorfologické analýzy z digitálního modelu terénu a z analýzy horninového složení pásma aerace včetně stanovení hydropedologických charakteristik.

Ad 3) Analýzy okolí oceňují charakteristiky oblasti kolem určeného místa (ohniska) a jsou zvláště cenné pro ohodnocení charakteru lokální oblasti. Vedle stanovení ohniska operace (u rastrového modelu se jím stává postupně každá buňka) je nutné specifikovat okolí kolem každého ohniska (4-sousedství, 8-sousedství, okolí definované vzdáleností a/nebo směrem od ohniska a okolí vymezené polygonem na jiné vrstvě tzv. zónou) a stanovit funkci, která se provádí na elementech ve vymezeném okolí.
Pro hydrologické aplikace mají zcela zásadní význam operace nad DMT jako je určování sklonu, orientace, drenáže, insolace apod.). Velký potenciál nabízí systém GRASS GIS, který poskytuje i sofistikovanější operace nad DMT, jako je výpočet LS faktoru (*length and slope* = délka a sklon) pro revidovanou univerzální rovnici ztráty půdy (RUSLE) a tvorby rastru topografického indexu (*topidx* $=A/\tan\beta$, A – přispívající plocha, β – tangens rovinné vzdálenosti a převýšení) pro simulaci v prostředí TOPMODEL (Beven, 2001). (viz obr.4).

GIS se výrazně uplatňuje jako interpolační a kalibrační nástroj. To je důležité pro tvorbu rastrové vrstvy s odhady množství srážek (především na základě interpolace hodnot ze srážkoměrné sítě).

Základní výbava interpolačních nástrojů v řadě případů nestačí. Pokud není k dispozici geostatistický modul ArcGISu, je vhodné využít napojení na některé externí systémy jako je WinSurfer nebo GSTAT, případně potřebné procesy naprogramovat.



Obr. 1 Obecný postup schematizace povodí

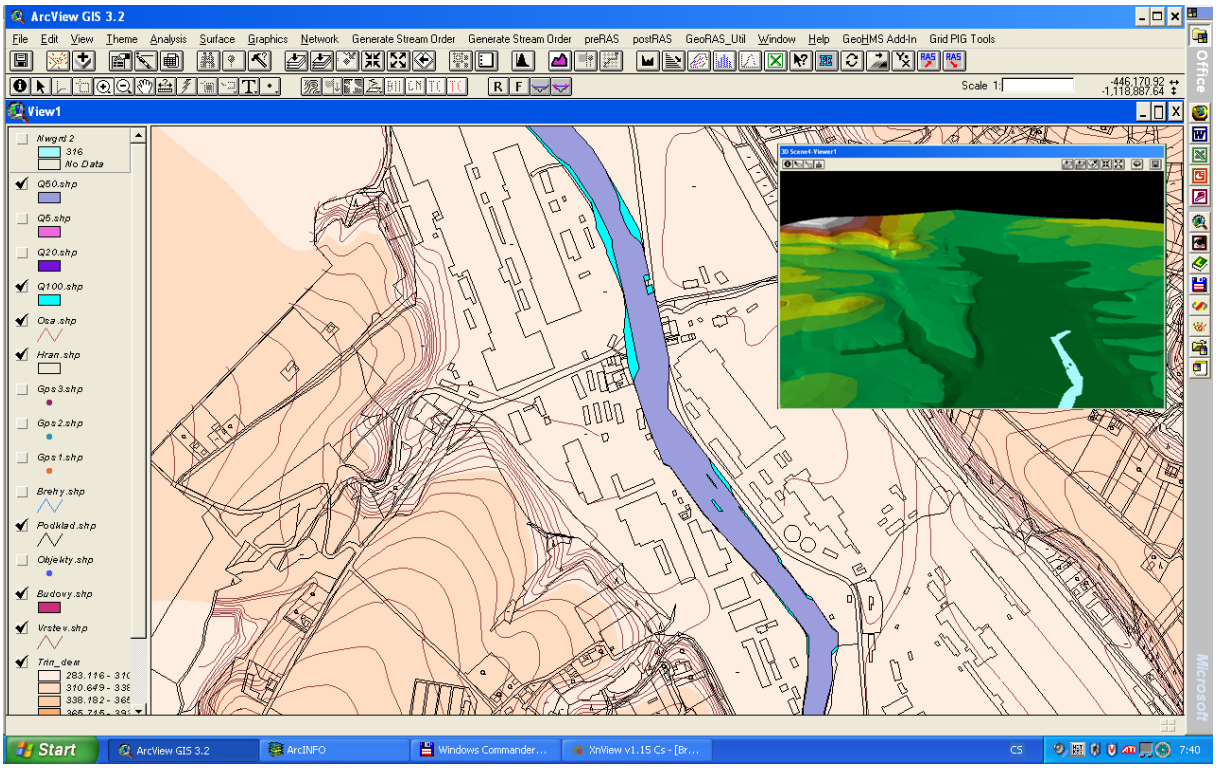
Ad 4) Analýzy spojitosti využívají k dosažení výsledku akumulace hodnot v procházené oblasti, kde se získávají průběžné výsledky krok za krokem. Typický způsob práce předpokládá nejdříve ocenění atributu a pak modelování, kde každý krok představuje pohyb v prostoru - např. segment 100 m podél toku. Průběžný výsledek může být kvantitativní (např. kumulativní vzdálenost, čas) nebo kvalitativní (jsou či nejsou body viditelné ?).
Řadíme zde mimo jiné síťové funkce a funkce šíření. Právě ty bývají základem automatizované schematizace povodí. Je možné např. generovat speciální mapy akumulace a dráhy odtoku.

Obecný postup schematizace je uveden na obr.1. Cílem je vytvoření schematizovaného povodí s hydrografickou sítí, hlavními rozvodnicemi, rozvodnicemi dílčích subpovodí a závěrovým profilem.

