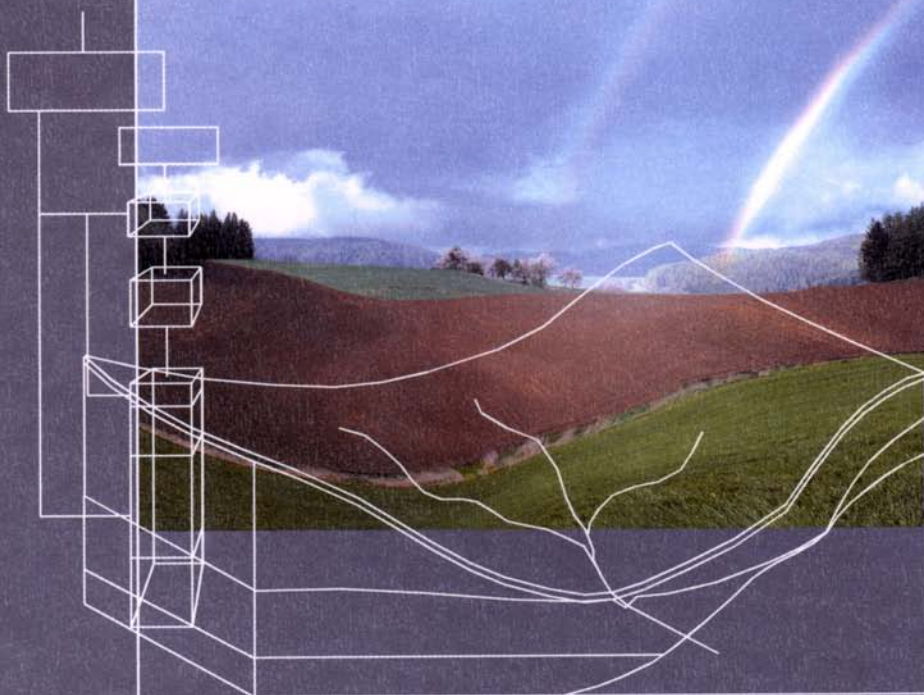




VÚMOP Praha

KULHAVÝ Z. – KOVÁŘ P.



VYUŽITÍ MODELŮ HYDROLOGICKÉ BILANCE PRO MALÁ POVODÍ

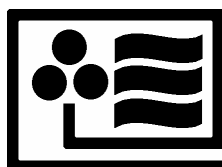
Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy Praha

Metodická pomůcka

Využití modelů hydrologické balance pro malá povodí

Kulhavý Zbyněk

Kovář Pavel



Praha 2000

Metodická příručka „Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí“ je uživatelským výstupem projektu NAZV ČR „Hodnocení vlivu zemědělského hospodaření na odtokové poměry malých povodí aplikací metod matematického modelování“ (evidenční číslo EP 7062). Publikování v edici VÚMOP je doporučeno Ministerstvem zemědělství ČR – odborem vodohospodářské politiky dopisem ze dne 12.5.2000 č.j. 573/2000-6020.

Je určena projekčním složkám, orgánům státní správy a realizační sféře, pracujícím s hydrologickými podklady ve fázi návrhu a schvalování vodohospodářských staveb, při posuzování vlivu změn organizace hospodářského provozu v ploše malých zemědělsko-lesních povodí i při ochraně vodní komponenty v krajině.

Autoři: Ing. Zbyněk Kulhavý, CSc. ^{/1}; Prof.Ing. Pavel Kovář, DrSc. ^{/2}

^{/1} Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy Praha, Žabovřeská 250, 156 27 PRAHA 5 – Zbraslav, tel. 02-57921640, fax. 02-57921947, E-mail: sekretariat@vumop.tel.cz, <http://web.vumop.tel.cz> pracoviště Pardubice, B.Němcové 231, 530 02 PARDUBICE, tel.,fax: 040-6310265, E-mail.: vumop.kulhavy@telecom.cz, http://web.telecom.cz/vumop_pce

^{/2} Česká zemědělská universita Praha - lesnická fakulta, Katedra biotechnických úprav, Kamýcká 129, 165 21 PRAHA 6 – Suchdol, tel.: 02-24382148 (2121), E-mail: kovar@lf.czu.cz, <http://www.lf.czu.cz>

Textová a přílohová část byla oponentně projednána při zasedání sekce meliorací Vědecké rady VÚMOP Praha dne 23.února 2000 s písemným vyjádřením oponentů Doc.Ing.Josefa Buchtele,CSc. (Ústav pro hydrodynamiku AV ČR Praha) a Ing.Josefa Hladného,CSc. (ČHMÚ Praha).

© Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy Praha
Ředitel ústavu: Doc.Ing. Miloslav Janeček, DrSc.

ISSN 1211-3972

OBSAH

1.	ÚVOD	2
2.	Vymezení pojmů, terminologie	4
3.	Obecné principy deterministických modelů	9
3.1	<i>Bilanční modely v podmínkách malých zemědělských povodí</i>	<i>14</i>
3.2	<i>Příklad struktury koncepčních modelů</i>	<i>17</i>
3.2.1	<i>Model SMAR</i>	<i>17</i>
3.2.2	<i>Model WBCM</i>	<i>22</i>
3.3	<i>Související metody (užité koncepčními modely)</i>	<i>27</i>
4.	Zásady práce v prostředí hydrologických modelů	35
4.1	<i>Podmínky implementace modelů</i>	<i>35</i>
4.2	<i>Zpracování a struktura vstupních dat</i>	<i>39</i>
4.3	<i>Kritéria pro stanovení počátečních a okrajových podmínek řešení</i>	<i>46</i>
4.4	<i>Metody verifikace výsledků</i>	<i>48</i>
4.5	<i>Typy výstupů modelových řešení</i>	<i>50</i>
5.	Uplatnění témat metodiky ve vodohospodářské a zemědělské praxi	53
6.	Závěrečná doporučení	54
7.	Literatura	56
8.	PŘÍLOHOVÁ ČÁST	60
A.	Studie vlivu vodohospodářsky významných opatření na bilanci vod povodí Kateřinského potoka	61
B.	Retenční schopnost povodí, vyjádřená čarou trvání retenčních objemů vod (Studie Dolského potoka s využitím generované 100-leté datové řady)	67
C.	Hodnocení prostorové a časové variability podmínek odtoku z malých zemědělsko-lesních povodí	74
D.	Popis bilančních složek odtoku a distribuce půdní vlhkosti	82
E.	Využití bilančního modelu pro identifikace extrémních hydrologických situací	85
F.	Vybrané související termíny z oborů vodního hospodářství, hydrologie, hydroopedologie a GIS	91
G.	Požadavky modelů WBCM-5 a SMAR na vstupní data	94

Předmluva

Problematika hydrologického modelování matematickými modely, propojenými s databázemi příbuzných oborů je v současnosti živým, zcela otevřeným tématem. Cílem publikace je přispět k interdisciplinárnímu přístupu při tvorbě informačních systémů ve vodním hospodářství, zemědělství, lesnictví a ekologii rozpracováním témat využití koncepčních hydrologických modelů.

Autoři publikace děkují oponentům publikace Doc.Ing.Josefu Buchtele,CSc. a Ing.Josefu Hladnému,CSc. za cenné připomínky k textu, paní Romaně Málkové a Ing.Luláši Hájkovi za zpracování grafických příloh, Ing.Milanu Čmelíkovi a RNDr.Josefu Eichlerovi,CSc. za zpracování podkladů řešených případových studií a Ing.Květě Královcové za redakční úpravu publikace.

V dubnu 2000

autoři

1 ÚVOD

Intenzita využívání krajiny v našich zeměpisných polohách je na jedné straně limitována přírodními a hospodářskými podmínkami oblasti (regionu), na druhé straně je zřejmá tendence tento stav přizpůsobovat svým potřebám realizací systémů technických a organizačních opatření. Dynamika rozvoje a využívání krajiny, posuzovaná měřítky posledního desetiletí, významně ovlivnila celou oblast souvisejících procesů přírodních, hospodářsko-ekonomických, ale i sociálních, apod. Tyto procesy pak přímo či nepřímo mění i podmínky vytváření odtoku z povodí. Příčinou jsou úpravy vlastnických vztahů, restrukturalizace venkova současně s formováním tržních vztahů v zemědělství, ale i realizace programů udržitelného využívání krajiny a její ochrany. Cílovým stavem je dosažení příznivější relace mezi produkční a ochrannou funkcí krajiny, odpovídající stupni jejího využití a různorodosti významu, jaký v životním prostředí člověka zaujímá.

Změny organizace půdního fondu a využívání krajiny tedy ovlivňují poměry hydrologické i vodohospodářské v rámci dílčích povodí. Zejména u určitých typů malých povodí mohou mít tyto zásahy významný vliv na srážko-odtokový proces, přitom zřetelný projev lze sledovat v relativně krátkém časovém měřítku tak, jak jsou různé zásahy v povodí realizovány. V této souvislosti je možné na jedné straně poukazovat na v minulosti neúnosné zatěžování krajiny intenzivní zemědělskou výrobou, vyznačující se extrémně velkými plochami obhospodařovaných pozemků – zemědělských honů, na druhé straně lze pozitivně hodnotit vliv trvalých travních porostů, nebo zvyšování podílu lesních ploch. V rámci programů Evropské unie se koncipují rámcové plány (např. Agenda 2000), podporované cílenou dotační politikou státu, korigující nejen vlastní produkci komodit, ale současně zlepšující podmínky venkovského prostoru jak z hlediska přírodního prostředí, tak i jeho infrastruktury. Souhrnně pak realizace takových programů přispívá k podpoře přirozených akumulacích a retenčních schopností povodí s cílem zvýšení stability oblasti a prevence ochrany před extrémními hydrologickými jevy – jakými jsou dlouhodobá sucha či časté povodňové stavy.

K posouzení vlivu, jaký navrhovaná, nebo již realizovaná opatření na hydrologické procesy v povodí mají, jsou ve světě i u nás používány matematické modely, přizpůsobené svými principy, strukturou a posláním pro různé účely použití. Metody matematického modelování umožňují simulovat nejen skutečný hydrologický proces, ale s jejich pomocí lze aproximativně předpovídat chování povodí v různých extrémních situacích. Pro dlouhodobé analýzy hydrologického režimu je určující řešení hydrologické bilance povodí, včetně popisu jejich základních složek. Krátkodobé analýzy naproti tomu jsou schopny pro významné srážko-odtokové epizody analyzovat zejména složku přímého odtoku a výsledky využít v předpovědích, nebo při korekci návrhu připravovaných vodohospodářsky významných opatření či zásahů v povodí (zpravidla vždy s akcentem jejich ochranné funkce). Spolehlivost užitých metod je úměrná věrnosti matematického popisu fyzikálního procesu a rozsahu i spolehlivosti použitého datového souboru.

Specifická je v tomto ohledu kategorie malých povodí. Přístup k řešení je vymezen dvěma polohami. Na jedné straně detailními prostorovými modely (např. fyzikálními), vhodnými k popisu odtokového procesu v elementárních odtokových plochách a na velmi malých povodích, na druhé straně prostorově generalizovanými přístupy (např. aplikací koncepčních modelů), vhodnými pro povodí velkých rozloh. Velký počet povodí drobných vodních toků znesnadňuje systematický monitoring hydrologických charakteristik v celostátním měřítku. Současně se však jedná o kategorii povodí s nejrozmanitějšími přírodními a hospodářskými podmínkami, ovlivňujícími ve svém dopadu i rozmanitost vodních režimů. Přírodních hydrologických pozorování bývá nedostatek; k dispozici je však již

celá řada územních podkladů (databáze, koncipované v rámci GIS – Geografických Informačních Systémů) a doplňujících informací o provozu v povodí, z nichž lze odvodit vztahy, platné pro místní posouzení odtokového režimu.

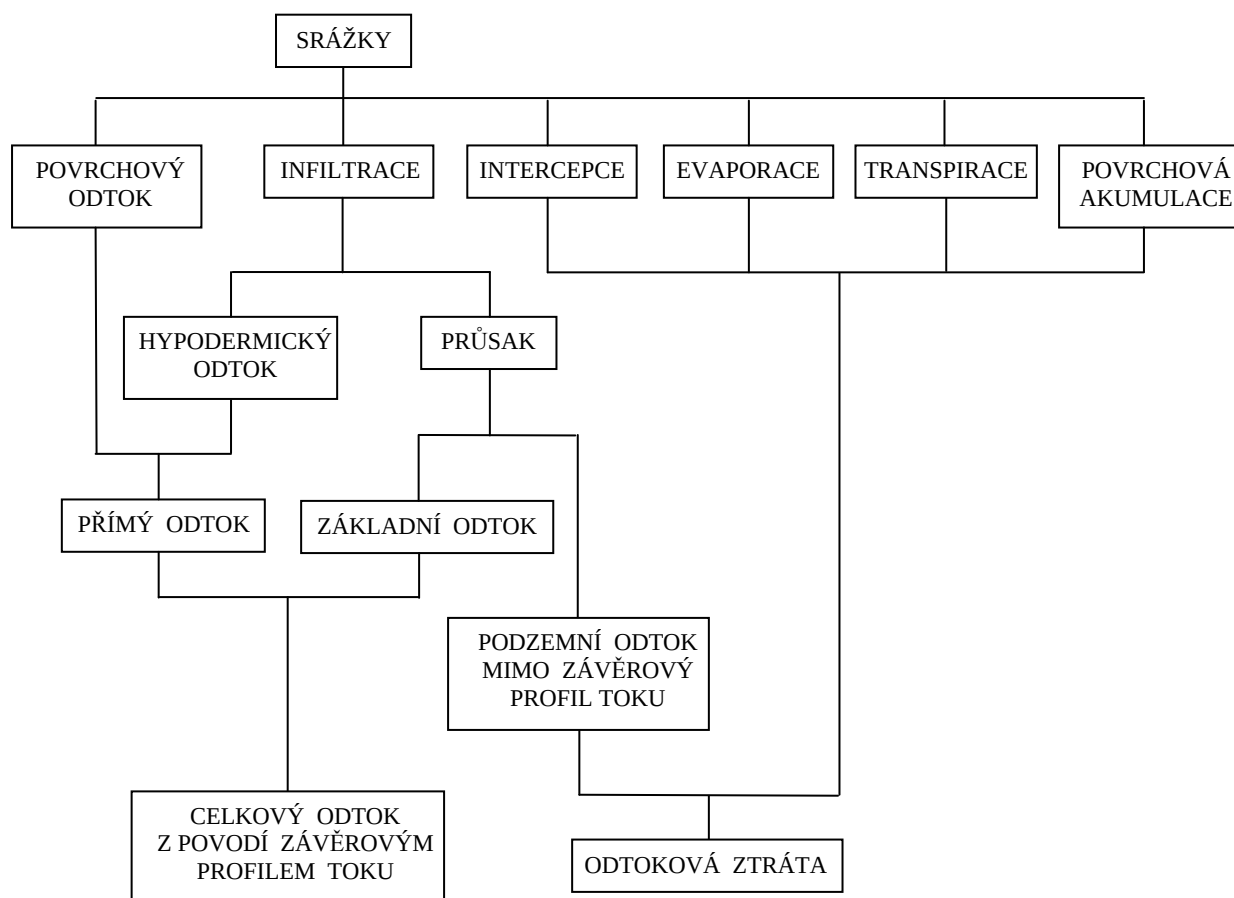
V rámci řešení projektu NAZV „Hodnocení vlivu zemědělského hospodaření na odtokové poměry malých povodí aplikací metod matematického modelování“ byly uplatněny pracovní postupy, orientované k popisu hodnocení v dlouhodobém měřítku a s dlouhodobým dopadem na hydrologickou bilanci malých povodí uvedeného typu. Přestože jsou v předložené metodice komentovány podrobněji jen dva modely z celé škály existujících typů, bylo záměrem na těchto ‘zástupcích’ demonstrovat postup využití a adaptace matematických modelů v konkrétních regionálních podmínkách současně s poukázáním na formy uplatnění jejich výstupů v zemědělském a lesnickém managementu.

V předkládané metodice je akcentováno využití modelů bilančních, které podle zvolených scénářů mohou hodnotit stupeň ovlivnění hydrologické bilance změnami kultur způsobem hospodaření a jinými důsledky antropogenní činnosti, ať již příznivými, nebo nepříznivými. Zvýrazněno je propojení hydrologických modelů s územními databázemi (uplatněním nástrojů GIS), orientované na popis struktury pěstovaných zemědělských plodin, střídaných v osevních postupech a realizaci agrotechnických operací - to vše s dopadem na sezónní vývoj hydrologických charakteristik malých povodí uvedeného typu.

Předložená metodická pomůcka je určena pro pracovníky projekční a provozní praxe jako jeden z nástrojů realizace současných cílů udržitelné vodohospodářské politiky. Využitím v příručce uvedených principů modelování, lze optimalizovat efektivnost návrhu i provozu jednotlivých vodohospodářských, lesnických či zemědělských opatření a posoudit jejich hydrologický, environmentální i hospodářský aspekt v dané krajině. Bilanční modely nacházejí uplatnění i jako nástroj zpřesnění počátečních a okrajových podmínek následných aplikací epizodních modelů a mohou tak nahradit některé dosud používané, zpravidla však méně přesné - empirické postupy. Konečně, v metodice je zdůrazněna specifičnost malých zemědělsko-lesních povodí a těmto specifickým podmínkám jsou přizpůsobeny pracovní postupy, obecně využívané v aplikacích bilančních modelů. Při respektování těchto odlišností může uvedený typ modelů přispět ke zpřesnění návrhu systému opatření pro ochranu lidských životů, zdraví a majetku současně s respektováním požadavků přírodního prostředí a hospodářského rozvoje krajiny, odpovídajícímu současnému stupni rozvoje naší společnosti.

2 VYMEZENÍ POJMŮ, TERMINOLOGIE

Zaměření metodiky předpokládá její interdisciplinární uplatnění v rámci oborů hydrologie, vodního hospodářství, zemědělství, lesnictví a ochrany přírody. Proto je účelné vymezit některé termíny a témata, důležitá pro správnou interpretaci vlastního textu. V *PŘÍLOZE F* je proveden výběr z několika terminologických norem a odborných publikací (vodní hospodářství, hydopedologie, GIS). V textu jsou pak použity odkazy na doporučenou literaturu (souhrnně uvedenou v *KAPITOLE 7*), které zpřístupňují podrobnější výklady k aplikovaným metodám a pracovním postupům. *OBR.2-1* schematicky popisuje odtokový proces a současně vymezuje hydrologické procesy v povodí.



Obr. 2-1 Schéma odtokového procesu
(použito podkladu z normy ČSN 736530 – Názvosloví hydrologie, 1985)

Srážko-odtokový proces lze zapsat základní **bilanční rovnicí** oběhu vody:

$$P = AES + TQ \pm \Delta W \quad (\text{mm}) \quad (2-1)$$

kde P výška srážek
 AES výška územního výparu
 TQ výška celkového odtoku

ΔW výška odtokové ztráty, tj. zvýšení nebo snížení zásob povrchové a podpovrchové vody

Výška **celkového odtoku** TQ je součtem výšek **odtoku povrchového** a **podpovrchového**, tj. **hypodermického** (půdního) a **podzemního**. Povrchový a hypodermický odtok je ve svém součtu označován jako **odtok přímý**, podzemní odtok jako **odtok základní**. Povrchový odtok vzniká v tenkých plošných vrstvách obvykle jen na malých, málo propustných ploškách s určitým topografickým reliéfem. Tyto plochy mohou patřit jak k infiltračním plochám povodí, tak i k jeho aluviálním částem, tj. plochám nasyceným vodou. Podle této koncepce plošného povrchového odtoku (ronu) je jev zván dle jejího autora **hortonovským povrchovým odtokem**. Jinou koncepcí je představa, že obě složky přímého (tzv. nasyceného) odtoku (povrchová a hypodermická) vznikají na nepropustných, nebo vodou nasycených ploškách, jejichž velikost v průběhu srážko-odtokového procesu se zvětšuje. Tyto plochy jsou označovány jako **zdrojové plochy** (variable source areas) [DUNNE, 1978]. Propustnost zdrojových ploch je velmi nízká, obvykle nasycené půdy bývají v bezprostřední blízkosti vodních toků. Zdrojovými plochami mohou být také oblasti mělkých půd, které jsou nasyceny již předcházející srážkou, dále zastavěné plochy, cestní síť apod.

Obě koncepce se dále sjednocují v tom, že v důsledku geomorfologické diverzity zemského povrchu se povrchový odtok z ronu či ze zdrojových ploch obvykle soustřeďuje do sítě stružek, které dále tvoří základ **hydrografické sítě**. V ní dochází k **soustředěnému** a později **korytovému odtoku**. Povrchový odtok probíhá na malých povodích s malým časovým zpožděním za příčinným deštěm.

K hypodermickému odtoku dochází v horní vrstvě půdy, v nenasycené zóně, ale s možností dotace povrchového odtoku, aniž by bylo dosaženo hladiny podzemní vody. Nejčastější příčinou vzniku hypodermického odtoku jsou méně propustné, nakloněné vrstvy půdy, nebo propojené podpovrchové systémy kořenů a chodbiček, tzv. **privilegované cesty** hypodermického odtoku. Další příčinou hypodermického odtoku je i laterální gradient půdní vlhkosti. V porovnání s povrchovým odtokem, bývá hypodermický odtok pomalejší, obě odtokové formy se často prolínají a během odtokové fáze na povodí dochází ke změně odtokové formy i několikrát [BEVEN, 1986]. Přestože obě tyto formy jsou hydrologicky těžko oddělitelné, používá řada modelových technik jejich součtu, tj. přímého odtoku. Druhá část infiltrované vody, tj. **hlubší filtrace**, někdy uváděná jako **perkolace**, přispívá ke zvýšení zásob podzemní vody a ve formě podzemního odtoku z této nasycené zóny s větším či menším časovým zpožděním napájí hydrografickou síť.

Je ovšem evidentní, že tato klasifikace tří odtokových složek je schematická, nemůže věrně zobrazovat složitost odtokového procesu, nicméně všechny odtokové modely fyzikálně založené, toto schéma ve své stavbě respektují.

Cílem matematického modelování hydrologických procesů je vyjádření časové, nebo časově-prostorové závislosti určitých veličin, charakterizujících hydrologický režim modelovaného objektu, tj. povodí, nebo jeho částí. Srážko-odtokový proces je ovlivňován společným působením deterministických i stochastických vlivů, jejichž míra působení je dána samou podstatou přírodních jevů. Metody matematického modelování umožňují nejen simulovat skutečný hydrologický proces, ale s jejich pomocí lze navíc aproximativně určovat i reakci modelovaného objektu (prototypu) v různých extrémních (srážkových) situacích pro návrhové nebo prognózní účely. Současný rozvoj metod matematického modelování, podpořený možnostmi soudobé výpočetní techniky, poskytuje nové, moderní způsoby prognózování hydrologických systémů ovlivněných lidskou činností, určování návrhových veličin i zpětné ověření parametrů, navržených v minulosti. Tyto metody matematického

modelování jsou rychlé a racionální ve srovnání s klasickými empirickými postupy. Jejich spolehlivost je úměrná věrnosti matematického popisu fyzikálního procesu a rozsahu i spolehlivosti použitého datového souboru.

Matematický model srážko-odtokového procesu je zjednodušenou představou složitého hydrologického systému se vzájemnými vazbami mezi proměnnými veličinami. Hydrologický systém je definován jako systém především fyzikálních procesů, působících na vstupní proměnné za účelem jejich transformace ve výstupní proměnné. Hydrologický matematický model tedy představuje algoritmus řešení soustavy rovnic, kterými je popsána **struktura**, či **chování** povodí (nebo obojí) během srážko-odtokového procesu [FLEMING, 1975].

Pro tyto procesy je typické, že okamžité hodnoty výstupů (průtoky, změny vlhkosti půdy, změny hladiny podzemní vody, atd.) závisí nejen na okamžitých hodnotách vstupů, ale i na okamžitém stavu systému, který je výsledkem **předchozích hydrologických procesů**. Výběr zkoumaných veličin závisí na schopnosti definovat jejich vzájemné vztahy. Pokud máme tyto vztahy matematicky popsat tak, aby popis odpovídal fyzikální podstatě procesu, povede tato snaha k deterministickému modelu. Nezávisle **proměnné veličiny** klasifikujeme jako **vstupní, výstupní a vnitřní**. Vstupní a výstupní proměnné veličiny vyjadřují styk modelovaného objektu s prostředím, vnitřní veličiny vyjadřují stav objektu v daném okamžiku a nazýváme je proto **stavovými veličinami**. V hydrologických modelech bývají modelované vnitřní veličiny, zejména jsou-li konstantní v čase, nazývány **parametry modelu**. Často i z praktických důvodů zavádíme předpoklad stálosti stavových veličin, čili parametrů alespoň v určité krátké časové periodě. Vnitřní proměnné a jejich vzájemné vazby tvoří **strukturu** systému, způsob transformace vstupních proměnných do výstupních, charakterizuje jeho **chování**.

Systémové pojmy chování a struktura byly převzaty z kybernetiky a jsou již běžně užívány v dnešní hydrologické terminologii. Pod pojmem chování systému rozumíme komplexní reakci systému na vstup, obecně **transformační funkci povodí** (např. jednotkový hydrogram, nebo výtokovou čáru povodí), podle které se transformuje vstupní déšť do výstupních veličin.

Základní **prvky struktury systému** jsou jeho fyzikálně geometrické vlastnosti, tj. charakteristiky povodí (např. plocha, střední sklon, tvar, hydraulické drsnosti), půd a jejich využití, stavu vegetace, geologického podloží, aj.

Jestliže označíme $x(t, h)$ jako vstupní a $y(t, h)$ jako výstupní časoprostorové veličiny (t, h jsou souřadnice času a polohy), potom podle komplexnosti řešené problematiky v modelu vystoupí vedle vlastních proměnných, jejich derivace v čase a poloze, ale také vnitřní proměnné modelovaného systému, které charakterizují jeho strukturu a jejichž hodnoty se rovněž mohou měnit v čase i poloze (viz dále modely celistvých a dělených systémů). Matematický model **celistvého systému**, tj. systému, kde zanedbáváme prostorovou závislost veličin a uvažujeme pouze závislost časovou, můžeme obecně popsat diferenciální rovnicí, popisující vztahy mezi vstupními a výstupními proměnnými a stavovými veličinami, neboli parametry systému.

Prakticky však nepoužíváme kontinuálních záznamů $x(t)$ a $y(t)$, ale dáváme přednost jejich diskrétní formě v určitém časovém intervalu Δt . Potom můžeme parciální derivace nahradit konečnými diferencemi, takže je možno zapsat:

$$f[x_t, y_t; x_{t-1}, y_{t-1}; x_{t-2}, y_{t-2}; \dots \theta_1, \theta_2 \dots] + \varepsilon_t = 0 \quad (2-2)$$

kde θ_1, θ_2 jsou parametry modelu a ε_t je proměnná, vyjadřující "odchylky" modelu od prototypu v časových hladinách, takže ε_t je časovou funkcí chyby (residuálu) v kladném nebo záporném smyslu.

Jestliže kterákoliv z proměnných x_t , y_t , ε_t je **nahodilou proměnnou**, mající nějaké **pravděpodobnostní rozdělení**, potom rovnice je **stochastickým modelem**, jestliže nikoliv, pak tato rovnice představuje **model deterministický**. Deterministické modely jsou tedy vždy spojovány s časovými proměnnými, pro které neplatí žádné rozdělení pravděpodobností (např. kolem jejich průměrných hodnot) a jejichž vzájemné vztahy (i vztahy k parametrům modelu) jsou ryze příčinné, neboli deterministické. Na druhé straně, ostatní modely bývají označovány jako **stochastické**, spíše než pravděpodobnostní, ke zdůraznění časové závislosti proměnných, které jako nahodilé veličiny (v důsledku působení nahodilých vlivů) mají nějaké pravděpodobnostní rozdělení.

Další obecnou kvalitativní charakteristikou modelu je jeho linearita, nebo nelinearita. V deterministickém smyslu je **model lineární**, jestliže je popsán lineární diferenciální rovnicí (nebo rovnicemi) a tak je v něm zachována linearita mezi vstupními a výstupními proměnnými $x(t)$ a $y(t)$ a platí tedy princip superpozice. Odezva (výstup) lineárních systémů závisí pouze na funkci chování systému (tj. jeho transformační funkci). **Nelineární modely** reprezentují nelineární systémy, popsané nelineárními diferenciálními rovnicemi, kdy odezva těchto systémů závisí nejen na funkci chování, ale také na intenzitě vstupu. Ve stochastickém smyslu je však model lineární pouze tehdy, jestliže existují lineární vztahy mezi stavovými veličinami (parametry). Dalším hlediskem v rozdělení hydrologických modelů je prostorové rozčlenění vstupních a stavových veličin. **Celistvé modely** (lumped models) neuvažují žádnou prostorovou závislost těchto veličin (pouze časovou), zatímco **modely geometricky dělené** (geometrically distributed models) tuto závislost respektují. Prostorové změny vstupních a stavových veličin jsou řešeny v uzlových bodech zvolené geometrické sítě. Určitým přechodem mezi oběma skupinami modelů jsou **modely pravděpodobnostně dělené** (probability distributed models), které mají prostorovou variabilitu vstupních nebo stavových proměnných (nebo obojích), nikoliv však na vztahu ke konfiguraci uzlových bodů geometrické sítě nebo topografii prototypu ale ve smyslu rozdělení pravděpodobnosti výskytu těchto veličin a to i u modelů označovaných za deterministické [BECKER, 1988; CLARKE, 1973].

Délka časové základny je rovněž důležitým faktorem při výběru modelu. Dlouhé časové řady srážek a dalších hydrometeorologických dat tvoří datovou bázi pro **kontinuální modely**, simulující odtokový proces, nebo hydrologickou bilanci a to nejen v povrchových zónách. Kontinuální modely reprezentují modelovaný prototyp v každém časovém intervalu se zaměřením na kvantifikaci hydrologických procesů buď ve smyslu rekonstrukčním (po identifikaci vnitřních parametrů modelovaného systému), nebo ve smyslu prognózním (simulace systému) ať již v reálném čase, nebo pro návrhové účely. Pro modelování jednotlivých významných srážko-odtokových epizod slouží pouze kratší řady dat, kdy údaje o nepřítalových srážkách (nebo nulových) do modelu nevstupují. Tyto modely bývají označovány jako **modely diskrétní**, nebo **epizodní**.

Pro simulační výpočty (pro rekonstrukční nebo návrhové účely) se běžně užívá **optimalizačních procedur** (nejčastěji Rosenbrockova, Marquartova, nebo SIMPLEXní metoda). Pro řešení v reálném čase se často používá **adaptivních** (samoučících se) **metod**, jako je například rekursivní metoda nejmenších čtverců ARMA a ARIMA modely [HAAN, 1982], metoda Kalmánových filtrů [ANDERSON, BURT, 1985] a mnoho jiných. Na rozdíl od optimalizačních procedur, jsou zmíněné adaptivní metody založeny na stochastických principech a doposud je poměrně málo využíváno jejich propojení s deterministickými modely.

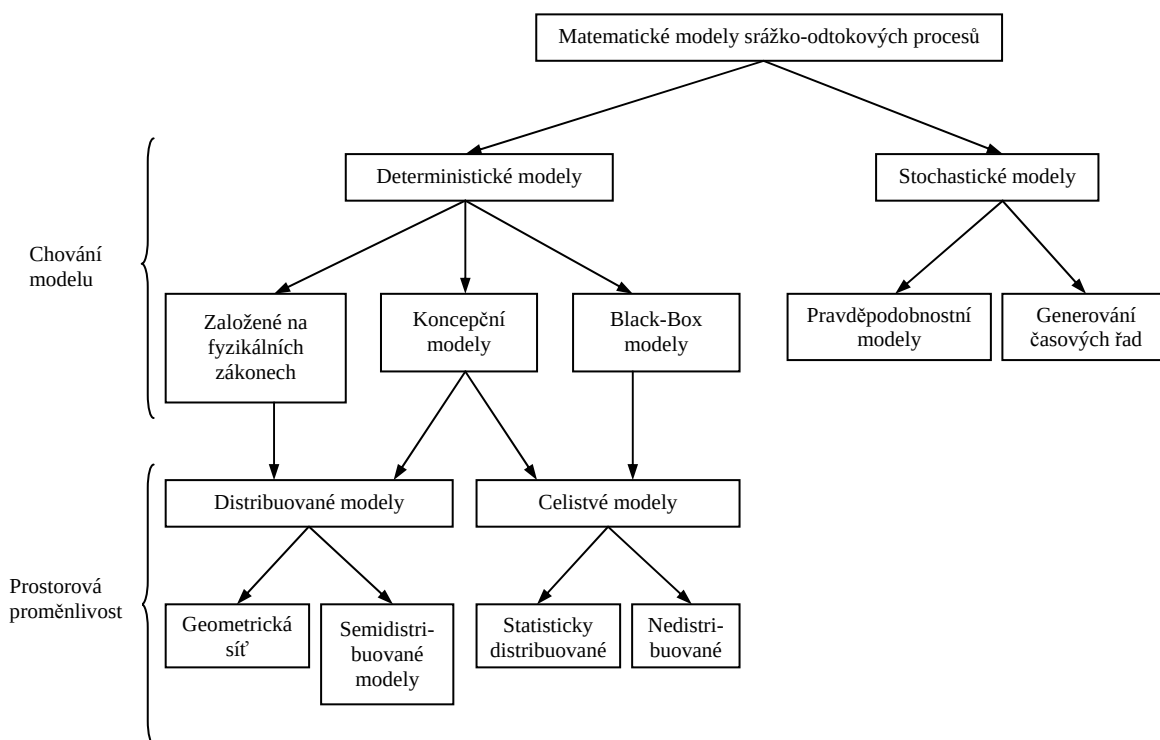
V současné hydrologii nabývá stále většího významu uplatňování metod umělé inteligence a modelů na základě těchto metod koncipovaných. Jsou to zejména **modely neuronových sítí**, vycházející z představy simulace odtokového procesu sítí vzájemně

propojených prvků stejného typu. Způsob propojení a „váhy“ těchto prvků určují **chování** sítě, které kvantifikujeme rozdílem mezi požadovanými a skutečnými výstupy sítě, tj. měřeními a skutečnými hodnotami průtoků. Spolehlivost predikce, získané modelem neuronové sítě závisí na rozsahu rekonstruovaných historických dat, které mají pro síť **samoučící význam**. Problematika umělých neuronových sítí a jejich modelů je dnes podrobně rozpracována v literatuře [KOSKO, 1992; STARÝ, 1998].

Citlivost modelu na změnu parametrů a vstupních proměnných zjišťujeme jeho kalibrací pro různé mezní podmínky použití.

S ohledem na účel použití modelu, na kvalitu i kvantitu pozorovaných proměnných a tím i odvozených parametrů, se vývojový trend v hydrologii směřuje do dvou základních skupin podle převládajících principů deterministických, nebo stochastických. Následující schéma (OBR.2-2) ukazuje vzájemné vazby mezi oběma skupinami dle účelu aplikace, stupně kauzality a datových možností.

Deterministické modely jsou členěny do tří skupin: fyzikálně založené (white box), koncepční (grey box) a kybernetické modely (black box). Stochastické modely se dělí mezi skupinu modelů pravděpodobnostních a generativních (tj. modelů generování časových řad).



Obr. 2-2 Klasifikace hydrologických modelů [podle BECKER, 1988]

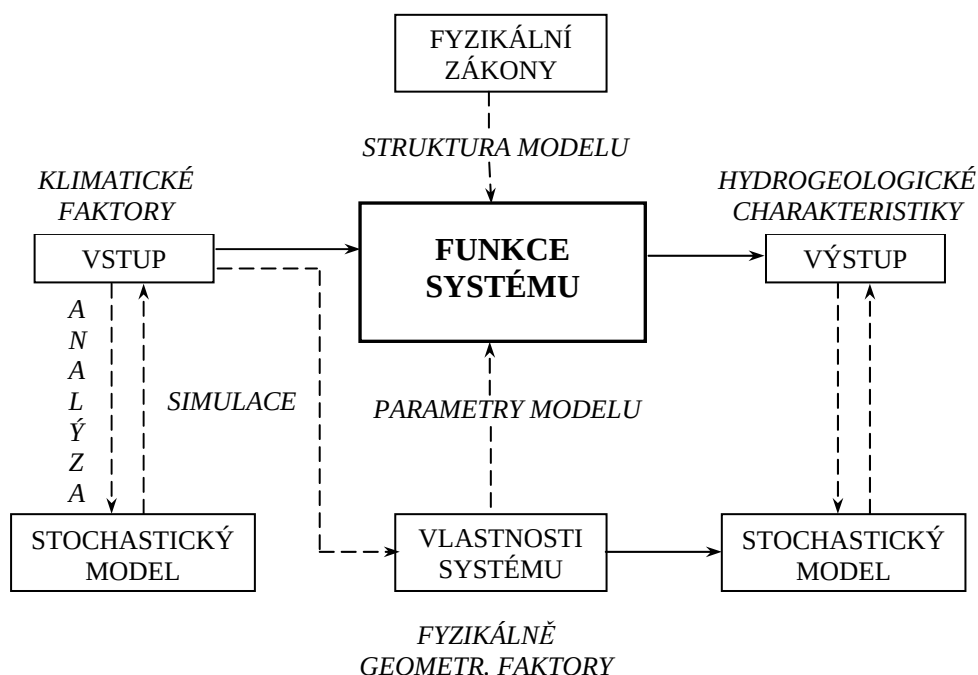
3 OBECNÉ PRINCIPY DETERMINISTICKÝCH MODELŮ

Podle schématu na OBR.2-2 jsou obvykle deterministické modely v hydrologii klasifikovány dle převládajících principů své konstrukce na:

- kybernetické
- fyzikálně založené
- koncepční

• Kybernetické modely

Přístup kybernetického modelování ignoruje změny stavových veličin a zkoumá průběh procesu výhradně z hlediska **transformační funkce** systému. Využívá metod systémové analýzy z oboru kybernetiky ke zkoumání chování systému a nezajímá se o jeho strukturu. Uplatňuje se proto u hydrologických systémů s jednotným chováním a jednoduchou strukturou, ale pouze tam, kde kromě vstupních údajů jsou alespoň zčásti známy odpovídající údaje výstupní, aby z jejich vzájemného vztahu bylo možno funkci **chování identifikovat**. Tento přístup zdůrazňuje převahu systémového chování nad strukturou. Je založen na ryze formální struktuře modelu, kterou odvozuje ze známého chování. Klasická koncepce tohoto přístupu je uvedena na OBR.3-1, kde jsou také naznačeny paralely deterministických a stochastických modelových přístupů.



Obr. 3-1 Obecná funkce systému

V OBR.3-1 pouze střední horizontální část (VSTUP - FUNKCE SYSTÉMU - VÝSTUP) reprezentuje stroze kybernetický přístup. Uplatnění vertikálních vztahů, zahrnujících strukturu systémů a působící fyzikální zákony rozšiřují obecnost modelu ve směru ke koncepčním nebo dokonce i k fyzikálně založeným modelům.

Jako příklady kybernetických modelů se kterými mají autoři dřívější zkušenosti lze uvést Model maticové inverze (MATRIX), nebo modely aproximace měřených časových řad

srážek a odtoků řadami Fourierovými (FOURIER) nebo Laguerrovými polynomy (LAGUERRE). Tyto dva poslední modely by bylo též možno dočasně zařadit mezi modely stochastické, což ukazuje na částečné uplatnění deterministických i stochastických principů. Mezi další příklady kybernetických modelů je možno dále uvést modely identifikující transformační funkci povodí s použitím fiktivního systému nádrží (NASH, SATO-MIKKAWA, TANK MODEL a další).

• Fyzikálně založené modely

Tato skupina modelů je reprezentována převážně „modely hydrodynamickými“, představující opačný extrém modelů kybernetických. Modelové přístupy založené na fyzikálním základě se snaží respektovat principy zachování hmoty, hybnosti a energie. Patří vždy do kategorie modelů s geometricky rozdělenými parametry.

Pro sestavení a implementaci hydrodynamického modelu je nutné mít k dispozici následující informace:

- přírodní zákony, podle kterých proces probíhá a je popsán formou parciálních diferenciálních rovnic (např. rovnice kontinuity a pohybové);
- geometrický systém (např. čtvercovou nebo trojúhelníkovou síť, atd.) potřebný pro diskretizaci diferenciálních rovnic do rovnic diferenčních (tj. numerických);
- numerické schéma umožňující převedení výchozích rovnic do diferenčního tvaru s využitím geometrického systému, uvažovaného v čase i poloze;
- potřebné hydrologické a hydraulické proměnné a parametry ve výpočtových bodech geometrické sítě;
- počáteční a okrajové podmínky úlohy.

Obecný odtokový model obvykle zahrnuje sub-modely tří dominantních procesů:

- a) Procesu "**produkce**" efektivního deště z příčinného deště, včetně vyjádření příslušných ztrát a distribuce vstupů do obou systémů povrchového a podpovrchového odtoku. Ztráty objemu povrchového odtoku jsou způsobeny intercepací, evapotranspirací, bezodtokovými mikro a makrodepresemi a zejména infiltrací.
- b) Procesu "**transformace**" efektivního deště, mnohdy se zpětnou vazbou s příčinným deštěm pro upřesnění vstupů do obou odtokových systémů.
- c) Procesu "**translace**" charakteristik odtoku v časoprostorové oblasti řešení.

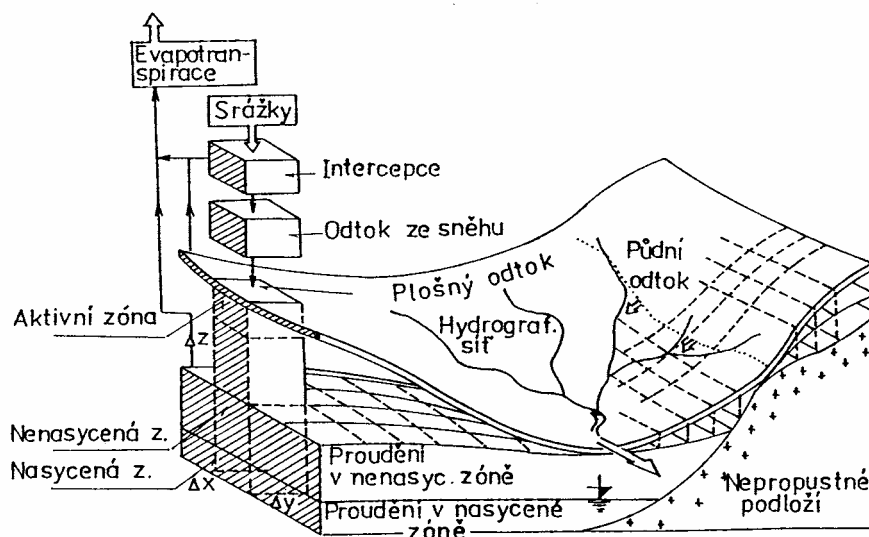
Procesy produkce a transformace bývají nejčastěji vyjadřovány prostřednictvím koncepčních hydrologických modelů, zatímco proces translace svahového a soustředěného odtoku lze nepoměrně lépe popsat dynamickým, nebo kinematickým modelem.