Oblast postprocesingu dat

Zde můžeme zařadit výstupní formátování, tedy obecněji řečeno různé formy vizualizace dat.
Výstupy v GIS mohou být velmi názorně prezentovány, což významně usnadňuje jejich interpretaci. Např. po vygenerování průběhu odtoku hydrologickým modelem skýtá GIS možnost vizualizace záplavových či jinak ohrožených zón (Maidment, D. et Djokic, D. (2000)) (obr.2). Opět se nabízí široká paleta software včetně free (HEC-GeoRAS) a open source software (GRASS/NVIZ). Limitujícím faktorem je v každém případě rozlišení gridu, pro vizualizaci záplavových zón je vhodné zjemnit informaci o příčných profilech a inundacích (psaný podélný profil, geodetické či GPS měření).

Extenze HEC-GeoRAS vyžaduje ArcView 3.2 a 3D Analyst. Samotná vizualizace a postprocesing je shrnut do volby menu PostRAS. V prostředí GRASS slouží jako vizualizační nástroj 2.5D a 3D modul NVIZ (viz. např. obrázek č. 5). Představuje vyzrálé prostředí, které je plně konkurenceschopné např. modulu ESRI ArcScene. Je zde možnost vizuální transformace (rotace, změna převýšení, centra a elevace pohledu, náklon, změna azimutu a deklinace osvětlení území ad.). Na 3D modely je možno nakládat vektory a stanovovat jejich relativní převýšení vůči samotnému DMT.

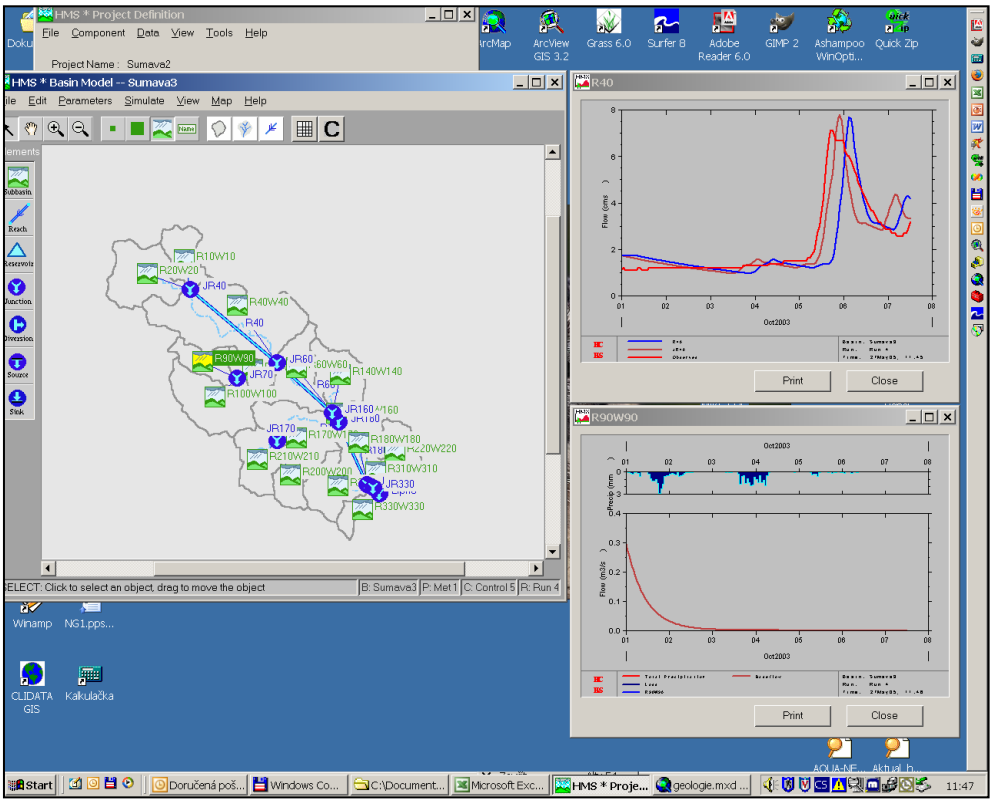


Obr. 2 Vizualizace záplavových zón v prostředí ArcView 3D Analyst/HEC-GeoRAS

Srovnání postupu a výstupů S-O modelování ze 2 různých systémů

V rámci testování jednotlivých možností byla v rámci projektu TRANSCAT provedena schematizace povodí v rámci rozdílných GIS platforem, konkrétně ArcView (s některými operacemi v ArcGIS) + HEC-HMS a GRASS GIS. V prvním případě se používá i HEC-GeoHMS, nadstavba ArcView, která slouží pro preprocesing dat. Jiný modul, HEC-DSSVue, je možno využít coby operativní databáze hydrometeorologických dat.
Byl připraveny prototyp srážko-odtokových (dále jen S-O) modelů pro povodí Bělé (číslo hydrol. pořadí 2-04-04, III. řád, pravostranné přítoky Kladské Nisy v Jeseníku) v prostředí HEC-HMS a GRASS GIS, pro povodí horní Vltavy po ústí do nádrže Lipno (1-06-01) pouze v prostředí ESRI a HEC-HMS (obr. 3).

Obě povodí byla v rámci tvorby modelu kalibrována pro málo vodné až středně vodné epizody (do Q_2) k zajištění jemnější odezvy na srážkový impuls na povodí (viz obr. 3). Druhým důvodem je pak znatelný nedostatek stanic s operativním přenosem v povodí Bělé, takže v případě např. konvektivních srážek může být kvalita předpovědi tímto faktorem citelně zatížena.



Obr. 3 Výstup z modelu povodí horní Vltavy (profil Lenora, červená čára – měřený Q)

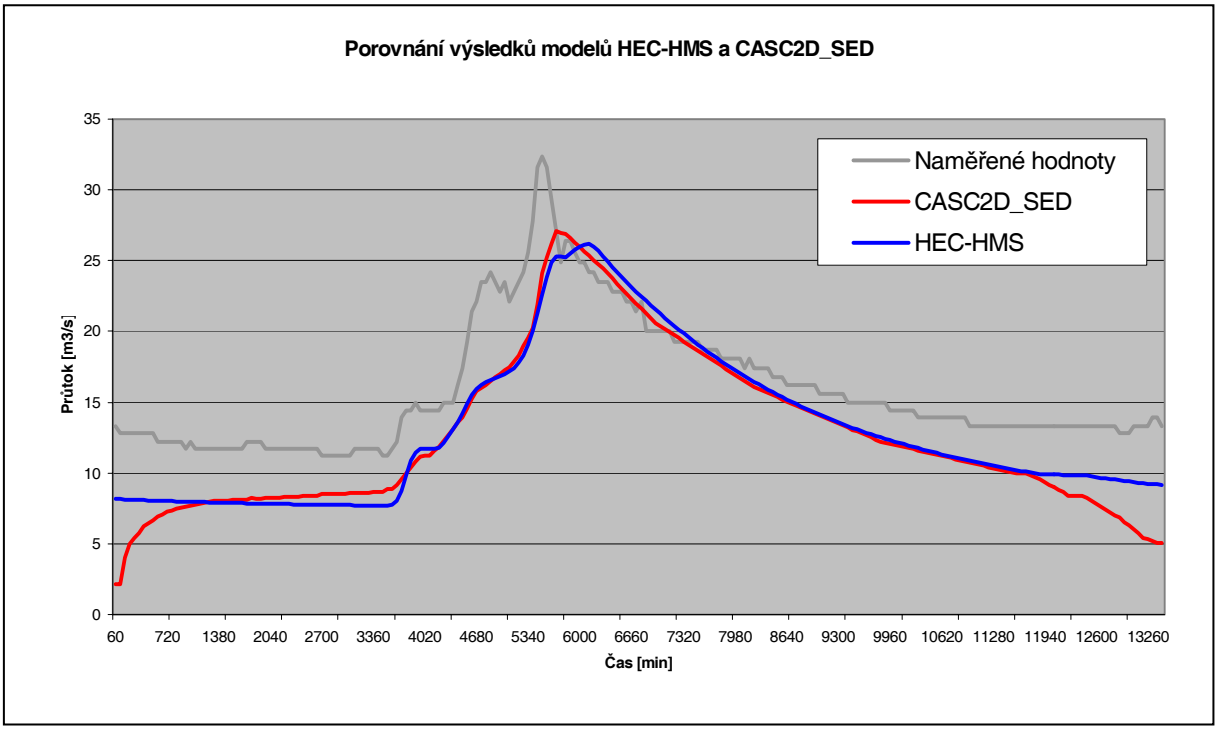
Lze říci, že základní postup a dílčí mapový výstup je v rámci obou systémů téměř shodný a lze jej shrnout do těchto kroků:

1. hydrologická verifikace DMT (odstranění mezer (*gaps*) a propadů (*sinks*))
2. analýza směru odtoku (*flow direction grid*)
3. analýza akumulace odtoku (*flow accumulation grid*)
4. analýza sítě akumulace odtoku (popř. export do vektoru hydrografické sítě)
5. tvorba subpovodí (*subbasins*), popř. polopovodí (*halfbasins*) pro orientovaný graf výpočetních algoritmů
6. tvorba samotného schématu povodí a případný export do S-O modelu, jen v případě HEC-GeoHMS zcela automatizovaně

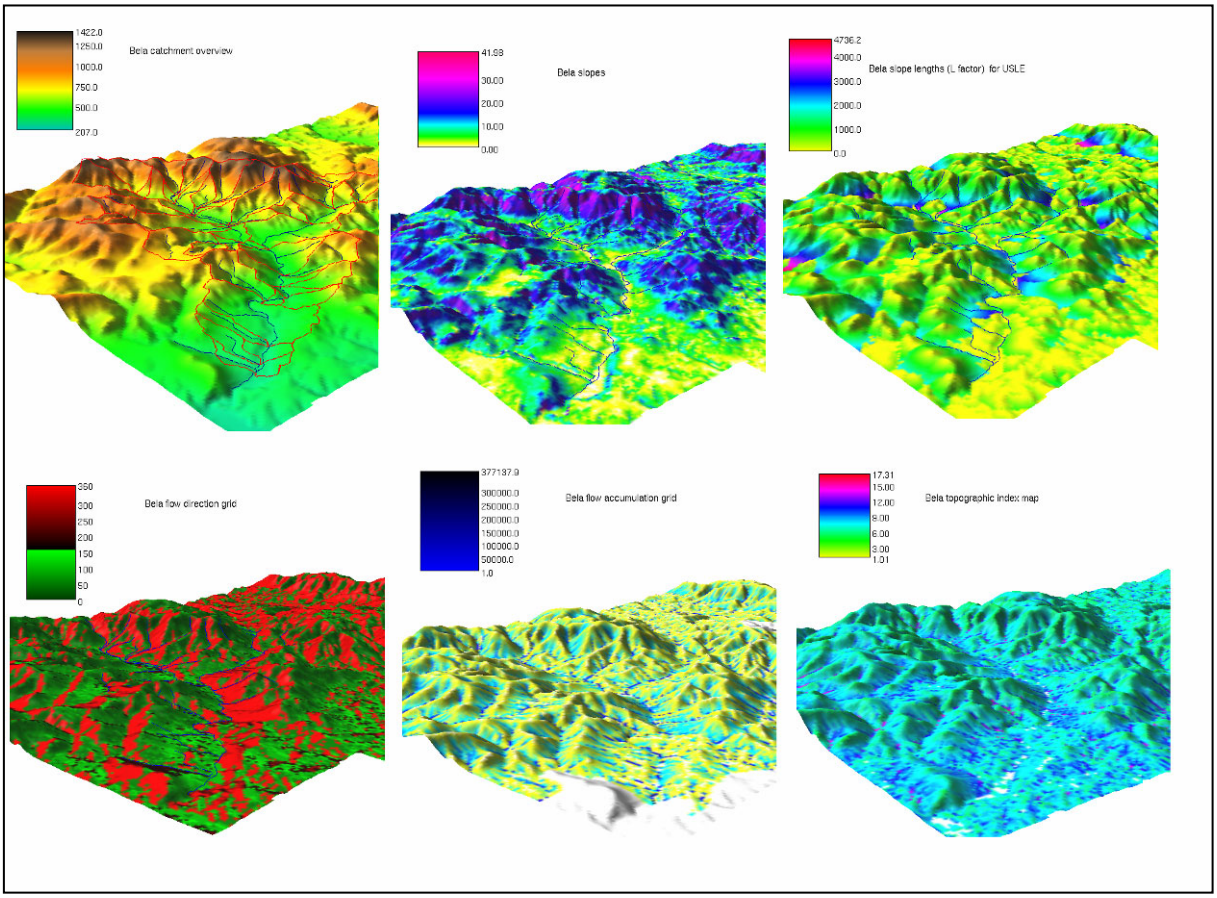
Některé výsledky jsou zobrazeny na obr. 5.