Vývoj těchto hydrodynamických modelů, tj. modelů s rozdělenými parametry se však neodehrává pouze v oblasti modelování povrchového odtoku, ale také v oblastech dalších hydrologických procesů, buď individuálních, nebo v jejich vzájemné interakci. Většinou se jedná o **modely dílčích procesů**, jako je vláhová dynamika nenasycené zóny, proudění podzemní vody, nebo samozřejmě nejvíce pojednávána oblast povrchového odtoku. Daleko méně je modelů komplexních, zahrnujících interakce procesů. Především je to již zmíněný model SHE (Système Hydrologique Européen) [ABBOTT, 1986].

Model SHE představuje zatím nejúplnější hydrodynamický přístup a zahrnuje jednorozměrné proudění soustředěného (korytového) odtoku, dvourozměrné svahové proudění, jednorozměrné vertikální proudění v nenasycené zóně a dvourozměrné proudění v nasycené zóně. Modelovací systém je doplněn o algebraické modely, které umožňují opravy vstupů hmoty (odtok ze sněhu, intercepce a evapotranspirace). Topologická struktura modelu je obrazem topologické struktury povodí (viz OBR. 3-2). Systém může pracovat s 2 000

výpočetními body ve vodorovné rovině a s 30 vertikálními úrovněmi. Pojem prostorových souřadnic je zaveden v diskrétní reprezentaci a vyjadřuje prostorové rozložení skutečných elementů povodí soustřeďujících parametry modelu.

Přetrvávajícím problémem, který silně limituje použití fyzikálně založených modelů je však nedostupnost většiny vstupních dat, zejména však plošného (a časového) rozložení deště, plošné variability fyzikálních parametrů půdy a dalších požadovaných údajů. Pro účinnou simulaci srážko-odtokového procesu (zejména v bilančním smyslu) jsou stále nejvíce využívány modely koncepční.



Obr. 3-2 Povodí jako systém se subsystemy a procesy (SHE)

• Koncepční modely

Koncepční deterministické modely popisují matematickými vztahy jednotlivé části hydrologického cyklu nebo cyklus jako celek. Tento modelový přístup vychází z těsného kontaktu s přírodní podstatou jevu a snaží se získat přímou analogii struktury modelu se strukturou zkoumaného jevu. Pro úspornost řešení a minimalizaci požadavků na zdroje informací o parametrech objektu vyhýbá se tento přístup prostorovým vztahům ve vyjádření parametrů a předpokládá, že k prostorovým změnám stavových veličin dochází pouze v určitých reprezentativních bodech objektu. Tímto způsobem je vylučována prostorová souřadnice. Původně spojitý dynamický systém je převeden na nespojitý v prostoru. Tato úprava je prováděna pro všechny uvažované složky hydrologického cyklu. Žádané podrobnosti struktur objektu a modelu je docíleno následnou integrací všech těchto složek v rámci bilance hmoty. Vzhledem k diskretizaci v prostoru, vede řešení těchto úloh k obyčejným diferenciálním rovnicím, u nichž obvykle jedinou nezávisle proměnnou je čas. Hodnoty prostorových souřadnic se stávají parametry řešení a mohou být během identifikace modelu kvantifikovány (např. optimalizačními procesy). Prostorové rozložení parametrů je vyjádřeno náhradním způsobem (buď konstantně, nebo pravděpodobnostně rozděleno), který zajistí propojení jednotlivých složek hydrologického cyklu.

Koncepční modely se užívají k simulování různých hydrologických režimů povodí a podle účelu volíme i délku časového kroku Δt . Pro účely modelování hydrologické bilance se volí obvykle $\Delta t \geq 1$ den, pro účely modelování jednotlivých krátkodobých hydrologických

procesů (ve vzájemné vazbě) je voleno Δt kratší podle charakteru simulovaného procesu. Koncepční modely matematicky popisují hlavní procesy hydrologického cyklu.

Povrchové procesy:

intercepce, evapotranspirace, povrchová retence a akumulace v mikro a makrodepresích, formování povrchového odtoku a svahový odtok (příp. další procesy transportního charakteru).

Podpovrchové procesy:

infiltrace, půdní odtok, vláhová dynamika, aktivní, nasycené a nenasycené zóny, proudění podzemní vody, tvorba základního odtoku, atd.

Korytové procesy:

vznik soustředěného odtoku, transformace odtoku v údolnici, atd.

Skupinu konceptních modelů můžeme klasifikovat podle různých kritérií. Praktické hledisko při jejich klasifikaci je opět délka časového kroku Δt . Jak již bylo dříve zmíněno, s delším časovým krokem jsou implementovány **modely bilanční** (kontinuální), s kratším **modely epizodní** (diskrétní), simulující hydrologický proces o kratší časové základně. Některé modely jsou natolik flexibilní, že mohou sloužit pro oba účely (např. SACRAMENTO model, SMAR - ve výpočtovém kroku 1hod. [KULHAVÝ, 1995]). Pro použití většiny konceptních modelů je pak nutno v identifikační fázi počítat s upřesňováním parametrů některou z optimalizačních technik (nejčastěji automatickou optimalizací).

Ve světě je známá celá řada konceptních modelů buď **epizodních**, nebo **bilančních**. Z nejznámějších epizodních modelů je možno uvést Model SSARR [BROOKS, 1975], CLS [NATALE, TODINI, 1987], STRRE [KOVÁŘ, 1984], KINFIL [KOVÁŘ, 1994] aj. Zajímavou skupinou epizodních konceptních modelů jsou modely „nehortonovského“ odtoku, nazývaného též **nasyceným povrchovým odtokem**. Plochy nasycené vodou z tzv. exfiltrace jsou **zdrojovými plochami** odtoku (variable source areas), které se během srážko-odtokového procesu rozšiřují. Jejich rozsah záleží na řadě faktorů, především na hydraulických vlastnostech půdy, jejich hloubce, topografii, vzdálenosti od trasy soustředěného odtoku a také na klimatických a sezónních činitelích.

V posledních letech jsou intenzivně rozvíjeny metody „**scalingu**“, nebo „**krigingu**“, které za základě geostatistických principů (statistické kovariance a variogramů) umožňují za určitých podmínek aplikace určení „representativních hodnot“ povodí, nebo jeho částí [MAIDMENT, 1993]. Teorie scalingu i krigingu jsou založeny na předpokladu homogenizace dat, získaných z různých míst povodí (např. půdní parametry). Scaling je metoda využívající „váhy“ (scaling factor) měřeného bodu, přičemž bodově měřené hodnoty jsou transformovány s minimalizací jejich rozptylu. Kriging je „váhová“ interpolace plošně měřených hodnot s minimalizací součtu čtverců jejich odchylek [KUTÍLEK, NIELSEN, 1994].

Do skupiny bilančních konceptních modelů, zaměřených na bilancování složek hydrologického cyklu, je možno zařadit následující modely:

- **WYM** (Water Yield Model) [WILLIAMS, LA SEUR, 1976], který kontinuálně řeší s denním časovým krokem potenciální retenci aktivní zóny povodí pro aktuální stanovení změn čísla odtokových křivek CN.
- **SMD** (Soil Moisture Deficit) [KOVÁŘ, 1994] je modelem hydrologických procesů aktivní zóny povodí, sloužící pouze k simulování půdní vlhkosti v denním časovém kroku.
- **HYRROM** (Hydrological Rainfall-Runoff Model) [BLACKIE, EELES, 1985] simuluje zjednodušeně hydrologický cyklus v denním časovém kroku. Simuluje evapotranspiraci,

dynamiku půdních vlhkostí, přímý a základní odtok. Model má 15 parametrů, z nichž některé jsou automaticky optimalizovány (Rosenbrockova metoda). Struktura modelu nereflektuje příliš fyzikální principy hydrologických procesů, význam parametrů spočívá spíše v robustním určení tzv. efektivního deště (tj. části, tvořící přímý odtok).

- **BILAN, PODBIL** [KAŠPÁREK, KREJČOVÁ]. Modely, které v měsíčním časovém kroku simulují potenciální evapotranspiraci, územní výpar a celkový odtok z povodí. Rozdíl mezi oběma verzemi podobné struktury modelů spočívá v prioritním využití dat celkového odtoku (BILAN), nebo dat stavů podzemních vod (z podzemních vrtů–PODBIL). Oba modely mají 5 parametrů, automaticky optimalizovaných. Jsou převážně zaměřeny k simulaci odtokové složky bilance.
- **HBV** [BERGSTRÖM, 1975, 1992] je celistvým deterministickým koncepčním modelem se semi-distributivními komponenty. Pracuje v denním časovém kroku, má 3 hlavní složky:
 - tání sněhu
 - bilance půdních vlhkostí
 - celkový odtok a jeho transformace korytem

Model má 9 parametrů, některé jsou optimalizovány. Je rozšířen zejména ve Skandinávii a Švýcarsku.

- **SACRAMENTO** [BURNASH et al, 1973; PECK, 1976] je flexibilním koncepčním modelem, sloužícím jak pro účely simulace srážko-odtokových epizod (s krátkým krokem), tak i kontinuální hydrologické bilance. Model je poměrně složitý, má 15 parametrů, z nichž některé jsou optimalizovány. Model bývá využíván s uplatněním scénářů klimatických změn [BUCHTELE, 1994].
- **IHDM** (Institute of Hydrology Distributed Model) [CALVER, WOOD, 1989] je fyzikálně založený, distributivní (dělený) model, vycházející z numerického řešení parciálních diferenciálních rovnic, popisujících neustálé proudění svahové, soustředěné povrchové proudění a proudění podpovrchové v nenasycené i nasycené zóně. Cílem je snaha o dokonalý fyzikální popis hydrologických a hydraulických procesů. Jeho stavba je velmi sofistikována, je náročný na množství kvalitních dat, proto je zejména testován na experimentálních odtokových plochách. Jeho předností jsou velmi solidně zpracované komponenty odtoku.
- **TOPMODEL** [BEVEN, 1986], [BLAŽKOVÁ, 1993] obdobně jako IHDM není účelově bilančním modelem, ale ukazuje směr vývoje hydrologického modelování. Je především rovněž zaměřen na simulaci odtoku z proměnlivých zdrojových ploch povodí a pracuje s plošným rozdělením deficitu půdních vlhkostí. Svým zařazením patří do kategorie semi-distributivních modelů (quasi-dělených) modelů. Model zpracovává údaje o topografii povodí a jeho půdách do topografických indexů TOPSi. TOPMODEL kromě simulace historických řad rovněž generuje srážkové epizody z daného rozdělení intenzity a trvání dešťů. Využívá spojení s GIS (Geografickým Informačním Systémem) pro automatické vyhodnocení plošných indexů TOPi, TOPSi a dalších parametrů.
- Modely **CREAMS, GLEAMS, SWRRB, EPIC, AGNPS** jsou typickými koncepčními modely hydrologických procesů, spojených s procesy erozními a sedimentačními. Dají se rovněž využít jako modely bilanční.
- **SWATRE** Modely (Soil Water Atmosphere Transport Reaction Models) představují řadu koncepčně-fyzikálních modelů hydrologické bilance [FEDDES, WESSELING, BELMANS, 1983], rozpracované nebo komentované pro využití v našich podmínkách dalšími autory [DAMAŠKOVÁ, 1989], [KOVÁŘ, KURÁŽ, NACHTNEBEL, 1996]. Tyto modely používají pro

řešení přímého odtoku buď metodu Hortonovu, nebo Dunneovu. Modely SWATRE potřebují kromě údajů hydrometeorologických také údaje o vegetačním porostu. Řeší procesy intercepce, povrchové retence, přímého odtoku, infiltrace, evapotranspirace, kapilárního vztlínání (v případě mělké hladiny podzemní vody) a doplňování zásob podzemních vod, případně základní odtok. Mají nevýhodu, že se dají použít pouze pro velmi malé elementární plochy, kontrolované lyzimetrem. Pro svou detailnost jsou základem řady dalších koncepčních modelů, simulujících hydrologickou bilanci malých povodí.

Z dalších bilančních modelů jsou v předložené studii podrobně popsány a implementovány zejména modely **SMAR** [ZHANG, O'CONNOR, LIANG, 1995], [KULHAVÝ, 1997, 1999] a **WBCM** [KOVÁŘ, 1994, 1998] jako obecně použitelné modely hydrologické bilance pro účely rekonstrukční, návrhové i scénářové.

3.1 Bilanční modely v podmínkách malých zemědělsko-lesních povodí

Řešení vztahu bilančních prvků v rámci hydrologické bilanční rovnice jednotlivých povodí, nebo soustavy povodí, je tradiční úlohou obecné hydrologie, resp. hydrologie inženýrské. Prakticky je potvrzením principu spojitosti a zachování objemu vodní komponenty v prostoru a v čase. Avšak již různost formulací některých členů rovnice odráží konkrétní účel použití – liší se proto prostorovým měřítkem, členitostí a přesností odvození jednotlivých prvků rovnice a samozřejmě metodami jejich stanovení, i nástroji ověření. Bilanční rovnice tak mívají v konečné podobě různou strukturu. Je důležité, aby se všechny členy bilanční rovnice vztahovaly ke stejnému období – nejčastěji to bývá hydrologický rok (1.XI. až 31.X.), dekáda, nebo den. Dlouhodobá bilance vystihuje poměry za delší řadu let (měsíců); čím je období kratší, bývá obtížnější stanovit některé bilanční prvky. Praktické hledisko pro rozlišení typu bilančního přístupu je **délka výpočtového časového kroku**. Delší časový krok (den, dekáda) charakterizují bilanci kontinuální (dlouhodobou), kratší výpočtový interval je častější u bilance krátkodobé, typické pro modely epizodní (diskrétní, užívané k popisu složky povrchového odtoku – např. pro posouzení erozních procesů). Pokud se bilancování zabývá jen určitou výsečí v časové řadě, je důležité stanovit počáteční, případně koncové hodnoty bilančních členů, odpovídající hranicím zpracovaného období. Typickým příkladem je popis dlouhodobě bilančních prvků pro účely zemědělství – např. pro vegetační období. V takovém případě je opodstatněné např. vyloučení zimního období (náročného na provoz a strukturu monitorovacích systémů – zvláště s ohledem na značnou různorodost podmínek tvorby zimní zásoby vod táním sněhové pokrývky a sycením promrzajícího půdního profilu). Tím se však zvyšují nároky na výběr reprezentativních pracovních postupů, které zpravidla nepřímo, zásoby vody v povodí na začátku řešeného období stanovují.

Pro účely hodnocení vlivu zemědělských činností v povodích drobných vodních toků, tj. v povodích o rozloze do několika desítek km², je třeba důsledněji respektovat některá specifika, která v konečném efektu ovlivňují řešenou hydrologickou bilanci povodí významněji, než tomu může být u povodí větších rozloh. V malých povodích (v intenzivních zemědělských oblastech) mohou nastat případy, kdy celé povodí, nebo jeho převážná část je využívána jako orná půda. V takových podmínkách jediná agrotechnická operace (např. orba, realizovaná v průběhu několika dní) rázem změní **vlastnosti povrchu** (pro jednotlivé bilanční složky např. i různým směrem – infiltrace, povrchový odtok) a na teoreticky totožnou srážku, následující v krátkém odstupu, pak reaguje povodí zcela odlišně. S tímto případem kontrastují povodí velkých rozloh. Struktura využití půdy je v takových podmínkách pestřejší – mozaiková (lesy, travní plochy, orná půda, urbanizované plochy) a přispívá tak k vyrovnaní

výkyvů, způsobených intenzivní zemědělskou činností. Navíc i zemědělská výroba upřednostňuje **střídání plodin** v rámci obhospodařovaných ploch a takové kompenzace vlivů je dosahováno již v rámci působnosti jednoho zemědělského subjektu (přestože zejména v současnosti jsou k vidění rozsáhlé plochy monokultur, pěstovaných spíše v regionálním měřítku – např. technické plodiny – řepka olejka apod.).

V této fázi vyvstává úkol zvolit pracovní postup (typ modelu) a tomu odpovídající měřítko prostorové, ale i časové, splňující účel následného využití získaných podkladů. Těmito okruhy se přiměřeně zabývají další kapitoly textu a popisují různé přístupy konstrukce a uplatnění koncepčních modelů. Charakter zpracovaného tématu předurčuje vlastní text jako víceméně inspirativní materiál, který se pokouší hledat v mozaice různých přístupů postupy nejefektivnější pro dosažení zadaného cíle. V rámci řešení bilance malého zemědělsko-lesního povodí se snaží vzájemně přiblížit hranice mezi podrobným, avšak podkladově i strukturně velmi náročným řešením distribuovanými modely, a koncepčním, robustnějším přístupem celistvých modelů. Tato úroveň by měla být na jedné straně snadno aplikovatelná, na druhé straně by měla obsáhnout oblast nejčastějších požadavků praxe.

Po podrobné analýze významnosti jednotlivých bilančních prvků a mechanismů jejich ovlivňování v podmínkách malých zemědělsko-lesních povodí, je účelné zmíněná specifika stručně formulovat.

V první řadě je třeba respektovat **vliv vrstevného půdního profilu** – ke změně vlastností dochází v závislosti na intenzitě a způsobech agrotechnického zpracování svrchních vrstev. Dochází tak opakovaně v určitých termínech k výrazným skokovým změnám; plynule se pak některé vlastnosti navrací k typickým hodnotám. Vlastnosti půdního prostředí jsou ovlivňovány i typem pěstovaných plodin. V podmínkách převážně zemědělských povodí lze dynamiku těchto změn odvodit z agronomických podkladů o systémech hospodaření. K dispozici jsou v ČR i půdní mapy, vymezující místně některé typické hydrofyzikální vlastnosti ornice (např. kategorie hydrologických skupin půd). Pro popis hydrologické funkce půdního profilu je významná i **existence hydromelioračních opatření**. Může jím být systematická drenáž, provozování závlah, ale i komplex protierozních opatření a dalších melioračních opatření (obecně zlepšujících půdní vlastnosti a to podle místních podmínek v různých směrech – např. snižování propustnosti lehkých půd, nebo naopak zvyšování u půd těžkých, atd.). Místně může být významné např. odvodnění zamokřovaných lokalit (s různou příčinou zamokření), převody drenážních vod, jímání pramenních vývěrů atd.

Podobně je třeba zohlednit **vliv pěstovaných plodin**, které působí na hydrologickou bilanci současně několika funkcemi. V zemědělských povodích mohou mít tyto projevy výrazně nespojitý charakter, což souvisí s termíny sklizní (u píce i opakovaných v rámci jednoho roku), změnou zapojenosti porostu, odvozenou z růstových fází pěstovaných plodin, určenou např. termínem setí. Významnou roli mohou mít předplodiny, které ovlivňují charakter půdního povrchu již v zimním období. Plodiny jsou na orných půdách pěstovány v několikaletých cyklech, tzv. osevních postupech, které optimalizují nároky plodin v rámci přírodních a dlouhodobě hospodářských podmínek. Jedná se o nejsložitější krajinně-ekologický systém, ovlivňující energetické toky v systému půda-rostlina-atmosféra, který však pro účely řešení bilance vody v povodí bývá nahrazen zjednodušujícími postupy, odpovídajícími významnosti a výpočtové složitosti řešeného problému.

Popis plošného zastoupení i prostorové skladby **lesů a trvalých travních porostů** v rámci povodí, mocnost a kvalita humózní vrstvy, realizovaná hospodářská opatření – to vše limituje vliv těchto krajinných prvků na režim odtoku vod. Jeho hodnocení je vesměs pozitivní, neboť zvyšují akumulaci a retenci srážkových vod v povodí, chrání půdní povrch před plošnou erozí, zvyšují transpirační složku, která v našich podmínkách příznivě ovlivňuje

mikroklima. Hospodářské zásahy mohou v některých případech výrazně ovlivnit bilanční složky (intercepci, transpiraci, infiltraci) a tyto skutečnosti je třeba zohlednit.

Opačnou funkci mívají **urbanizované plochy**. Zde je prvořadým cílem odvést bezpečně a co nejrychleji srážkovou vodu, k čemuž slouží odvodňovací systémy několika etází (odvodnění střech, ulic a zpevněných ploch, kanalizační a drenážní systémy), dimenzované na převedení průtoků, odvozených pro návrhové stavy. V porovnání s plochou extravilánu se jedná o území s minimální akumulací, retenční a infiltrační schopností, s malými hydraulickými drstnostmi povrchů, často s velmi kapacitními transportními prvky pro převod povrchových vod. V závislosti na podílu urbanizované plochy k celkové ploše povodí jsou voleny bilanční metody; pokud je předmětem řešení oblast venkova, s převažujícím zastoupením zemědělských a lesních ploch, bude urbanizovaná plocha v bilančním řešení charakterizována typickými vlastnostmi území stejně jako přírodní plochy (infiltrace, povrchová akumulace, retardace odtoku atd.).

Zvláštní pozornost zasluhuje i posouzení aktuálních **režimů nakládání s vodami a využívání vod** v rámci povodí. Tyto systémy mohou obsáhnout vody v rámci řešeného povodí (využití akumulace povrchových vod pro technologické účely, zásobování zemědělských objektů, vodárenství, vypouštění a napouštění drobných vodních nádrží lokálního významu), někdy i v rámci bilance nižších hydrogeologických zvodní (jímání podzemních vod), nebo převody vod mezi jednotlivými (např. sousedními) povodími. V takových situacích je významné posoudit objemy převáděných vod s ohledem k bilancovaným hydrologickým složkám, čímž se redukuje chyby měřených průtoků v určujících profilech povodí apod.

Tyto prvky zahrnují vedle zmíněného přímého nakládání s vodou i systémy nepřímého ovlivňování složek hydrologické bilance povodí **technickými** či **organizačními opatřeními** (protierozní opatření, vegetační úpravy, způsoby využití území, vedení cestních sítí, systémy protipovodňové ochrany). Kategorie organizačních opatření nejenže zahrnuje většinu výše zmíněných vlivů, působících na režim odtoku z malých povodí (významných pro zvolené prostorové a časové měřítko), ale je třeba je doplnit i celou škálou místních úprav, speciálních staveb, organizačních pokynů a vyhlášek, které mohou ve vytvářeném schématu povodí ovlivnit proces odtoku vod a při řešení bilance území nemohou být opomenuty.

Transformační schopnost hydrografické sítě může v závislosti na zvoleném časovém měřítku ovlivnit dynamiku hydrologické bilance malého povodí. Při delším výpočtovém kroku (dekáda, den) bývá její vliv zanedbáván. Při zkrácení výpočtového kroku na délku jednotek hodin (např. pro řešení vývoje kulminačních průtoků v korytech a nádržích) pro účely aplikací epizodních modelů, je třeba zahrnout hydrotechnické charakteristiky vodních koryt (podélné a příčné profily, vedení trasy toku, druh opevnění, vzdouvací objekty, tůňky, vegetační a biologický doprovod).

Uvedená témata mohou v podmínkách různých typů malých zemědělsko-lesních povodí nabývat většího, někdy menšího významu. Je úkolem zpracovatele posoudit míru těchto vlivů na hydrologickou bilanci. S ohledem na účel metodiky - poukázat na uplatnění kontinuálních bilančních modelů ve vodohospodářské praxi v těchto podmínkách - je třeba upozornit na další skutečnost. **Sezónní vývoj** charakteristik vlastností půdního povrchu (porostlého vegetací, nebo holého) je v podmínkách těchto povodí významnější, než je tomu u povodí větších rozloh. V přístupu k řešení tak mohou nastat dva směry. Tuto *sezónnost zanedbat*, nebo ji redukovat jen na dvě období (zimní a vegetační) – například pro dlouhodobé bilance, bez záměru podrobné kvantifikace vlivu zemědělství v rámci povodí jako celku. Ve druhém případě ji považovat za určující a pracovní postupy přizpůsobit *různým obdobím charakteristických vlastností* (vegetace, půdního profilu), což umožňuje detailní popis jejich vlivu na hydrologické bilanční složky. V takovém případě je třeba doplnit podklady,

popisující termíny změn a vývoj těchto určujících charakteristik. V povodích s významným plošným zastoupením zemědělských ploch je úkolem rozšířit informační zdroje o popis systémů zemědělského hospodaření.

3.2 Příklad struktury koncepčních modelů

V kapitole jsou popsány dva typy (WBCM a SMAR) z metodikou komentovaných koncepčních bilančních modelů. Uvedené typy se liší vedle vlastních schémat generování odtoku z povodí především přístupem k formulaci vstupních parametrů. To je odrazem podmínek vzniku jednotlivého modelu a záměrů jeho využití: model SMAR byl konstruován pro vrstevné půdní prostředí s vyčleněním složky přímého odtoku na bázi jednotkového hydrogramu a navázal na Nashovo schéma užití Gamma funkce pro řešení soustavy lineárních nádrží s uplatněním 'schematizovaných' (ne vždy přímo měřitelných) parametrů řešení. Druhý model - WBCM byl koncipován pro aplikaci na malých povodích a podrobněji analyzuje podmínky tvorby efektivní srážky. Povrchový odtok pak formuluje v pracovní verzi 5 s využitím metody CN-křivek, při respektování fyzikálního významu použitých parametrů vlastního řešení, s jejich snažším odvozením z přímo měřitelných podkladů.

Použití modelů v metodice je voleno s cílem praktických demonstrací práce s koncepčními modely (v obecné rovině u *KAPITOLY 4*, v praktických aplikacích pak v přílohové části). Přínosem by měl být i podrobnější popis konstrukce obou modelů, z čehož lze odvodit i dílčí přednosti či nedostatky při využití v konkrétní aplikaci.

3.2.1 Model SMAR (*Soil Moisture Accounting and Routing*)

Původní schéma modelu, známého jako „vrstevný model“ [O'CONNELL at al., 1970], je uvedeno na *OBR.3-3* a přibližuje vlastní strukturu řešení. Ta dává do souvislosti proces odtoku z povodí se stavem nasycení půdních vrstev, závislejícím na vývoji meteorologické situace (sycení srážkami, resp. vytváření vláhového deficitu vlivem evapotranspirace). Přitom pomocí nezávislých vnitřních parametrů od sebe odděluje komponenty vodní bilance a odtokového procesu, obojí pak optimalizačními metodami stanovuje.

Struktura modelu zdůrazňuje nelineárnost procesu tvorby vodních bilančních komponent v povodí od linearizované transformace složky přímého a základního odtoku. Parametry modelu se nastavují v **kalibrační fázi** řešení postupným uplatněním třech cyklů optimalizačních procedur - Genetická, Rosenbrockova, Simplexní metoda [MELOUN, 1992; LIANG, 1991], viz *KAPITOLA 3.3*. Metody jsou u nelineárních regresních modelů používány s cílem nalezení lokálních extrémů funkce – v případě modelu SMAR hledání minima objektivní funkce F .

$$F = f(T, H, Y, C, Z, \text{ dále } G, u) = \text{Min.} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2 \quad (3-1)$$

kde T, H, Y, C, Z jsou parametry modelu

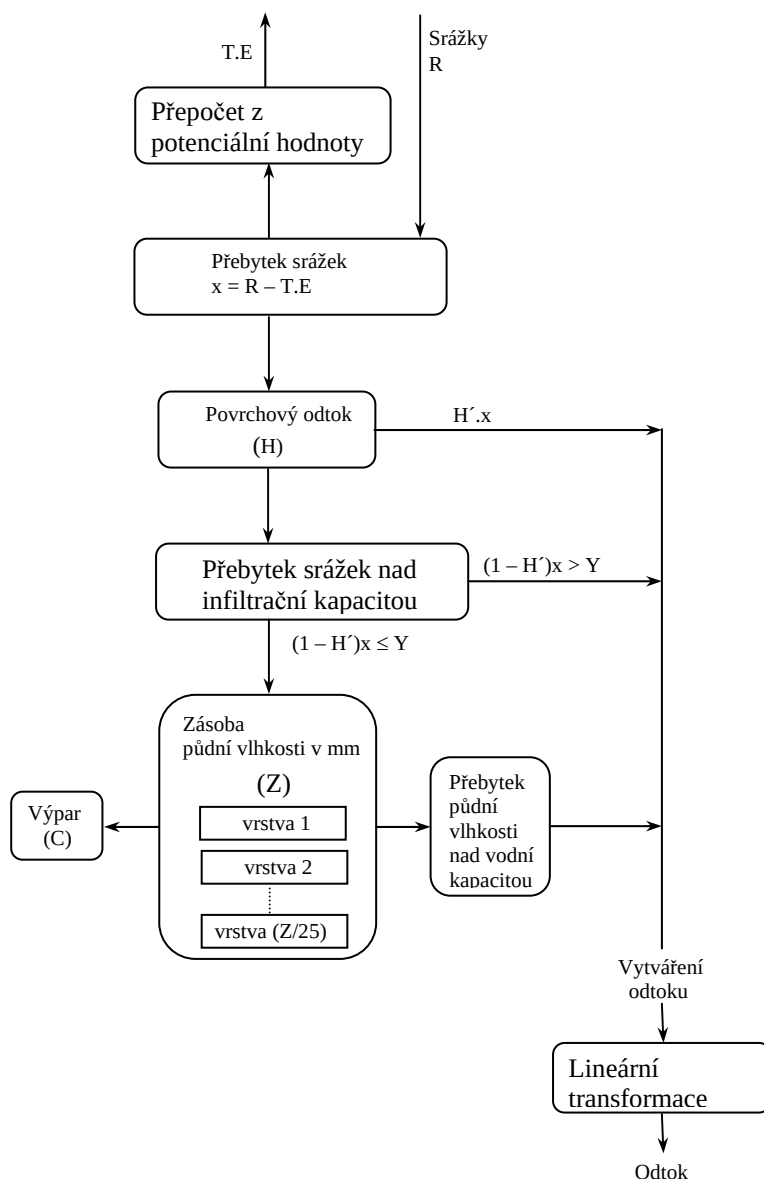
G, u jsou transformační funkce, popisující odezvu hydrologického systému

y_j měřená data průtoku určujícím profilem povodí v j -tém intervalu

$\hat{y}_j$ dtto, data vypočtená modelem s volenými parametry řešení

Model disponuje pěti parametry (T, H, Y, C, Z) bilance složek odtoku ve vrstevném půdním prostředí. Novější verze modelu [KACHROO, 1992] dále řeší podrobněji transformaci

odtoku čtyřmi parametry – G , KG (tvorba základního odtoku); N , NK (vytváření přímého odtoku - odvozeno z teorie jednotkového hydrogramu užitím Gamma funkce podle Nashova postupu). Pro detailnější seznámení se strukturou modelu je připojeno modifikované schéma - OBR.3-4 [KULHAVÝ, 1997]. Metodám odvození jednotkového hydrogramu (JH) je věnován oddíl KAPITOLY 3.3.



Obr. 3-3 Původní schéma modelu SMAR s odvozením základních parametrů

Půdní profil je z důvodů vyjádření hydrologické bilance charakterizován jako **vertikální systém horizontálních vrstev**, z nichž každá je schopna pojmout určité množství vody. Vrstevné prostředí je pak popsáno celkovým zásobním prostorem Z (mm) půdní vlhkosti, získané součtem dílčích upotřebitelných vodních kapacit 25 mm každé z m půdních vrstev (tato charakteristika se přibližuje v našich podmínkách definovanému hydrolimitu „využitelná vodní kapacita“ – VVK, tj. rozdílu „polní vodní kapacity“ a „bodu vadnutí“). Parametr Z , stejně jako další parametry řešení, označované velkými písmeny, je parametrem optimalizovaným.

Z měřených klimatických dat (srážky, výpar z vodní hladiny) je stanovena efektivní hodnota srážky - propad deště vegetačním krytem (ve dnech se srážkou), resp. podíl jednotlivých půdních vrstev na územním výparu (ve dnech bez deště). Optimalizovaný opravný parametr T redukuje měřené potenciální hodnoty výparu.

Ve dnech s výskytem deště je posuzována nasycenost vrchních pěti vrstev půdního prostředí ve vztahu k tvorbě povrchového odtoku:

$$H' = H \cdot (\text{disponibilita vodní kapacity vrstev 1 až 5}) \quad (3-2)$$

$$H' = H \cdot (a / 125) \quad (3-3)$$

kde a je aktuální vodní zásoba (mm) vrchních pěti vrstev.

Z uvedeného vztahu vyplývají závislosti tvorby povrchového odtoku – např. při plném nasycení ($a = 125\text{mm}$) odtéká maximální množství postupující srážky povrchovým odtokem (srážka je redukována hodnotou optimalizovaného parametru H). Významnost bilancované 1. až 5. vrstvy na vývoj povrchového odtoku je analyticky i prakticky prokazatelná [KULHAVÝ, 1999], nižší vrstvy se v modelu účastní při vytváření ostatních složek odtoku, případně při kapilární výměně v období bez srážek.

V dalším kroku je posouzeno množství infiltrující srážky do půdního profilu. Pokud by infiltrační kapacita půdního povrchu byla překročena, vytvořený přebytek se přičítá k povrchovému odtoku, přitom do půdního profilu infiltruje pouze množství, limitované hodnotou Y (mm) – tj. parametrem modelu. Z popisu vyplývá, že **povrchový odtok** je závislý na stupni dosycení svrchních vrstev půdního profilu vodou (dlouhodobá bilance, zahrnující mj. vliv předchozích srážek a režim ET) a na infiltrační schopnosti povrchu. Parametr H přitom koriguje dynamiku výměny vlhkosti v rámci zásobního prostoru půdních vrstev.

Modelem je současně popisován proces evapotranspirace, v závislosti na aktuální vlhkosti půdy. K distribuci podílu vlivu jednotlivých vrstev na evapotranspiraci je využit vztah (viz OBR. 3-4):

$$E_{(i)} = E_p \cdot C^{(i-1)} \quad (3-4)$$

$$E_A = \sum_1^m E_{(i)} \quad (3-5)$$

kde $E_{(i)}$ je evapotranspirace v i -tém dni (mm)

E_p denní úhrn potenciální evapotranspirace v (mm)

C distribuční koeficient podle TAB.3-1 (-), definovaný modelem

E_A denní úhrn aktuální evapotranspirace v (mm)

Mezi vrstvami dochází k vertikální výměně kapilárním zdvihem a tyto změny jsou bilancovány v rámci zvoleného výpočtového kroku (např. 1 den).

V případě výskytu srážky se zvyšují zásoby půdní vody až do maximální kapacity jednotlivých vrstev. Hypodermický odtok, jako složka r_3 přímého odtoku, je odvozen ze základního odtoku, jehož tvorbu popisují parametry G , KG . K transformaci přímého odtoku je využita metoda jednotkového hydrogramu. Tvar hydrogramu je popsán s uplatněním Gamma funkce, jejíž parametry (N , NK) jsou odvozeny optimalizačními postupy v průběhu kalibrace.

Přehled použitých parametrů řešení modelem SMAR uvádí následující tabulka:

Parametr	Popis	Jednotky	Obor platnosti
T	Modul opravy potenciálního výparu	-	0,0-1,0
H	Modul složky povrchového odtoku	-	0,0-1,0
Y	Půdní infiltrační kapacita	mm.čas ⁻¹	reálný
Z	Celková maximální vodní zásoba půdního profilu	mm	reálný
C	Distribuční koeficient úhrnného výparu	-	0,0-1,0
G	Transformace základního odtoku	-	0,0-1,0
KG		čas	reálný
N	Transformace přímého odtoku (parametry Γ funkce)	-	0,0-34,8
NK		čas	reálný

Poznámka: 'čas' ve sloupci Jednotek - reprezentuje délku časového kroku (obvykle 1 den)
'reálný' ve sloupci Obor platnosti – nabývá reálných hodnot v rámci definice proměnné

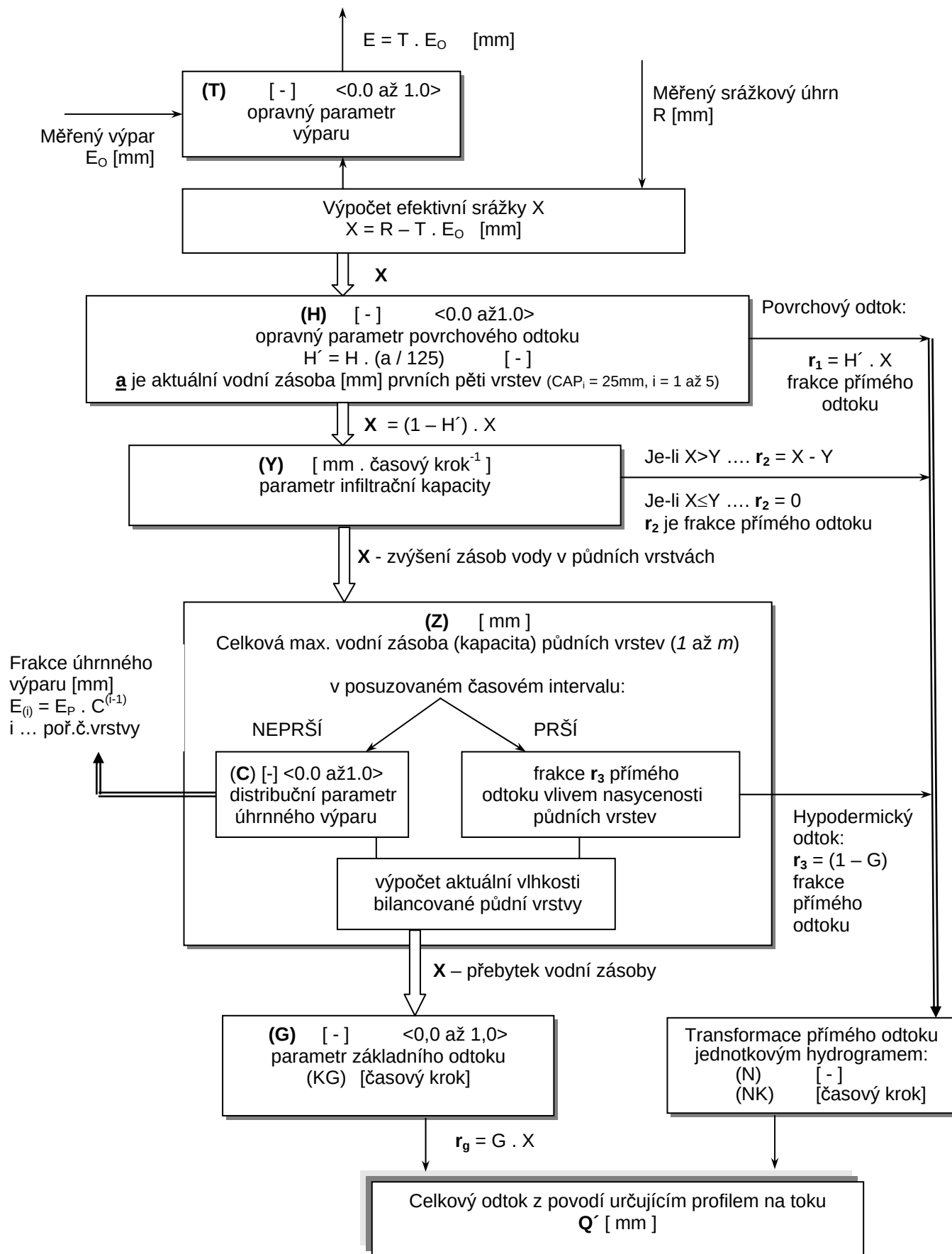
Tab. 3-1 Popis parametrů modelu SMAR

Je třeba uvést, že vstupními daty jsou v originále data A-Pan výparoměru. V našich podmínkách bylo uspokojivých výsledků dosaženo přímým použitím hodnot, naměřených výparoměrem GGI 2000, nebo jednotným použitím vypočtených dat ET_p některou ze standardních metod (v závislosti na dostupnosti dat). Implicitně jsou hodnoty korigovány podle charakteru použitých dat parametrem T .

Vlastní uplatnění modelu se řídí zpravidla následujícími pracovními fázemi, které jsou obecné a jsou jim věnovány příslušné kapitoly metodiky:

- kalibrace modelu, kdy jsou optimalizačními postupy hledány nejvěrohodnější kombinace parametrů řešení pro konkrétní časové úseky se známým vývojem srážko-odtokového procesu (k dispozici jsou měřená data, především průtoky v uzavřovém profilu povodí);
- verifikace nalezeného řešení na podobném (někdy navazujícím) časovém úseku, kdy je bez korekce parametrů modelu testována shoda měřených a odvozených (modelem simulovaných) průtokových řad;
- použití nastaveného (kalibrovaného) modelu pro analytické práce při kvantitativním popisu procesu odtoku ve volených podmínkách (interpolace, extrapolace, separace bilančních komponent hydrologického procesu v povodí atd.).

Standardní použití modelu je modifikováno pro různé účely využití rozšiřujícími moduly (např. generátor počasí, submodel klasifikace vlivu zemědělského hospodaření apod.) [KULHAVÝ, 1998, 1999].



Obr. 3-4 Rozšířené schéma jádra modelu SMAR s komentářem výpočtového postupu

3.2.2 MODEL WBCM (Water Balance Conceptual Model)

Model WBCM [KOVÁŘ, 1994] je deterministický, patří do kategorie modelů koncepčních, celistvých (lumped) a nelineárních s pravděpodobnostně rozdělenými parametry po ploše modelovaného povodí tak, aby mohla být zachována jejich plošná variabilita. Každý kapacitní element modelu reprezentuje přirozenou zásobu vody v jednotlivých vertikálních subsystémech hydrologického profilu. Verze WBCM-5, použitá v předložené metodice, byla koncipována pro simulaci denních bilančních hodnot ve vegetačním období. Model uvažuje všechny podstatné interakce mezi jednotlivými zónami (tj. vegetační zónu, nenasycenou a nasycenou zónu). Struktura modelu respektuje fyzikální principy, podle nichž dochází k interaktivním hydrologickým procesům. Cílem modelu je zejména simulace dynamiky půdní vlhkosti v aktivní a nenasycené zóně, územního výparu a denních odtoků. Změny zásob podzemních vod jsou simulovány pouze koncepčně, zvláště pak s ohledem na tvorbu základního odtoku.