HEC-HMS používá metodu SCS (*Soil Conservation Service*, tzv. CN křivky), modifikovaný Clarkův jednotkový hydrogram semidistribuovaný pro jednotlivé geomorfologické jednotky či subpovodí, kinematickou vlnovou aproximaci pro 1D i 2D proudění v korytech a na plochách povodí a recesní metody (metody separace hydrogramu) pro základní odtok.

Pro spojitou simulaci přímého odtoku z povodí v 2D slouží v GRASS GIS modul r.hydro.CASC2D („kaskádový hydrologický model“). Srovnání výstupů tohoto modelu spolu s měřeným Q a výstupem z modelu HEC-HMS znázorňuje obrázek č. 4. Protože r.hydro.CASC2D neumožňuje zadat do okrajových podmínek počáteční ustálený Q, simulace zde startuje od průtoku nulového.



Obr č. 4 Srovnání výstupů z modelů CASC2D, HEC-HMS a měřených Q na profilu Mikulovice



Obr. 5 Postup schematizace povodí v GRASS GIS (pořadí zleva: 1. DMT, 2. sklony terénu, 3. délky svahů, 4. rastr směrů odtoku, 5. rastr akumulace odtoku, 6.rastr topografického indexu TOPMODEL)

Zhodnocení výsledků

Výsledky jsou uspokojivé a jak naznačuje obrázek č. 4, modely vykazují poměrně dobrou shodu s měřeným Q v rámci zvolené epizody, rovněž pak mezi sebou s přihlédnutím k určitým odlišnostem v použitých metodikách výpočtu.

Pro vylepšení kvality a operability předpovědí v současnosti náš tým řeší několik dílčích úkolů. Zde můžeme jmenovat např. tvorbu dalších mapových vrstev využitelných pro samotné výpočty (shapefile pro Green & Ampt a SMA metody a testování dalších možností jak samotného HEC-HMS, tak GRASS GIS.
U modelu povodí Bělé probíhá revize metodik infiltrace a transformace srážek. Metoda CN křivek jako typická „event metoda" je postupně nahrazována metodou Green & Ampt a výhledově (SMA – ***S**oil **M**oisture **A**ccounting*).

Na druhou stranu je v prostředí GRASS prováděna analýza potenciálu u dalších modulů, jako jsou ***r.watershed, r.water.fea, r.cn*** a další. Modul ***r.cn*** generuje CN křivky z rastrových souborů hydrologických skupin půd a land use pro SCS metodu. Modul zohledňuje i faktor AMC (***A**ntecedent **S**oil **M**oisture **C**onditions* = předchozí vláhové podmínky) pro generování správné modifikace CN křivky.

Pro tání sněhu a odtok ze sněhu byl vytvořen program v prostředí Visual Studio .NET, který používá metody stupeň/den a alternativně metodu Andersona, jelikož HEC-HMS do verze 2.2.2 metodiky výpočtů odtávání sněhové pokrývky nepodporuje.

Očekávaná nová verze HEC-HMS 3.0 má krom ostatních předpokládaných vylepšení disponovat modulem pro odtáváním sněhu, takže jeden z dalších kroků bude srovnávání výstupu z námi naprogramovaného modulu pro odtávání sněhu (degree/day, Anderson) a vnitřního modelu HEC-HMS (nejspíše degree/day).

Tab. 1 Srovnání možností GIS v pre- a postprocesingu

Druh operace s prostorovými daty	ArcView 3.2 [1]	ArcGIS 8.x, 9.x	GRASS[2] (název modulu)
fill sinks (hydrologická verifikace DMT)	●	●	● (r.fill.dir)
flow direction grid (rastr směru odtoku)	●	●	● (r.fill.dir. r.kineros)
flow accumulation grid (rastr akumulovaného odtoku)	●	●	● (r.fill.dir, r.flow, r.kineros, r.terraflow)
stream grid/stream lines (odtoková síť)	●	●	● (r.flow, r.kineros)
watershed grid/watershed polygons (generování subpovodí)	●	●	● (r.watershed, r.water.outlet)
infiltrace/počáteční ztráta na povodí	●	●	● (r.hydro.CASC2D, r.cn, r.water.fea)
parametry jednotkového hydrogramu (doba koncentrace ad.)	●	-	● (r.agnps. r.hydro.CASC2D)
topografický index (TOPMODEL)	-	-	●
interpolace bodových dat (srážky ad.)	●	●	● (r.surf.*, s.surf.rst)
vizualizace výsledků na digitální mapě (vektor/rast/TIN/3D)	●/●/●/● [3]	●/●/●/●	●/●/-/● (NVIZ)