Řešené procesy:

- potenciální evapotranspirace
- interceptce
- tvorba povrchového odtoku a jeho transformace
- dynamika aktivní zóny
- dynamika nenasycené zóny a skutečná evapotranspirace
- dynamika nasycené zóny, základní odtok, celkový odtok

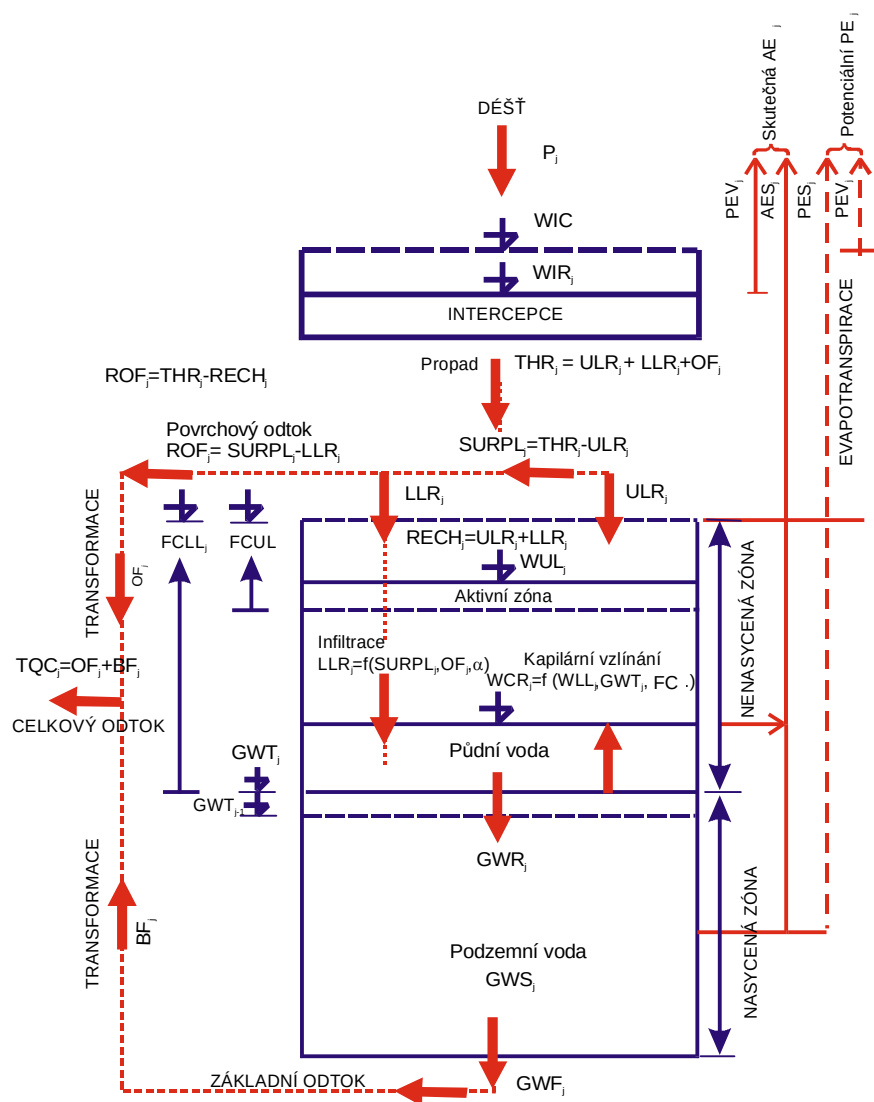
Struktura modelu je patrná na schématu OBR.3-5.

Jednotlivé parametry modelu **WBCM-5** mají následující fyzikální význam:

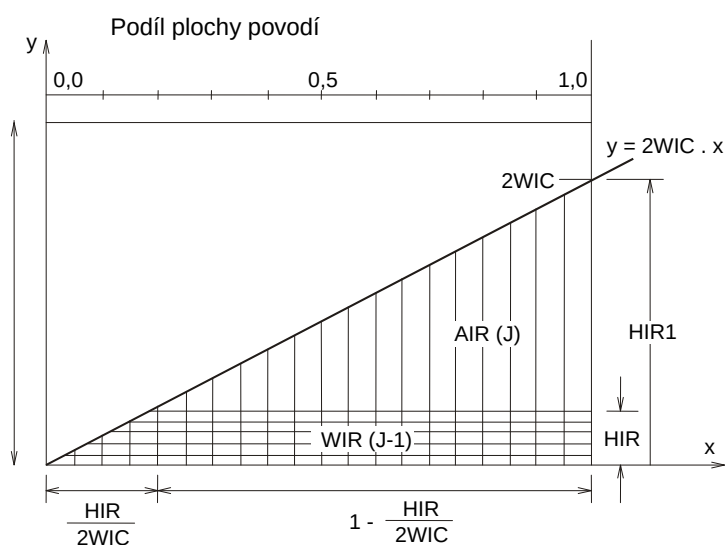
AREA	plocha povodí (km ²)
FC	parametr charakterizující „průměrnou“ hodnotu <i>PoVK</i> (retenční vodní kapacitu) nenasycené zóny (-)
POR	parametr charakterizující „průměrnou“ hodnotu pórovitosti nenasycené zóny
DROT	průměrná tloušťka aktivní zóny (mm)
WIC	horní limit kapacity interceptce (mm)
ALPHA(α)	parametr „nonlinearity“ syčení nenasycené zóny (-)
SMAX	parametr reprezentující maximální kapacitu nenasycené zóny (mm)
GWM	parametr reprezentující potenciální kapacitu zvodně (mm)
CN	číslo odtokové křivky (-)
P1, P2, P7	parametry ovlivňující dynamiku nenasycené zóny (-)
BK	parametr transformace základního odtoku (den)

Pro řešení denních hodnot **potenciální evapotranspirace** *PE(J)* byla algoritmizována adaptovaná metoda Penmana, dále Priestley-Taylorova metoda a postup dle Hamona. Aplikační výběr každé z těchto metod závisí na dostupnosti vstupních meteorologických dat. Denní hodnoty nasycených vodních par (při dané teplotě) a Bowenův poměr je řešen analyticky Goff-Gratchovými rovnicemi.

Modelová jednotka, řešící **intercepční proces** je založena na předpokladu simulování intercepční schopnosti vegetačního krytu povodí parametrem, jenž vyjadřuje průměrnou interceptci povodí. Předpokládá se též lineární rozdělení lokálních interceptcí kolem této průměrné hodnoty po ploše povodí. Vstupem do této jednotky je dešť, výstupem propad deště, výška interceptce a část výparu vody zachycené vegetací. Parametr potenciální (tj. maximálně dosažitelné) interceptce *WIC* je lineárně rozdělen po povodí (od nulové hodnoty až do dvojnásobku *WIC*), jak je patrné ze schématu.



Obr. 3-5 Koncept modelu WBCM-5



Obr. 3-6 Lineární rozdělení kapacity intercepce

P_j	výška deště (mm . den ⁻¹)	OF_j	transformovaný přímý odtok (mm.den ⁻¹)
PE_j	potenciální evapotranspirace (mm.den ⁻¹)	WUL_j	obsah vody v aktivní zóně (mm)
PEV_j	evapotranspirace vody zachycené intercepčí (mm.den ⁻¹)	$FCUL_j$	průměrná retenční kapacita aktivní zóny (mm)
PES_j	potenciální evapotranspirace z půdy (mm.den ⁻¹)	WLL_j	obsah vody v celé nenasycené zóně (mm)
AES_j	skutečná evapotranspirace (mm.den ⁻¹)	$FCLL_j$	průměrná retenční vodní kapacita nenasycené zóny (mm)
THR_j	propad deště vegetačním krytem (mm.den ⁻¹)	GWR_j	přírůstek objemu podzemní vody (mm.den ⁻¹)
$SURPL_j$	povrchová retence (mm.den ⁻¹)	GWS_j	akumulace podzemní vody (mm)
ULR_j	voda zadržaná vrchní zónou a voda zadržaná v mikrodepresích (mm.den ⁻¹)	GWT_j	hladina podzemní vody pod úrovní terénu v měřeném reprezentačním profilu (cm)
LLR_j	voda infiltrující během retenční fáze (mm.den ⁻¹)	WCR_j	kapilární doplňování nenasycené zóny ze zásob podzemní vody (mm.den ⁻¹)
$RECH_j$	velikost infiltrace (mm.den ⁻¹)	BF_j	základní odtok (mm.den ⁻¹)
ROF_j	výška přímého odtoku (mm.den ⁻¹)	TQC_j	celkový odtok (mm.den ⁻¹)

Tab. 3-2 Popis symbolů podle Obr.3-5 modelu WBCM

Proces tvorby **povrchového odtoku** je řešen upravenou U. S. Soil Conservation Service metodou. Potřebné parametry, zahrnující vliv fyziografických charakteristik a odtokové vlastnosti reliéfu aktivní zóny jsou hodnoceny číslem odtokové křivky CN (mohou být též získávány automatickou optimalizací).

Povrchový odtok $ROF(J)$ (U.S. Metoda odtokových křivek)

$$\frac{THR(J) - ROF(J)}{A(J)} = \frac{ROF(J)}{THR(J)} \quad (3-6)$$

$$A(J) = 25,4 [1000 / (CN - 10)] \quad (3-7)$$

Hodnota CN závisí na skupině půd, zastoupení kultur, způsobu hospodaření a předchozím nasycením povodí srážkami. U malých povodí (řádově do 20-30km²) vzhledem k $\Delta t = 1$ den obvykle stačí $ROF(J) = OF(J)$ a není třeba transformovat povrchový odtok. Z větších povodí je žádoucí provést alespoň lineární transformaci typu:

$OF(J) = ROF(J) \cdot (e - 1)^{\frac{1}{K}} + OF(J - 1) \cdot e^{-\frac{1}{K}}$, kde K je součinitel lineární transformace, zjistitelný analýzou měřených hydrogramů.

Řešení dynamiky **nenasycené zóny** (tj. její sycení a čerpání) záleží především na výšce propadu deště, deficitu půdní vlhkosti této zóny, potenciální evapotranspiraci a parametrech, vyjadřujících její nehomogenitu. Vstupem do této zóny je infiltrační podíl (po odečtení přímého odtoku), výstupem přítok do nasycené zóny, část skutečné evapotranspirace z této zóny a přírůstek její vlhkosti.

Sycení **aktivní zóny povodí** (tj. vrchní vrstvy nenasycené zóny tl. 0.3 – 0.6 m, která nejvíce kvantitativně ovlivňuje tvorbu povrchového odtoku) může být popsáno Richardsovou jednorozměrnou rovnicí pro vertikální půdní profil:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial H}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (3-8)$$

v diferenčním tvaru:

$$\theta_{i+1,n} = \theta_{i,n} + \frac{q_{i,n-1} - q_{i,n}}{\Delta z} - \frac{AE_{i,n}}{\Delta z} \quad (3-9)$$

$$q_{i+1,n} = K(\theta)_{i,n+\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{H_{i,n+1} - H_{i,n}}{\Delta z} + 1 \right) \quad (3-10)$$

kde θ vlhkost půdy (-)
 H tlaková výška (m)
 t časová souřadnice (s)
 z pořadnice hloubky syčení (m)
 $K(\theta)$ součinitel nenasycené hydraulické vodivosti ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
 q přítok do půdní vrstvy ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
 AE aktuální evapotranspirace ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Složitý proces absorpce zóny pro výpočet dynamiky její vlhkosti, a tím i řešení územního výparu je popsán rekursivními vztahy, respektujícími plošnou proměnlivost lokálních hodnot parametrů POR a FC , vyjadřujících průměrnou pórovitost a retenční vodní kapacitu aktivní zóny.

Platnost lokálních parametrů procesu je nutno rozšířit respektováním jejich proměnlivosti po ploše většinou lineárně, kolem jejich průměrných hodnot. Proces “plnění” této aktivní zóny závisí tedy především na stupni jejího nasycení, tzn. podílu vlhkosti $WUL(J)$ na maximální udržitelné vlhkosti (retenční vodní kapacitě) $FCUL$. Tento podíl $WUL(J) / FCUL$ je limitujícím, nicméně model dále respektuje heterogenitu lokálních hodnot $FCUL$ po ploše povodí tak, že předpokládá jejich lineární rozdělení od nulové hodnoty do dvojnásobku hodnoty průměrně $FCUL$. Obdobně i pro funkci “vyčerpávání”, tj. pro územní výpar, je tato koncepce akceptována s tím, že podíl aktuálního a potenciálního výparu se řídí hydropedologickými zákonitostmi, v modelu vyjadřovanými parametry ($P1, P2, P7$). Řešení procesu “syčení” a “čerpání” celé nenasycené zóny je založeno na obdobném principu jako řešení aktivní zóny, jež je její součástí. Vzhledem k prostorové nestejnorodosti nenasycené zóny je do řešení zaveden parametr, vyjadřující heterogenitu prostředí (parametr $ALPHA$). Procesy jsou obdobně řízeny podílem nasycení, tj. poměrem vlhkosti $WLL(J)$ a retenční vodní kapacity $FCLL(J)$: $WLL(J) / FCLL(J)$. Je-li půdní vlhkost aktivní zóny $WUL(J)$, potom je bilančním vstupem do aktivní zóny $RUL(J)$:

$$RUL(J) = THR(J) - OF(J) - PES(J) \quad (3-11)$$

a deficit její vlhkosti:

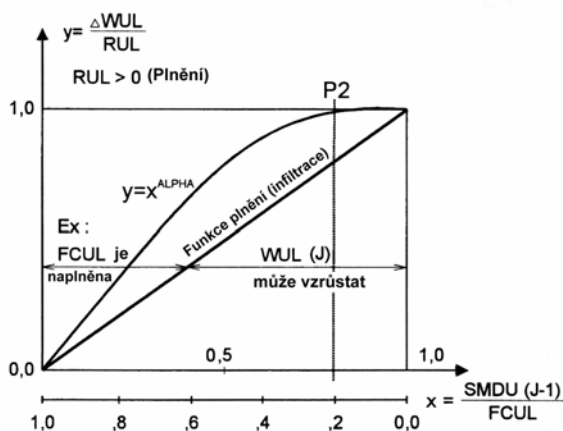
$$SMDU(J) = FCUL(J) - WUL(J) \quad (3-12)$$

Jestliže **$RUL(J) > 0$ (Syčení):**

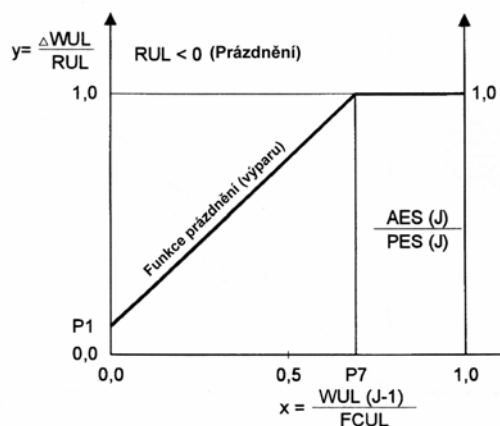
Lineární nebo nelineární rozdělení lokálních hodnot retenční vodní kapacity kolem jejich průměrné hodnoty $FCUL$ na povodí. Křivka rozdělení definuje část povodí na kterém je již průměrné hodnoty $FCUL$ dosaženo, kde přebytek vody infiltruje do hlubších vrstev a zbývajících povodí, kde je další syčení aktivní zóny možné.

Jestliže $RUL(J) < 0$ (Čerpání):

Funkce čerpání je přímková pro aktivní zónu, parabolická (ALPHA) pro celkovou nenasycenou zónu.



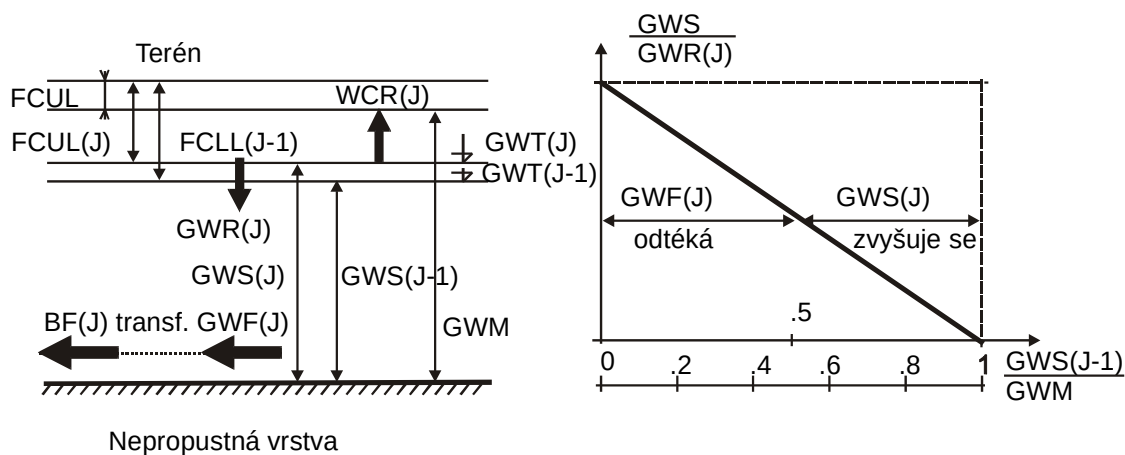
Obr. 3-7 Plocha povodí s aktivní zónou naplněnou po FCUL



Obr. 3-8 Čerpání (výpar) aktivní zóny

Nasycená zóna WBCM-5 je řešena pouze rámcově tak, aby poskytovala mechanismus vytváření základního odtoku bez bilancování zásob podzemní vody (při absenci pozorovaných dat). Vstupem do ní je hluboká infiltrace (perkolace), která je výstupem z nenasycené zóny. Maximální akumulace nasycené oblasti je vyjádřena parametrem GWM , vyjadřujícím maximální nasycení zvodně.

Průběžná akumulace je doplňována perkolačním přítokem, prázdňena případným kapilárním vztlínáním a základním odtokem. Pro řešení průběžné **akumulace zvodně** bylo použito lineární pravděpodobnostní rozdělení kapacity zvodně v povodí tak, aby byla opět respektována její nehomogenita. Po výpočtu bilančních složek nenasycené zóny je modelem řešena skutečná evapotranspirace redukcí jejich potenciálních hodnot se zohledněním vlhkosti půdy v této zóně. Proces **transformace základního odtoku** je řešen alternativně buď lineárně, nebo nelineárně. Celkový odtok je získán superpozicí přímého základního odtoku (viz schéma).



Obr. 3-9 Dynamika nasycené zóny Obr. 3-10 Relativní plocha s nasycenou zónou GWM

Parametry *SMAX*, *GWM* a *BK* se optimalizují dle pozorovaných dat denních (nebo dekádních) odtoků. Objemovou shodu složek bilance zabezpečuje sledování kontinuity dle bilanční rovnice:

$$SRAIN = AE + STF + (\Delta WP + \Delta WZ) \quad (3-13)$$

$$SRAIN = AE + STF + \Delta W \quad (3-14)$$

kde	<i>SRAIN</i>	výška srážek (mm)
	<i>STF</i>	výška celkového odtoku (mm)
	<i>AE</i>	skutečný (aktuální) územní výpar (mm)
	ΔWP	změna vlhkosti nenasycené zóny (mm)
	ΔWZ	změna objemu nenasycené zóny (mm)
	ΔW	(tj. dotace podpovrchových vod)

Pro automatickou optimalizaci parametrů modelu byla použita metoda Rosenbrockova, umožňující vyhledávání lokálních minim objektivní funkce (viz *KAPITOLA 3.3*). Absolutní minimum objektivní funkce je dáno nulovou hodnotou součtu čtverců odchylek měřených a vypočtených kritériálních proměnných. Jako kritériální proměnné byly v modelu použity buď denní odtoky, nebo hladiny podzemní vody.

Potřeba dat pro implementaci modelu WBCM - 5

Základní údaje: datum začátku bilancování, předchozí denní srážky aspoň 30 dnů před bilančním obdobím (je potřeba pro stanovení počáteční vlhkosti aktivní zóny).

Charakteristiky povodí: plocha povodí, sklon toku, zastoupení kultur a plodin, klasifikace půd dle BPEJ pro stanovení hydrologických skupin půd A, B, C, D pro finální stanovení křivek CN.

Hydrofyzikální vlastnosti půd: celkové pórovitosti charakteristických lokalit (meze), jejich retenční vodní kapacity (meze), zrnitostní kategorie pro stanovení kapacitních transformačních parametrů. Základní hydrogeologický průzkum klasifikující parametry zvodně: koeficient nasycené hydraulické vodivosti (koeficient filtrace) a transmisivita, příp. mocnost zvodně.

Denní výšky srážek a denní hodnoty klimatických dat pro výpočet potenciální evapotranspirace: teploty, radiace, relativní vlhkost vzduchu, rychlost větru (min. rozsah), nebo denní hodnoty výparu z volné vodní hladiny.

Denní nebo dekádní odtokové výšky v uzávěrovém profilu povodí, případně kolísání **hladin podzemních vod** v charakteristickém profilu dolní inundace.

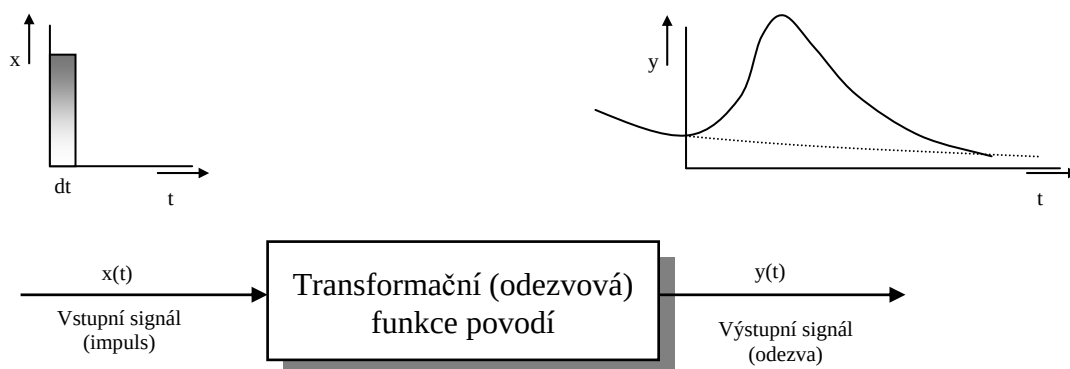
3.3 Související metody (*užité koncepčními modely*)

Využití teorie jednotkového hydrogramu (JH) ve srážko-odtokových modelech

Jedná se o metodu rozšířenou v různých modifikacích, jenž je základem řady hydrologických postupů a metod určování povodňového odtoku. Teoretickým principům i numerickému rozpracování je v zahraničí věnováno množství prací [SHERMAN, 1932; SNYDER, 1938; LIANG, 1991], v naší literatuře lze odkázat vedle základních učebnic hydrologie např. na publikaci VÚV [BLAŽKOVÁ, 1993].

Teorie JH byla základem jednodušších typů **kybernetických modelů**, které popisovaly tvorbu odtoku z povodí výhradně z hlediska chování systému. V takové podobě se nezajímaly

o strukturu systému, čímž ignorovaly vývoj a změny stavových veličin. I v novějších verzích hydrologických modelů může být principu JH využito k odvození hydrogramu a stanovení pořadnic přímého odtoku (příkladem je model SMAR). Potom bývá lineární teorie JH dílčí částí komplexnějšího modelu, v tomto případě kombinovaného typu, řešícího nelineární procesy tvorby odtoku z povodí. Jednotkový hydrogram vyjadřuje odezvu povodí na efektivní dešť jednotkového objemu.



Obr. 3-11 Vyjádření transformační funkce povodí systémovým přístupem tzv. „black box“

Teorie JH předpokládá lineární chování systému:

- "*princip linearity*" V daném povodí jsou průtoky lineárně úměrné výšce efektivního deště pro všechny efektivní deště stejného trvání.
- "*princip superpozice*" Průtoky způsobené po sobě následujícími dešti mohou být vypočteny sečtením průtoků, vyvolanými jednotlivými dešti, s uvažováním časů jejich výskytu.
- V daném povodí je trvání průtokových vln, vyvolaných efektivními dešti stejného trvání vždy stejné, bez ohledu na intenzitu deště.

Po základních operacích - redukci srážkových úhrnů na objem efektivního deště a po vyčlenění (separaci) složky přímého odtoku z odtoku celkového, jsou vytvořeny podmínky k popisu odezвовé transformační funkce povodí. Jedná se o tzv. kalibraci systému.

V praxi se často vyskytují složité kombinace příčinných dešťů a odezвовých vln, existuje pak řada analytických i numerických postupů, které po zavedení kritérií o fyzikální podstatě transformační funkce, umožňují nalézt řešení.

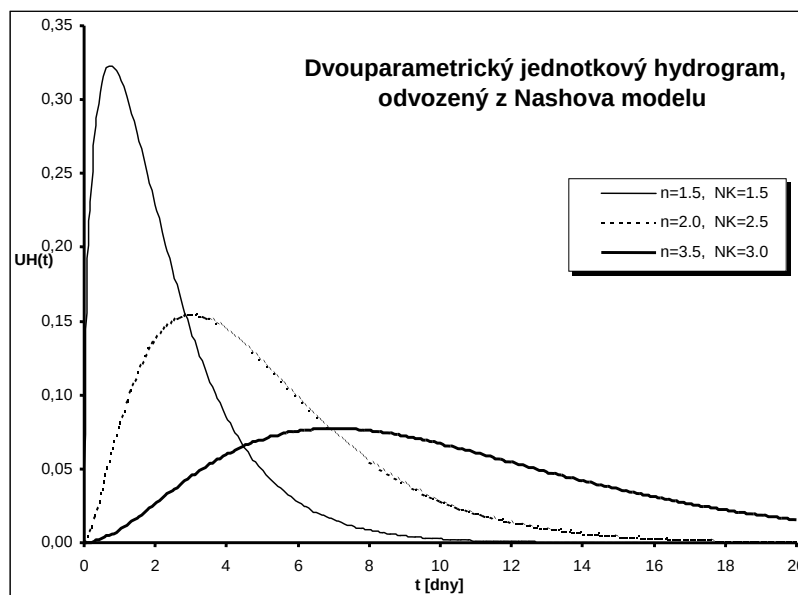
V modelu SMAR je použit tzv. **Nashův model**, formulován s užitím funkce Γ , umožňující realizovat řešení i pro necelé číslo n počtu nádrží v kaskádě:

$$h(t) = \frac{1}{NK \cdot \Gamma(n)} \left(\frac{t}{NK} \right)^{n-1} e^{-t/NK} \quad (3-15)$$

kde NK je transformační parametr (t) – viz TAB.3-1
 $\Gamma(n)$ je Gamma funkce, definovaná integrálem:

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{n-1} dx \quad (3-16)$$

Příklady JH pro různé hodnoty parametrů n , NK uvádí OBR.3-12.



Obr. 3-12 Příklady tvarů JH, odvozených volbou parametrů n , NK .
Vyjádření rychlosti odezvy povodí (systému).

Metoda čísel odtokových křivek (CN)

Jednou z metod, řešících problematiku přímého odtoku z významných dešťů na povodí bez limnigrafického měření, je metoda čísla odtokových křivek (Curve Number Method, dále CN), vyvinutá americkou Službou ochrany půdy (U.S. Soil Conservation Service) a v současné době rozšířená v hydrologické praxi v celosvětovém měřítku. Četná odborná literatura [U.S. SCS, 1972, 1986, 1992], [HAWKINS, 1979], [JANEČEK a kol., 1983, 1992] uvádí podmínky a metodiku jejího použití. Metoda je oblíbena pro svou jednoduchost a dostupnost vstupních údajů. Její využití je doporučováno zejména na malých povodích do plochy cca 10 km² [U.S. SCS, 1986], jsou však známy i přijatelné výsledky její aplikace na povodích větších [HJELMFELT, 1991].

Princip metody je založen na hypotéze lineárního vztahu poměru skutečného a maximálně možného (potenciálního) **rozdílu** výšky srážky H_s a výšky přímého odtoku z ní H_o a poměru **hodnot** tohoto odtoku ke srážce:

$$\frac{H_s - H_o}{A} = \frac{H_o}{H_s} \quad (3-17)$$

kde H_s výška srážky (mm)
 H_o výška přímého odtoku (mm)
 A potenciální retence aktivní zóny povodí (mm) po úpravě:

$$H_o = \frac{H_s^2}{H_s + A} \quad (3-18)$$

Po zavedení počáteční ztráty R_I dle metodiky CN, 20% A , je základní rovnice upravena:

$$H_o = \frac{(H_s - R_I)^2}{H_s - R_I + A} = \frac{(H_s - 0,2A)^2}{H_s + 0,8A}, \quad \text{jestliže } H_s \geq 0,2A \quad (3-19)$$

Tuto základní hypotézu CN metody je nutno doplnit bilanční rovnicí:

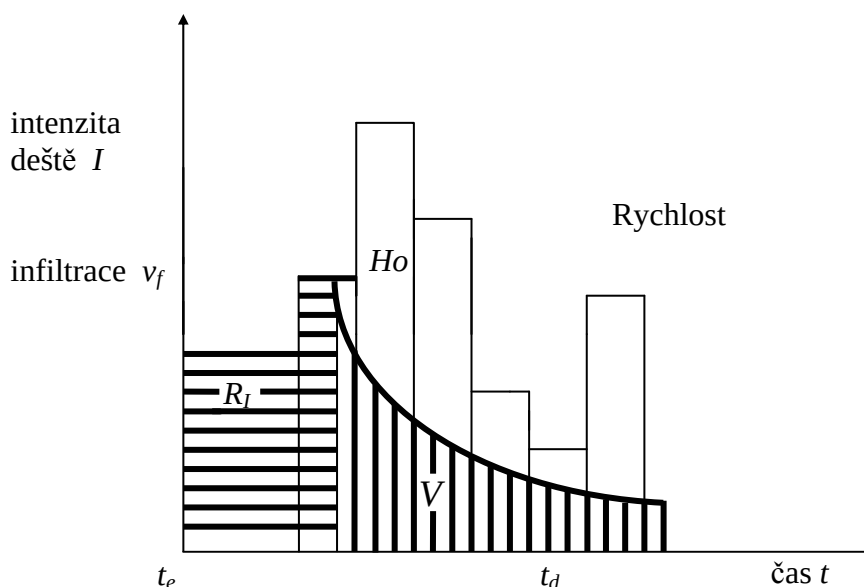
$$H_s = R_I + V + H_o \quad (3-20)$$

kde R_I je počáteční ztráta v bezodtokové fázi, která je součtem ztrát intercepce, počáteční absorpce povrchu půdy, akumulace v mikropodtlacích a infiltrace před začátkem přímého odtoku, V je kumulativní infiltrace (po odečtení R_I). Princip je ilustrován na Obr.3-13.

$$H_s = H_o + R_I + V \quad (3-21)$$

$$\frac{V}{S} = \frac{H_o}{H_s - R_I} \quad (3-22)$$

$$V = H_s - H_o - R_I \quad (3-23)$$



Obr. 3-13 Principy metody SCS (CN)

Potenciální retence A se určí výpočtem z čísla křivky $CN < 0, 100 >$:

$$A = (25\,400 / CN) - 254 \quad (3-24)$$

Hodnota parametru CN je potom:

$$CN = \frac{25400}{A + 254} \quad (3-25)$$

Řešíme-li r. (3-17) tak, abychom vyjádřili A , dostáváme:

$$A = 5H_s + 10H_o - 5H_o\sqrt{5H_s / H_o + 4} \quad (3-26)$$

Rovnici (3-26) lze úspěšně využívat v případě známého hyetogramu a jemu odpovídajícího hydrogramu k určení velikosti potenciální retence A za účelem rekonstrukce epizody.

Pro stanovení hodnot CN dle metodik U. S. SCS (nebo např. [JANEČEK 1983,1992]) je nutno vyhodnotit:

- Zastoupení **hydrologických skupin půd** buď podle údajů součinitele nasycené hydraulické vodivosti K_s , nebo map BPEJ:
 - A. Propustné půdy, především písčité půdy, velká zrnitost, $K_s > 1,1 \text{ m.den}^{-1}$
 - B. Půdy se střední schopností vsaku i při plném sycení, převážně písčito-hlinité a hlinito-písčité, střední zrnitost; $0,45 < K_s < 1,1 \text{ m.den}^{-1}$
 - C. Půdy s malou schopností vsaku, hlinité půdy, jílovito-hlinité až jílovité půdy, jemná zrnitost; $0,24 < K_s < 0,45 \text{ m.den}^{-1}$
 - D. Půdy s velmi malou schopností vsaku, zahrnující hlavně jíly, půdy s trvale vysokou hladinou podzemní vody, nebo mělké půdy na téměř nepropustném podloží, velmi jemná zrnitost; $K_s < 0,24 \text{ m.den}^{-1}$
- Vliv **povrchu povodí**, tj. zastoupení vegetace a způsobu hospodaření na povodí (land use: orná půda, TTP, lesy, intravilán, atd.)
- **Předchozí vláhové poměry (PVP)**, určené součtem srážek za předchozích 5 dnů před přívalovým deštěm. Hodnota potenciální retence A se mění v závislosti na jejím předchozím nasycení. Podle toho se rozeznávají 3 základní kategorie:

<i>PVP (II)</i>	vlhkostní podmínky kolem retenční vodní kapacity aktivní zóny
<i>PVP (I), PVP (III)</i>	sušší a vlhčí podmínky

Výsledná hodnota CN je dána váženým průměrem jednotlivých lokalit a dle předchozích vláhových poměrů se mění ze dne na den. Tyto kontinuální změny je možno vyjádřit sezónní potenciální retencí $AS(J)$:

$$AS(J) = 1,3A(J) \frac{(\sin(JD - 5 + 180) + 1)}{2} + 0,1A(J) \quad (3-27)$$

kde JD je pořadové číslo dne v roce:

$$JD = 30 (\text{číslo měsíce} - 1) + \text{číslo dne} \quad (3-28)$$

Průběh sezónních hodnot potenciální retence aktivní zóny $AS(J)$ je závislý na průběhu její vlhkosti v roce a je zde aproximován sinusoidou.

Další vývoj metody CN vedl ke zjištění korelačních vztahů mezi hodnotami CN a fyzikálními parametry půd, zejména nasycené hydraulické vodivosti K_s a sorptivity při retenční vodní kapacitě S ($PoVK$), případně retenčního součinitele sacího tlaku S_f [KOVÁŘ, 1994]:

$$CN = f_1(K_s), CN = f_2(S_f) \quad (3-29)$$

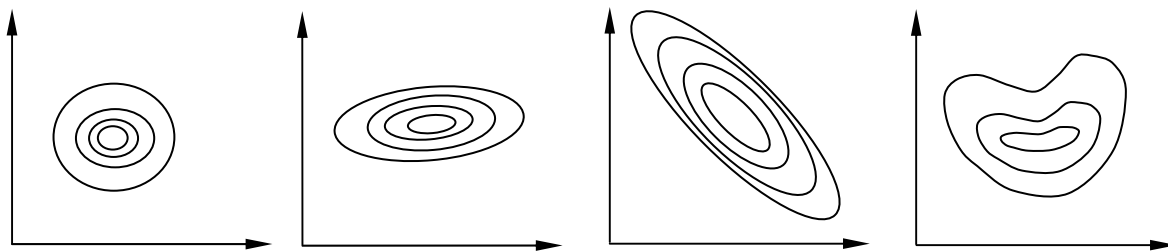
Tyto vztahy se úspěšně aplikují při implementaci srážko-odtokových modelů (např. KINFIL).

Nederivační multiparametrické optimalizační postupy

Využití numerických modelů uvedeného typu předpokládá nejen vyhodnocení shody mezi měřeními a modelem vypočtenými výstupními údaji, ale zejména stanovení optimálních hodnot parametrů, toto kritérium splňujících. Optimalizační techniky se proto využívají k hledání hodnot parametrů (nezávislých proměnných), které poskytují **extrémní hodnoty** objektivní funkce modelu (v daných případech minimum funkce F). Jedná se o metody teoreticky propracované, nicméně ve složitých, přitom v praxi častých případech, je stanovení extrému funkce složité a ne vždy je vhodné použít automatických postupů.

Nejprve je třeba stanovit **limitní hodnoty** jednotlivých parametrů – a tím zajistit fyzikální reprezentativnost hledaného řešení. Při stanovení těchto limit je třeba využít veškerých relevantních dostupných podkladů - např. odvozením z výsledků měření, využitím metod analogií, nebo korekcemi vypočtených hodnot porovnáním s fyzikálními zákonitostmi popisovaného jevu.

V dalším kroku je účelné popsat (zmapovat) přibližný tvar objektivní funkce a posoudit její citlivost na změnu jednotlivých parametrů modelu. Tyto operace mohou být vynechány v případech popisu povodí v minulosti posuzovaného, nebo při nalezení analogických vztahů s povodím jiným.

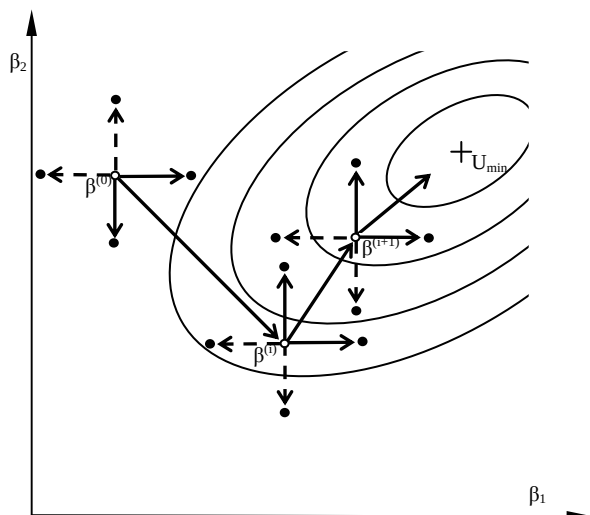


Obr. 3-14 Příklady dvoudimenzionálních objektivních funkcí

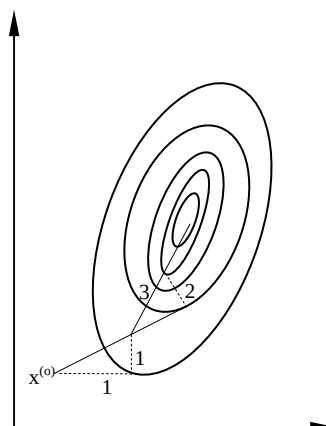
Automatické, samostatně použité optimalizační metody vyhovují lépe v případech jednoduchých topografických tvarů vyšetřované funkce, jaké jsou uvedeny např. na **OBR.3-14**. Ve složitějších případech se používá **posloupnost několika vyhledávacích metod** od přibližných ke zpřesňujícím. V případě výskytu několika lokálních extrémů poblíž sebe nemusí být ani takový postup úspěšný. Následující část kapitoly podává základní informace o optimalizačních procedurách, využívaných modely SMAR a WBCM. V případě Rosenbrockovy a Simplexní metody se jedná o nástroje standardní. Jedná se o nederivační optimalizační postupy, které využívají pouze informace o tvaru objektivní funkce F . Tyto informace jsou získávány vhodným „mapováním“ prostoru odhadů. Pohyb směrem k extrému se děje podle řady různých heuristických pravidel. V praxi jsou oblíbené pro svoji jednoduchost. Nevýhodou bývá, že buď konvergují velmi pomalu, zvláště v blízkosti optima, nebo obtížně zvládají komplikovanější tvary objektivní funkce – např. v případě tvaru zakřivené úzké rokle (podlouhlé topologické deprese) předčasně ukončují svou činnost.

Mezi nejnázornější patří **metody přímého hledání** (např. ordinátní), na principu krokových posunů ve směru jednotlivých souřadnicových os a hledání zlepšeného odhadu. Schematicky je postup znázorněn na **OBR.3-15** ve dvouparametrickém prostoru.

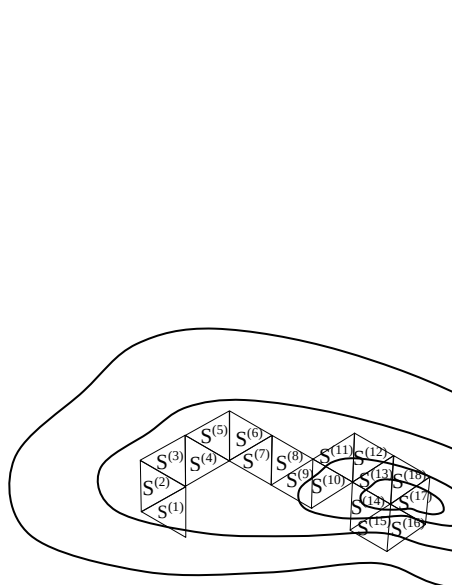
Rosenbrockova metoda provádí místo krokového hledání rotaci souřadného systému tak, aby jedna osa splynula se směrem následujícího posunu. V dalším cyklu se provádí koordinátní hledání v novém souřadném systému. Metoda pracuje dobře i v úzkých zakřivených roklích. Pro dvourozměrnou funkci je postup znázorněn v **OBR.3-16**.



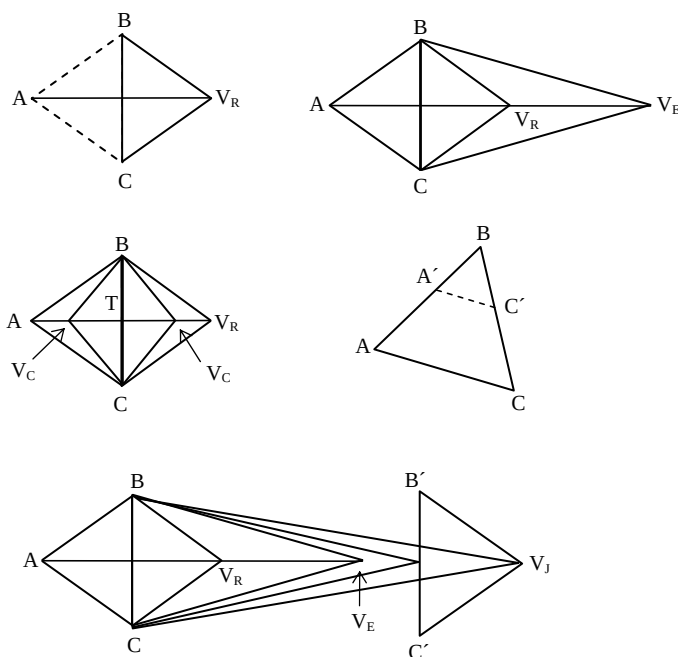
Obr. 3-15 Postup koordinátního hledání (čárkované jsou znázorněny neúspěšné směry)



Obr. 3-16 Rosenbrockova metoda hledání extrému funkce (dvouparametrické pole)



Obr. 3-17 Simplexní metoda dvouparametrické optimalizace



Obr. 3-18 Základní operace simplexu: reflexe, expanze, kontrakce, redukce a přenesení

V praxi nejužívanější bývají **simplexové metody**, vycházející z postupného vytváření adaptivních polyedrů (simplexů) v m -rozměrném prostoru ($m = 2 \gg$ trojúhelník, $m = 3 \gg$ jehlan). Je universální pro technické a statistické aplikace, snadno se programuje. Vychází z počátečního odhadu. Směr k minimu bude na spojnici mezi vrcholem, kterému přísluší

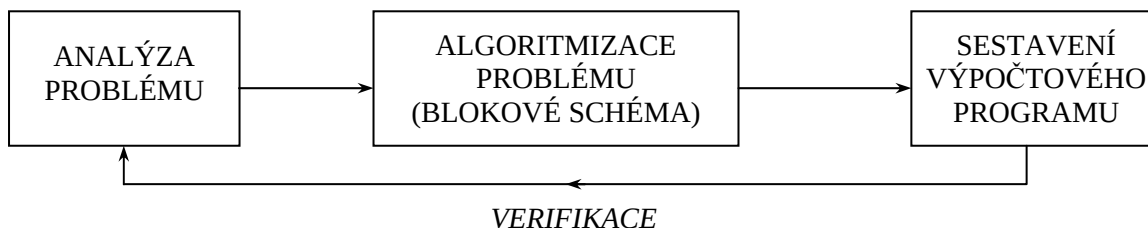
maximální hodnota a jeho zrcadlovým obrazem (OBR.3-17). Vrchol s maximem kritéria se zrcadlově promítne přes těžiště zbývajících vrcholů. Tak vznikne nový simplex. Základní operace simplexu zobrazuje OBR.3-18. Metoda je vhodná v případech, kdy je počáteční odhad značně vzdálen od optima. Nevýhodou je pomalá konvergence v oblasti minima.

Poslední z komentovaných metod je optimalizační postup, využívající náhodných čísel (v modifikaci modelu SMAR tzv. „**genetická metoda**“ [LIANG, 1991]). Jedná se o jednoduchou a přitom velmi efektivní počáteční proceduru, použitou k výběru nejvhodnější oblasti hledání minima objektivní funkce modelu. Využívá principu adaptivní náhodné optimalizace. Nevyžaduje dobrou znalost počátečních odhadů parametrů funkce F . Minimum se hledá s využitím mutací binární řady čísel ($2n$). Metoda je založena na podobnosti s genetickým principem přirozeného evolučního procesu ve stochastickém přírodním prostředí (chromosomy) s cílem hledání optimální varianty.

4 ZÁSADY PRÁCE V PROSTŘEDÍ HYDROLOGICKÝCH MODELŮ

4.1 Obecné podmínky implementace modelů

Vývoj modelu hydrologického procesu má své specifčnosti, ale také určité obecné zásady, jejichž dodržování je vázáno logickou posloupností. Kompilace modelu obvykle vyžaduje následující postup:



Obr. 4-1 Pracovní postup kompilace modelu

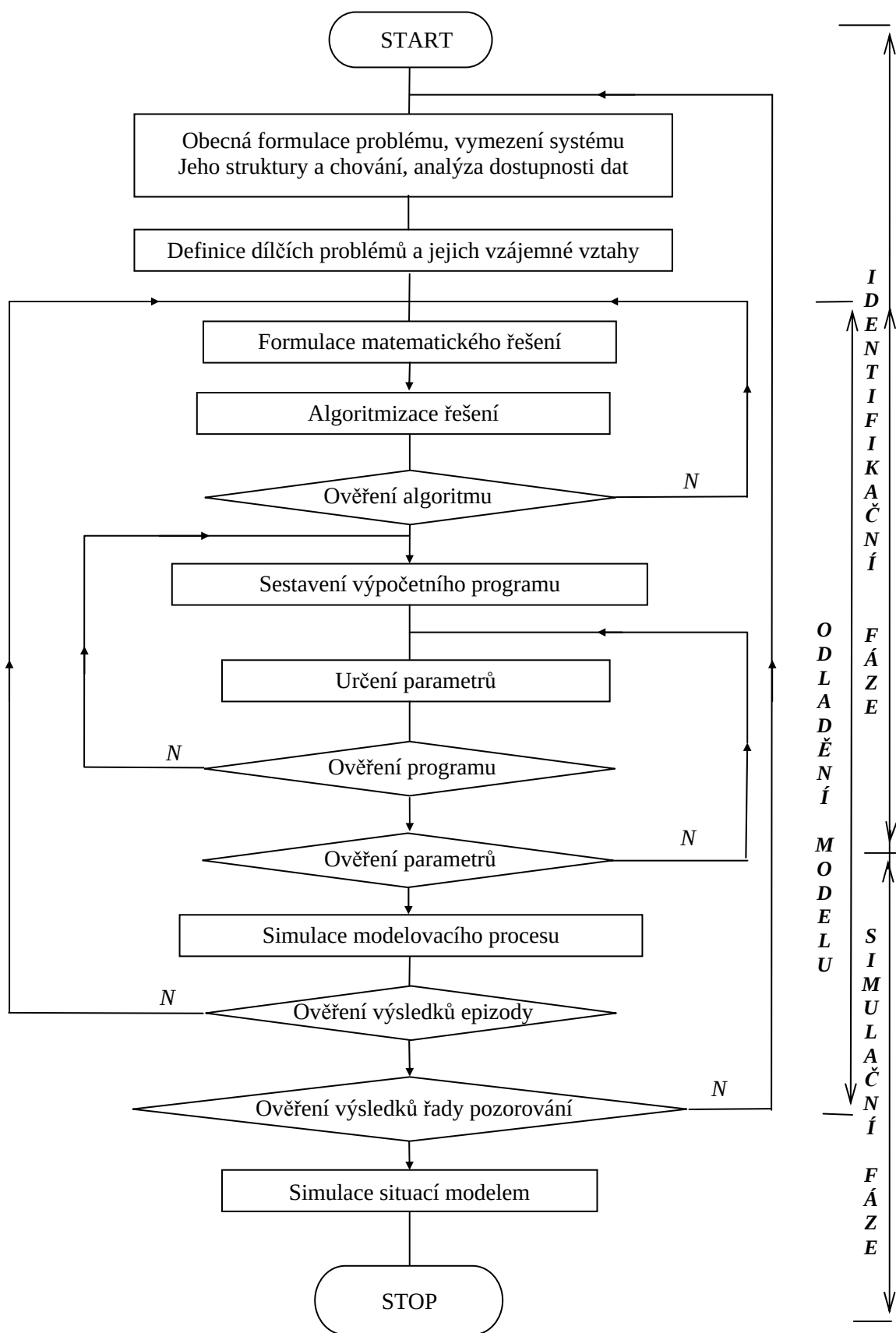
Postup sestavení matematického modelu a jeho verifikace v různých hydrologických situacích (tj. podle reálných vstupních dat) obvykle sestává z těchto jednotlivých operací:

- Sběr a rozbor reálných hydrologických dat.
- Definice dílčích problémů a jejich vzájemné vazby, cílová analýza.
- Analytická formulace úlohy vzhledem k sestavení matematického modelu.
- Sestavení algoritmu řešení v podobě blokového schéma.
- Naprogramování algoritmu v programovacím jazyce.
- Zkusmé určení parametrů modelu a jeho verifikace.
- Testování sensitivity modelu, zejména je-li model vybaven automatickou optimalizací parametrů.
- Implementace modelu s reálnými daty a jeho testování simulací různých krajních situací.
- Vyhodnocení výsledků modelu ve srovnání s výsledky prototypu.
- Modifikace a další vývoj modelu.

Důležitým aspektem modelu je i jeho provozuschopnost (počet vstupních veličin, jejich dosažitelnost, frekvence a přesnost, vypovídací schopnost a spolehlivost výstupů, minimalizace tzv. perfekcionismu, rychlost výpočtů, náročnost obsluhy atp.). Co je vhodné pro výzkum, nemusí být vyhovující pro provoz.

Pro modely přírodních procesů je společné rozdělení jednotlivých fází jejich implementace podle určování modelových parametrů při použití vstupních dat:

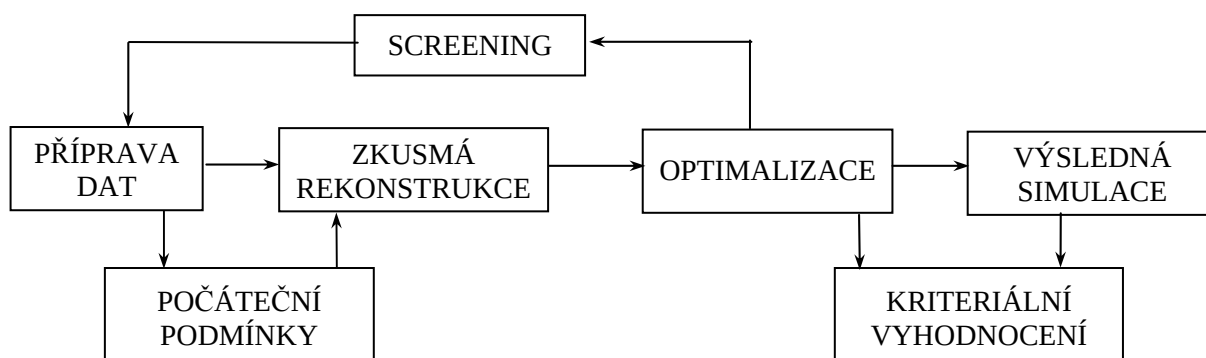
- Fáze identifikace je primární fází práce s modelem. Jejím cílem je nalezení (identifikování) funkce chování modelovaného systému, konkrétně určením hodnot parametrů tohoto systému.
- Fáze simulace je sekundární fází implementace modelu. Je ji možno dále rozdělit podle účelu na:
 - Fázi rekonstrukce, kdy model s předem identifikovanými parametry simuluje hydrologický proces pro účely rekonstrukční, nebo návrhové
 - Fázi prognózní, kdy je modelu použito pro prognózu hydrologického procesu v reálném čase.



Obr. 4-2 Pracovní fáze sestavení a implementace matematického modelu

Celý postup sestavení modelu a jeho odladění je ilustrován proudovým schématem na OBR.4-2.

Základním předpokladem úspěšné **implementace hydrologického koncepčního modelu** jsou především kvalitní datové soubory, získané přímým měřením na povodí. Postup práce modelu s daty znázorňuje následující schéma:



Obr. 4-3 Postup práce modelu s daty

Jednotlivé etapy implementace koncepčních modelů, kde předpokládáme identifikaci parametrů optimalizačním postupem, se dají stručně popsat:

Příprava dat:

Práce s daty před vlastní aplikací modelů spočívá především ve výběru spolehlivých měřených dat z povodí a v jejich přípravě pro počítačové zpracování. Konkrétní požadavky na datové soubory modelů hydrologické bilance specifikuje PŘÍLOHA G.

Zkusmá rekonstrukce a stanovení počátečních podmínek

Rekonstrukce alespoň části testovaného období pomáhá při odhadu počátečních podmínek (pokud nejsou měřeny) a při odhadu počátečních hodnot parametrů pro optimalizaci. V této etapě se dále ověřuje **formální správnost** vstupních údajů, event. se odhalují jejich případné nedostatky.

Optimalizace

Na základě analýzy v předchozí etapě se volí počáteční hodnoty parametrů. Hodnoty těchto parametrů se během řešení optimalizují podle **optimalizačních kritérií** (viz etapa „kriteriální vyhodnocení“). Proces optimalizace spočívá v nalezení nejmenší hodnoty kriteriální funkce (tj. většinou součet čtverců odchylek měřených a modelovaných proměnných), jejichž definiční obor je z důvodů fyzikálních omezen (tj. velikosti parametrů se dají přisoudit pouze reálné hodnoty). Optimalizace je většinou automatický proces, který řeší:

- určení délky kroku
- určení směru postupu
- omezení definičního oboru parametrů.

Poznámka: Součástí optimalizačního procesu bývá zkoumání vlivu změn vstupních parametrů na výstupy, neboli **citlivostní analýza**. Jeden parametr je testován, ostatní zůstávají konstantní a sleduje se celková odezva. Citlivostní analýza přisuzuje vstupním parametrům pořadí důležitosti. V optimalizačních postupech bývá také výhodné, orientovat se na podkladě multivariační faktorové analýzy, která kalkuluje i s tím, že nelze měřit všechno a to co se měří, nemusí být správné (viz dále etapa „screening“). Analýza současně počítá i s porušením pravidla nezávislosti mezi závisle proměnnými.

Výsledná simulace

Konečnou etapou zpracování je výsledná simulace hydrologické bilance povodí se zaměřením na modelování denních (nebo dekadních) odtoků s předem identifikovanými parametry. Rozlišujeme při tom, zda je simulace realizovaná s parametry odvozenými právě z tohoto zkoumaného období, nebo jestli pracujeme s průměrnými parametry (aritmetický či vážený průměr jejich hodnot), reprezentujícími chování povodí v dlouhodobém smyslu.

Screening

V této etapě se provádí kvalitativní rozbor optimalizačního procesu jak z hlediska parametrů modelu, tak i z hlediska kritérií shody modelu s prototypem. Rozbor se provádí i subjektivně, hlavně pokud se týká revize nespolehlivých, či chybějících datových údajů. Období, která z jakýchkoliv příčin vykazují neuspokojivé výsledky, se před sestavením reprezentativního souboru parametrů pro finální simulaci denních odtoků, ze souboru eventuálně vyloučí [WMO, 1990, 1992].

Kritériální vyhodnocení

Pro posouzení **shody simulace** s měřenými proměnnými (odtoky, stavy hladin podzemních vod, vlhkostmi půdy atd.) jsou nejčastěji používána bezrozměrná kritéria (viz dále KAPITOLA 4.4):

- koeficient determinace *RE* (-)
- koeficient variace *PE* (-)

U modelů jednotlivých srážko-odtokových epizod se vyhodnocuje také:

- chyba v určení kulminace (%)
- chyba objemu odtoku (%)

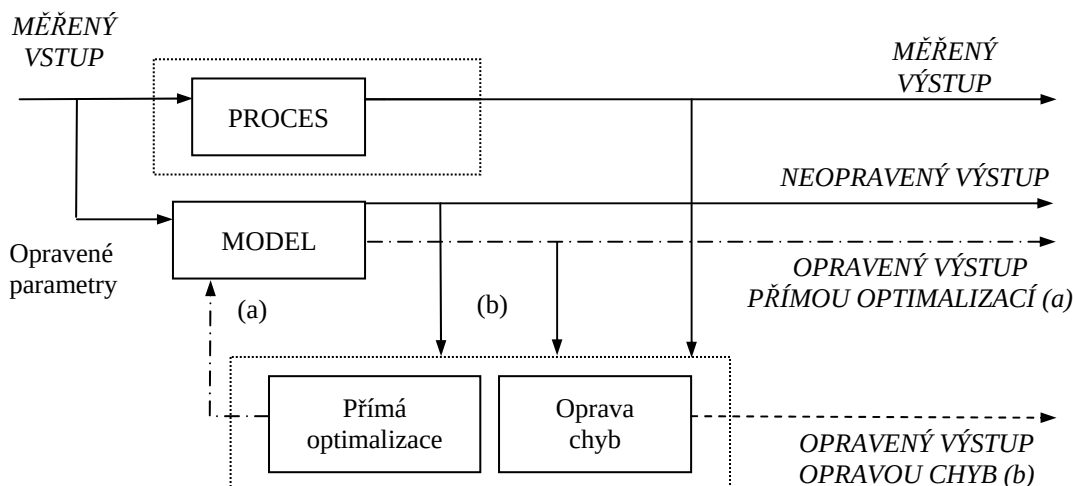
Je evidentní, že při rekonstrukci jednotlivých srážko-odtokových případů, vlivem proměnlivých podmínek a nahodilosti jevu se budou hodnoty optimalizovaných parametrů měnit. Objektivní metodou jejich optimalizace je potom analýza všech případů, kdy minimalizovaná kritériální funkce je součtem všech kritériálních funkcí jednotlivých případů. Žádný ze zkoumaných případů nemá optimální parametry sám o sobě, nýbrž celá skupina případů (group of events) ano [KOVÁŘ, 1994].

V operační hydrologii, zejména v oblasti předpovědí v reálném čase, pracujeme i se systémy, jejichž chování není jednoznačně determinované souborem parametrů modelu. Výstupní informace modelu je využívána jako podstatná část chodu systému, model objektu se stává součástí řídicího systému objektu. Této vlastnosti je dosaženo zavedením zpětné vazby mezi výstupem modelu a strukturou prototypu, podobně jako je tomu u adaptivních schémat, kde byla zachována zpětná vazba mezi výstupem modelu a strukturou modelu. Na OBR.4-4 je znázorněno obecné blokové schéma použití optimalizace ve smyslu **adaptivní metody** pro umožnění oprav výsledků hydrologického modelu.

Jsou zde naznačeny dva možné způsoby adaptivních oprav předpovědních výpočtů:

- a) oprava parametrů se zpětnou vazbou – ať již klasickou optimalizací, nebo jinou technikou (modely ARMA, ARIMA, Kalmánovy filtry apod.),
- b) přímou opravou výsledků modelu, tzv. „up-dating“.

Podrobnosti o optimalizačních a adaptivních metodách obsahuje četná literatura [ANDERSON, BURT, 1985], [BOX, JENKINS, 1970], [NĚMEC, 1986].



Obr. 4-4 Schéma adaptivní procedury

4.2 Zpracování a struktura vstupních dat

Struktura vstupních dat modelových řešení hydrologických úloh bývá různorodá. Hydrologické procesy probíhají v čase a v prostoru. Proto je s ohledem na způsoby sběru, třídění a archivace dat výhodné použít základní členění na **časové řady** (vystihující chronologičnost vývoje dané veličiny) a na **geografické informace** (popisující prostorovou strukturu zvoleného tématu). Nejmodernější technologie GIS vytváří podmínky širšího propojení uvedených dvou typů datových struktur, jak bude uvedeno dále. To umožní realizaci časoprostorových analýz, prognóz, nebo jen prostého znázornění skutečných, prostorově vymezených, dynamických procesů v hydrologických povodích.

Uvedeným trendům odpovídá v posledním období široké rozšíření technologie GIS v aplikační podobě do celé řady hospodářských a správních aktivit. Tím vzrůstá počet, ale i kvalita zpracovaných témat (vrstev GIS) a touto formou distribuovaných územních informací. Pokud tyto vazby mezi prostorem a časovým vývojem jevu nejsou v hydrologickém modelu přímo zohledněny (např. plošné rozložení srážek na povodí, charakterizované srážkovými úhrny okolních meteorologických stanic), předpokládá se buď samostatné řešení dílčího problému vhodnými metodami (Hortonovy, Theisenovy polygony), nebo je vědomě potlačen vliv prostorové variability (např. u celistvých modelů). To bývá především s cílem zjednodušení řešení a snížení nároků na pořízení relevantních datových souborů. V minulosti mohla být důvodem manuální pracnost, časová nebo finanční náročnost, neúměrná dosaženému efektu v aplikaci. V současnosti může být ze stejných příčin zvolena výpočtová metoda, eliminující pořizování nestandardních prostorových, nebo časových řad. Trendem však bude distribuce prostorových parametrů řešení podle měřených, nebo odvozených vlastností, směřovaných na víceúčelové využívání prostorových dat, umožňující realizaci analýz v globálnějších měřítcích – např. celokontinentálních.

Pro demonstraci různorodosti datových vstupů hydrologických modelů lze použít zatřídění podle následujících témat:

- data **meteorologická** (srážky, výpar a jeho kategorie, teplota a vlhkost vzduchu, sněhové poměry, bilanční složky radiace, rychlost větru atd.). Použity jsou buď dlouhodobé statistické charakteristiky, nebo měřené časové řady; informace jsou polohově vztaženy

k místu měření a pro jejich plošnou interpretaci jsou používány odpovídající empirické postupy, v závislosti na morfologii terénu, nadmořské výšce apod.

- data **hydrologická** (průtoky, hladiny podzemních vod, vydatnosti pramenů a dalších vodních zdrojů, odvozené charakteristiky půd a půdního povrchu, atd.). Relace k prostorovým měřítkům jsou uplatňovány prostřednictvím přiřazených atributů k bodům, liniím a k polygonům (viz dále).
- data **geografická**, která se stále častěji stávají nosnou bází veškerých informací (aplikace GIS) a umožňují realizaci prostorových analýz, včetně relačního propojení s databázemi časových řad. Lze jimi identifikovat:
 - vodohospodářská díla a systémy
 - monitorovací systémy v krajině
 - hydrologické charakteristiky území - plocha povodí, rozvodnice, odtokové linie, hydrografická síť, atd.
 - morfologii terénu - sklonové poměry, tvorba DMT (Digitálního Modelu Terénu)
 - geologické poměry
 - hydropedologické poměry a odvozené půdní charakteristiky
 - využití území
 - hranice zemědělských honů
 - hydromeliorační opatření (odvodnění, závlahy, protierozní opatření)
- data **zemědělsko-hospodářská** rozšiřují informace speciálního charakteru a vedle prostorových vazeb mají vztah k časovým měřítkům (hospodářsko-ekonomické podmínky jednotlivých let a územně-správního členění, osevní postupy a pěstované plodiny, výnosové charakteristiky, atd.)
- **ostatní podklady** jako např. manipulační a provozní řády vodohospodářských staveb atd. (Mohou mít charakter textů, tabulek, grafů či výkresů, nebo souborných dokumentací; forma přístupu a archivace bude optimálně digitální, případně s digitálním odkazem na klasický podklad – projektovou dokumentaci apod.)

V další části kapitoly nebudou explicitně rozlišovány typy datových podkladů (chronologické, geografické), neboť nebude-li výslovně uvedeno jinak, lze popisované operace realizovat s daty obou typů. Naopak speciální typy dat v sobě toto rozlišení již obsahují (např. časové řady průtoků, nebo pěstované typy plodin na vymezené ploše zemědělského honu).

Struktura dat závisí na zvoleném typu modelu a na účelu jeho využití. Vzhledem k různým fázím, v nichž se s daty pracuje - např. kalibrace modelu, verifikace nastavených parametrů a poté vlastní řešení, jsou vyžadována tomu odpovídající data vhodné struktury, původu a přesnosti.

V úvahu přichází následující způsoby pořízení dat:

A. Podle účelu původního využití

- využití podkladů, pořizovaných k odlišnému účelu primárního využití (např. údržba cest a dálnic, řízení závlahového provozu apod.)
- využití podkladů, pořizovaných a primárně využívaných k podobným účelům (hydrometeorologická či agrometeorologická služba)

B. Podle frekvence sběru dat

- pořízených jednorázově (účelová šetření, k danému termínu - např. stanovení kulminačního průtoku při povodni)

- pořizovaných opakovaně v pravidelném/nepravidelném režimu (např. měření průtoku při odběru vod k chemickým rozborům)
- kontinuální měření (limnigrafická stanice stálé monitorovací sítě)

C. Podle přesnosti měření

- orientačně (např. pro účely údržby)
- středně přesná (běžná měření - bez závazného režimu kalibrací)
- referenční měření, přesná (zpravidla v síti stanic měření pověřené organizace)

D. Podle původu dat

- vlastní měření (účelově orientované, experimentální)
- měření zprostředkované subjektem s odlišným hlavním předmětem činnosti (doplňková činnost)
- měření zajišťované subjektem, u něhož se jedná o hlavní předmět činnosti.

Ve fázi **kalibrace modelu** by měla být využita data reprezentativní, nejvýstižněji charakterizující podmínky aplikace modelu. Je u nich třeba zvolit systém kontrol minimálně v rozsahu, který vyloučí hrubé chyby, vzniklé v předchozích operacích, např. chybným přepisem, vymazáním části souboru apod. Data je vhodné podrobit statistické analýze (např. zkoušce homogenity, filtraci apod.), jak bude uvedeno dále a posoudit věrohodnost získaných statistických charakteristik (např. variační rozpětí hodnot, průměrnou hodnotu) srovnáním s fyzikálně opodstatněným a tedy předpokládaným průběhem měření. Volba systému kontrolních analýz závisí na typu dat a rozsahu studie.

Lze vycházet z následujícího doporučeného postupu [MELOUN, MILITKÝ, 1992], rozčleněného do následujících pracovních etap:

- **analýza chyb instrumentálních měření**, popisující vliv přesnosti měřicího přístroje, systém zaokrouhlování dat, atd.
- **průzkumová analýza dat**. Účelem je odhalit zvláštnosti naměřených dat většího rozsahu a ověřit předpoklady pro následné, často rutinní, statistické zpracování. Užívají se pracovní postupy jako např. frekvenční analýza, sledování lokálního chování dat. Používají se grafické postupy zobrazení statistických zvláštností dat pro svou přehlednost a multifunkčnost.
- **statistická analýza dat**, která by měla následovat po předchozím kroku. Ten může být vynechán u souborů malého rozsahu. Pak se ke statistické analýze dat přistoupí bezprostředně po definici instrumentálních chyb měření. Účelem je stanovit střední hodnoty měření, rozptyl, tvar výběrového rozdělení, statistické charakteristiky polohy jako medián atd. Po tomto rozřídění dat může u rozsáhlejších datových souborů následovat analýza rozptylu.
- **analýza rozptylu** se v technické praxi používá buď jako samostatná technika, nebo jako postup, umožňující analýzu zdrojů variability u lineárních statistických modelů. Těmito nástroji lze v opodstatněných případech charakterizovat vliv typu přístroje, lidského faktoru a obsluhy na výsledek měření. Podstatou je rozklad celkového rozptylu dat na *složky objasněné* (známé zdroje variability) a *složku neobjasněnou*, o níž se předpokládá, že je náhodná.
- **chronologičnost a spojitost** měřených časových řad u kontinuálních záznamů, diskretizovaných v určitém konstantním, nebo proporčním intervalu Δt (Δt_i). Diskrétní forma je standardní z důvodu archivace dat v digitální formě. (Kontrolou lze eliminovat vliv ztráty dat při jejich přepisu z paměti měřicího přístroje, nebo manipulací s nimi.)

- **jednoduché regresní vztahy** vzájemně ovlivněných veličin s ošetřením resp. vysvětlením naměřených odchylek – např. vztah mezi měřeným výparem a meteorologickými charakteristikami (teplota a vlhkost vzduchu, nebo den s výskytem ovzdušných srážek apod.)

Podle místa vzniku chyby v řetězci měření jsou chyby členěny na:

- **Instrumentální chyby** - způsobené konstrukcí měřicího přístroje. Jejich velikost je limitována kvalitou přístroje a bývá uváděna výrobcem.
- **Metodické chyby** - jsou dány použitou metodikou měření (odečítání dat, eliminace vnějších vlivů apod.).
- **Teoretické chyby** - souvisí s použitým postupem měření (princip měření, používané konstanty a přepočítávací parametry).
- **Chyby zpracování dat** - ovlivněné zvolenými numerickými metodami primárního zpracování měření, užitím nevhodných metod statistického vyhodnocení.

Podle příčin vzniku lze chyby rozdělit na:

- **Náhodné chyby**, které kolísají při opakovaném měření náhodně co do velikosti i znaménka, nedají se předvídat a jsou popsány určitým pravděpodobnostním rozdělením.
- **Systematické chyby** ovlivňují výsledek měření předvídatelným způsobem a mívají stejná znaménka. Bývají funkcí času nebo parametrů měřicího procesu. Mohou souviset s opotřebením nebo stárnutím měřicího přístroje. Nemusí se navenek projevovat, lze je odhalit porovnáním s výsledky z jiného přístroje. Rozlišují se chyby aditivní (chyba nastavení nulové hodnoty) a multiplikativní (chyba citlivosti).
- **Hrubé chyby** - způsobené výjimečnou příčinou, náhlým selháním měřicího přístroje, nesprávným záznamem výsledku. Způsobují, že se dané měření výrazně odlišuje od ostatních.

S datovými soubory se pracuje i v následující fázi - **verifikaci** nastavených parametrů modelu. Zvolený pracovní postup závisí na účelu aplikace: zda bude model ověřen na datech srovnatelného rozpětí (pro ověření interpolační schopnosti), nebo pro účely scénářových extrapolací budou využity měřené hodnoty extrémní, případně hodnoty, vybočující z řady naměřených hodnot, avšak respektující fyzikální limity těchto jevů a přírodních procesů. Tato data by měla být analyzována obdobnými pracovními postupy - a to zpravidla současně s daty, použitými pro kalibraci modelu, nebo samostatně v případě, že jsou použita data z časově nespojitého období, nebo v případě dodatečně upravených nebo uměle generovaných časových řad.

Vedle přímých měření připadají v úvahu i další způsoby pořízení vstupních dat modelových analýz. To umožňuje modifikovat scénáře změn vývoje počasí, využití území, nebo predikci dalších vlivů, působících na proces odtoku vody z povodí. Hydrometeorologické časové řady lze modifikovat s využitím tzv. "**generátorů počasí**". Tyto nástroje vytváří na základě analýz relativně krátkých úseků měřených meteorologických dat (případně přímým zadáním parametrů vývoje počasí místní platnosti) nové, zpravidla delší časové řady průběhu počasí, které respektují místní klimatické zákonitosti. Uplatněním těchto generátorů lze prodloužit dosud naměřené, nebo nově vytvořit dlouhodobé časové řady meteorologických charakteristik (srážky, teploty a vlhkosti vzduchu atd.), které by nebylo možné získat v dostatečné délce ze stávajících měření. Lze tak studovat vliv očekávaných změn globálního nebo místního charakteru.

V přílohové části je komentováno použití generátoru počasí WXGEN [RICHARDSON, NICKS, 1990], zakomponovaného do modelu EPIC [WILLIAMS a kol., 1985] rozšiřujícím modulem modelu SMAR. Program generuje následující denní hodnoty meteorologických prvků:

- denní úhrn globálního krátkovlnného slunečního záření
- maximální a minimální teplotu vzduchu
- denní úhrn srážek
- průměrnou relativní vlhkost vzduchu
- průměrnou rychlost větru ve výšce 10m
- další statistické prvky, využitě pro odhad intenzit srážek, kratších než jeden den.

Pro statistické porovnání generovaných řad s řadami měřenými jsou využity především následující charakteristiky, tabelované pro každý kalendářní měsíc:

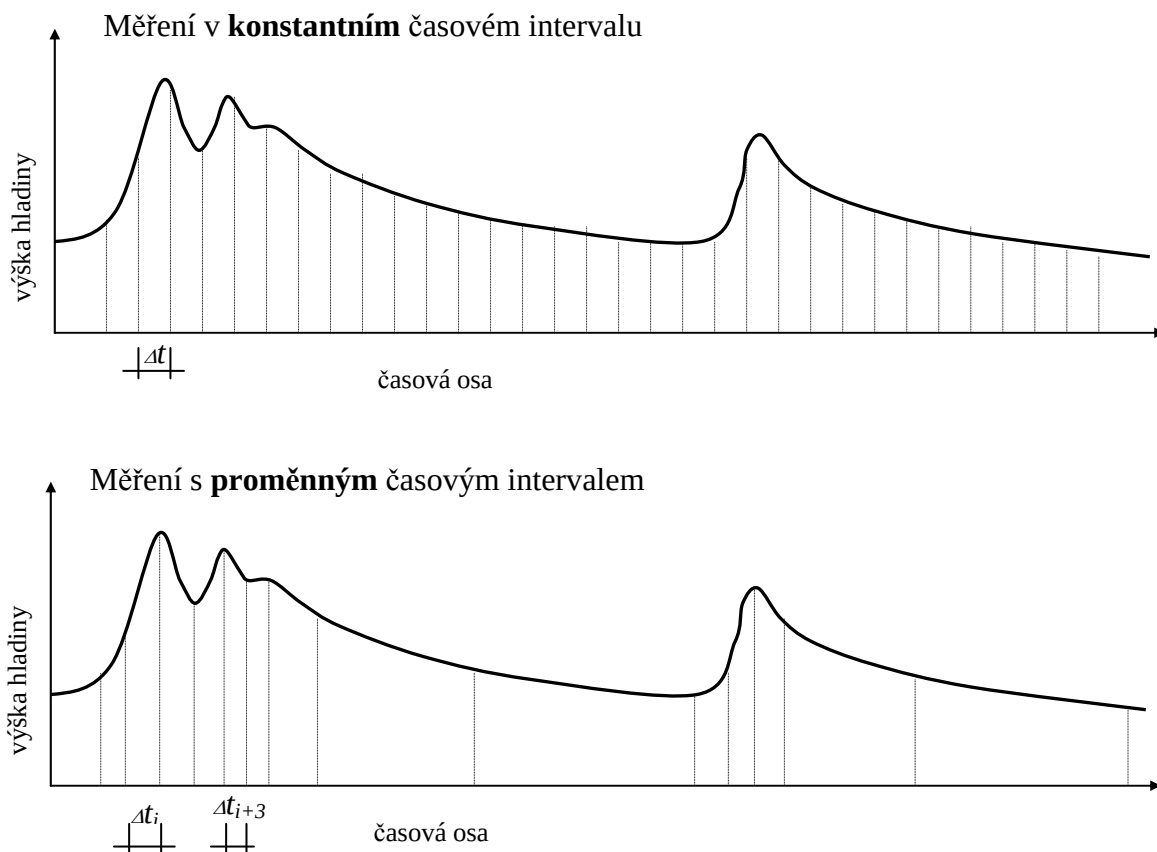
- průměrná maximální a minimální denní teplota vzduchu
- standardní odchylka maximálních a minimálních teplot vzduchu
- průměrný denní úhrn srážek
- standardní odchylka denních úhrnů srážek
- koeficient špičatosti statistického rozdělení denních srážek
- pravděpodobnost výskytu vlhkého dne po dni suchém (přitom vlhký den je takový, kdy byl zaznamenán výskyt srážky větší než 0,2mm, naopak suchý den je den s maximálním úhrnem srážek do 0,2mm)
- pravděpodobnost výskytu vlhkého dne po dni vlhkém (zbývající dvě kombinace se dopočítávají)
- průměrný počet dní s výskytem deště pro každý měsíc
- maximální intenzita deště s trváním 30 min.
- průměrný faktor korekce radiace
- průměrná denní relativní vlhkost vzduchu.

Správa databází hydrologických měření

Při archivaci primárních podkladů kontinuálních měření hydrologických veličin v terénu (úroveň hladin vody, vlhkost půdy apod.) mohou být využívány dvě základní struktury diskrétních datových souborů:

- s hodnotami měřených veličin v **konstantním časovém intervalu**, tj. konstantním odstupem jednotlivých záznamů – např. 1 hodina, 6 hodin, 1 den apod. (termín libovolného záznamu se pak odvozuje od samostatně registrovaného termínu prvního záznamu). Tato forma registrace je standardní.
- s **proměnným intervalem** registrace měřených veličin. V takovém případě je součástí databáze čas realizace měření s přesností, odpovídající rozlišovací schopnosti *t*-pořadnice časové osy. (Uvedený způsob se využívá u některých typů elektronických registračních přístrojů s dostatečnou kapacitou paměti – např. překlápěcí ombrograf apod., nebo u digitizérů analogových procesů, řízených mikroprocesorem).

Uvedená schémata vyhovují digitalizaci klasického záznamu (pisátkem na rastrovém svitku papíru apod.) i přímé digitální registraci na datová média.



Obr. 4-5 Odlišnost přístupu k digitalizaci měřených analogových veličin (např. hladiny vody na měrném přelivu) pro konstantní a pro proporcionální časový interval.

V prvním případě se vytváří rozsáhlý datový soubor, jehož velikost je nepřímo úměrná délce časového kroku Δt , ve druhém případě jsou data uspořádána nespojitě (zdánlivě nepřehledně), podle typu monitorovaného jevu však mohou být archivována v podstatně kratším datovém souboru. Přestože v současnosti nebývají potíže s archivací rozsáhlých souborů, podle okolností může být výhodnější druhý způsob uspořádání měřených dat (s přesností, odpovídající přesnosti záznamu času měření). Později lze snadno ze zdrojového souboru rekonstruovat datové řady v různé délce časového kroku s vynikající časovou rozlišovací schopností. Tento způsob však vyžaduje vytvoření uživatelských funkcí a ošetřujících procedur např. jako součástí tabulkových kalkulátorů, v nichž se operace s databázemi realizují. Příkladem je uživatelská funkce, řešící numerickou integraci měřené veličiny ve zvoleném časovém intervalu [KULHAVÝ a kol., 1998].

Typickým příkladem uplatnění postupu s **proměnným intervalem** záznamu meteorologických dat je elektronický člunkový překlápěcí (tipping bucket) srážkoměr, případně upravená modifikace drenážního průtokoměru. Překlopení člunku inicializuje sepnutí kontaktu a tento čas je registrován v elektronické části ombrografu s přesností na 1 s. Podle objemu člunku (zpravidla 0,1 nebo 0,2 mm srážky) rozčleňuje každý zaznamenaný čas celkovou srážku na krátké časové úseky různé délky avšak s konstantní, velmi malou, výškou deště. Zařízení v období bez srážek žádná data neregistruje. Archivovaný datový soubor je z paměti přístroje přepsán do PC při návštěvě obsluhou. Podobný princip je využit u drenážního odtokoměru [KULHAVÝ, SOUKUP, DOLEŽAL, 1999] s tím rozdílem, že nádoba překlápěcího

člunku je konstruována na zadržený objem 1 až 3 (l) a elektronická část řeší zvýšení počtu překlopení člunku do doby registrace času zakomponováním "dělitele" (ve voleném rozmezí hodnot 1 až 999), který tak zvětšuje objem proteklých vod do okamžiku registrace času v paměti přístroje. Tímto opatřením se snižuje počet zaznamenaných dat při vyhovující přesnosti měření, respektující charakter měřené veličiny.

Uplatnění geografických dat

Současné, na bázi počítačů založené nástroje pro práci s prostorovými daty nad (nebo pod) povrchem Země, jsou označovány jako **prostorové informační systémy**. Komentují jejich přímou návaznost na klasické prostředky a způsoby zpracování informací tohoto druhu – na mapové podklady. Souhrnně je tato část doménou geodézie, kartografie a geografie a bývá nově nazývána geomatikou. Přibývají však disciplíny, zabývající se informací jako takovou, její tvorbou, přenosem a zpracováním [TUČEK, 1998]. Prostorová lokalizace – definování informace, je typické pro všechny geovědní disciplíny. Pojem **GIS** (Geografický Informační Systém) je pak možné chápat ve třech úrovních – jako technologie, jako aplikačního nástroje a jako vědeckého oboru. Pro účely metodiky je významné jeho chápání jako aplikačního nástroje pro realizaci přípravných operací, vlastních modelových analýz, ale i jako nástroje k prezentaci výsledků dokončených numerických operací. Perspektivně pak představuje GIS informační systém, který je součástí řízení organizační jednotky (např. podniku, nebo správního orgánu). GIS tak umožňuje v přehledné formě sběr a správu prostorových dat, manipulaci s nimi, archivaci i realizaci libovolných prostorových analýz.

Geografická informace je geometrický, topologický, tématický a dynamický popis geoobjektu s ohledem na potřeby subjektivně určené aplikace (např. informační systém o půdě). Informace může být uložena a zpracována v různých formách:

- v numerické formě, která může být analyzována jako atributové hodnoty, např. při statistické analýze
- v textových dokumentech
- v obrazových informacích, vhodných pro popis složitých vztahů
- v multimediální formě, která integruje texty, statické a animované obrazy i audio sekvence.

Aby bylo možné definovat prostorové vztahy geoobjektů (to znamená definovat jejich geometrii a topologii jednoznačným způsobem), je třeba definovat **souřadnicový systém**. Takový souřadnicový systém musí splňovat tři požadavky:

- Definice polohy musí být jednoznačná. To znamená, že objekty se stejnou polohou musí být identické a různé polohy definují rozdílné objekty.
- Definování polohy musí být měřitelné v měrných jednotkách.
- Musí být definována tzv. metrika, která umožňuje měřit vzdálenosti.

Popis prostorové situace ve vektorové struktuře se opírá o vyjádření geometrie prostorových objektů přes jejich lineární charakteristiky. Znamená to, že bude reprezentovat lineární struktury liniových objektů, hranice plošných objektů a polohy bodových objektů.

Charakteristika	Prostorová rozlišovací schopnost		
	mikro měřítko	mezo měřítko	makro měřítko
Prostorové objekty	měřicí body, profily, segmenty	malá a střední povodí	velká povodí, kontinenty
Charakteristická délka nebo plocha	< 100 m < 10 m ²	0,1 až 30 km 0,01 až 1 km ²	> 30 km > 1 km ²
Kartografické měřítko	více než 1 : 25 000	od 1 : 25 000 do 1 : 1 000 000	méně než 1 : 1 000 000
Časová rozlišovací schopnost	sekundy hodiny	dny, dekády měsíce	roky, 10, 100 roků
Tématická rozlišovací schopnost	dílčí procesy (např. infiltrace)	procesy (např. odtok)	globální procesy
Typy prostorových údajů	bodová pozorování	maloplošné charakteristiky	velkoplošné charakteristiky
Metody a modely	detailní prostorové modely	semideterministické modely	prostorově generalizované analýzy a statistické modely

Tab. 4-1 Rozdíly v prostorové, časové a tématické rozlišovací schopnosti GIS na příkladu hydrologických problémů (podle TUČKA, 1998)

Geografická informace v GIS pak není chápána jen jako objekt pro úlohy kreslení, reprodukce, ale i jako zdroj údajů pro databázové aplikace. Všeobecně akceptovanou datovou strukturou pro zpracování neprostorových (atributových) údajů v GIS aplikacích je **relační struktura**. Organizace atributových dat do sérií tabulek, které mohou být použity individuálně, nebo společně, je flexibilní, jednoduše pochopitelná a umožňuje efektivní ukládání dat. Umožňuje jednoduché realizace změn – doplnění, mazání. Prostorová informace je složitější a operace s ní komplikovanější. Změna nezpůsobí zásah do jednoho pole, jednoho souboru, ale většinou vyvolá současné změny ve více záznamech a ve více souborech.