[1] s rozšířením Spatial Analyst, HEC-GeoHMS

[2] verze 5.3, 5.4 a 6.0.1

[3] 3D Analyst a HEC-GeoRAS

Jak je patrné z tabulky č. 1, jak platforma ESRI, tak platforma GRASS nabízí prakticky kompletní možnosti schematizace povodí, preprocesingu a postprocesingu pro potřeby hydrologického

modelování. Odlišnosti jsou spíše v uživatelském rozhraní a v tom, zda je preprocesing poloautomatizovaný a jednotný (HEC-GeoHMS, HEC-GeoRAS), či je tato činnost prováděna v oddělených modulech (GRASS, software ESRI bez speciálních extenzí). Jelikož lze obě základní platformy skriptovat, tato činnost může být zautomatizována uživatelem.
Co se týče odchylek ve výpočtech, tyto jsou v případě gridů typu integer zanedbatelné a u gridů s plovoucí desetinnou čárkou hluboko pod úrovní chyb v ostatních vstupech (srážky) a rozlišovací schopností uživatele.

HYDROGEOLOGICKÉ MODELOVÁNÍ

Jedním z faktorů ovlivňujících hydrologické modelování je i komunikace s nasycenou zónou (Beven 2001, Buchtele 1990, Kantor et al. 2003, Kovář 1990), proto se ukazuje jako potřebné v místech, kde dochází k významné komunikaci, kombinovat hydrologické modely s hydrogeologickými.

Kombinace hydrologických a hydrogeologických modelů nemá smysl provádět systematicky v celém území. Zpravidla neexistuje plošný soulad hydrogeologické struktury s povodím, a to především u plošně rozsáhlých a geologicky pestrých území. Kromě toho model proudění podzemních vod je náročný na vstupní data, vyžaduje značnou geologickou prozkoumanost území, což je finančně náročné v geologicky složitých oblastech typu Českého masívu či Karpatské soustavy. Proto se provádí vývoj hydrogeologického modelu proudění podzemní vody a řešení interakce povrchových a podzemních vod pouze lokálně, zpravidla v kvartérních nivách řek.

Typickým příkladem takovéto aplikace je i budovaný hydrogeologický model v povodí Bělé. Zájmová oblast se nachází v oblasti Bělské pahorkatiny, která představuje typický denudační podhorský terén. Kvartérní sedimenty jsou proto soustředěny hlavně v údolním systému řeky Bělé od Jeseníku po Mikulovice.

S výjimkou kvartérních sedimentů z hydrogeologického hlediska převládá v oblasti puklinový oběh podzemních vod. V úzkém pásmu údolní nivy řeky Bělé mezi Jeseníkem a Mikulovicemi má rozhodující význam průlinová propustnost mělkého freatického oběhu podzemních vod. Průlinový oběh mělkých podzemních vod existuje dále v kvartérním pokryvu od Jeseníku až po Mikulovice.
Údolí Bělé je mezi Jeseníkem a Písečnou poměrně měkce modelované, založené snad v silně porušených horninách na širším zlomovém pásmu a lemované velkými akumulacemi svahovin. Mezi Písečnou a Širokým Brodem je údolí výrazně zakleslé, o 40 až 60 m pod úroveň okolních terasových plošin a svahů, zaříznuté do skalního podkladu, budovaného rulami a ortorulami, dále metasedimenty a metavulkanity devonské vrbenské skupiny a variskými granitoidy. Od Širokého Brodu se údolí znovu rozevírá a má dobře vyvinutý terasový systém (obr. 6).

Hydrogeologický model byl sestaven s primárním cílem zpřesnit základní odtok, drénovaný řekou Bělou, což jednoznačně zvyšuje spolehlivost srážkoodtokových modelů. Vybudovaný model může v budoucnu řešit i případné střety zájmů v oblasti ochrany podzemních vod mělkého freatického oběhu, které nejsou v zájmové oblasti využívány pro hromadné, ale spíše pro individuální zásobování obyvatel pitnou vodou.

Model je sestavován v prostředí GMS 5.0 numerickým modelem MODFLOW 2000 na bázi metody konečných rozdílů. Pre/postprocesor GMS velmi dobře komunikuje s ArcGIS, přičemž v řadě funkcí v přípravě modelových dat je GIS podstatně flexibilnější.

Sestavení koncepčního modelu, jakož i vymezení zájmové oblasti bylo provedeno v prostředí ArcGIS. Možnosti prostorové vizualizace v GIS s využitím digitálního modelu terénu a geologických a hydrogeologických map jsou při tvorbě koncepčních modelů nezastupitelným přínosem. Vymezení modelové oblasti je patrné z obr. 7. S výjimkou hydraulicky umělé severní hranice, na které předpokládáme odtok podzemních vod kvartérním kolektorem k severu, je modelová oblast vymezena rozsahem kvartérního pokryvu. Na hranici kvartérního pokryvu nepředpokládáme okrajovou podmínku II.typu – nulový přítok, nýbrž III.typu, neboť jistý přestup podzemních vod z krystalinika a

vod povrchového odtoku je v horském reliéfu pravděpodobný. Jeho hodnota bude kalibrovaným parametrem. Dále předpokládáme dotaci ze srážek, která bude odhadnuta na základě výpočtu modelem proudění v nenasycené zóně HELP v prostředí UNSAT Suite.