Při uplatnění hydrologických modelů uvedených typů se využívají geografické informace, účelově shromážděné k řešení zadaného problému. Na základě výsledků dílčích přípravných operací (např. distribuce půdních vlastností po ploše povodí) jsou korigovány parametry řešení, nebo nastaveny okrajové podmínky. Pro tyto účely mají relační databáze charakter textových podkladů, číselných dat (měřených, nebo odvozených), jen výjimečně jsou provázány na grafické informace. Významně se přitom využívá schopnosti GIS přiřadit podle popisovaného tématu dílčí ploše atribut a stanovit plochu.

4.3 Kritéria pro stanovení počátečních a okrajových podmínek řešení

Nastavení počátečních hodnot a volba okrajových (mezních) podmínek hydrologického problému je zásadní úlohou, předcházející vlastnímu řešení numerickým modelem. Přestože bývají v průběhu řešení používány automatické optimalizační postupy a mezní hodnoty jednotlivých parametrů či veličin jsou autory modelu komentovány - zpravidla je i softwarově ošetřeno jejich překročení, je právě v podmínkách malých povodí z důvodů jejich různorodosti (širě variačního rozpětí jednotlivých charakteristik) významné tyto mezní

hodnoty zodpovědně stanovit. Komentáři vlivu jednotlivých témat na strukturu hydrologické bilance je věnována *KAPITOLA 3.1*, nastavení mezních hodnot vybraných charakteristik je dokumentováno na řešených příkladech v *PŘÍLOHOVÉ ČÁSTI*.

Při volbě pracovního postupu, cíleného ke stanovení okrajových podmínek numerického řešení je třeba nejprve formulovat **rámec využití modelu** jak je popsáno například schématem *OBR.4-3*, zároveň s vyhodnocením rozsahu, struktury a přesnosti disponibilních datových souborů (*KAPITOLA 4.2*). Součástí postupu je i vytvoření schémat výpočtu (nebo potvrzení modelem dané struktury), návrh variant jeho korekcí podle výsledků dílčích operací (pokud to model umožňuje), použití samostatných metod pro stanovení chybějících veličin i potvrzení vhodnosti optimalizačních procedur (a jejich posloupností). Všechny uvedené operace bývají součástí manuálu vlastního modelu, nebo jsou uživatelsky vymezeny prostředím modelu. V této fázi se poprvé stanovují i mezní hodnoty podmínek řešení – limity parametrů modelu, vstupních dat, volba časového kroku, volba kritérií pro automatické optimalizační postupy. Tyto hodnoty mohou být doporučeny zpracovatelem modelu, nebo závisí na předchozích zkušenostech uživatele při práci s modelem, nebo s modelem podobným. Využívá se principu analogií – řešeného povodí s povodími zpracovanými, využívá se souhrnných územních informací (např. sestavených v prostředí GIS), výsledků měření atd. Souhrnně jde o první fázi **nastavování** okrajových podmínek řešení, odpovídající zvolenému typu numerického modelu.

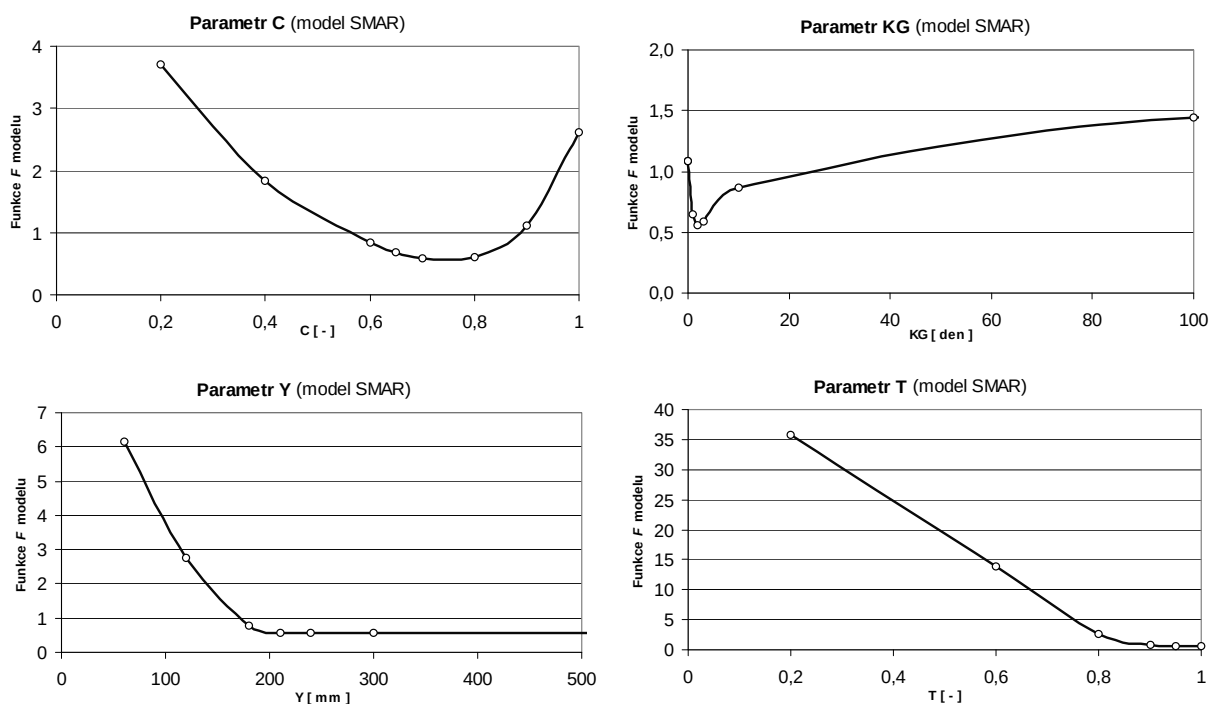
Poté následuje **aplikační fáze** modelu v daných místních podmínkách, která zajišťuje první přiblížení k věrohodným hodnotám parametrů modelu, případně poukáže na specifika řešení a poskytne podklad pro korekce, resp. doplnění datových souborů.

V rámci těchto operací se realizuje **citlivostní analýza** jednotlivých parametrů modelu, nebo vstupních dat při ovlivnění hodnot objektivní funkce F . To předchází druhé fázi **korekcí** okrajových podmínek numerického řešení. Jednoparametrická analýza (*OBR.4-6*) poskytne přehlednou informaci o vlivu jednotlivých parametrů modelu na efektivitu modelování v konkrétních místních podmínkách (viz *KAPITOLA 4.4*); v opodstatněných případech je účelné vyšetřovat i víceparametrickou analýzou vliv kombinace jednotlivých hodnot parametrů řešení. Jde však o postup časově náročný, obtížněji znázornitelný a nebude pravděpodobně delší dobu standardním postupem v rámci aplikací současných verzí modelů.

Využití územních databází, které jsou pro řešenou oblast k dispozici usnadňuje postup nastavení podmínek řešení. Jsou využívány půdní mapy (kategorizace podle BPEJ – z nichž je dále odvozeno zařazení do kategorií hydrologických skupin A-D), mapy využití území, mapové podklady o podílu odvodněných ploch systematickou trubkovou drenáží (užití podkladů SMS), zemědělské hospodářské mapy (včetně popisu osevních postupů), v prostředí GIS lze realizovat prostorové analýzy s využitím DMT (Digitálního Modelu Terénu) pro stanovení sklonových poměrů v povodí atd. Rozsah přípravných prací bude záviset na účelu použití modelu a složitosti místních podmínek.

Popsané operace poskytují podklady pro stanovení (odvození) okrajových podmínek řešení povodí. Předpokladem je **disponibilita** odpovídajícími soubory informací a měřených dat – s ohledem na aplikace koncepčních modelů uvedeného typu může být hlavním problémem kvalita a délka časové řady měřených průtoků v určujících profilech pro účely kalibrace modelu (pokud tato data zcela nechybí). V povodích, kde tato data k dispozici nejsou, je třeba provést poměrně detailní rozbor přírodních a hospodářských podmínek a na základě výsledků těchto rozborů provést stanovení okrajových podmínek s využitím analogií s povodími, která byla již modelem zpracována. Pro ověření reprezentativnosti zvolených parametrů řešení je účelné identifikovat období, pro které jsou k dispozici alespoň základní informace o průtocích (měření, odhady) současně s dalšími relevantními podklady, a v rámci tohoto období verifikovat aplikaci modelu. Variantnost takových přístupů je závislá na

konkrétním účelu využití modelu a lze předpokládat postupné zpřesňování pracovních postupů v rámci četnosti aplikací jednotlivých typů hydrologických modelů v praxi.



Obr.4-6 Vliv změny parametrů modelu na tvar a míru ovlivnění objektivní funkce F modelu SMAR (analýza podmínek odtoku - Hvozdnice, 1997).

4.4 METODY VERIFIKACE VÝSLEDKŮ

Základem úspěšné implementace konceptuálních modelů hydrologické bilance je **nalezení optimálních hodnot** (nebo změn hodnot) parametrů modelu. Procedura identifikace těchto parametrů je buď zkusmá nebo automatická, která je součástí modelu, jak je tomu v případě modelů SMAR i WBCM. Předpokladem její úspěšnosti jsou nesporně kvalitní vstupní data, jak je již zdůrazněno v KAPITOLE 4.1. Selektivní procedurou náhrady nespolehlivých, ale také doplněním chybějících dat (tzv. „screening“) dosáhneme výrazného zlepšení shody měřených a simulovaných (vypočtených) výsledků. Kvalitu shody ovlivní samozřejmě výběr párových hodnot co do jejich kvantity (tj. délky časové řady), nebo kvality (tj. stupně kauzality).

K vyhodnocení shody se obecně používá základních statistických charakteristik, tj. průměrů základních souborů, jejich rozptylů a směrodatných odchylek. Tyto základní statistické analýzy však nejsou dostatečné ke kvantifikaci souborů měřených a simulovaných dat. Proto se využívá různých **testů shody**, především:

- Kolmogorov-Smirnov test
- Wilcoxon test
- kritéria shody: koeficienty determinace a variace.

V testování hydrologických procesů, zejména potom při určování shody výsledků hydrologické bilance se používají v celosvětovém měřítku podle Světové meteorologické organizace [WMO, 1987] kritéria shody, vyhodnocení koeficientu determinace (*RE*) a variace (*PE*). Jak bylo řečeno, záleží na výběru párových hodnot a na jejich počtu (tj. délce řady). Úspěšnost bilančních modelů je obecně možno testovat **shodou párových hodnot**:

- odtoků v uzávěrovém profilu povodí
- stavů hladiny podzemní vody v reprezentativním intersektu
- hodnot vlhkostí půdy v reprezentativním půdním profilu.

Vzhledem k tomu, že v našem případě diskutujeme uplatnění „**koncepčních modelů**“, je jasným kritériem shoda odtoků v uzávěrovém profilu povodí. Čím delší časová řada, tím bude kritérium shody objektivnější. Analýza shody denních odtoků (tj. hydrogramů), příp. dekadních prostřednictvím hodnot koeficientu determinace a variace je tedy nesporně nejvhodnějším kritériem.

Při vyhodnocení shody pozorovaných a vypočtených hydrogramů je doporučeno postupovat dle změněných instrukcí WMO. Toto vyhodnocení bývá prováděno podle následujících kritérií:

1. Koeficient determinace *RE* (efficiency coefficient)

$$RE = 1 - \left(\frac{F}{F_o} \right) \quad (4-1)$$

2. Koeficient variace *PE* (variation coefficient)

$$PE = \frac{\left(\frac{F}{N} \right)}{Q} \quad (4-2)$$

kde: $F = \sum_{i=1}^N (Q_i - QC_i)^2 \quad (4-3)$

$$F_o = \sum_{i=1}^N (Q_i - Q)^2 \quad (4-4)$$

kde: Q_i měřené pořadnice průtoku ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
 QC_i vypočtené pořadnice průtoku ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
 Q aritm. průměr měřených průtokových. pořadnic ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
 N počet pořadnic průtoku (-)

Podle těchto kritérií je možno shodu měřeného a vypočteného hydrogramu vyhodnotit následovně:

<i>RE</i>	<i>PE</i>	<i>Shoda</i>
1,0 – 0,8	0,0 – 0,15	velmi dobrá
0,8 – 0,7	0,15 – 0,30	dobrá
0,7 – 0,6	0,30 – 0,40	použitelná

Tab. 4-2 Kritéria shody měřeného a vypočteného hydrogramu

Příkladem, ilustrujícím použití možnosti verifikace výsledků dle kritérií *RE* a *PE* je simulace hydrologické bilance vegetační sezóny 1.5. - 31.10.1982 experimentálního povodí Černé Nisy (uzávěrový profil Uhlířská, plocha povodí $A = 1,75 \text{ km}^2$). Verifikační kritéria *RE* a *PE* byla vypočtena z pozorování časových řad měřených a vypočtených odtoků (modelem WBCM-5) denních a dekadních. Přesnější verifikační analýza denních odtoků logicky přináší méně příznivé kritériální hodnoty, než při analýze dekadních odtoků:

Denní odtoky:	$RE = 0,91$	$PE = 0,06$
Dekadní odtoky:	$RE = 0,98$	$PE = 0,03$

Závěrem je možno říci, že čím nižší počet komparativních hodnot, tím menší přesnost a spolehlivost verifikační analýzy a rovněž méně účinná procedura optimalizace parametrů modelu.

4.5 TYPY VÝSTUPŮ MODELOVÝCH ŘEŠENÍ

Původní verze bilančních modelů (WBCM, SMAR aj.) byly vytvořeny v systému MS DOS, a tudíž měly limitované možnosti grafické interpretace výsledků. Nicméně jejich tabelární výstupy je možno použít ke grafickému zpracování jiným SW (např. EXCEL, COREL apod.). Výsledné vektory se tak stávají vstupními daty pro jejich eventuální další (především grafické) zpracování. Příklady uvádí *PŘÍLOHA E*.

Výstupními daty WBCM jsou:

- základní údaje o modelu
- název a plocha povodí, logické proměnné
- počáteční podmínky (proměnných)
- hodnoty parametrů (počáteční pro identifikaci, quasi-konstantní pro simulaci systému)
- finální hodnoty parametrů po jejich optimalizaci (pouze pro identifikační fázi systému)
- **výsledné denní hodnoty proměnných** (po dekadách v mm: datum, dešť, intercepce, potenciální a aktuální evapotranspirace, infiltrace, přímý odtok, vlhkost aktivní zóny, její deficit, hloubková infiltrace do podzemních vod, základní odtok, celkový odtok)
- **výsledné měsíční hodnoty proměnných** (dtto)
- **sumární roční (sezónní) hodnoty proměnných** (dtto)
- chyba bilance, evaluační kritéria (*RE*, *PE*).

Tyto údaje se tisknou automaticky v tabelární formě, na disk se zaznamenává „odečtová“ tabulka hlavních bilančních proměnných, nejčastěji v desetidenních intervalech (tj. dekadách) pro další zpracování (např. v EXCELU). Její příklad uvádí následující tabulka *TAB. 4-3*. Grafické příklady jsou uvedeny v *PŘÍLOZE A*. Modernější verze modelu WBCM-5, programovaná ve „VISUAL BASICu“, je plně uživatelsky interaktivní a nabízí řadu možností grafické interpretace v systému WINDOWS.

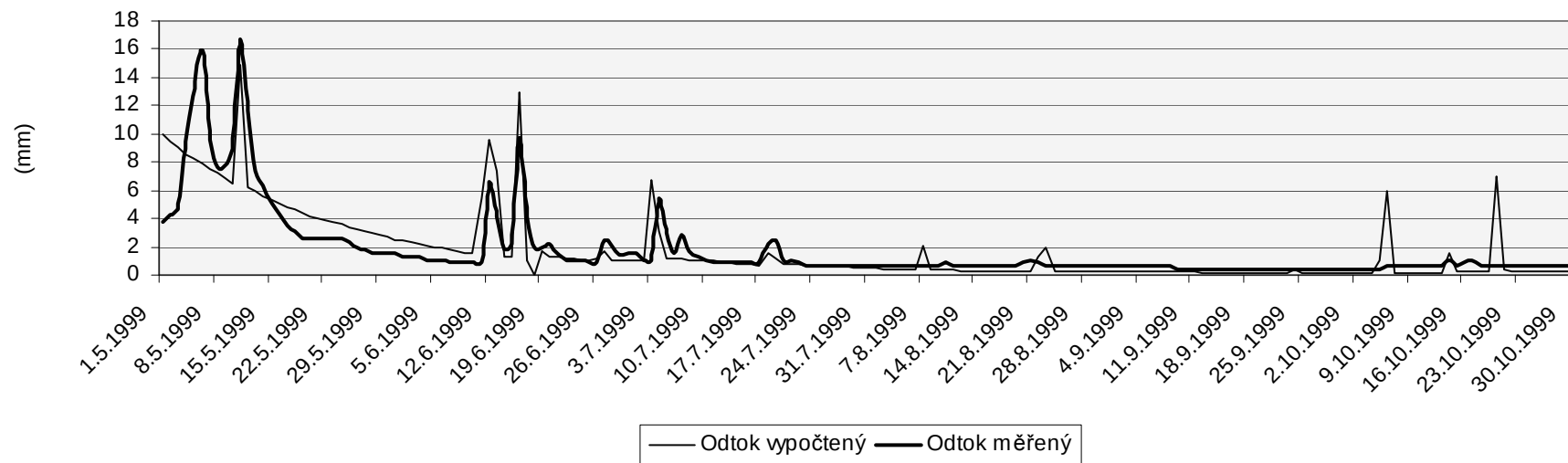
Podobný vývoj lze dokumentovat i u modelu SMAR. Původní verze, programovaná jazykem FORTRAN, je v současnosti transponována do programovacího jazyku VISUAL BASIC (verze U.C.G. i verze, adaptované na podmínky ČR). Základní schéma modelu je doplněno vnějšími výpočtovými moduly (modul tání sněhu, generátor počasí, výpočet ET_A v závislosti na struktuře vstupních dat, vyhodnocení podmínek zemědělského hospodaření v prostředí ArcView, vyhodnocení půdních poměrů atd.). Uplatnění modelu je demonstrováno na řešených příkladech v *PŘÍLOHOVÉ ČÁSTI (B,C,D)*. Požadavky na vstupní data uvádí *PŘÍLOHA G*.

Dekáda	Srážky	Aktuální evaporace	Změny objemu podpo- vrchových vod ΔW		Odtok	
			nenасыčené	nasycené	vypočtený	měřený
1	46,70	13,68	0,10	33,34	13,42	14,30
2	17,10	26,72	-18,74	9,12	2,27	1,10
3	34,30	16,00	-1,76	20,06	7,75	6,80
4	8,80	20,00	-16,59	5,39	2,00	5,40
5	45,00	23,92	-4,19	24,83	6,72	3,80
6	26,50	22,80	-14,25	17,80	8,95	6,70
7	172,30	16,24	29,77	110,28	71,61	78,10
8	41,70	18,16	-5,33	28,25	15,16	16,30
9	63,30	13,20	4,08	46,64	37,87	35,00
10	23,60	19,76	-12,63	16,47	12,34	9,10
11	2,00	23,92	-22,25	0,33	0,22	3,10
12	5,30	22,02	-18,24	1,52	0,54	1,50
13	49,10	13,28	9,92	24,98	15,94	12,60
14	10,70	14,26	-6,83	3,27	2,10	1,00

Tab. 4-3 Model WBCM-5: simulace povodňové situace na povodí Rokytenky v roce 1997
(všechny údaje jsou v mm)

Hydrologická bilance povodí Černé Nisy (uzávěr. profil Uhlířská) 1.5.-31.10.1982: Model WBCM-5

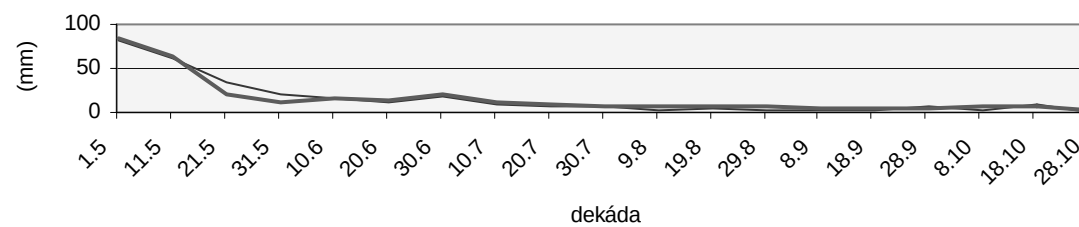
Denní odtoky



Koeficient determinace $RE = 0,91$

Koeficient variace $PE = 0,06$

Dekádní odtoky



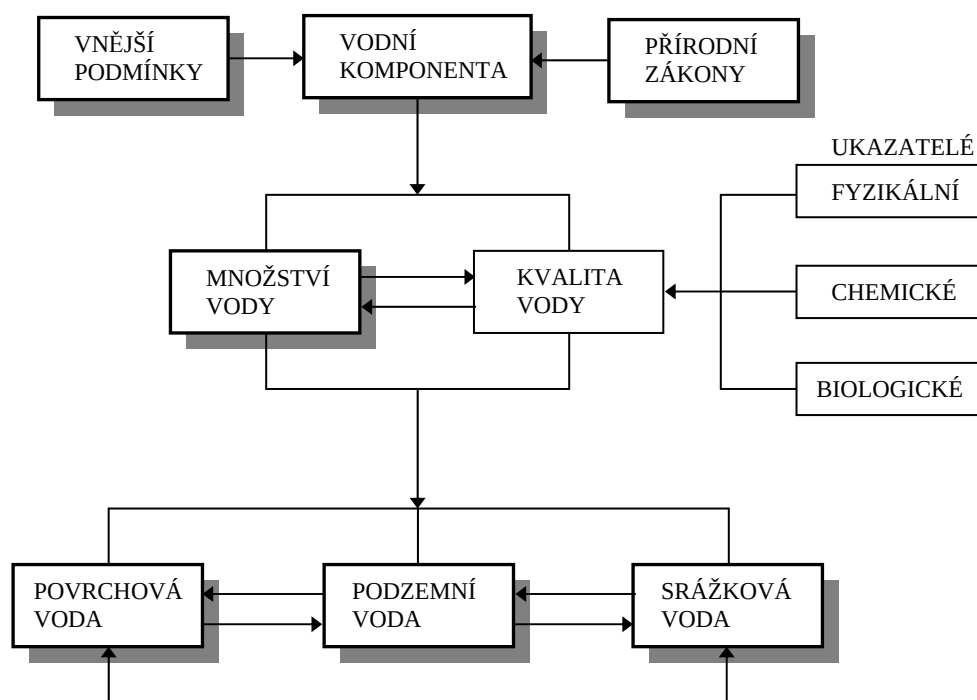
Koeficient determinace $RE = 0,98$

Koeficient variace $PE = 0,03$

Obr. 4-7 Porovnání verifikace výsledků denních a dekádních odtoků (WBCM-5)

5 UPLATNĚNÍ TÉMAT METODIKY VE VODOHOSPODÁŘSKÉ A ZEMĚDĚLSKÉ PRAXI

Problematika hydrologického modelování matematickými modely, propojenými přímo, či nepřímo s existujícími databázemi příbuzných oborů je v současnosti živým, zcela otevřeným tématem. Šířka problematiky, vyjádřená jednak různorodostí typů modelů, zvolenými metodickými přístupy i účelem jejich využití, naznačuje obtížnost samotného tématu a nelze prakticky předpokládat, že pracovní materiál tohoto rozsahu bude schopen pojmut možné varianty přístupů k jejich uplatnění. Hydrologické procesy v povodích však ovlivňují celé spektrum **souvisejících přírodních dějů** (OBR.5-1). Rozvoj výpočetní techniky dnes obsáhne prakticky celou oblast lidských aktivit, hydrologii nevyjímaje. Tyto skutečnosti předznamenávají budoucí vývoj informačních technologií, poskytujících přehledné a účelu využití přizpůsobené informace (o krajině, o povodí, o vlivu zemědělských činností, o složkách přírodního prostředí). K tvorbě informačních systémů ve vodním hospodářství, zemědělství, lesnictví a ekologii – podporujících interdisciplinární přístup v rámci koncepce a využití krajinných systémů v našich přírodních a hospodářských podmínkách, by předložená metodika mohla přispět tématem – využití koncepčních hydrologických modelů.



Obr. 5-1 Klasifikační systémy a jejich vztah k metodice

Hlavní uplatnění bilančních hydrologických modelů, aplikovaných v podmínkách malých zemědělsko-lesních povodích, lze předpokládat:

- **v projekci** při zpracování územních studií a posouzení hydrologické účinnosti navrhovaných vodohospodářských a krajinných opatření v rámci jednotlivých staveb (změny využívání stávajících, nebo projekce nových), hodnocení vlivu krajinného plánování i dalších antropogenních činností na hydrologický režim

- **v realizační sféře** (budování zpevněných ploch, odkanalizování obcí, řešení přilehlého extravilánu obcí, biocenter), zpracování projektů pozemkových úprav atd.
- v přípravě **organizačních opatření** pro ochranu před záplavami, protierozní ochranu půd, ochranu extravilánu obcí, zpracování individuálních plánů protipovodňové ochrany exponovaných povodí (stav počátečního nasycení povodí)
- **ve státní správě** při posuzování studií revitalizací říčních systémů, vlivu změny organizace půdního fondu a intenzity jeho využití, vlivu využití vodohospodářských staveb apod.

Zaměření metodiky podporuje rozšíření metod hydrologického modelování při řešení vodohospodářských úkolů v kulturní krajině. Nalezne uplatnění při návrzích pozemkových úprav (jednoduchých i komplexních), ve studiích revitalizací říčních systémů, při revizích pásem hygienické ochrany vodních zdrojů, ochraně půdního fondu a při organizaci zemědělských a dalších hospodářských aktivit v oblastním až regionálním měřítku.

Předložená metodická příručka vytváří podmínky v projekční a provozní praxi operativně realizovat hlavní cíle udržitelné vodohospodářské politiky, vyplývající z harmonizace našeho práva se Směrnicí Rady Evropy k vodohospodářské politice a vodohospodářskému plánování. Uplatněním zásad hydrologického modelování v konkrétních lokalitách lze v potřebné úrovni řešit jak environmentální cíle rozvoje šetrného hospodaření s vodní komponentou v krajině (např. zajištěním rovnováhy mezi čerpáním a plněním vodních zdrojů), ochranu krajiny a živých tvorů před nepříznivými následky sucha a povodní, tak i ekonomické cíle jejího udržitelného rozvoje (např. v oblasti snížení nákladů na úpravu pitné vody, snížení škod způsobených suchem nebo povodněmi, minimalizaci nákladů na údržbu a tvorbu ekologicky, hospodárně i esteticky vyrovnané krajiny, atd.). Uvedené principy modelování lze využít při posuzování jednotlivých vodohospodářských, lesnických či zemědělských opatření na hydrologický, environmentální i hospodářský aspekt v dané krajině.

6 ZÁVĚREČNÁ DOPORUČENÍ

Po uplynutí období více než dvaceti let experimentálního vývoje technik různých matematických hydrologických modelů a pozoruhodného vývoje výpočetních technologií (PC a WS) je vysoce aktuální nabídnout některé z úspěšně vyzkoušených modelů praxi. Jedná se zvláště o podniky státní správy, či soukromého sektoru, ať již v oblasti projekční nebo investorské. Konkrétně na úseku státní správy jde o podniky Povodí a.s., Státní meliorační správy a Správy vodních toků Lesů ČR. Rovněž útvary místní, okresní (odborné životního prostředí) a regionální správy ocení možnost operovat nástrojem, kvantitativně vyhodnocujícím **hydrologické režimy** povodí zejména v důsledku změn, realizovaných na povodí. Posouzení vlivu staveb (urbanizace) na vodohospodářské poměry území, a tedy i na jeho hydrologickou bilanci ukládá v České republice zákon č.14/1998 Sb. o vodách (dříve 138/1973). Kromě toho je vyžadován posudek **vlivu stavby na životní prostředí (EIA)** dle zákona č.244/1992 Sb. Projekty staveb, technologií a různých činností podléhají tedy těmto posouzením dle zákona, přičemž se dále posuzuje rozsah staveb nebo území, chráněných podle zvláštních předpisů. Předpokládané vlivy se přitom hodnotí jak při běžném provozu, tak i při případných haváriích. Tento zákon jmenovitě ukládá nutnost posuzování mj. vlivu odlesnění, nevhodných melioračních zásahů a změn kultur (viz Příloha č.1 zákon 244/92 Sb.) na režimy povrchových a podzemních vod (§ 3, a.1).

Proto by bylo žádoucí, aby se obdobně jako při zkoumání vlivu staveb, hodnotily i další vlivy změn využívání půdního fondu (kultur), zejména změny v zemědělském a lesním

hospodářství, případně vlivy přírodních katastrof (povodně, sesuvy půd). Je nutno připomenout, že model hydrologické bilance je jedinečným nástrojem ke kvantifikaci stupně nasycení aktivní zóny povodí, signalizující **povodňové nebezpečí**. Bilanční modely jsou nástroje daleko dokonalejší, než současně (již více než 20 let) pro tento účel používaná metoda ČHMÚ ukazatele předchozích srážek (UPS-API).

Souhrnně lze stručně formulovat **oblasti využití** bilančních hydrologických modelů formou EIA (nebo obdobně) v následujících oblastech:

- u všech stupňů krajinného plánování např. při zpracování územních studií (vliv urbanizace na hydrologický režim), vodohospodářských studiích (odkanalizování obcí) atd. v souladu se Směrnicemi EU
- zpracování plánů protipovodňové ochrany (stav počátečního nasycení povodí)
- zpracování studií revitalizací říčních systémů (změny půdního fondu a změny v hospodaření)
- zpracování komplexních pozemkových úprav (včetně protierozní ochrany půdy), aj.

7 LITERATURA

- ANDERSON M.G. - BURT T.P., 1985: Hydrological Forecasting. J. Wiley and Sons, N.Y. USA.
- BECKER A. - SERBAN P., 1990: Hydrological Models for Water Resources System Design and Operation. WMO Report No. 740 (64pp.)
- BERGSTROM S., 1975: The development of a snow routine for the HBV-2 model. Nordic Hydrology, 6, pp. 73-92.
- BERGSTROM S., 1992: The HBV model - its structure and applications. SMHI Raports RH, No.4, Norköping.
- BEVEN K.J., 1986: Runoff production and flood frequency in catchments of order n : an alternative approach. In: Scale Problems in Hydrology (editor GUPTA, V.K. et al.) pp. 107-131. D. Riedel Publishing Comp.
- BLACKIE J.R. - EELES W.O., 1985: Lumped catchment models. In: Hydrological Forecasting. J. Wiley & Sons, pp. 311-346.
- BLAŽKOVÁ Š., 1993: Srážkoodtokové modely založené na principu jednotkového hydrogramu. Práce a studie VÚV, sešit, 183, VÚV TGM Praha.
- BOX G.E.P. - JENKINS G.M., 1970: Time Series Analysis. Forecasting and Control. Holden-Day, San Francisco, California, U.S.
- BRACKENSHIEK D.L. - RAWLS W.J., 1981: An infiltration based rainfall-runoff model for a SCS Type II distribution. Winter Meeting ASAE, Palmer House, Chicago, Illinois.
- BROOKS M. et al, 1975: SSAR Model (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation), U.S. Army Eng. Division.
- BUCHTELE J., 1994: Land use and Streamflow changes in the Labe river basin as simulated by a rainfall-runoff model. In: Flow Regimes from Experimental and Network Data (FRIED), IAHS Publ. No. 221, pp. 207-212
- BURNASH R.J.G. - FERRAL R.L. - MCGUIRE R.A., 1973: A Generalized Streamflow Simulation System-Conceptual Modeling for Digital Computers. U.S. Dept. of Commerce. National Weather Service and State of California, Dept. of Water Resources.
- CALVER A. - WOOD W.L., 1989: On the discretization and cost - effectiveness of a finite element solution for hillslope subsurface flow. Journal of Hydrology, 110, pp. 165-179.
- CLARKE R.T., 1973: Mathematical models in Hydrology, FAO Paper No. 19, Rome.
- DAMAŠKOVÁ H., 1989 : Podklady primární realizace (Uživatelská příručka - uplatnění modelu SWATRE pro návrh parametrů a prognózu účinnosti odvodnění). ZZ P 06-329-813-01-03 VÚZZP Praha
- DOLEŽAL F. - PÝCHA M. - PROBST P. - DUMBROVSKÝ M., 1995: Rozbor a ověření funkce modelu EPIC. Samostatná součást ZZ za VE01 „Regulace povrchového odtoku protierozními opatřeními“. Koordinátor Janeček M., VÚMOP Praha
- DOLEŽAL F. - JAIN S.K. - DAMAŠKOVÁ H. - JANEČEK M. - TIPPL M. - CAWLEY T., 1998: Water balance, water quality and soil erosion on agricultural lands in the foothill zone of the Bohemo-Moravian Highland. In: „Catchment Hydrological and Biochemical Processes in Changing Environment“, Conference proceedings, Liblice, Czech Republic, September 22-24, 1998. Published by Institute of Hydrodynamics (Academy of Sciences of the Czech Republic), Czech Hydrometeorological Institute and National Committee for Hydrology of the Czech Republic. Pp. 33-35.

- DOLEŽAL F. - SOUKUP M. - KULHAVÝ Z., 1999: Výzkum vlivu odvodňovacích soustav v zemědělské krajině na velikost a průběh extrémních odtoků. Workshop 99 GAČR - Extrémní hydrologické jevy v povodích. ČVUT Praha, 25. října 1999
- DOLEŽAL F. - SOUKUP M. - KULHAVÝ Z., 1999: Poznámky k hydrologii drenážního odtoku. Vědecké práce. VÚMOP Praha, 2000 (předáno do tisku)
- DUNNE T., 1978: Field studies of hillslope flow processes. In Hillslope Hydrology (Kirkby M. J., editor). J. Willey and Sons, pp. 227-294.
- FEDDES R.A. - BELMANS C. - WESSELING J.G., 1983: Simulation model of the Water balance of a cropped soil: SWATRE. Journal of Hydrology 63, 3/4: 271-286
- FEDDES R.A. - WESSELING J.G. - DE GRAAF M., 1985: Program SWACRO. Simulation model of the water balance of a cropped soil providing different types of boundary conditions including the possibility to simulate crop yield and irrigation. Institute for Land and water Management Research, Wageningen.
- HAWKINS R.H., 1979: Runoff Curve Numbers from Partial Area Watersheds. Journal of Irrigation and Drainage Div. ASCE Vol. 105, No IR 4, (pp. 375-389).
- HJELMFELT A.T., 1991: Investigation of Curve Number Procedure. Journal of Hydraul. Eng., Vol. 117, no. 6, pp. 725-737.
- JANEČEK M. a kol., 1983: Ochrana zemědělské půdy před erozí. Metodiky ÚVTIZ 11/1983 (77 str.)
- JANEČEK M. a kol., 1992: Ochrana zemědělské půdy před erozí. Metodiky ÚVTIZ 5/1992 (110 str.)
- KACHROO R.K., 1992: River flow forecasting. Part 5. Applications of conceptual model. J. Hydrol., 133: 141-178
- KAŠPÁREK L. - KREJČOVÁ K., 1993: Chronologická hydrologická bilance povodí. Výzkumná zpráva "Vliv antropogenní činnosti na změny odtokového režimu a vydatnost zdrojů vody". VÚV TGM 1990-93.
- KOSKO B., 1992: Neural Networks and Fuzzy Systems. A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence. London, Prentice-Hall International Editions, 449p.
- KOSTELANSKÝ F. A KOL., 1997: Obecná produkce rostlinná. Mendelova zemědělská a lesnická universita v Brně, 212s.
- KOVÁŘ P., 1984: Řešení extrémních srážko-odtokových procesů v povodí matematickým modelem. Sborník Vodní toky 1984, Hradec Králové, str. 87-98.
- KOVÁŘ P., 1990: Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích. Monografie, VŠZ Praha, Editpres MON, ISBN 80-213-0088-4, (136 str.)
- KOVÁŘ P., 1990: Application of adopted curve number model on the Sputka catchment. Hydrology of Mountainous Areas. IAHS publ. No. 190, pp. 391-401.
- KOVÁŘ P. - SVITÁK M. 1994: A possibility of modelling direct runoff on small catchments using Geographical Information Systems. Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 35, pp. 345-357, Hamburg.
- KOVÁŘ P., 1994: Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích. Doktorská disertační práce, LF ČZU Praha.
- KOVÁŘ P. a kol, 1996: Aplikace hydrologických modelů v povodí Rokytenky. Závěrečná zpráva GAČR 103-94-0653: Transportní procesy v pramenných oblastech. Praha, 66 str.

- KOVÁŘ P., 1998: Water Balance Modelling on Small Forested Catchments. In: Environment Forest Science (Editor K. Sassa), Kluwer Academic Publishers, London.
- KULHAVÝ Z. - KVÍTEK T. - SOUKUP M., 1992: Retardace a regulace vody na zemědělské půdě. Zásady technickoorganizačních opatření, arch.č.310-956. Ministerstvo zemědělství České republiky, VÚ MOP Praha - Zbraslav
- KULHAVÝ Z., 1995: Příspěvek řešení vodohospodářského managementu zemědělsky využívaného povodí. Disertační práce, VÚMOP Praha
- KULHAVÝ Z. a kol., 1999: Hodnocení vlivu zemědělského hospodaření na odtokové poměry malých povodí aplikací metod matematického modelování. Výroční zprávy projektu EP 7062 za roky 1997, 1998, 1999. VÚMOP Praha
- KULHAVÝ Z., 1999: Využití hydrologického bilančního modelu při posouzení retenčního potenciálu malého zemědělsko-lesního povodí. Sborník 'Krajina, meliorace a vodní hospodářství na přelomu tisíciletí.' 22.-23.9.1999, Brno, str.187-194
- KULHAVÝ Z. - SOUKUP M. - DOLEŽAL F., 1999: Měření drenážních odtoků za extrémních hydrologických situací. Příspěvek workshopu Extrémní hydrologické jevy v povodích. GAČR 103/99/1470 Praha
- KUTÍLEK M., Nielsen D.R., 1994: Soil Hydrology, McGraw-Hill inc. Katena Verlag, Cremling-Destedt, Deutschland
- LIANG G.C., 1991: Computational Methods in Hydrology. Dept. of Engineering Hydrology, University College Galway, Ireland, 1991
- MAIDMENT D. R., 1993: Handbook of Hydrology. McGraw-Hill inc., ISBN 0-07-039732-5, N. York, USA.
- MELOUN M. - MILITKÝ J., 1992: Statistické zpracování experimentálních dat na osobních počítačích. Díly I-II, A,B. 932 stran, Finish Pardubice
- MOREL H. J. - SEYTOUX - VERDIN J.P., 1981: Extension of the Soil Conservation Service. Rainfal-runoff methodology for ungauged watersheds. Colorado, USA.
- NATALE L. - TODINI E., 1977: A constrained parameter estimation technique for linear models in hydrology, J. Wiley &, Chichester, U.K.
- NĚMEC J., 1986: Hydrological Forecasting. D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland.
- O'CONNEL P.E. - NASH J.E. - FARRELL J.P., 1970: River flow forecasting through conceptual models. Part 2. The Brosna catchment at Ferbane. J. Hydrol., 10: 317-329
- O'CONNOR K.M. - LIANG G.C. and all., 1995: River Flow Forecasting. International Advanced Course - Dept. of Engineering Hydrology, University College Galway, Ireland
- PECK E., 1976: Catchment modelling and initial parameter estimation for the National Weather Service River Forecasts System, NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO-31, June, Washington, USA.
- PENMAN H. L., 1963: Vegetation and Hydrology. Tech. Comm. 53. C. Burea of Soils, Harpenden, England.
- PONCE V. M. - HAWKINS R.H., 1996: Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity? In Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 1, No. 1, ASCE, USA (pp. 11-19).
- RITZEMA H.P., (EDITOR-IN-CHIEF), 1994: Drainage Principles and Applications. ILRI Publication 16. ILRI, P.O.Box 45, 6700 AA Wageningen, The Netherlands.
- SHERMAN L. K., 1932: Streamflow from rainfall by a unit hydrograph method. Eng. News Record, 108, pp. 501-505.

- SINGH V.P. and all., 1995: Computer Models of Watershed Hydrology. Dep. of Civil Environmental Engineering Louisiana State university.
- SNYDER F. F., 1938: Synthetic unit-graphs. Trans. Am. Geophysical Union, Vol. 19, pp. 447-454.
- SOUKUP M., FÍDLER J., KULHAVÝ Z.- Vliv melioračních opatření na retenční potenciál krajiny, maximální odtok a průběh povodní. Zpráva za etapu 5.2.4. dílčího úkolu 5.2.: Vliv stavu a využívání krajiny na povodňovou situaci z úkolu 312-4 „Vyhodnocení povodní 1997“, VÚMOP Praha, ČHMÚ, ČZU Praha, květen 1998-09-02
- SOUKUP M. - HRÁDEK F., 1999: Optimální regulace povrchového odtoku z povodí. VÚMOP Praha
- STARÝ M., 1998: Neuronové sítě a předpověď kulminačních průtoků a objemů povodní v povodí řeky Ostravice. Uzávěrkový profil Šance. Vodohosp. čas. 46., s.45-61.
- TUČEK J., 1998: Geografické informační systémy. Principy a praxe. 424 str. Computer Press
- U.S. SCS, 1972: National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Washington, D.C., USA.
- U.S. SCS, 1986: Urban Hydrology for Small Watersheds, Technical Release 55 (updated), USA (13pp.).
- U.S. SCS, 1992: Soil Conservation: Program Methodology, Chapter 6.12: Runoff Curve Numbers, USA (13 pp.).
- WILLIAMS J.R. - LA SEUR W.R., 1976: Water Yield Model using SCS Curve Numbers. Journal of Hydraulic Division, HY9, pp. 1241-1253.
- WILLIAMS J.R. - DYKE P.T. - FUCHS W.W. - BENSON V.W. - RICE O.W. - TAYLOR E.D., 1990: EPIC - Erosion/Productivity Impact Calculator. Model Documentation & User Manual. U. S. Department of Agriculture (Agricultural Research Service. Technical Bulletin No. 1768.
- WMO, 1990: Hydrological models for water resources system design and operation, WMO No. 740, Operational Hydrology No. 74, Geneva
- WMO, 1992: Simulated real-time intercomparison of hydrological models, WMO No. 779, Operational Hydrology No. 38, Geneva
- ZHANG J.Y - O' CONNOR K.M. - LIANG G.C., 1995: SMAR: A User Friendly Software Package for River Flow Forecasting. Version 1.1 Dept. of Engineering Hydrology, University College Galway, Ireland.
- Zákony 138/1973 Sb. O vodách (vodní zákon) ve znění zákona č. 14/1998
458/1999 Sb. O správě ve vodním hospodářství
244/1992 Sb. Vliv staveb na životním prostředí
17/1992 Sb. O životním prostředí
114/1992 Sb. O ochraně přírody a krajiny
289/1995 Sb. O lesích
284/1991 Sb. O pozemkových úpravách

PŘÍLOHOVÁ ČÁST

PŘÍLOHA A.

Studie vlivu vodohospodářsky významných opatření na bilanci vod povodí Kateřinského potoka (KOC Šeberov, Praha 4)

Cílem přílohy je ukázat interpretační možnosti kvantifikace hydrologické bilance povodí modelem WBCM. Studie řeší bilanci stávajícího stavu a současně simuluje stav po realizaci projektu výstavby Komerčně obchodního centra (KOC) Šeberov v jižní části pražské aglomerace, kde je navrhována výstavba o celkové ploše cca 910 ha v horní části povodí Kateřinského potoka, který je přítokem Kunratického potoka. Cílem bylo porovnání rozdílů základních bilančních složek povodí, zejména s ohledem na změny přímého odtoku, infiltrace a zvláště dotace podzemních vod, ovlivněné výstavbou. Studie byla předložena jako součást podkladů pro územní plán rozvoje hl.m. Prahy.

Podklady

Plocha povodí měří 90,5 ha. Terén povodí je plochý s nejvyšší kótou 310 m n.m., jeho severní částí prochází dálnice D1 Praha – Brno. Průměrný roční srážkový úhrn pro stanici Průhonice (1901 – 1950) je 611 mm (ve vegetačním období 383mm) a 559mm pro nejbližší stanici Praha – Hostivař. Průměrná roční teplota 8,1 °C, Langův dešťový faktor 75. Geologickým podkladem jsou algonické břidlice, překryté svahovinami kvartéru. Na nich se vytvořily hnědé půdy (HP). Zrnitostní složení orniční vrstvy odpovídá převládajícímu půdnímu druhu: hlína písčitá. Hladina podzemních vod je poměrně mělká (do 2,0 m, místy hlouběji), avšak často nespojitá.

Základními podklady k modelovým výpočtům byly:

- Hydrometeorologická data (denní srážky a výpar z volné vodní hladiny, příp. data k výpočtu potenciální evapotranspirace, dále dekádní odtoky dle nichž se optimalizují parametry modelu)
- Půdní data (klasifikace půd, celková pórovitost, polní vodné kapacity, hydraulická vodivost, případně sorptivita a počáteční vlhkost aktivní nenasyčené zóny na začátku vegetačního období)
- Parametry modelu (fyziografické charakteristiky povodí, půdní a hydrologické parametry)

Výsledky studie

Hydrologické bilance byly řešeny matematickým modelem (WBCM-5) pro vegetační období (duben–říjen včetně) let 1993 a 1994, kdy na základě měření průtoků byly kalibrovány parametry modelu (identifikace systému) a dále pro extrémní roky 1965 (mokrý rok), 1992 (suchý rok) 1986 (průměrný rok) vždy pro tři stavy povodí:

- A/ stávající stav
- B/ stav po výstavbě bez kompenzačních opatření
- C/ stav po výstavbě s navrhovanými kompenzačními vodohospodářskými opatřeními

Model byl aplikován s denními daty srážek ze stanice ČHMÚ Praha–Libuš a daty výparu z vodní hladiny ze stanice Praha-Karlov. Dekádní (10ti-denní) odtoky v uzávěrovém profilu povodí (vtok rybníka Kovářský) byly vypočteny z pozorování průtoků. Z půdních dat bylo použito hodnot celkové pórovitosti, průměrné polní retenční vodní kapacity, hodnot

nasycené hydraulické vodivosti a zrnitostního rozboru k zatřídění půd. Bilanční výpočty identifikačních období 1993 – 1994 i simulačních let extrémních, tj. 1965, 1992 a 1986 byly provedeny implementací modelu WBCM-5.

A. Posouzení stávajícího stavu před výstavbou

V první fázi výpočtů byly bilancovány měřené roky 1993 a 1994 za účelem identifikace parametrů. Z bilanční analýzy vyplývá, že rok 1993 (i když z důvodů začátku měření až 6/93) byl srážkově daleko bohatší, než poměrně suchý rok 1994. Tomu odpovídají sledované hodnoty odtoku a zejména dotací podpovrchových vod, kdy v roce 1993 dochází ke zvýšení zásob podzemní vody (současně zachování zásob půdní vody) a v roce 1994 se zásoba podzemní vody zvyšuje pouze na úkor deficitu půdní vody, což prakticky znamená téměř nulový přírůstek výsledné zásoby podpovrchových vod. Shoda měřených a vypočtených odtokových výšek byla u obou sledovaných období velmi dobrá.

Po identifikační výpočtové fázi a nalezení optimálních hodnot parametrů modelu WBCM-5 (*SMA*X, *G*WM, *B*K) bylo přikročeno k simulaci hydrologických bilancí obou let extrémních (1965, 1992) a roku průměrného (1986). Tabulka *TAB.A-1* poskytuje sezónní bilanční výsledky těchto období. Deficit ve výsledné změně objemu podpovrchových vod je příznačný pro suchý rok a zcela jistě ho nebude možno vyrovnávat žádnými technickými vodohospodářskými zařízeními, protože srážkový úhrn nekryje potřeby výparu a odtoku.

Bilanční člen (mm)	MOKRÝ 1965	PRŮMĚR 1986	SUCHÝ 1992
Srážky (SRAIN)	512,3	348,7	245,3
Celkový odtok vypočtený (STF)	112,2	37,1	19,7
z toho přímý odtok (SOF)	0,8	9,2	9,7
Aktuální výpar (AE)	235,2	282,2	250,1
Výsledná změna objemu podpovrchových vod (ΔW)	165,8	28,8	-26,4
Chyba bilance (%)	0,0	0,0	0,8

Tab. A-1 OKC – ŠEBEROV PŘED VÝSTAVBOU (SIMULACE)
Simulační období 1965, 1986, 1992, (1/4 – 31/10)

B. Posouzení cílového stavu bez kompenzace snížené infiltrační schopnosti povodí

Hospodářské využití plochy povodí bude zástavbou podstatně změněno, což nesporně ovlivní hydrologický režim. Podíl zastavěných a zpevněných ploch se zvýšil na 32 % celkové plochy povodí, z toho plocha střech (čisté vody) činila 10 % a plocha komunikací a parkovišť 22 %. Parametry ovlivňující tvorbu odtoku (*CN*) interpretace (*WIC*) i počáteční podmínky byly změněny tak, aby odpovídaly projektovaným změnám. Tabulka *TAB.A-2* uvádí výsledky.

Bilanční člen (mm)	MOKRÝ 1965	PRŮMĚR 1986	SUCHÝ 1992
Srážky (SRAIN)	512,3	348,7	245,3
Celkový odtok vypočtený (STF)	97,6	25,4	18,0
z toho přímý odtok (SOF)	24,9	17,6	16,0
Aktuální výpar (AE)	256,5	307,9	267,3
Výsledná změna objemu podpovrchových vod (ΔW)	158,3	15,5	-41,4
Chyba bilance (%)	0,0	0,0	0,5

Tab. A-2 OKC – ŠEBEROV PO VÝSTAVBĚ (Bez kompenzačních opatření)
Simulační období 1965, 1986, 1992, (1/4 – 31/10)

Hlavní složky hydrologické bilance pro tuto variantu jsou graficky znázorněny v OBR.A-1. Z tabulek TAB.A-1 a TAB.A-2 vyplývají rozdíly v jednotlivých bilančních složkách stávajícího stavu před výstavbou a po výstavbě, bez jakékoliv kompenzace přídatnými vodohospodářskými opatřeními. Tyto rozdíly v nejdůležitějších složkách hydrologické bilance před a po výstavbě jsou:

Složka	1965	1986	1992
Přímý odtok SOF (mm)	+24,1	+8,4	+6,3
Změna objemu podpovrchových vod (ΔW)	-7,5	-13,3	-15,0

Tab. A-3 Rozdíly nejdůležitějších složek hydrologické bilance pro varianty A. a B.

Deficity v dotaci podpovrchových vod vlivem plánované výstavby bude třeba snížit vlivem sekundární infiltrace, zejména potom zasakováním čistých srážkových vod (ze střech). Obdobné snížení objemu přímého odtoku, zvláště povrchového, by mělo nastat po navržení propustných infiltračních příkopů a polderů v zájmové oblasti zástavby.

C. Posouzení cílového stavu po návrhu kompenzačních vodohospodářských opatření

Ke snížení objemů povrchového odtoku a k jeho infiltraci do půdy a tím i zvýšení dotace podpovrchových vod budou sloužit kompenzační zařízení. Jejich infiltrační schopnosti jsou dle hydropedologických vlastností půd předpokládány následovně:

- Plochy střech (9,4 ha) odvádějí čistou srážkovou vodu, která zasakuje do vsakovacích studní s kapacitou 17 l.s^{-1} , což představuje 370 m^3 . Tyto studny (počet 27) budou propojeny drenážním potrubím o vsakovací kapacitě $7,9 \text{ l.s}^{-1}$, což činí 170 m^3 . Celkem čistá voda ze střech může infiltrovat do výše objemu 540 m^3 .
- Přечиštěná voda z komunikací a parkovišť (20 ha) bude částečně infiltrovat svodnými příkopy o infiltrační kapacitě 21 l.s^{-1} , což je 450 m^3 . Nejúčinnějším retenčním, ale i infiltračním zařízením však budou poldery, které budou vsakovací kapacitou 137 l.s^{-1} na ploše 1,2 ha infiltrovat cca $2\,970 \text{ m}^3$. Tyto údaje byly modelem WBCM-5 zpracovány při simulaci popsaného stavu.

Parametr	Varianta B	Varianta C
Počáteční CN	85 (-)	78 (-)
WIC	1,5 mm	1,0 mm
DCAP1 (studny)	-	0,6 mm
DCAP2 (příkazový)	-	0,5 mm
DCAP3 (poldery)	-	3,3 mm

Tab. A-4 Zohlednění kompenzačních opatření bylo provedeno úpravou parametrů podle tabulky

Přídavné parametry DCAP vyjadřují denní hodnoty (mm) infiltrační kapacity jednotlivých kompenzačních vodohospodářských zařízení.

Tabulka TAB.A-5 udává vypočtené bilanční hodnoty.

Bilanční člen (mm)	MOKRÝ 1965	PRŮMĚR 1986	SUCHÝ 1992
Srážky (SRAIN)	512,3	348,7	245,3
Celkový odtok vypočtený (STF)	85,9	28,4	10,8
z toho přímý odtok (SOF)	6,7	6,1	8,5
Aktuální výpar (AE)	258,0	283,1	269,8
Výsledná změna objemu podpovrchových vod (ΔW)	168,4	37,2	-34,5
Chyba bilance (%)	0,0	0,0	0,6

Tab. A-5 OKC – ŠEBEROV PO VÝSTAVBĚ (S realizací kompenzačních opatření)
Simulační období 1965, 1986, 1992, (1/4 – 31/10)

Z tabulek TAB.A-2 a TAB.A-5 plynou rozdíly v jednotlivých bilančních položkách, zejména pak ve srovnání přímého odtoku SOF a zůstatku podpovrchových vod ΔW po výstavbě bez realizace kompenzačních infiltračních opatření a dále pak s nimi. Tyto rozdíly uvádí následující tabulka:

Složka	1965	1986	1992
Přímý odtok SOF (mm)	-18,2	-11,5	-7,5
Změna objemu podpovrchových vod (ΔW) (mm)	+10,1	+21,7	+6,9

Tab. A-6 Rozdíly nejdůležitějších složek hydrologické bilance pro varianty B. a C.

Z uvedeného vyplývá, že vlivem kompenzačních opatření došlo ve všech letech ke snížení přímého odtoku a ke zvýšení objemu podpovrchových vod.

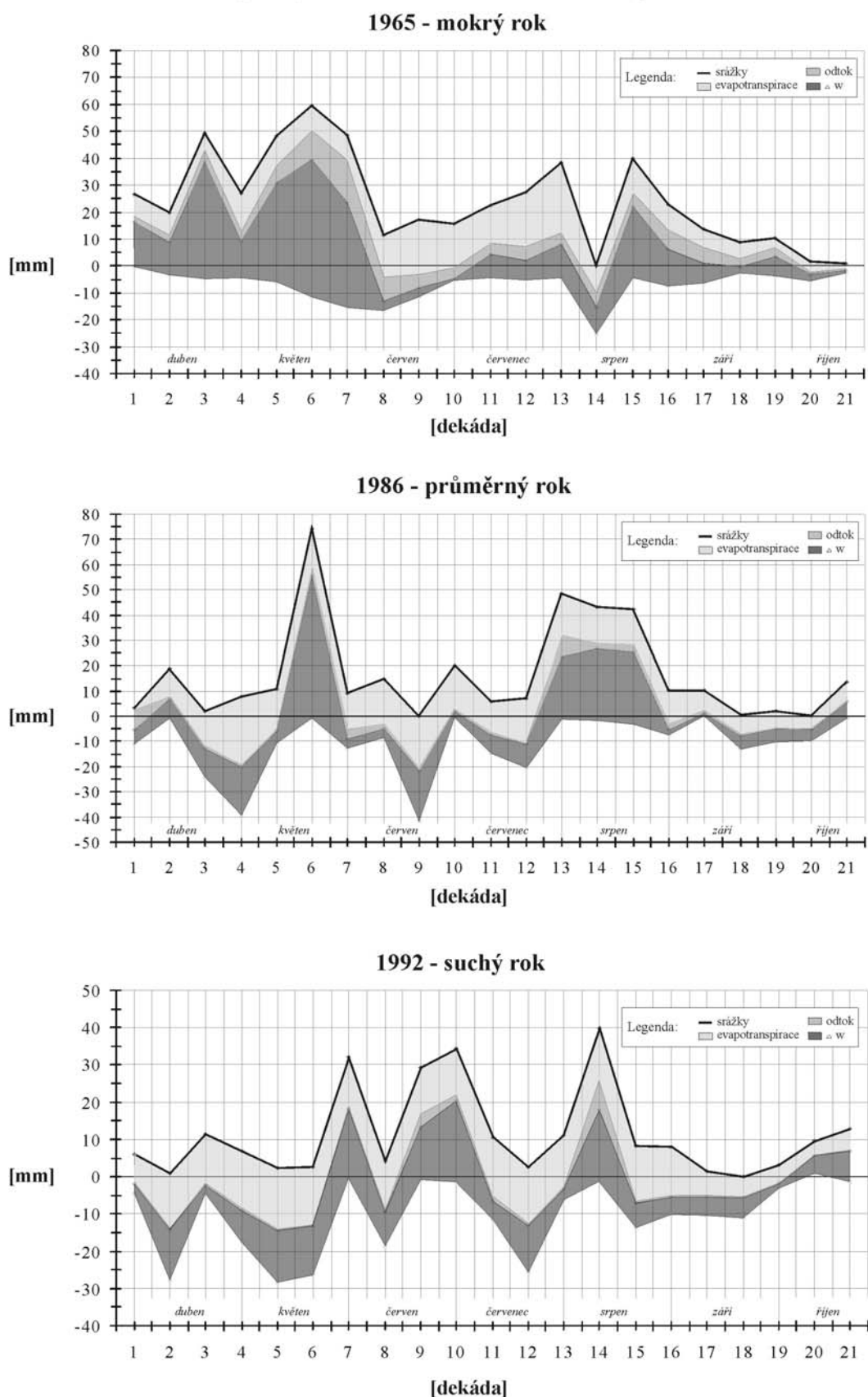
Závěry

Příspěvek ukazuje vhodnost matematického bilančního modelu WBCM-5 jako aparátu pro srovnávací studie, kdy rozhodujeme o stupni dotčení území výstavbou. Pro popisovanou případovou studii OKC Šeberov je možno učinit následující závěry:

1. Přímý (zejména povrchový) odtok je po výstavbě bez opatření (B) významně zvýšen. Infiltrační opatření (C) ho však účinně sníží, a to v průměrném a suchém roce dokonce na hodnoty nižší, než před výstavbou (C). Grafické znázornění viz. OBR.A-2.
2. Změny objemu podpovrchových vod jsou po výstavbě bez opatření sníženy o 5 % v mokřím roce, o 46 % v průměrném a 56 % v suchém roce. Infiltrační opatření však jsou s to tyto deficity vyrovnat v mokřím i v průměrném roce (dokonce nalepšit proti stavu před výstavbou), v suchém roce se tento deficit nepodaří plně krýt, jeho saturace je však zhruba dvojnásobná ve srovnání se stavem po výstavbě bez infiltračních opatření. Deficit 8,1 mm je způsoben nízkým srážkovým úhrnem vegetačního období suchého roku, kdy je opodstatněný předpoklad, že se během zimního období vyrovná. Závěrem je možno říci, že navržená kompenzační infiltrační opatření efektivně vyrovnají hydrologickou bilanci sledovaného povodí OKC Šeberov po výstavbě.

Obr. A-1

Hlavní složky hydrologické bilance-KOC Šeberov (stav po výstavbě bez infiltračních opatření)

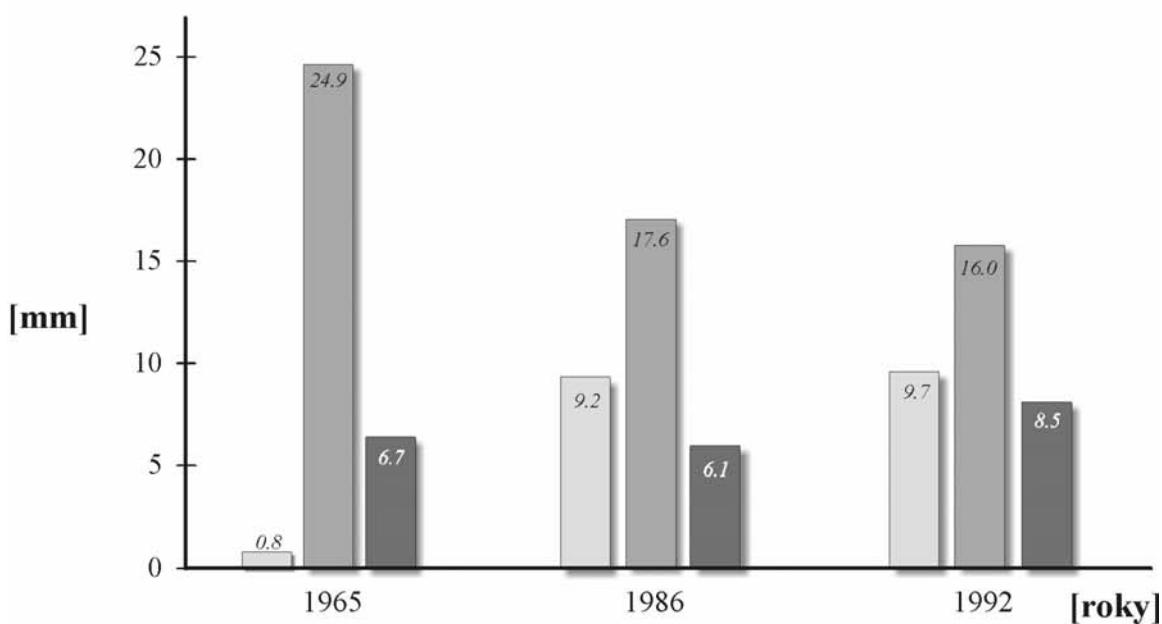


Obr. A-2

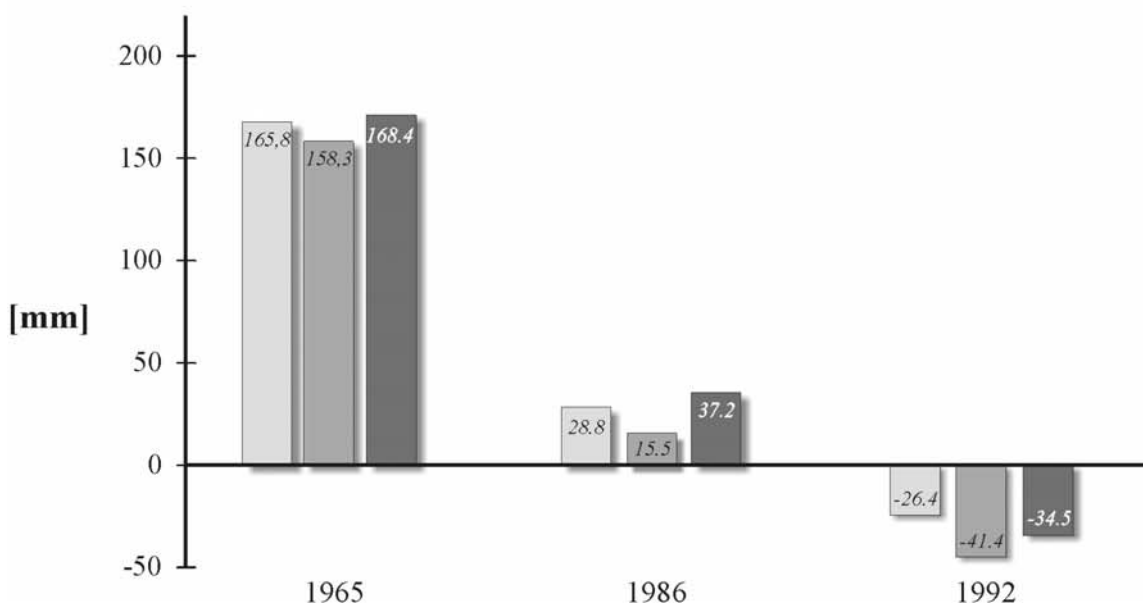
Porovnání hydrologických bilancí vegetačních období 1965, 1986, 1992 pro jednotlivé scénáře A, B, C

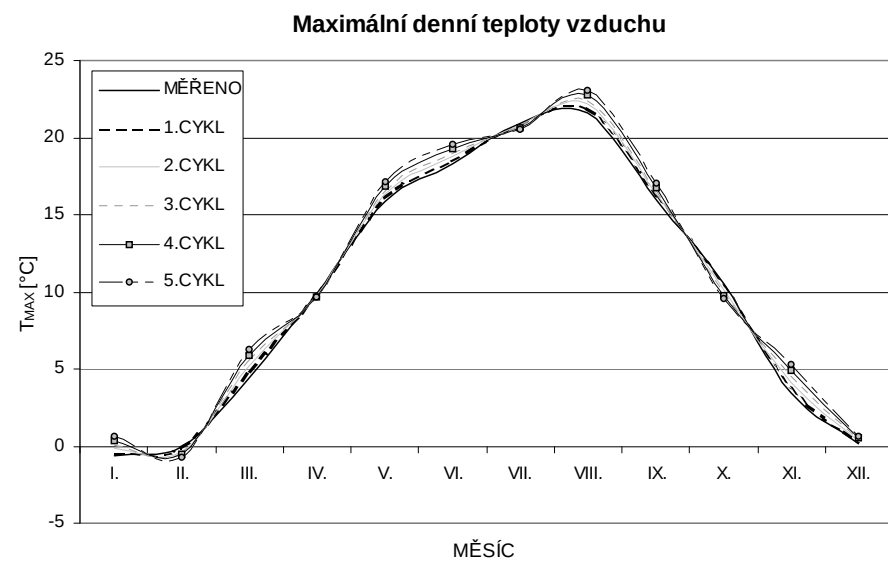
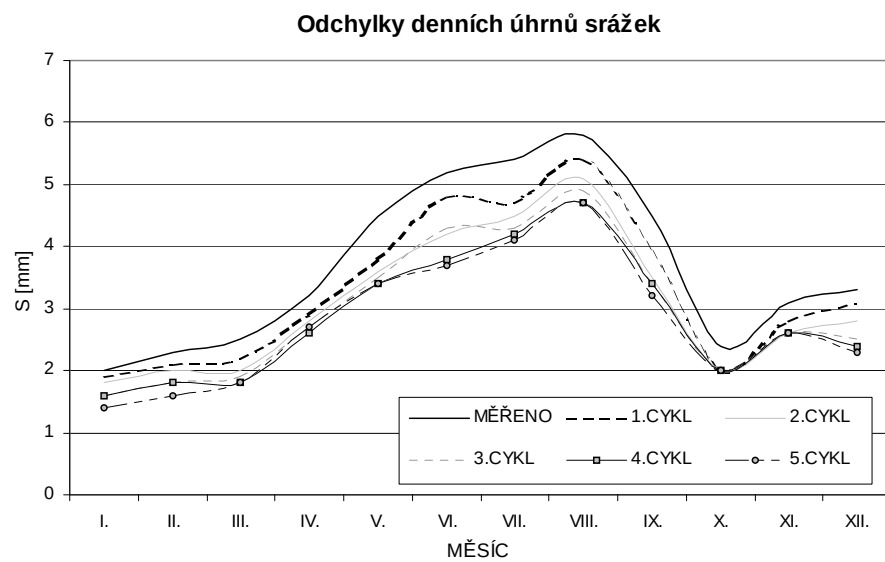
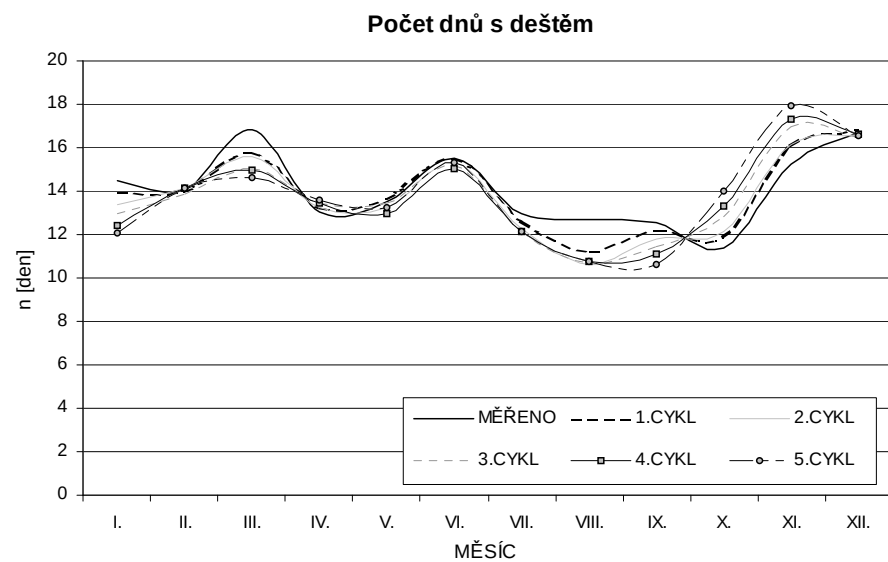
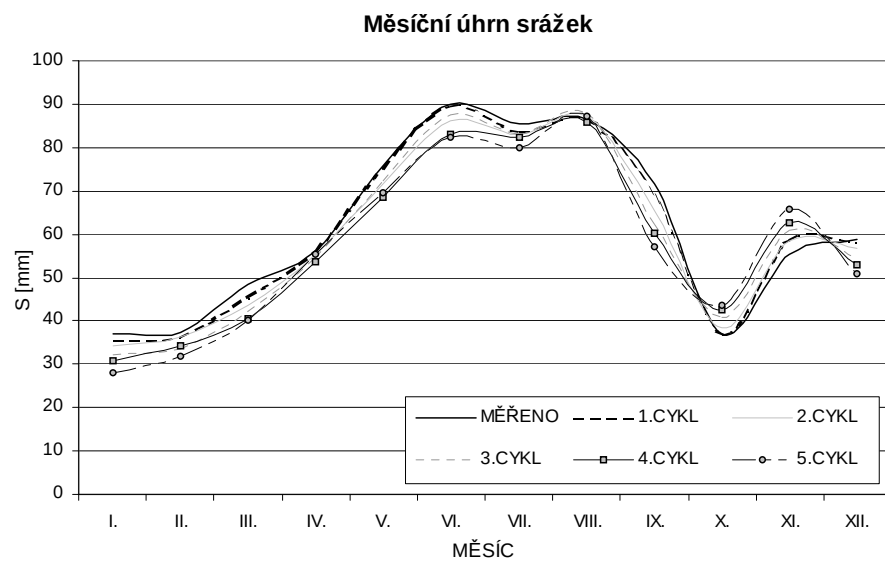
- A.....stav před výstavbou
- B.....po výstavbě bez infiltračního opatření
- C.....po výstavbě s infiltračním opatřením

Přímý odtok SOF



Výsledná změna objemu podzemních vod ΔW





Obr.B-1, Grafy 1-4

PŘÍLOHA B.

Retenční schopnost povodí, vyjádřená čarou trvání retenčních objemů vod

Studie Dolského potoka (okr.Chrudim) a Čižiny (okr.Bruntál)
s využitím generované 100-leté, resp. 37-mi leté datové řady.

V příloze je diskutován jeden z přístupů k popisu retence vody v povodí, tj. schopnosti dočasně zadržet vodu na půdním povrchu, v půdě, v korytě a v nádržích. Je využito koncepčního hydrologického modelu SMAR, kalibrovaného na místní podmínky, odpovídající poměrům v období realizace experimentálních prací, doplněného pro dlouhodobou simulaci srážko-odtokového procesu generovanými meteorologickými daty. Vedle hodnocení vlivu na vývoj povodňových situací, je retence významná i při popisu režimu minimálních průtoků ve vodních tocích.

Jde o charakteristiku časově proměnnou, odrážející nejen přírodní podmínky, způsob využití území a správy vodních děl, ale i vývoj hydrometeorologické situace. Podle zvoleného scénáře využití území tak lze hodnotit dlouhodobý efekt na odtokový režim v daných klimatických podmínkách. Tyto simulace lze přizpůsobit i pro odhad vlivu předpokládaného vývoje změn klimatu kombinací vstupních parametrů 'generátoru počasí' a podmínkami aplikace hydrologického modelu.

Postup posouzení je členěn z hlediska popisu jednotlivých srážko-odtokových epizod, nebo z hlediska dlouhodobě bilančního. Se zvyšující se nasyceností povodí předchozími srážkami se aktuální retenční schopnost snižuje (v objemu zadržené vody), současně se zkracuje doba jejího zdržení – retardace. Je možné lokálně definovat limity retenční schopnosti, které nemohou být prakticky překročeny a úzce přitom souvisí s pravděpodobnostním charakterem vývoje hydrometeorologické situace – tu lze vystihnout například ve dvou extrémech: intenzivní krátká srážka (používaná zpravidla pro návrhový stav vodohospodářských staveb), dlouhé srážkové období s nízkými intenzitami dešťů.

Navržené řešení využívá bilančního modelu k popisu retence v půdním profilu. Praktický příklad je vypracován pro povodí Dolského potoka v okrese Chrudim (experimentální povodí VÚMOP Praha) a pro vodní tok Čižinu v okrese Bruntál (povodí bylo opakovaně poškozeno povodněmi v letech 1997 a 1998).

Pro první fázi bylo využito modifikovaného generátoru počasí z modelu EPIC [WILLIAMS, 1990] – moduly WXGEN a WXPARM, upravené v prostředí MS EXCEL (a Visual Basic). Ze vstupního souboru měřených meteorologických dat je stanoven soubor parametrů, charakterizující klimatické poměry (nejvýznamnější uvádí TAB.B-1) a z nich je programem WXGEN generována denní časová řada meteorologických dat – dlouhodobé měřené charakteristiky nejbližších meteorologických stanic uvádí TAB.B-2.

V KAP.4.2 je komentována struktura vstupních a výstupních dat programu WXGEN a v grafech OBR.B-1 jsou uvedeny některé výsledky cyklických testů 100-leté datové řady, odvozené z 14-ti leté měřené řady stanice Svratouch. Testy umožňují hodnotit věrohodnost vztahu parametrů řešení a metod aproximace meteorologických dat [KULHAVÝ A KOL., 1999].

Z aplikací upravené metody 'generátoru počasí' vyplývá, že pro dlouhé časové řady (100 let) mají výsledky ustálený charakter, přitom čím delší je řada pozorování, tím větší je spolehlivost generované řady. Model má tendenci zvyšovat vyrovnanost srážek (viz postupné snižování odchylek denních úhrnů srážek, nebo snižování koeficientu špičatosti denních srážkových úhrnů). Pravděpodobnost výskytu 'dne se srážkou' po 'dni bez srážky' a pravděpodobnost výskytu 'dne se srážkou' po 'dni se srážkou' oscilují v cyklickém testu mezi

dvěma krajními polohami, což v úvodní fázi nebylo v modelu ošetřeno z důvodů jinak vyhovující shody generovaných řad, zejména při užití výsledků prvního cyklu aproximací.

Param.	Měsíční charakteristika	Jedn.	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
TMAX	Prům.MAX.tepl.vzd.	(°C)	-0.87	0.05	4.17	9.86	15.63	18.08	21.01	21.42	15.77	10.66	3.06	0.08
TMIN	Prům.MIN.tepl.vzd.	(°C)	-5.61	-5.33	-2.06	1.88	6.84	9.3	11.5	11.73	7.89	4.01	-1.4	-4.02
SDTMAX	Stř.odch.MAX.teplot	(°C)	4.82	4.92	5.13	5.45	4.71	4.5	4.59	4.93	4.38	4.78	4.15	4.18
SDTMIN	Stř.odch.MIN.teplot	(°C)	5	5.23	4.04	3.96	3.54	3.11	3.11	3.12	3.01	4.11	3.86	4.3
RAIN	Prům.měs.úhrn srážek	(mm)	38.3	37.6	51	55.9	79.8	94	92.5	88.9	73	36	52	60.1
SDRF	Stř.odch.den.úhrnů S	(mm)	2.3	2.6	3.1	3.8	5.8	6.3	7.7	7.2	5.7	2.9	3.6	3.8
SKRF	Koef.špičatosti den.S	(mm)	2.88	3.54	3.96	3.47	3.77	3.41	4.73	6.12	3.89	3.94	3.71	3.62
P W/D	Pravděpod. W po D	(-)	0.619	0.687	0.819	0.483	0.49	0.688	0.406	0.418	0.436	0.29	0.616	0.86
P W/W	Pravděpod. W po W	(-)	0.327	0.292	0.306	0.368	0.4	0.362	0.428	0.399	0.413	0.457	0.33	0.281
DAY P	Prům.počet dní se S	(d)	16.29	15.93	17.71	13.93	15.93	16.71	13.86	13.64	14.14	12.64	16.71	18.86

TAB.B-1 Vstupní parametry generátoru počasí, odvozené z měřených časových řad meteorologických dat stanice Svratouch (ČHMÚ, okr. Chrudim) z let 1984-1997 (14 let)

V následujícím kroku jsou doplněny generované řady výpočtem potenciální evapotranspirace metodami podle PENMAN-MONTEITHA, podle metody HARGREAVES-SAMANI-ho (použita v řešeném příkladu) a podle PRIESTLEY-TAYLORA.

Vlastní aplikaci hydrologického modelu by tedy měly předcházet rozborů zejména:

- účelu aplikace modelu, jeho výběr, volba pracovních postupů, kritéria pro verifikaci získaných výsledků
- disponibilitu s relevantními datovými podklady
- charakteru a formy zpracování výstupu, podřízeného účelu studie či posudku.

Pokud je celistvý model zkalibrován pro místní podmínky, lze jej použít k simulaci v několikaleté datové řadě s měřenými vstupními parametry. Pokud se použije jako vstup srážko-odtokového modelu generovaná řada denních úhrnů srážek (v délce 100-1000 let – při zobecnění platnosti podmínek kalibrace pro celé toto období), bude i v tomto případě výstupem simulací řada průtoků včetně jeho složek, doplněná časovými řadami vnitřních stavových charakteristik (stupně nasycení půdních horizontů, resp. retenční prostor půdního profilu), z nichž lze hodnotit periodicitu výskytu (čáry trvání) studovaného jevu. Vedle využití modelů ke scénárovým simulacím, které samozřejmě budou v četnostech aplikací převažovat, se tak naskytá možnost využití tohoto typu modelů ke stanovení charakteristik s platností v rozsahu reálných klimatických podmínek – v uvedeném případě pro stanovení retenčního potenciálu povodí.

PODKLADY

Základní charakteristiky experimentální oblasti, odvozené ze zpracovaných měření a dalších podkladů:

Měsíc	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	Rok
Teplota ^{/1}	-4,0	-3,1	0,7	5,4	10,9	14,0	15,8	14,8	11,1	6,1	1,0	-2,3	5,9
Teplota ^{/2}	-2,8	1,8	0,9	5,5	10,9	13,7	16,2	16,1	11,2	6,5	0,6	-2,3	6,3
Srážky ^{/3}	50	45	43	52	75	80	101	91	61	60	51	55	764
Srážky ^{/4}	45	39	43	46	78	93	91	89	61	41	49	52	725
Srážky ^{/5}	41	39	51	57	80	92	89	88	71	35	51	59	751

TAB B-2. Dlouhodobé průměry teplot (°C)

^{/1} Za období let 1901-1950 (Stanice Hamry - 605 m n.m.; Atlas podnebí – ČHMÚ);

^{/2} Za období let 1987-1997 (Stanice Svatouch - 737 m n.m.; měřená denní data);

Dlouhodobé průměry srážek (mm)

^{/3} Za období let 1901-1950 (Stanice Hamry; Atlas podnebí – ČHMÚ);

^{/4} Za období let 1961-1996 (Stanice Hamry; měřená denní data ČHMÚ);

^{/5} Za období 1961-1996 (Stanice Svatouch; měřená denní data ČHMÚ).

	$q_{AVG}^{/2}$	N-leté průtoky [$m^3 \cdot s^{-1}$] ^{/1}						
		Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}	Q_{20}	Q_{50}	Q_{100}
Kotelský p.	5,15 / 0,44	1,05	1,74	2,96	4,12	5,49	7,66	9,60
Dolský p.	3,58 / 0,31	1,33	2,21	3,76	5,23	6,98	9,74	12,20

TAB. B-3 Dlouhodobé charakteristiky odtoku (mm)

^{/1} N-leté vody (podklad ČHMÚ ze IV.98) ($m^3 \cdot s^{-1}$) index označuje N=1 až 100let

^{/2} Průměrný dlouhodobý specifický celkový odtok ($l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$) / ($mm \cdot den^{-1}$)
(odvozeno z měření VÚMOP Praha v letech 1982-1998)

Název povodí :	Dolský p.	Kotelský p.	p. Čížina
Nadmořská výška povodí (m n.m.)	456-676	438-663	340-703
Celková plocha povodí (km^2)	4,63	3,75	50
Zastoupení lesů na ploše povodí (%)	0,97	3,4	43,0
Trvalá vegetace (%)	7	10	(12)
Urbanizované plochy (%)	8,2	4,9	4,2
Orná půda (%)	68	75,5	52,7
Odvodněné plochy (% z celk. plochy)	21,5	37,5	12
Zeměpisné polohy tečných bodů rozvodnic	49°45'47'' - 49°49'; 15°58'40'' - 16°00'17''		cca 50°00'; 17°60'

TAB. B-4 Geografické charakteristiky oblasti a údaje o využití území
(vlastní šetření – VÚMOP a podklady OkÚ Chrudim a Bruntál)**Podklady pro povodí Čížiny (okr. Bruntál)**

Z klimatického hlediska spadá povodí Čížiny do třech oblastí. Pramenní část spadá do chladné oblasti CH7, jedná se o východní svahy kót Hradisko (676 m n.m.), Vysoký vrch (703 m n. m.), Dlouhý vrch (695 m n.m.) a Liščí vrch (701 m n.m.). Dále k východu, po směru toku, spadá do mírně teplé oblasti MT2. Jedná se zhruba o oblast Horního Benešova, tedy oblast o průměrné nadmořské výšce okolo 500-550 m n.m. Dále k severovýchodu - okolí

Lichnova je řazeno do mírně teplé oblasti MT7, kde nadmořská výška údolí Čižiny se pohybuje okolo 450 až 360 m n.m.

V příkladu je zpracováno dílčí povodí vodního toku Čižiny k určujícímu profilu v obci Lichnov (okr. Bruntál, $F_{\text{subpovodí}} = 50 \text{ km}^2$). Ze srážkoměrných stanic se v zájmovém území nachází Horní Benešov s průměrným ročními srážkovým úhrnem 648 mm (oblast MT2) a ve vzdálenějším okolí Bruntál s průměrným ročním srážkovým úhrnem 678 mm (oblast MT2).