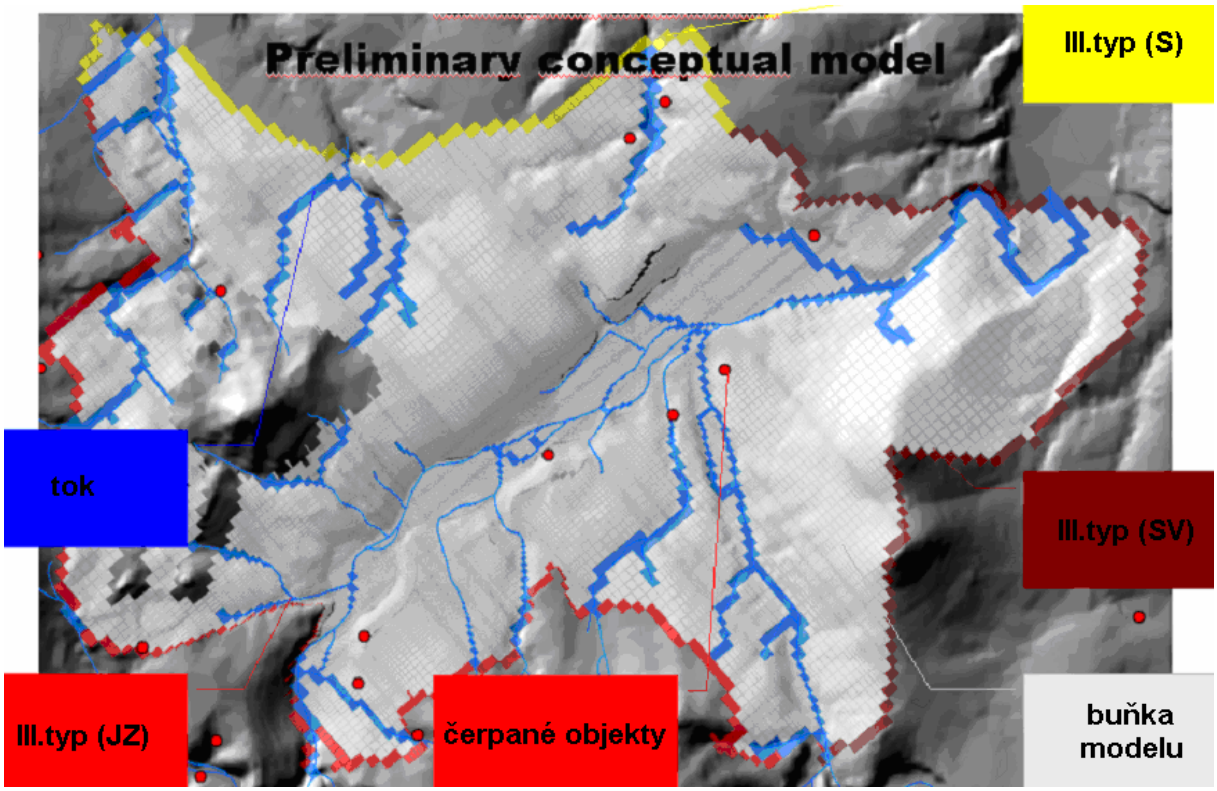
Koncepčně byla vymezena jedna hydrostratigrafická jednotka, tvořená kvartérními fluviálním, deluviálními a proluviálními sedimenty bez ohledu na jejich genezi, neboť tvoří spojitou zvodeň. Předpokládáme hydraulické odpory na přetoku mezi terasovými stupni, které byly vymezeny na základě digitálního modelu terénu a prověřovány terénní rekognoskací (obr. 6 a 7).

Interakce povrchových a podzemních vod bude v MODFLOW 2000 simulována pomocí tzv. funkce STREAM, která kombinuje III. typ okrajové podmínky – drenáž podzemní vody řekou s prouděním v korytě. Na vstupu do a výstupu z modelové oblasti je bilanční kontrolou průtok v povrchových tocích. Kalibrace modelu na hladiny podzemních vod a současně na průtoky v povrchových tocích významně zvyšuje spolehlivost modelových výsledků.

V současné době probíhají práce na stanovení kalibračních cílů tj. měření hladin podzemních vod na dostupných objektech a měření průtoků v tocích na zvolených profilech.
Výsledky kalibrovaného modelu budou integrovány v prostředí distribuovaného systému TRANSCAT DSS.