Stanice	Pravděpodobnost opakování za N roků				
	2	10	20	50	100
Bruntál	36.4	56.2	64.2	74.1	81.9
Krnov	36	54.4	61.9	71.1	78.3

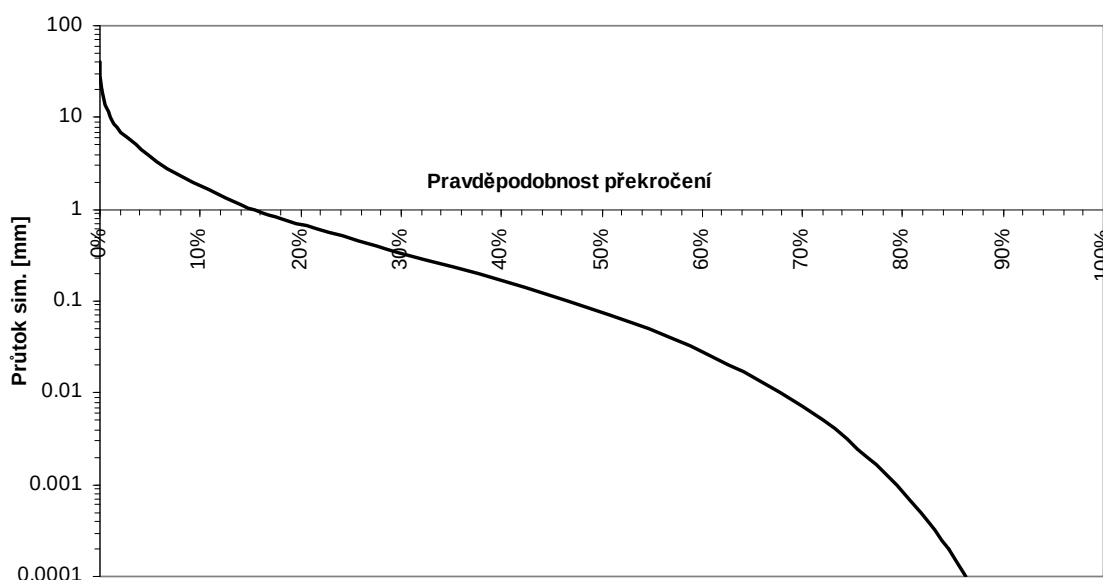
TAB. B-5 Hodnoty denních úhrnů srážek [mm] s pravděpodobností opakování za N roků dle ŠAMAJE, VALOVIČE, BRÁZDILA /1985/ (viz METODIKA ÚVTIZ 5/1992 - JANEČEK M. a kol., Příloha 3)

DISKUSE VÝSLEDKŮ:

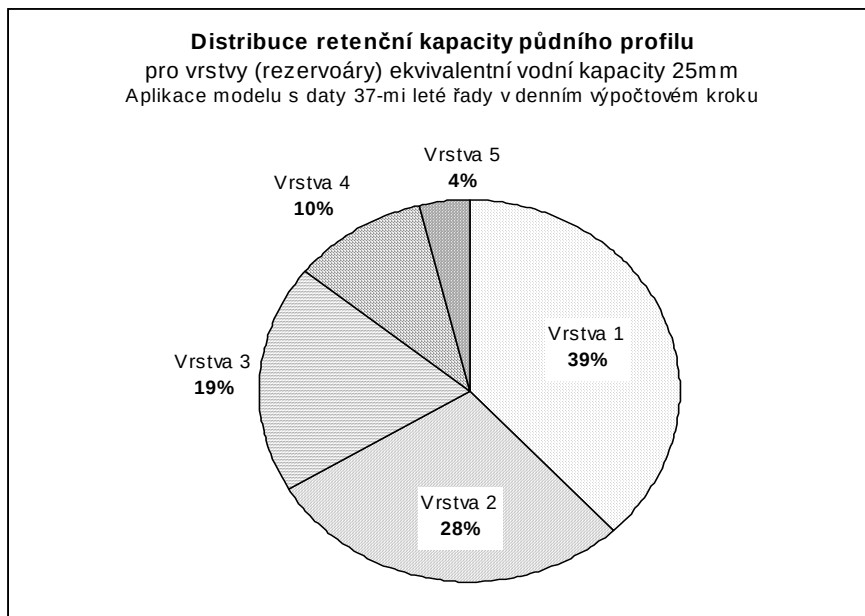
Příklady dokumentují aplikaci koncepčního hydrologického modelu SMAR s měřenými a generovanými vstupními klimatickými daty délky 37 a 100 let pro odvození teoretické čáry překročení průměrných denních průtoků a čar trvání retenčních objemů aktivního půdního profilu (do vodní kapacity 125mm) v denních objemech.

V denním výpočtovém kroku byla zpracována časová řada 37-mi let (1961-1997) pro měsíce V.-XI. (měřené úhrny srážek a měřený výpar GGI2000). Model poskytl bilanční objemy složek odtoku, mimo jiné i bilanci nasycení (resp. retenční prostor) půdního vrstevného prostředí pro vodní tok Čižinu v okrese Bruntál – viz *OBR.B-4*.

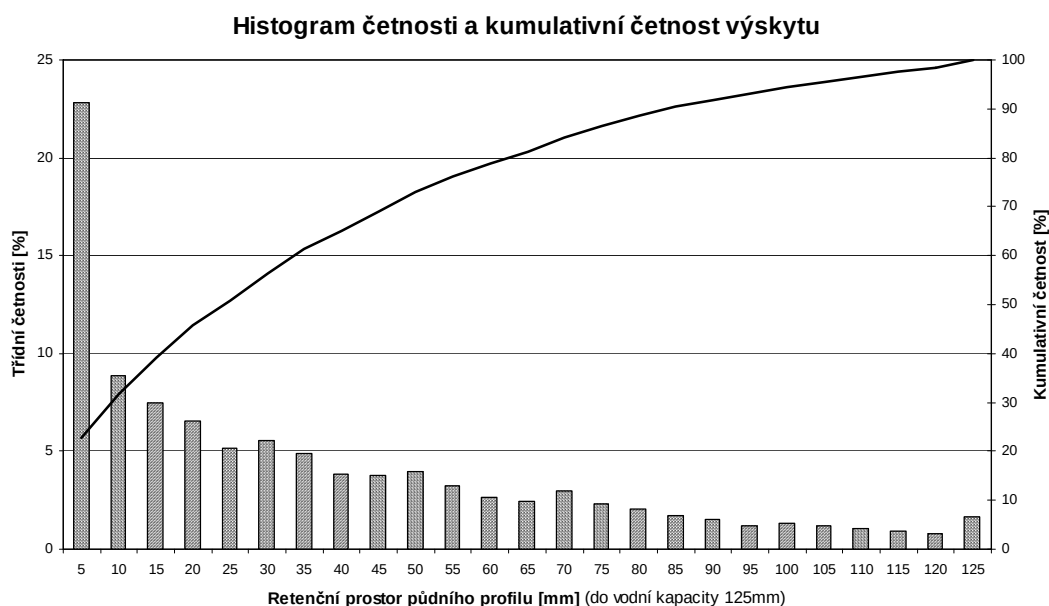
„Generátoru počasí“ bylo využito na povodí Dolského potoka v okrese Chrudim pro vygenerování 100-leté řady vstupních dat modelu při studiu těchto charakteristik, jako v předchozím případě.



Obr. B-2 Stanovení teoretické čáry překročení průměrných denních průtoků pro vodní tok Čižina v profilu Lichnov



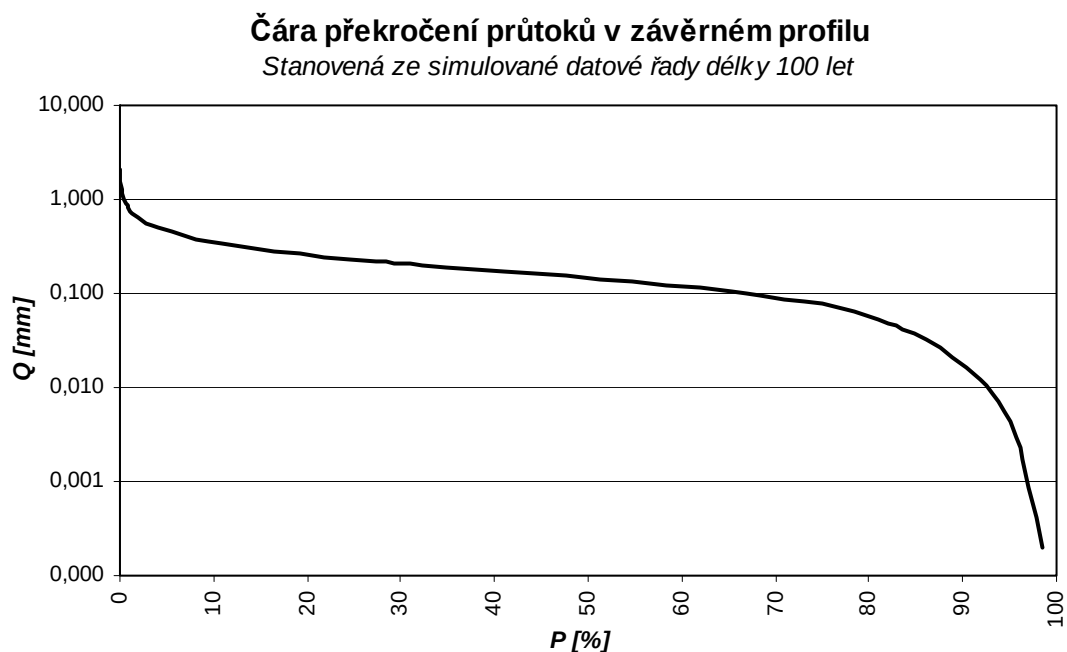
Obr.B-3 Vyjádření poměru dlouhodobých průměrných retenčních kapacit pěti svrchních vrstev půdního profilu. Odvozením z dat řešeného příkladu - Čížina (1961-97)



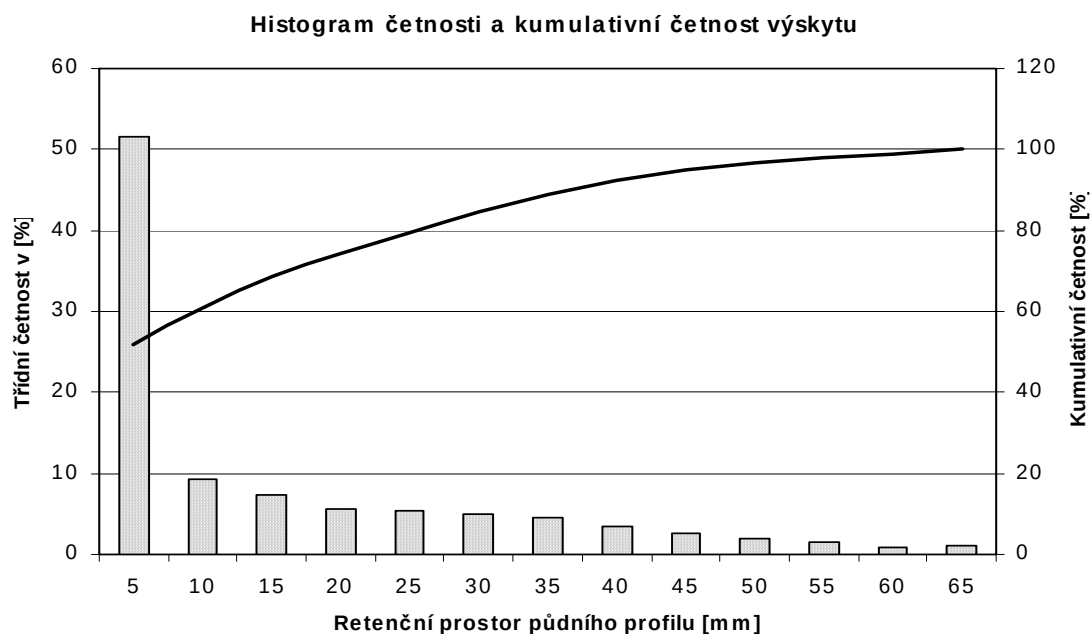
Obr.B-4 Retence vody v půdním profilu, odvozená z celkové nasycenosti vrstevného prostření s maximální vodní kapacitou 125mm, definovanou modelem SMAR
(Příklad řešení: Čížina, zpracováno 7.918 dní rozšířeného vegetačního období v letech 1961-1997)

Odvození čar překročení průměrných denních průtoků v závěrných profilech dokumentují *OBR.B-2* a *OBR.B-5*. Vliv prvních pěti půdních vrstev na distribuci složek retence v profilu podle definice modelu SMAR znázorňuje *OBR.B-3* a potvrzuje předpoklad významnosti retenční kapacity svrchních půdních vrstev – s ekvivalentem celkové vodní kapacity 125mm. Pro půdní vrstvy byla provedena sumace retenčního prostoru a zkonstruovány histogramy četnosti a čáry trvání (*OBR.B-4* pro Čížinu a *OBR.B-6* pro Dolský

potok). Z čar lze odvodit retenční potenciál povodí jako dynamickou charakteristiku v dlouhodobé datové řadě 37 resp. 100 let.



Obr. B-5 Stanovení teoretické čáry překročení průměrných denních průtoků pro Dolský potok v okrese Chrudim



Obr.B-6 Retence vody v půdním profilu, odvozená z celkové nasycenosti vrstevného prostření s maximální vodní kapacitou 125mm, definovanou modelem SMAR (Příklad řešení: Dolský potok, generovaná 100-letá řada, parametry řešení podle roku 1997)

PŘÍLOHA C.

Hodnocení prostorové a časové variability podmínek odtoku z malých zemědělsko-lesních povodí

V důsledku variability půdních vlastností, mj. vlivem blokace pozemků s pěstovanými monokulturami, plošným uplatňováním zúrodňovacích opatření, ale i změnou obecných podmínek zemědělského hospodaření v oblastním měřítku, je vyvolána potřeba přizpůsobit podmínky aplikace koncepčních modelů těmto sezónním změnám. Dynamika hydrologických procesů je tak ovlivňována kromě klimatických vlivů i volbou a rozvržením zemědělských kultur, jejich růstovými fázemi, použitými agrotechnickými postupy, v neposlední řadě i provozem hydromelioračních staveb.

Při zpracování podkladů modelových řešení je efektivní orientovat práce do prostředí GIS (Geografických Informačních Systémů). Takovým příkladem bylo při třídění a finálním využití databází měření, popisných dat a výsledků experimentálních prací, sestavení submodelu podmínek zemědělského využití pro jednotlivé hony (půdní celky jednoho typu zemědělského hospodaření) experimentálních povodí VÚMOP Praha oblasti Skutče v letech 1984-1998, u nichž jsou k dispozici informace o pěstování plodin. Podklad slouží pro rozšířenou aplikaci hydrologického modelu SMAR (viz KAP. 3.2.1) podle záměrů jeho využití v podmínkách malých zemědělských povodí. Do celistvého modelu tak vstupují hodnoty parametrů, distribuované po ploše podle podmínek zemědělského využití půdních celků, což respektuje změnu mezisezónních i sezónních podmínek ovlivnění tvorby odtoku z povodí. Na těchto experimentálních podkladech byly ověřovány pracovní postupy, umožňující identifikaci limitních hodnot jednotlivých parametrů použitého modelu. Příklad grafického zobrazení výstupu submodelu podmínek zemědělského využití je uveden v OBR.C-2, OBR.C-3. Obdobným způsobem byly využity podklady GIS při kompletaci vstupních dat aplikace modelu EPIC (Erosion/Productivity Impact Calculator), na experimentálním povodí Černíči [DOLEŽAL F. A KOL., 1998] a v rozpracovanosti i na povodích Dolského a Kotelského potoka.

S ohledem na rozsah témat, různorodost popisovaných jevů i vyžadované měřítko (pro kategorii malých povodí), lze tuto část zpracovat v současnosti pouze na úrovni řešených příkladů a jejich komentářů, závislých na použitém modelu a rozsahu získaných zkušeností při práci s ním. Pracovní metody, aplikované v malých zemědělsko-lesních povodích uvádí následující část.

Zatímco vnějšková srozumitelnost celistvých modelů pro simulaci procesů v povodí (odtoku, retence a bilance vody atd.) a snadnost manipulace s nimi mluví ve prospěch jejich využití tam, kde je nutno předpovídat nebo odhadovat vývoj procesů v čase (a kde tudíž nestačí statické nebo pseudostatické koncepce a intuitivní představy), je slabinou celistvých simulačních modelů (někdy podstatnou, někdy zanedbatelnou a častěji prostě zanedbávanou bez ohledu na její faktickou relevanci) okolnost, že veličiny a parametry, se kterými celistvé modely operují, nejsou přímo měřitelné resp. měřitelné či odvoditelné jsou, avšak za neúměrnou cenu detailního měření v husté prostorové síti. I tato „měřitelnost“ může být ve složitých podmínkách nedostačující, a to přinejmenším z těchto důvodů:

- Není většinou k dispozici dostatečně hustá prostorová síť měřicích bodů v povodích a to ani v povodích experimentálních.
- Struktura modelu nebývá taková, abychom vnitřní stavové proměnné (např. zásobu vody v půdě) mohli považovat za reálné charakteristiky povodí a tudíž mohli z jejich vývoje vyvozovat prakticky použitelné kvantitativní závěry.

- c) Charakter povodí je v čase proměnlivý. Zatímco průběh těchto změn je kvantifikovatelný pomocí veličin, které charakterizují tyto změny samotné, a to buď celistvými parametry (např. podílem zalesnění, zatravnění nebo drenáží odvodnění plochy na celkové ploše povodí, počtem a objemem vodních nádrží) nebo kartograficky (např. vrstvami GIS s připojenými kvantitativními atributy), neexistuje přímá vazba mezi těmito kvantitativními údaji a parametry celistvého modelu. Tato vazba bývá odvoditelná z dlouhodobého pozorování a měření povodí samotných.

Tyto parametry lze nejspíše stanovit kalibrací modelu pomocí souboru dat, který obsahuje přímo naměřené časové řady vstupů i výstupů daného povodí (viz *Kapitola 2.1 Výroční zprávy za rok 1998 [KULHAVÝ A KOL., 1999]*). Každé povodí může být takto charakterizováno (malým) vektorem parametrů modelu. Pokud se povodí nemění, nemění se ani jemu příslušné hodnoty parametrů modelu (lze pak mluvit o „parametrech povodí“). Různá povodí mají obecně různé parametry, které lze do jisté míry odhadnout empirickými postupy z přímo měřitelných celistvých charakteristik povodí a jeho stavu (tvaru povodí, hustoty hydrografické sítě, sklonitosti, lesnatosti apod.), pokud v dané oblasti bylo už předtím vynaloženo určité úsilí na odvození těchto empirických postupů. Parametry jednoho a téhož povodí se obecně mění, pokud se mění stav tohoto povodí (např. využití půdy). Samostatnou kapitolu představují cyklické změny stavu povodí během roku, které mohou také být do jisté míry popsány cyklickými změnami hodnot parametrů povodí. Denní cyklus se zpravidla v této souvislosti neuvažuje. Je sice možno počítat, zejména u malých povodí, se srážko-odtokovými událostmi, trvajícími několik minut nebo hodin, ale během této doby se parametry povodí prakticky vždy považují za konstantní, nikoli za proměnné v denním cyklu.

Simulujeme-li tytéž procesy v tomtéž povodí celistvým modelem a současně i modelem s distribuovanými parametry, máme možnost částečně nahradit reálná měření, která by jinak byla nutná ke kalibraci celistvého modelu, výsledky, získanými ze simulací s pomocí distribuovaného modelu. To je výhodné zejména tehdy, jestliže je třeba během relativně krátké doby zjistit, jak se parametry celistvého modelu změní, dojde-li k určitým závažným změnám v povodí (např. když se změní využití půdy, uspořádání pozemků nebo intenzita zemědělské výroby). Vedle toho samozřejmě distribuovaný model může poskytnout daleko podrobnější informace o simulovaných procesech, než model celistvý a je tudíž jeho samostatným doplňkem. Je ovšem jasné, že distribuovaný model, použitý k tomuto účelu, musí být dostatečně spolehlivý. Základní kroky, z nichž některé mohou probíhat paralelně, jsou tyto:

- a) Výběr celistvého modelu.
- b) Opatření kalibračních dat z experimentálního povodí pro celistvý model.
- c) Kalibrace a verifikace celistvého modelu pomocí existujících časových řad vstupních a výstupních veličin z experimentálního povodí.
- d) Výběr distribuovaného modelu.
- e) Výběr nebo vlastní tvorba celistvých modelů, které budou použity pro integraci výstupů distribuovaného modelování jednotlivých částí povodí (např. pozemků). Tyto modely jsou v dalším textu označovány jako integrující celistvé submodely.
- f) Definice jednotlivých dílčích částí povodí (např. pozemků) a zjištění jejich geografických charakteristik.
- g) Opatření dat z téhož experimentálního povodí pro distribuovaný model.
- h) Odvození vstupů pro distribuovaný model z existujících dat.
- i) Kvazi-kalibrace a kvazi-verifikace distribuovaného modelu pomocí existujících dat z experimentálního povodí. Simulují se procesy v každé dílčí části pozemku zvlášť a

výsledky jsou dále transformovány na výstupy z celého povodí pomocí integrujících celistvých submodelů (totéž platí i pro veškeré dále zmíněné simulace s distribuovaným modelem).

- j) Návrh scénáře dalších simulací s pomocí distribuovaného modelu pro totéž povodí, ve kterém ale hypoteticky došlo k určitým změnám (jde tedy vlastně o návrh scénářů možných změn, jejichž účinek na procesy v povodí je třeba prozkoumat, přičemž rozsah simulací musí být tak velký, aby poskytl dostatek dat pro následující kalibraci a verifikaci celistvého modelu).
- k) Realizace scénáře simulací podle předchozího bodu.
- l) Kalibrace a verifikace celistvého modelu, pro každý z jednotlivých scénářů pomocí výstupů distribuovaného modelu; přitom by měla být využita i všechna mezitím naměřená skutečná data z experimentálního povodí

Příklad A

Hodnocení prostorové a časové variability přírodních a zemědělsko-hospodářských podmínek na odtokové poměry povodí s využitím submodelu, ověřeného na povodích Dolského a Kotelského potoka (viz *OBR.C-2* a *OBR.C-3*).

Pro hodnocení byla zvolena čtyři kritéria:

- sklonitost pozemků
- infiltrační schopnost (odvozená z rychlosti infiltrace podle hydrologických skupin půd)
- listový index – listová plocha
- stav půdy – je dán předplodinovou a plodinovou hodnotou.

Kritéria pro kategorizaci přírodních podmínek, kterými jsou sklonitost pozemků a infiltrační schopnost, byla odvozena z užívaných metod, kategorizujících hydropedologické vlastnosti půd při tvorbě povrchového odtoku, erozních procesů apod. (Klasifikační systémy BPEJ, [NĚMEČEK, 1989], [JANEČEK A KOL., 1992]). Dynamickým faktorem je pak listový index, vliv zemědělských systémů hospodaření zohledňuje předplodinová hodnota, ovlivněná komplexním působením morfologických a fyziologických vlastností plodin a jinými faktory, působícími na půdu i následnou plodinu:

- stupněm zatížení (stínové garé)
- délkou vegetační doby plodin
- vlivem kořenového systému plodiny na půdní vlastnosti
- množstvím a kvalitou posklizňových zbytků atd.
- odčerpáním živin z půdy
- odčerpáním půdní vody
- dobou sklizně
- ostatními činiteli (choroby atd.)

V kulturní krajině převažují z ekologického hlediska méně stabilní a nestabilní ekosystémy, záměrně udržované pro vysokou produkci požadované biomasy. Podle předplodinové hodnoty jsou zemědělské plodiny členěny do několika skupin [KOSTELANSKÝ A KOL., 1997]:

1. Předplodiny výborné (zlepšující) – jeteloviny, luskoviny, jetelotravní směsky atd.
2. Dobré – řepa, kukuřice, jednoleté píce, kmín

3. Horší – obiloviny, mrkev, petržel atd.

Použitý submodel schematizuje povodí podle elementárních zemědělských ploch (honů) přiřazením typických vlastností podmínek přírodních (půdní pokryv, sklonitost) a typických vlastností pěstovaných plodin, s ohledem na významnost ovlivnění jednotlivých kategorií bilančních složek hydrologického řešení (evapotranspirace, povrchový odtok a hypodermický odtok, resp. vlastností rostlinného a půdního pokryvu – intercepce, infiltrace, hydraulická drsnost povrchu).

Uvedené kategorie umožňují v prostředí GIS vytvořit podklad, použitelný pro distribuci reprezentativních hodnot parametrů celistvého hydrologického modelu po ploše povodí v kalibrační fázi, následně ve fázi prognózní. Zároveň grafické vyjádření vytváří přehledný způsob orientace v podmínkách jednotlivých zemědělských honů, zvýrazněné volbou globálních kritérií – podmalba plochy honu (viz *Kapitola 2.5 Výroční zpráva za rok 1998* [KULHAVÝ A KOL., 1999]). Lze tak identifikovat například pozemky s nevhodnou kombinací přírodních podmínek /horní kvadranty/(nepříznivá sklonitost spolu s nízkou rychlostí infiltrace) a zemědělských podmínek /dolní kvadranty/(plodina s nízkou půdoochrannou funkcí, nevhodná předplodina, zhoršující druhotně půdní vlastnosti), celkově pak snižující retenční vodní potenciál pozemku (chápáno v systému půda-rostlina-atmosféra). Volba čtyř kritérií (A, B, C, D) ve třech stupních (1, 2, 3) se z hlediska dostupnosti základních informací o pěstovaných plodinách (přehled osevních postupů), jeví jako adekvátní uvažovanému využití při distribuci hodnot parametrů celistvého hydrologického modelu.

Příklad B

Vyjádření časové variability srážko-odtokových podmínek povodí aplikací modelu SMAR při posouzení vývoje infiltrační schopnosti půd a stavu povodí v období před povodněmi r.1997.

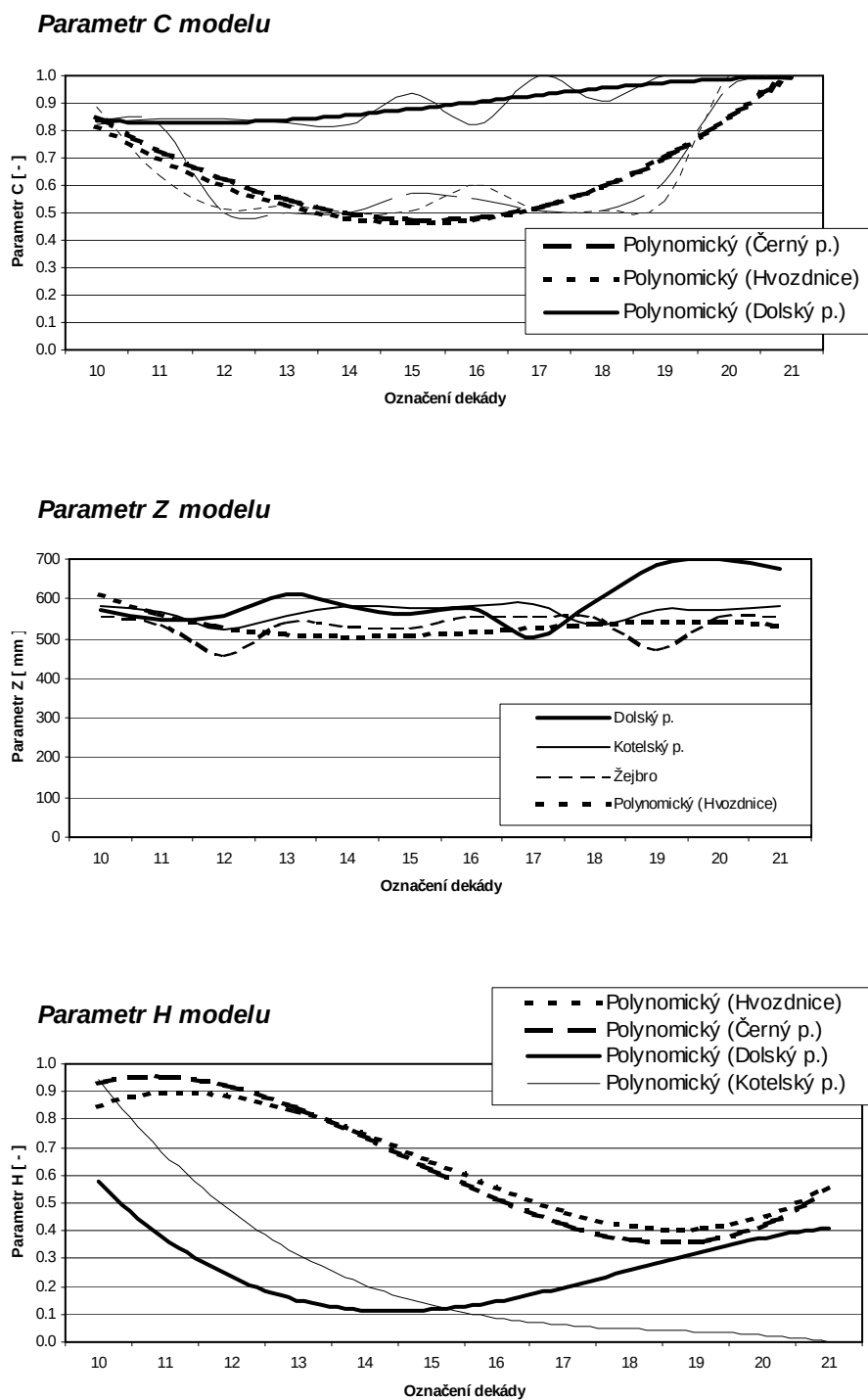
Hodnocen byl stav a krátkodobý vývoj hydrologických podmínek k závěrnému profilu posuzovaných povodí (okresů Chrudim a Bruntál – viz charakteristiky v *PŘÍLOZE B Metodiky*), v projevech infiltrační schopnosti, nasycenosti půd, podílech povrchového a mělkého podpovrchového odtoku atd. Pro realizaci studie bylo zapotřebí měřených dat vhodné struktury - tomu odpovídal výběr modelových povodí [SOUKUP M. – FÍDLER J. – KULHAVÝ Z., 1998]. Realizací analýz uvedeného typu pro období před povodňovými situacemi, je možné tyto zařadit v kontextu stavu povodí (předchozí nasycenosti půd a pod.) a diskutovat tak termín nástupu posuzovaných extrémních srážko-odtokových epizod, ale i specifika místních podmínek na západě a východě postižené oblasti (východní Čechy, severní Morava). Použitým nástrojem uvedených analýz je matematický nelineární hydrologický model, kalibrovaný daty z první poloviny roku 1997.

Aplikace modelu je rozdělena do dvou fází. V první, kalibrační fázi jsou optimalizačními postupy nastaveny parametry modelu tak, aby v denním výpočtovém kroku co nejvěrohodněji popisovaly srážko-odtokový proces. Kalibrační období je složeno ze tří intervalů (počáteční nastavování parametrů + optimální délka JH + posuzované výpočtové období = 10 + 20 + 10 dní) a po 10 dnech se posouvá od počátečního data vyšetřovaného období k datu konečnému. V uvedeném řešení jsou významné následující termíny:

- počátek datové řady (2. březen 1997 = začátek 7.kalendářní dekády)
- počátek období s parametry nastavenými modelem (1.duben = 10.dekáda)
- konec datové řady (29. července 1997 = konec 21.dekády)

Ve druhé, simulační fázi, jsou ze stanovených parametrů modelu dopočteny v denním režimu hydrologické veličiny, s nimiž model operuje (např. složky přímého a základního

odtoku). Časový vývoj hodnot parametrů C , Z , H v dříve definovaných dekádách ilustrují grafy *OBR.C-1*. Pro zvýraznění trendu hodnot parametrů v jednotlivých fázích, předcházejících povodni, byly průběhy vyhlazeny polynomm 3.stupně



Obr. C-1 Časový vývoj hodnot parametrů C , Z , H modelu SMAR při aplikaci s daty 2.III.-29.VII.1997 na vybraných povodích okresů Chrudim a Bruntál. Pro aproximaci je použita funkce polynomu 3ST.

Infiltrační schopnost půd (parametr $\underline{Y}$ modelu) všech povodí byla v posuzovaném období vyrovnaná a pohybovala se v rozmezí 200 - 250 mm.den⁻¹. V povodí vodního toku Hvozdnice byla o 10-20% nižší ve 13. a 14. dekádě (1.5. až 20.5.97), v povodí Černého potoka je patrná tendence mírného snižování od 13. dekády. Povodí Kotelského potoka je z hlediska infiltrační schopnosti nejvyrovnanější.

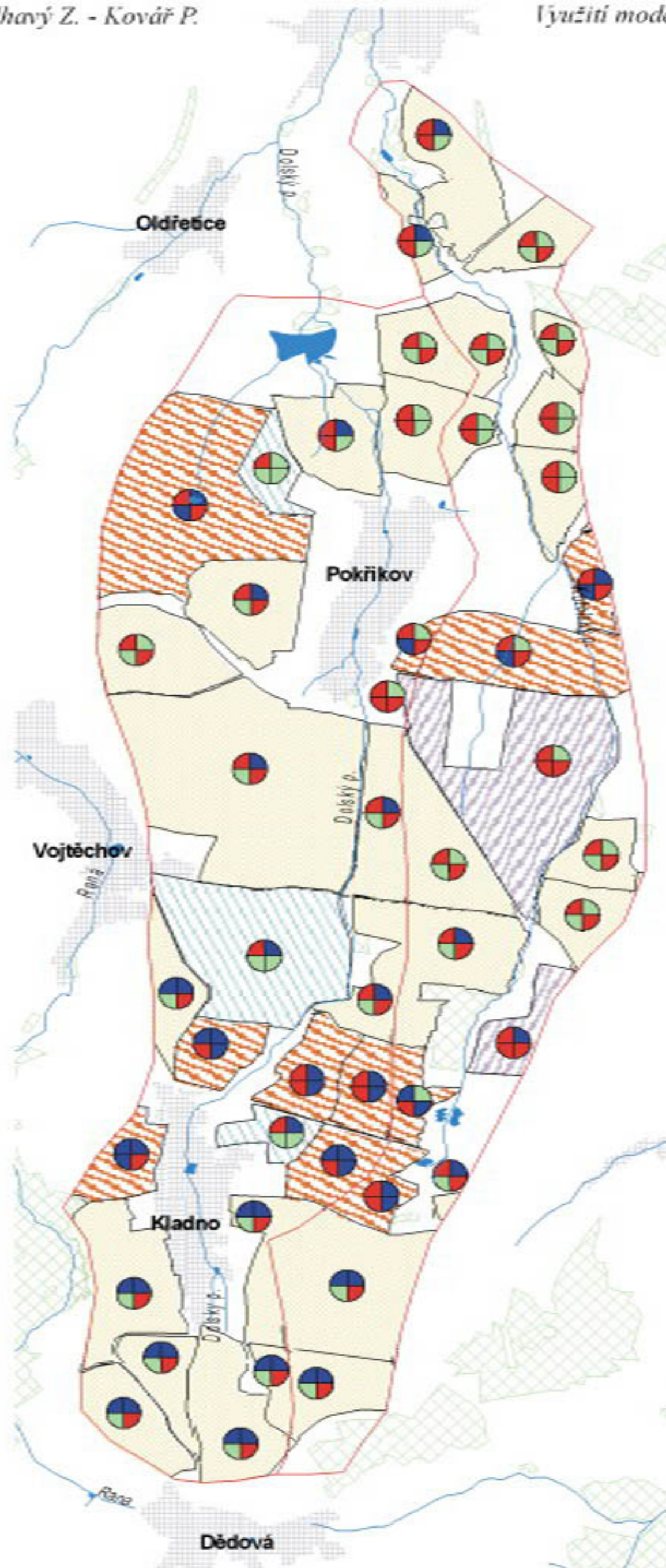
Podmínky pro vytváření povrchového odtoku s ohledem na nasycenost svrchních vrstev půdy charakterizuje model SMAR parametrem $\underline{H}$. Z hlediska náchylnosti povodí k vyššímu podílu povrchového odtoku při podobném srážkovém zatížení v posuzovaném období lze v tomto smyslu charakterizovat podmínky modelových povodí okresu Chrudim jako příznivější (tj. s nižším objemem povrchového odtoku). Přitom u všech pěti povodí je zřejmá tendence snižování hodnoty parametru $\underline{H}$, s maximem v 10. až 12. dekádě (tj. do 30. dubna 97). Rozdíl mezi dvěma typy povodí (okresu Chrudim a Bruntál) je patrný ve 14. až 17. dekádě. Povodí Dolského potoka se v počátku a v konci posuzovaného období poněkud liší.

Nasycenost povodí vodou, projevující se frakcí úhrnného výparu z vrstevného půdního prostředí a odvozenou ze zásob podpovrchových vod, lze charakterizovat parametrem $\underline{C}$. Ze zpracované přílohy vyplývá podobnost obou povodí okresu Bruntál – po počátečním vysokém nasycení (10. a 11. dekáda) dochází k poklesu a dlouhodobějšímu vyrovnání. V průběhu 19. dekády nasycenost povodí stoupá až k maximu pro 20. a 21. dekádu.

Obr.C-2

Submodel podmínek zemědělského hospodaření rok 1984

výraznění posouzení zemědělských podmínek
na jednotlivých kosech
(geometrický průměr kategorie listového indexu
a kategorie předplodiny)



A,B ... charakteristiky přírodních podmínek
C,D ... charakteristiky vlivu zemědělských činností

hodnotová stupnice :

1	výborně
2	dobře
3	špatně

A infiltrační schopnost půdy

- 1 vysoká rychlost infiltrace ($> 0,12$ mm/s)
- 2 střední rychlost infiltrace (0,06 až 0,12 mm/s)
- 3 nízká rychlost infiltrace ($< 0,06$ mm/s)

B průměrná sklonitost

- 1 do 3°
- 2 od 3° do 7°
- 3 nad 7°

C stav půdy po předplodině

- 1 výborný
- 2 dobrý
- 3 špatný

D listový index (LAI)

- 1 nad 8,5
- 2 od 5,5 do 8,5
- 3 do 5

Zemědělské podmínky

Stav půdy po předplodině a listový index (geometrický průměr)

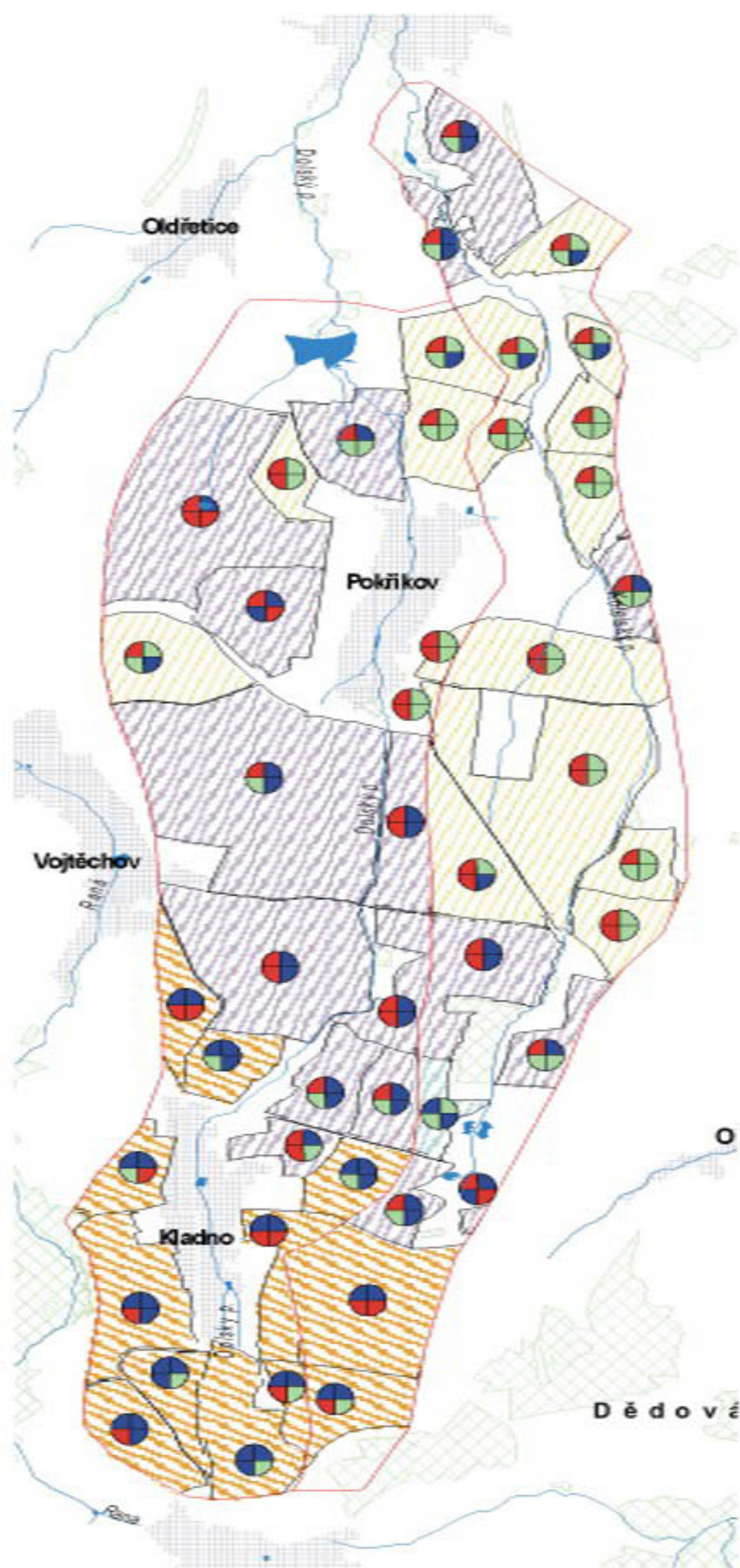
- | |
|------|
| 1 |
| 1,41 |
| 1,73 |
| 2 |
| 2,45 |
| 3 |

Síla

Lesy

0 200 400 600 800 1000 Meters





Submodel podmínek hospodaření

rok 1993

výrazení přírodních podmínek zemědělských horní (geometrický průměr kategorie rychlosti infiltrace a kategorie průměrné sklonitosti horní)



A,B ... charakteristiky přírodních podmínek

C,D ... charakteristiky vlivu zemědělských činností

hodnotová stupnice :

- 1 výborné
- 2 dobré
- 3 špatné

A infiltrační schopnost půdy

- 1 vysoká rychlost infiltrace ($> 0,12$ mm/min)
- 2 střední rychlost infiltrace ($0,06$ až $0,12$ mm/min)
- 3 nízká rychlost infiltrace ($< 0,06$ mm/min)

B průměrná sklonitost

- 1 do 3°
- 2 od 3° do 7°
- 3 nad 7°

C stav půdy po předplodně

- 1 výborný
- 2 dobrý
- 3 špatný

D listový index (LAI)

- 1 nad 8,5
- 2 od 5,5 do 8,5
- 3 do 5

Infiltrační schopnost a sklonitost horní (geometrický průměr)

- 1.414
- 1.732
- 2
- 2.449

Lesy

Sídla

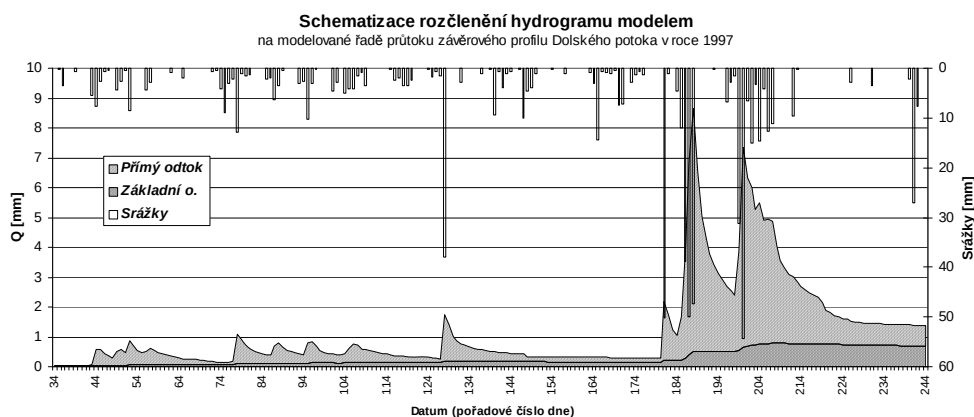
0 200 400 600 800 1000 Metry



PŘÍLOHA D.