Obr. 6 Koryto řeky Bělé s vyvinutými terasovými stupni

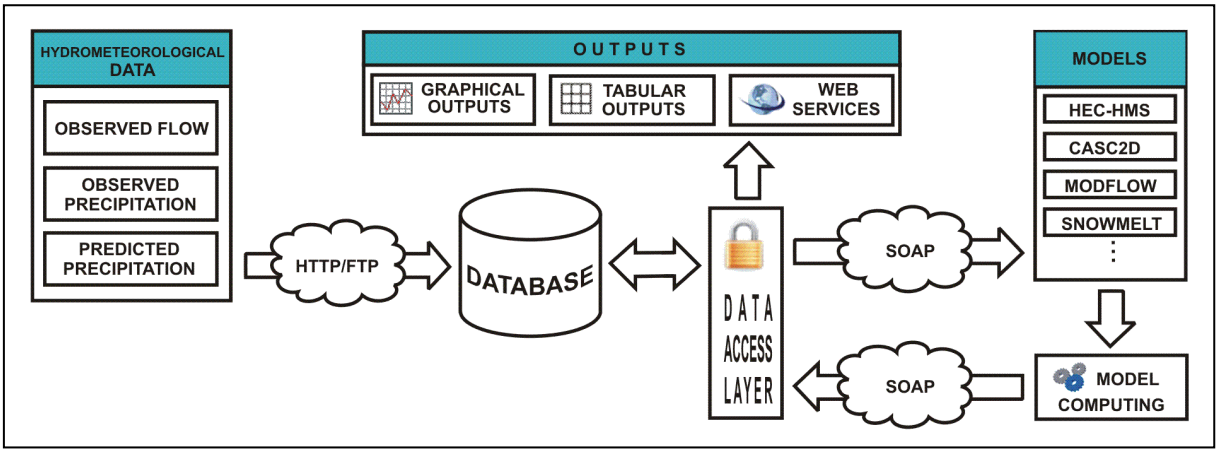


Obr. 7 Modelová oblast s vyznačením modelové sítě a okrajových podmínek

TECHNICKÉ ŘEŠENÍ PROPOJENÍ

Podpora rozhodování ve vodním hospodářství v systému TRANSCAT je založena především na informacích o předcházejících, aktuálních a nastávajících hydrometeorologických podmínkách v daném povodí, které jsou vhodným způsobem zpracovány a interpretovány koncovému uživateli. Jedním z hlavním výstupů systému je ***předpověď průtoků*** (resp. výšek hladin) na vybraných místech vodního toku, v závislosti na vstupních informacích dodávaných hydrologickému modelu – měřené průtoky, měřené srážky a předpovídané srážky.
Všechny tyto funkce a nástroje jsou k systému připojovány jako zásuvné moduly, což umožňuje snadné vytvoření a připojení libovolného dalšího modulu obsahující požadovanou funkcionalitu. Většina modulů ve stávajícím systému je koncipovaných jako webové služby a jsou použitelné i mimo systém samotný (např. získání předpovídaných srážek z GFS modelu, vytvoření hydrogramu ze zaslaných hodnot a podobně).

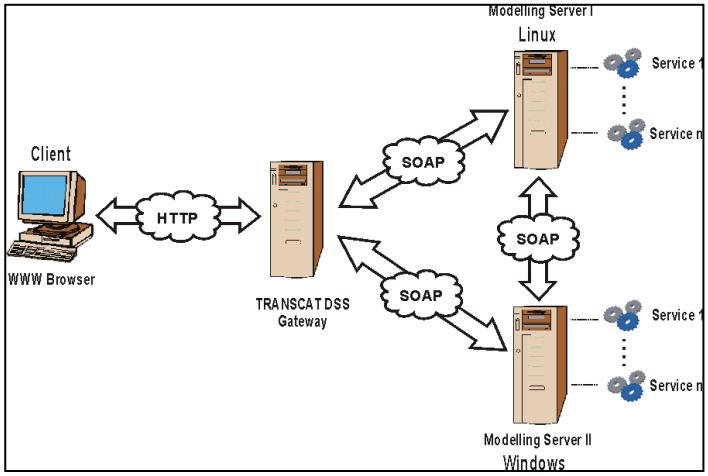
Nejpodstatnější operativní části systému je modelovací subsystém, který zajišťuje kontinuální výpočty a vzájemnou spolupráci modelů uvedených v předchozích pasážích textu.



Obr. 8 Procesy při hydrologickém a hydrogeologickém modelování

Jak ukazuje obr. 8, data potřebná pro jednotlivé modely jsou nejprve od jednotlivých poskytovatelů těchto dat přes síť Internet importována do společné databáze. V této databázi jsou mimo jiné uchovávány i informace o datech samotných (metadata), na základě nichž jsou exportována vybraná data pro jednotlivé modely. Tato data jsou zapisována do vstupních datových souborů jednotlivých modelů, které pak jsou v závislosti na intervalu aktualizace vstupních dat automaticky přepočítávány a výsledky modelů zapisovány zpět do databáze. Data v databázi jsou pro všechny modely sdílené a jeden model tak může jako vstup použít výstup z modelu jiného. Dohromady pak tento subsystém tvoří díky rozhraní (interface), postaveným nad jednotlivými modelovacími nástroji, integrovaný model zahrnující všechny potřebné hydrologické, hydrogeologické a jiné modely. Rozhraní tohoto subsystému jednak obsluhuje jednotlivé modely (zajišťuje automatickou nebo uživatelem definovanou změnu parametrů, umožňuje jejich automatizované spouštění), tak i zajišťuje vzájemnou komunikaci a kooperaci mezi nimi.

Důležitou součásti subsystému je služba „***Data Access Layer***“, která umožňuje zjednodušený autorizovaný přístup k databázi prostřednictvím protokolu SOAP (webová služba). Jak ukazuje obr. 9, systém TRANSCAT je systém distribuovaný – to znamená, že jednotlivé modelovací nástroje nemusejí být nutně součástí jediného výpočetního stroje, ale mohou se nacházet na různých počítačových serverech v celé síti Internet. Tato služba pak zajišťuje sdílení databáze pro všechny součásti tohoto subsystému.



Obr. 9 Schéma architektury distribuovaného servisně orientovaného systému hydrologického a hydrogeologického modelování v rámci projektu TRANSCAT

Díky modularitě celého systému a servisně orientované architektuře je možné systém propojit s jinými systémy či nástroji pro podporu rozhodování, jako je Mulino DSS (mDSS), Mediator, Prodec a jiné, a vyžádat si potřebná data pro multikriteriální nástroje.

ZÁVĚR

Dosavadní práce prokázaly vysokou operabilitu GIS coby nástroje ke kompletní schematizaci a preprocesingu povodí. V případě absence určitých specielních vrstev (CN křivky apod.) GIS opět disponuje nástroji pro generování těchto geodat. Pokud externí modelovací software je schopen komunikace s GIS softwarem (např. import ASCII rastrů), efektivita stavby semidistribuovaného či distribuovaného S-O modelu je pak řádově vyšší. GIS též se nabízí možnosti využít tzv. scénářů odtokové situace, např. generováním různých gridů infiltračního deficitu, drsnosti povrchu či hydraulické vodivosti.

Pokud máme hodnotit i „akceschopnost" softwarové kombinace v rutinním provozu, zde se z důvodu jednoduchosti použití nabízí kombinace ESRI/HEC-HMS. Tato kombinace je nejlépe schopna automatizovaného provozu, byť HEC-HMS nedisponuje API rozhraním, což však lze řešit využitím dalších softwarových prostředků (Girder). GIS GRASS a jeho nástroje pro hydrologické modelování představují velmi výkonný balík, navíc s možnosti automatizace pomocí skriptování nebo zásahem do programového kódu (open source). Protože však všechny výpočty probíhají nad rastrovými vrstvami, je zde nezanedbatelný faktor výpočetní náročnosti. I přes pokročilé úpravy uživatelského rozhraní od verze 5.7 a 6.0.1 GRASS zatím stále představuje spíše vědecký analytický nástroj než jednoduchý program pro operativní spouštění hydrologických předpovědí. Zde spatřujeme též potenciál námi předkládaného klientského rozhraní, kdy jsou nastavení a volby programových prostředků skryty pod zjednodušeným webovým formulářem.

V oblasti napojení hydrologických a hydrogeologických modulů můžeme rámcově konstatovat, že modulární systém celého řešení představuje reálný potenciál pro určitou komunikaci těchto modelů. Z uvažovaných výhod takového propojení lze uvážit např. verifikaci kalibračních parametrů pro základní odtok či proudění v nasycené zóně, lepší nastavení počátečního podzemního Q v rámci semidistribuovaného S-O modelu apod. Dále můžeme jmenovat testování metodik základního odtoku a infiltrace na povodí, testování okrajových podmínek apod. Rovněž vzájemné porovnání výstupů z modulu HELP/UNSAT a zvolených metod infiltrace (CN, Green & Ampt, SMA) může výhledově zlepšit řešení schematizace nenasycené zóny a vybrat pro tuto zónu metodiku nejvhodnější.

V neposlední řadě lze s potěšením říci, že free a open source software představuje zajímavou alternativu standardních a zavedených komerčních řešení a určitě si zasluhuje naši bližší pozornost.

Literatura

Anderson, E.A.: Development and testing of snowpack energy balance equations. Water Resources Research 3, 1968.

Bedient, Philip B., Huber, Wayne C. (2002): Hydrology and floodplain analysis. 3rd edition. Prentice Hall, 2002.

Beven, K. J. (2001): Rainfall-runoff modelling. The Primer. John Wiley & Sons Chichester, 2001.

Buchtele, J. (1990): Vliv předpokládaných klimatických změn na vodní zdroje. Vodohospodářský časopis č.4, Praha 1990.

Burrough P.A., McDonnell Rachael A.: Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, 1998. 333 stran. ISBN 0-19-823366-3.

Doležal F., Kodešová R., Kulhavý Z., Soukup M. - Studium hydrologické funkce systémů odvodnění zemědělských půd pomocí simulačního modelování. Hydrologické dny Plzeň. IX.2000

Chow, V.T.: Handbook of applied hydrology. McGraw-Hill New York, 1964.
Hrádek F.et Kuřík P.: Hydrologie. Skripta ČZU Praha, 2002.
Kantor P. et al. (2003): Lesy a povodně. Souhrnná studie. MŽP Praha, 2003.
Kovář, P. (1990): Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích. VŠZ Praha, 1990.
Kulhavý Z., Kovář P. – Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí. Metodická pomůcka - Uživatelský výstup projektu NAZV - EP 7062: Hodnocení vlivu zemědělského hospodaření na odtokové poměry malých povodí aplikací metod matematického modelování. VÚMOP Praha, II.2000, ISSN 1211-3972
Maidment, D. et Djokic, D. (2000): Hydrologic and hydraulic modelling support with Geographic Information Systems. ESRI Press Redlands, 2000.
Neruda M., Neruda R.: Porovnání kvantitativních a kvalitativních vlastností vody pomocí metody neuronových sítí, Konference Extrémní hydrologické jevy v povodích, 12. 11. 2002, Česká vědeckotechnická vodohospodářská společnost, Praha.
Přenosilová, E.: Důsledky klimatických změn na hospodaření s vodou v nádržích. NKP č.16. ČHMÚ Praha, 1994.
Rapantová, N., Grmela, A ., Vojtek D., Tylčer, J..:Assessment of natural and artificial recharge in the urban and industrial areas. XXXIII. Congress IAH. Mexico, 2004. ISBN: 970-32-1749-4.
Voženílek, V.: Time and Space in Network Data Structures for Hydrological Modelling. In Craglia M., Onsrud H.: Geographic Information Research - Trans-Atlantic Perspectives. Olomouc: Univerzita Palackého Olomouc, 1999, s. 189-202.
http://www.geomin/unibo.it/orgv/hydro/music/index2.htm
http://www.transcat-project.net/

Rapant, P. (2002): Úvod do geografických informačních systémů. Skripta PGS. Program celoživotního vzdělávání "Geoinformatika a geoinformační technologie". VŠB – TU Ostrava, 2002. 110 str. http://gis.vsb.cz/Publikace/Skripta_sylaby/U_GIS/UGIS.pdf
Horák, J. (1996): Zpracování dat v GIS II, skripta pro PGS, VŠB Ostrava 1996

AUTOŘI

Jan Unucka, ČHMU, pobočka Ostrava, K Myslivně 3, 70800 Ostrava-Poruba, unucka.j@chmi.cz

Jiří Horák, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Institut geoinformatiky, 17.listopadu 15, 70833 Ostrava-Poruba, jiri.horak@vsb.cz

Naďa Rapantová, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Institut geoinformatiky, 17.listopadu 15, 70833 Ostrava-Poruba, nada.rapantova@vsb.cz