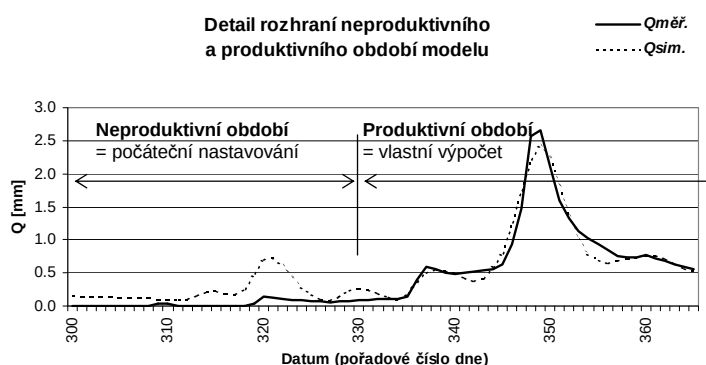
Popis bilančních složek odtoku a distribuce půdní vlhkosti

Uplatnění ověřených pracovních postupů v prostředí matematických modelů sdružuje přednosti výkonné výpočetní techniky a metod přehledného grafického vyjádření. Popis vybraných bilančních složek v rámci početního řešení srážko-odtokového procesu demonstruje *OBR.D-1* s využitím modelu SMAR podle definic, uvedených v *KAPITOLE 3.2.1.*



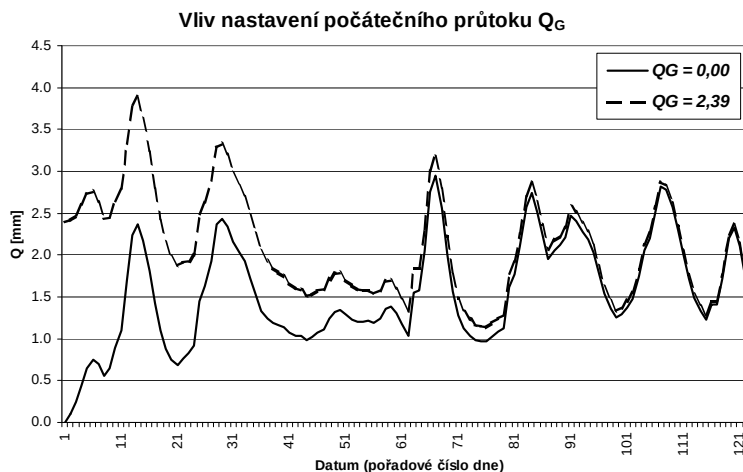
Obr. D-1 Grafické vyjádření základního a přímého odtoku

Odpovídající pozornost si zaslouží i pracovní postupy, přibližující chování zvoleného modelu v celém průběhu jeho aplikace. Po úvodní fázi automatického (nebo manuálního) nastavení počátečních podmínek vlastního výpočtu (zadáním měřených hodnot, nebo použitím optimalizačních postupů) lze posoudit správnost zvolených hodnot, nebo zvoleného pracovního postupu – viz *OBR.D-2*.



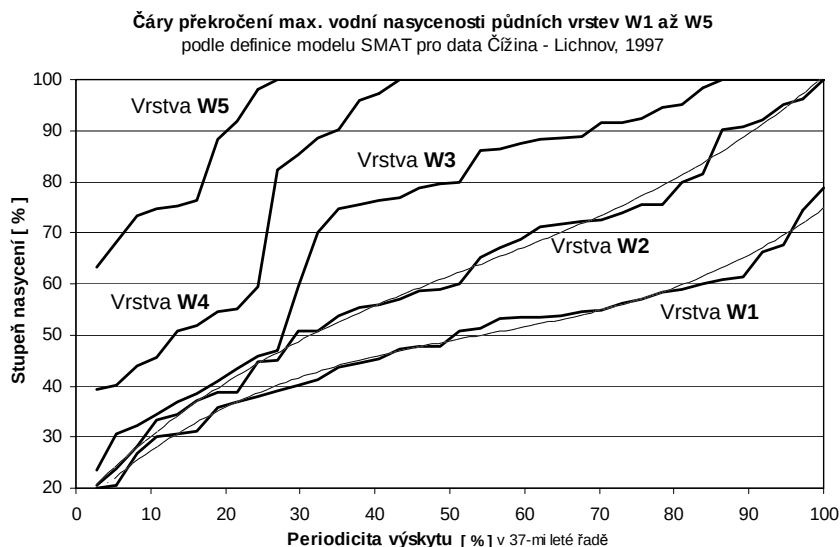
Obr. D-2 Reakce modelu na konci období nastavování počátečních podmínek řešení (optimalizačními postupy)

Obdobným způsobem lze hodnotit i funkci modelu při autokorekci chybně zadáných počátečních hodnotách výpočtu - např. na *OBR.D-3* vliv zadání hodnoty průtoky Q_G na počátku časového období. Chyba způsobí postupnou konvergenci ke správným hodnotám, snižuje se však efektivita modelování (RE , PE) celého výpočtového období.

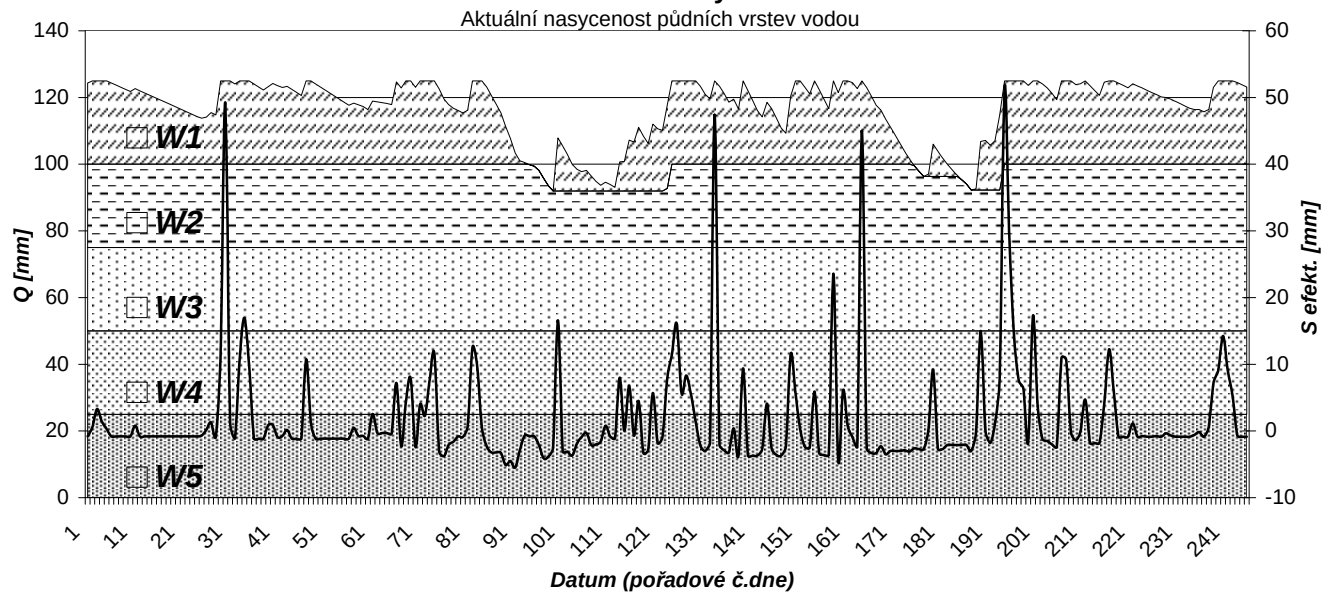
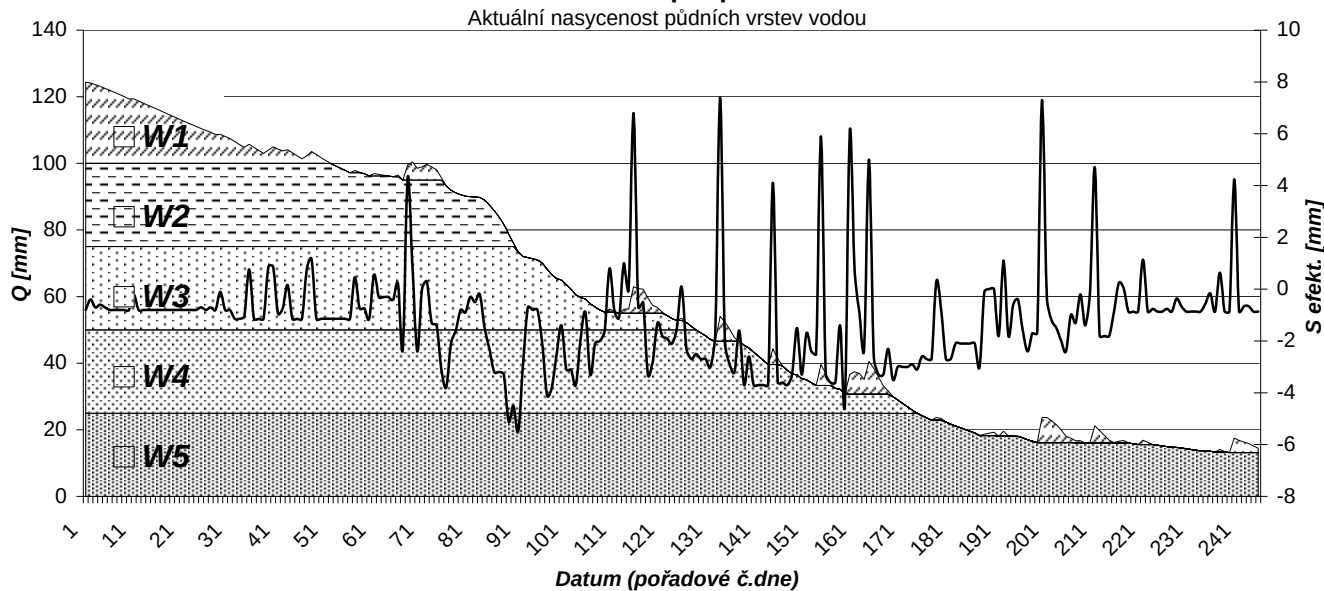
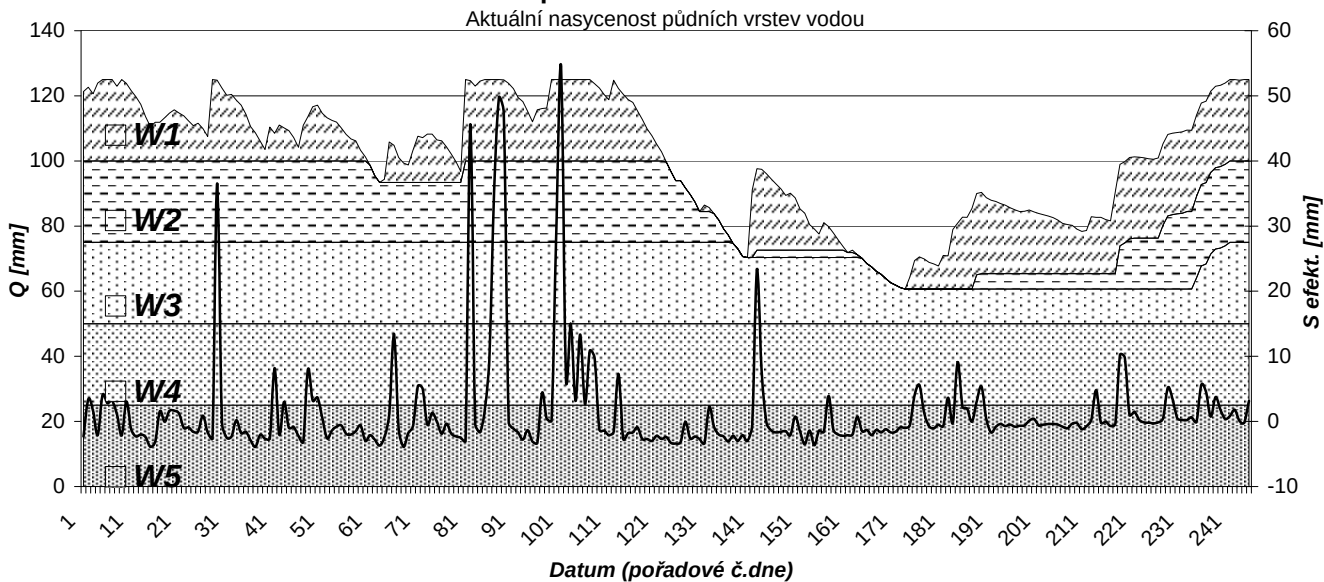


Obr. D-3 Odezva modelu po chybném nastavení počátečních podmínek řešení

Pokud je využito vnitřních stavových proměnných modelu k popisu režimu povodí, např. vyjádřením vodní nasycenosti půd (resp. deficitu vlhkosti), bude vedle chronologického časového průběhu sledovaných veličin (OBR.D-5) významné i statistické zpracování získaných řad, pokud je délka řešeného období dostatečné délky – viz OBR.D-4.



Obr. D-4 Odvození typických čar vodní nasycenosti vrstevného půdního profilu s aproximací užitím funkčního vztahu

A - varianta srážkově vydatného roku**Obr.D-5****B - varianta srážkově podprůměrného roku****C - zpracování běžného roku**

PŘÍLOHA E.

Využití bilančního modelu pro identifikace extrémních hydrologických situací

Využití modelů hydrologické bilance poskytuje **možnosti identifikace extrémů srážko-odtokového procesu**, tj. stavů nasycení aktivní zóny povodí (potenciální předpovodňový stav) a její vyčerpání v období extrémního sucha. **Odtokové faktory** jak **klimatické** (srážky, teplota, výpar), tak **fyzickogeografické** (morfologické vlastnosti povodí, půdní a vegetační poměry, antropogenní vlivy) velmi silně ovlivňují odtokový proces. Z obou skupin těchto faktorů jsou nesporně převládající **srážky** (výška, intenzita, doba trvání) a **půdní poměry** (hydraulické a fyzikální parametry, hloubka aktivní zóny).

Modely hydrologické bilance řeší dynamiku půdní vlhkosti v závislosti na srážko-odtokovém procesu. Protože proces vytváření extrémních odtoků je zejména ovlivňován **stupněm nasycení aktivní zóny** (povrchová půdní vrstva 0,20 – 0,60 m), je stav jejího nasycení (nejčastěji vyjadřován deficitem půdní vlhkosti *SMD*) rozhodující pro vznik extrémních povodní i extrémních období sucha.

Ilustrativní příklad přináší bilance aktivní zóny získané implementací modelu WBCM-5. Na tomto příkladu je ukázán stav povodňových nebezpečí, kdy dochází k plnění nasycené aktivní zóny, tj. kdy její vlhkost $\theta \rightarrow \theta_{SAT}$ a *SMD* $\rightarrow 0$. Byly zde porovnány povodňové situace z roku 1997 na povodích Rokytenky, Dolského a Kotelského potoka, kdy došlo ke dvěma povodňovým vlnám:

1. vlna: 5/7 – 10/7/1997
2. vlna: 18/7 – 22/7/1997

Následující tabulka uvádí hodnoty hlavních parametrů modelu WBCM-5

POVODÍ	Plocha km ²	Retenční kapacita <i>FC</i> mm	Pórovitost <i>POR</i> mm	Tloušťka akt. zóny <i>DROT</i> mm	Plné nasycení θ_{SAT} mm	Počáteční průtok <i>BF (0)</i> mm.den ⁻¹	Parametr <i>SMAX</i> mm	Parametr <i>GWM</i> mm
ROKYTENKA	63,20	0,38	0,45	400,0	152,0	3,7	700,0	1200,0
DOLSKÝ P.	4,63	0,35	0,45	300,0	105,0	0,5	800,0	1000,0
KOTELSKÝ P.	3,75	0,35	0,45	300,0	105,0	1,5	600,0	600,0

Tab. E-1 Parametry povodí pro aplikaci modelu WBCM-5

Model WBCM-5 jasně identifikuje nebezpečí vzniku povodní, kdy deficit vlhkostí aktivní zóny dosahuje 20,0 mm, jak je ukázáno na *OBR.E-1*. Průběhy hodnot deficitů (*SMD*) jsou velmi ilustrativní a mohou sloužit jako počáteční podmínky (spolu s hodnotami počátečních průtoků Q_0 [m³.s⁻¹] v uzávěrovém profilu povodí). Obě tyto hodnoty jsou určovány např. britskou meteorologickou službou (British Royal Meteorologic Service) a poskytovány denně vodohospodářům i veřejnosti. Přiložená tabulka *TAB.E-2* rovněž dokumentuje situaci deficitu půdní vlhkosti aktivní zóny na povodí Rokytenky den před zvýšenými průtoky (resp. před povodňovým stavem) devadesátých let. Situace těsně před povodňovými stavy července 1997 jsou významné.

Datum povodně od / do	Kulminace Q_{MAX} $m^3 \cdot s^{-1}$	Srážkový úhrn H_S mm	Deficit aktivní zóny SMD mm	Předchozí srážka za 5 dnů H_{S5} mm
27/6 – 28/6/91	1,35	27,5	52,7	12,9
3/6 – 5/6/93	0,92	33,5	56,5	0,0
8/8 – 10/8/94	1,72	48,0	48,6	11,2
7/6 – 9/6/95	2,27	33,4	44,5	3,5
11/6 – 12/6/95	3,16	32,0	39,8	36,9
31/8 – 3/9/95	13,1	51,6	29,6	12,1
4/7 – 10/7/97 (významné)	27,5	109,9	26,2 (10.7. po příčinném dešti)	62,4
18/7 – 27/7/97 (významné)	6,0	97,5	19,7 (6.7. po příčinném dešti)	6,8

Tab. E-2 Hydrologické údaje zvýšených průtoků na povodí Rokytenky ($Q_{SAT} = 152$ mm)

Kromě analýzy vlivu retence aktivní půdní zóny na vytváření povodňových situací je možno modelem WBCM vyhodnocovat i opačné stavy, tj. vznik hydrologického sucha. Výsledky „čerpání“ (tj. vysychání) aktivní zóny na povodích Rokytenky, Dolského a Kotelského potoka jsou uvedeny graficky na *OBR.E-2*. Z těchto grafů je jasné vidět, že nejlépe je „vododržná“ aktivní půdní zóna Rokytenky (nejmenší směrnice trendové přímky). Je to dáno jednak strukturou kultur, způsobem hospodaření a půdními poměry. Následuje Kotelský potok, který i přes velkou plochu povodí odvodněnou systematickou drenáží (37,75%) se odvodňuje pomaleji, než Dolský potok, který má menší odvodněnou plochu, (21,45%), ale jeho půdy jsou propustnější (viz. hydrologické skupiny půd). Vyšetřované období bylo zvoleno v měsíci srpnu 1984, tedy stejně pro všechna povodí a ke ztrátám vody hlubší infiltrací a územním výparem došlo za přibližně stejných klimatických podmínek. Základní hospodářské údaje a využití všech tří experimentálních povodí obsahuje *TAB.E-3*.

KULTURA	DOLSKÝ POTOK	KOTELSKÝ POTOK	ROKYTENKA
Orná půda	68,0 %	75,5 %	25 %
Louky, pastviny	6,7 %	10,4 %	40 %
Lesy	0 %	1,7 %	30 %
Ostatní	25,3 %	12,4 %	5 %
HYDROLOGICKÉ SKUPINY PŮD			
A	6,3 %	0,0 %	0,9 %
B	71,2 %	31,7 %	85,4 %
C	20,6 %	64,0 %	10,6 %
D	1,9 %	4,3 %	3,1 %

Tab. E-3 Přehled hospodářského využití povodí Dolského, Kotelského potoka a Rokytenky pro bilanční účely

Modelem WBCM byl také zkoumán vztah mezi relativní vlhkostí aktivní zóny ($\Delta AW = WUL(J) / FCUL$) a objemovým součinitelem odtoku $\underline{c}$ ($c = OF(J) / THR(J)$) na všech třech zkoumaných povodích. Graf na *OBR.E-3* tyto vztahy ukazuje. Je na něm názorně vidět, že Dolský potok i při značné nasycenosti aktivní zóny ($\Delta AW = 94\%$) má poměrně nízký odtokový součinitel ($c = 0,60$). To opět potvrzuje výsledky půdního rozboru, které ukázaly značnou propustnost půd. Také povodí Rokytenky při stejném stavu nasycenosti aktivní půdní zóny (tj. $\Delta AW = 94\%$) vykazuje jen o málo vyšší odtokový součinitel ($c = 0,64$), než povodí Dolského potoka. „Pufrový“ efekt zastoupení lesa zde zřejmě zmenšuje podíl povrchového odtoku. Povodí Kotelského potoka vykazuje zkoumaný vztah nejvíce ve prospěch zvyšování odtokového součinitele $\underline{c}$, tzn., že charakterizuje povodí s relativně nejvyšším „odtokovým potenciálem“ (při $\Delta AW = 93\%$ je $c = 0,75$).

K odhadu tohoto „odtokového potenciálu“ může vedle hodnot odtokových křivek CN (jako výsledku analýz hydrologických skupin půd, zastoupení kultur a způsobu hospodaření a předchozích vláhových podmínek), sloužit alespoň náhradně vztah hodnot relativní vlhkosti aktivní půdní zóny ΔAW (nebo hodnot deficitu vlhkosti této zóny) a indexu předchozích srážek API ($API = \text{Antecedent Precipitation Index}$, nebo $UPS = \text{Ukazatel Předchozích Srážek}$). Tento index, charakterizující (pouze však informativně) stupeň vláhové nasycenosti povodí je používán v prognózách ČHMÚ:

$$API_t = \sum_{t'=1}^{30} H_s C^{t'} \quad (\text{mm}) \quad (\text{R-1})$$

kde t' pořadí dnů počítané nazpět od příčinného deště
 H_s průměrný denní úhrn srážek v povodí (mm)
 C evapotranspirační konstanta (obvykle $C = 0,93$ v ČR)

Při předpovědním provozu se pak výpočet indexu provádí ze dne na den podle schéma:

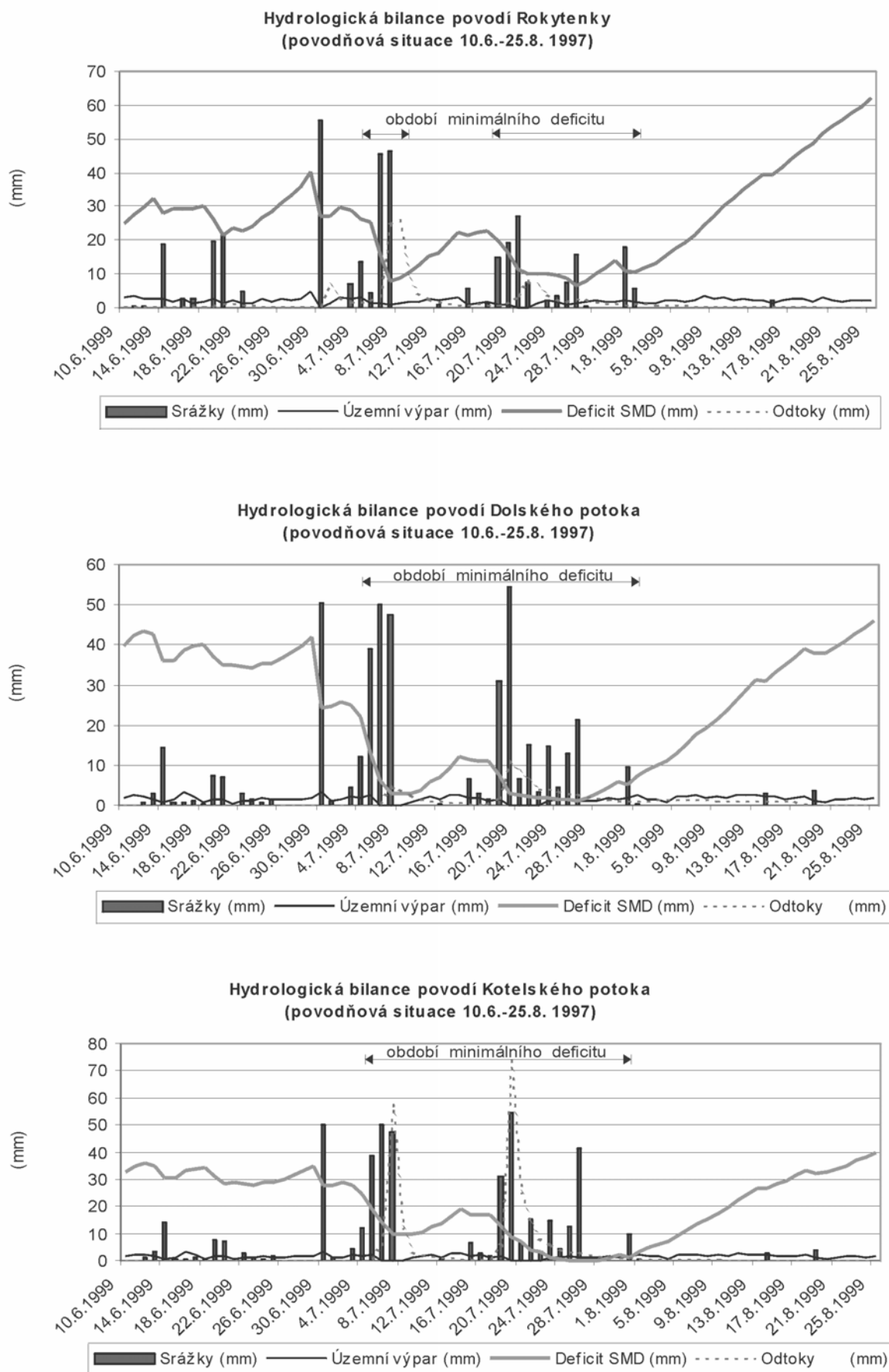
$$API_{t+1} = API_t \cdot C + H_s \quad (\text{R-2})$$

OBR.E-4 ukazuje vztah hodnot relativních vlhkostí aktivní zóny ($\Delta AW = WUL(J)/FCUL$) a indexu předchozích srážek (API) na povodí Rokytenky. Pro základní (informativní) odhad možného výskytu povodňové situace lze tedy na základě jednoduchého výpočtu API (po předchozím stanovení vztahu API versus ΔAW) zjistit stav nasycenosti aktivní zóny (ΔAW) a z něho odhadnout „potenciální“ odtokový součinitel. Model hydrologické bilance WBCM by k těmto úvahám mohl být vhodným nástrojem.

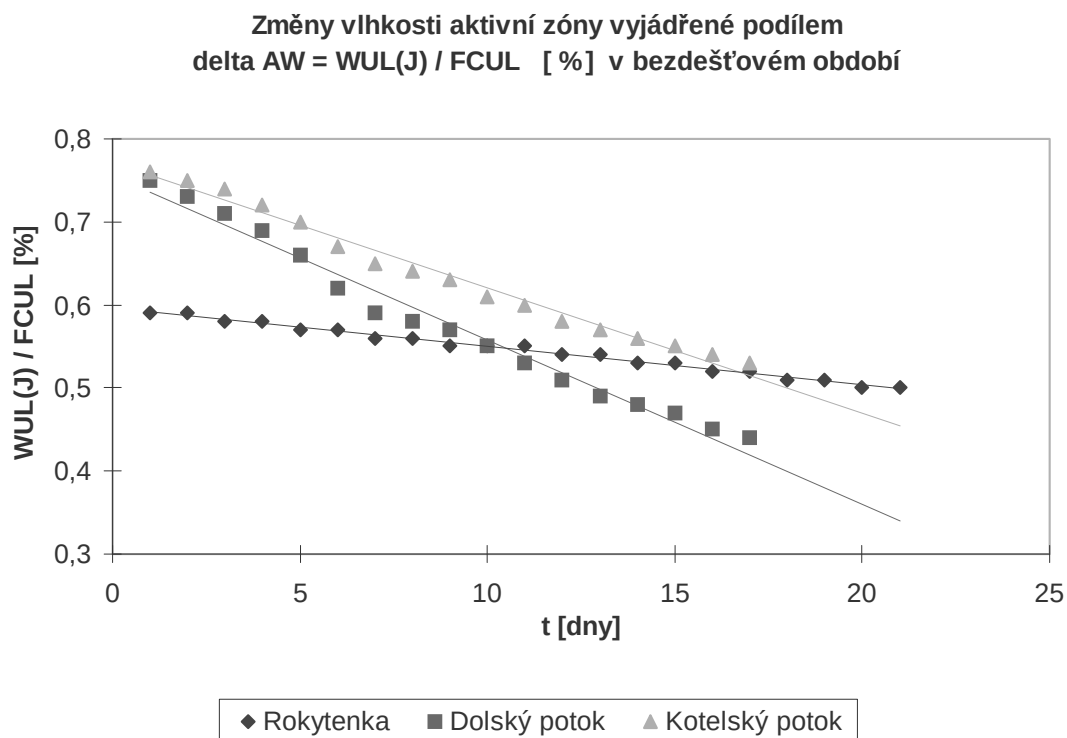
Pokud se týká vlivu vegetace na odtokové poměry, bylo jeho hodnocení pro extrémní odtoky provedeno se závěrem, že se zvyšující se intenzitou srážky a s její velikostí má vegetace zmenšující se vliv na podíl povrchového odtoku. V bilančním smyslu je však vliv vegetace velmi významný. Model WBCM ho kvantifikuje v denním časovém kroku jako intercepci $AIR(J)$, propad deště $THR(J)$, příp. zbytek interceptované vody na vegetaci $WIR(J)$, která se odpaří. Relace mezi výškou deště $RAIN(J)$ a výškou intercepce $AIR(J)$ na zkoumaných povodích ukazuje *OBR.E-5*. Maximální denní intercepční kapacita vegetačních pokryvů těchto povodí (WIC) byla stanovena:

DOLSKÝ A KOTELSKÝ POTOK: $WIC = 1,5 \text{ mm}$
 ROKYTENKA: $WIC = 2,0 \text{ mm}$

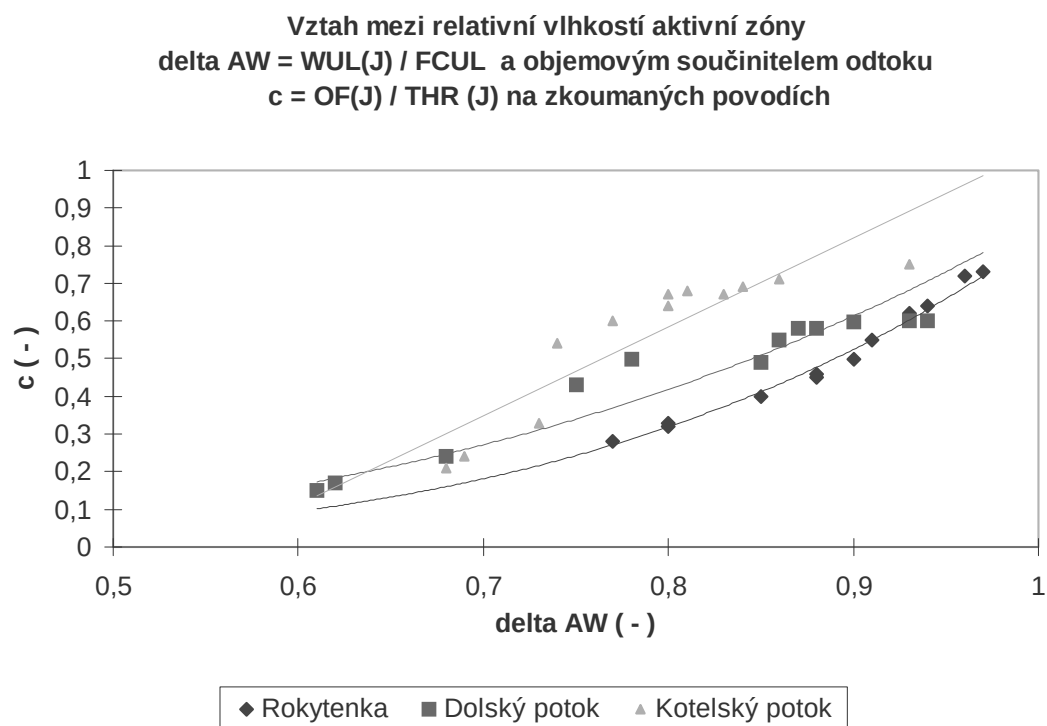
Toto určení bylo provedeno vzhledem ke druhové a prostorové skladbě vegetace a s přihlédnutím k hodnotám maximální denní intercepční kapacity WIC , experimentálně stanovených hydrologickým výzkumem.

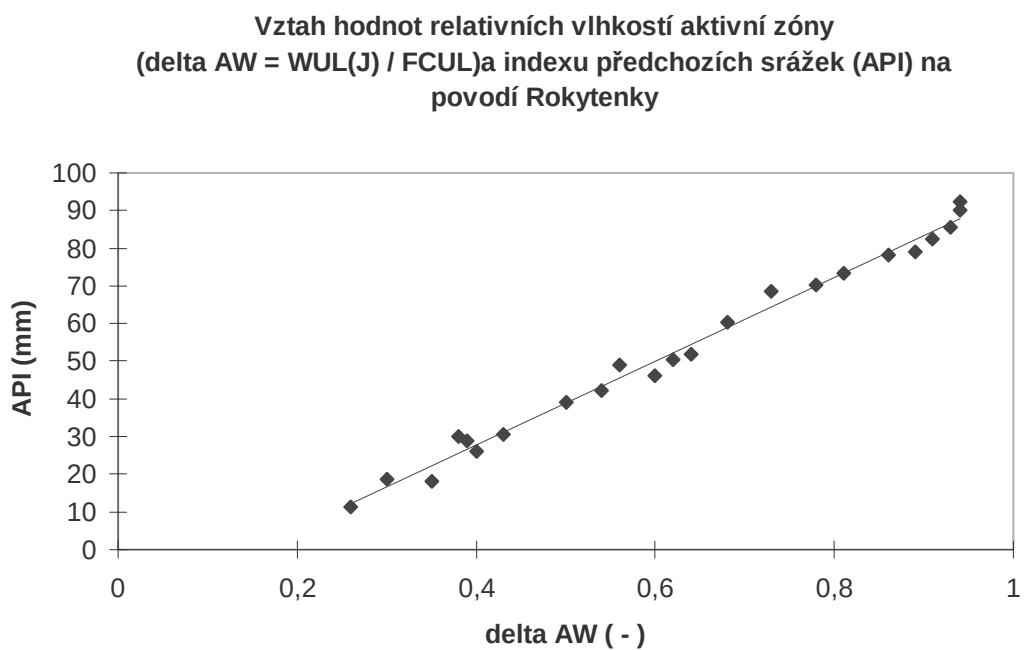
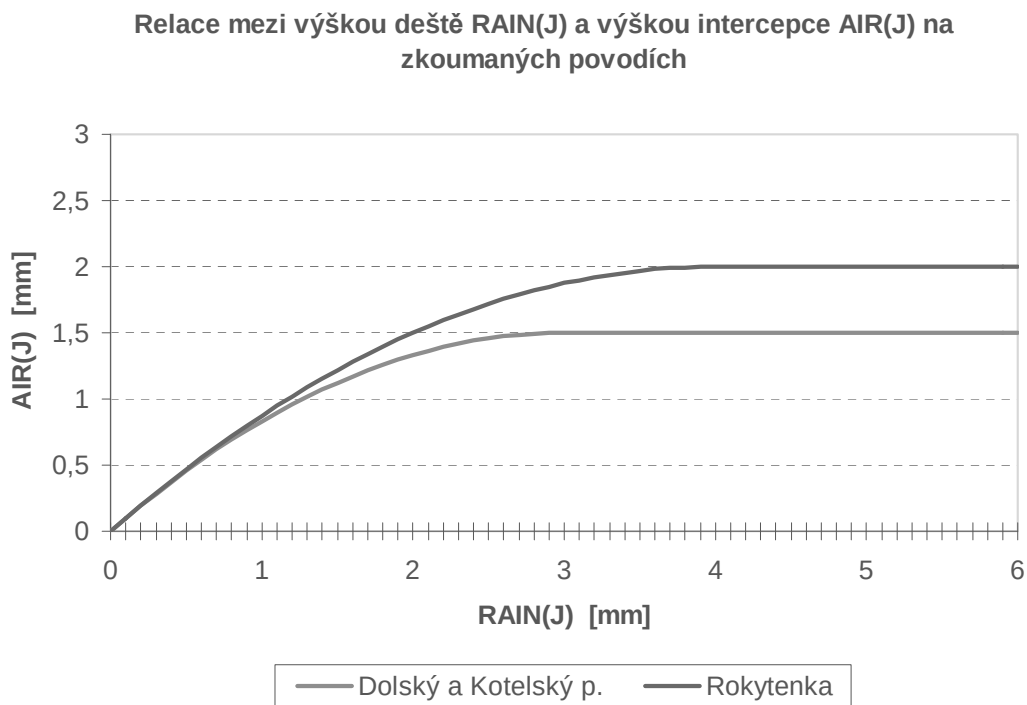
**Obr.E-1** Průběh deficitu nasycení aktivní zóny povodí

Obr. E-2



Obr. E-3



Obr. E-4**Obr. E-5**

PŘÍLOHA F.

Vybrané související termíny z oborů vodního hospodářství, hydrologie, hydroopedologie a GIS

<i>Termín</i>	<i>Definice</i>
hydrologická bilance	Porovnání přírůstků a úbytků vody a změn vodních zásob povodí, území nebo vodního útvaru za daný časový interval.
vodohospodářská bilance	Porovnání požadavků na vodu se zdroji vody v uvažovaném místě a čase, a to co do množství a jakosti.
celkový odtok	Souhrn všech složek odtoku procházejícího závěrovým profilem za daný časový interval.
retence vody	1. dočasné přirozené nebo umělé zdržení vody na povrchu terénu, v půdě, v korytě, v toku, vodní nádrži aj.; 2. objem vody dočasně zdržené na povrchu terénu, v půdě, v korytě toku, vodní nádrži apod.; 3. rozdíl přítoku do uvažovaného prostoru a odtoku z něho za časovou jednotku.
akumulace vody	Dlouhodobé přirozené, nebo umělé hromadění vody ve vodních útvarech (u podzemních vod ve zvodních, u povrchových vod v jezerech nebo nádržích)
intercepce	1. zadržování srážek na povrchu předmětů a vegetaci; 2. objem srážek zadržovaných na předmětech a vegetaci, které se nezúčastní bezprostředně odtoku na ploše uvažovaného území.
výška srážek	Objem vody ze srážek spadlých na povrch daného území za daný časový interval, vyjádřený výškou vrstvy rovnoměrně rozložené po ploše tohoto území.
výška odtoku	Objem vody odteklé z povodí nebo z daného území za daný časový interval, vyjádřený výškou vrstvy rovnoměrně rozložené po ploše tohoto povodí nebo území.
výška výparu	Objem vody vypařené z povrchu daného území za daný časový interval, vyjádřený výškou vrstvy rovnoměrně rozložené po ploše tohoto území.
úhrn srážek	Celková výška srážek spadlých za uvažované období na daném místě.
propad deště	Rozdíl mezi výškou deště a výškou intercepce
potenciální výpar z půdy	Výpar z půdy při daných atmosférických podmínkách (sytnostním doplnku, teplotě půdy, teplotě vzduchu apod.) za předpokladu stálého dostatku vláh v půdě.
transpirace	1. přechod vody v důsledku fyziologických procesů rostlin do ovzduší; 2. objem nebo výška vrstvy vody vydané rostlinami při transpiraci.
evapotranspirace	1. vypařování z povrchu území společně s transpirací; 2. objem nebo výška vrstvy vody vypařené z povrchu území společně s transpirací.

Pokračování tabulky

Pokračování tabulky

potenciální evapotranspirace	Evapotranspirace při daných atmosférických a půdních podmínkách za předpokladu stálého dostatku půdní vláhy a optimálních podmínek pro vývoj rostlin.
územní výpar	Výpar z povrchu území zahrnující všechny složky.

Tab. F-1 Bilance vod v povodí

<i>Termín</i>	<i>Definice</i>
základní odtok	Složka celkového odtoku tvořená výronem podzemních vod do sítě vodních toků (viz schéma odtok. procesu).
přímý odtok	Složka celkového tvořená povrchovým a hypodermickým odtokem (viz schéma odtok. procesu).
povrchový odtok	Složka celkového odtoku, která odtéká z povodí do sítě vodních toků po povrchu terénu (viz schéma).
hypodermický odtok	Složka celkového odtoku, která stéká do koryta toku v bezprostřední vrstvě pod povrchem povodí, aniž by dosáhla hladiny podzemní vody (viz schéma).
srážko-odtokový vztah	Vztah mezi odtokem a příčnými srážkami, jakož i dalšími činiteli působícími na odtokový proces.
jednotkový hydrogram	Hydrogram přímého odtoku odpovídající jednotkovému dešti plošně rovnoměrně rozloženému po povodí.
jednotkový déšť	Teoretický efektivní déšť o zvoleném jednotkovém úhrnu, rovnoměrné intenzitě a zvolené, zpravidla kratší době trvání (část doby koncentrace), který se používá k odvození jednotkového hydrogramu.
výtoková čára	Čára poklesu průtoků v období bez srážek, kdy je tok napájen pouze podzemní vodou.
transformace odtoku	Přirozené nebo umělé přerozdělení odtoku v čase.

Tab. F-2 Režim odtoku vod z povodí

<i>Termín</i>	<i>Definice</i>
vodohospodářské dílo	Prostorově a funkčně ucelený soubor staveb, objektů, strojních i jiných zařízení, asanačních, terénních a vegetačních úprav apod., který slouží potřebám vodního hospodářství.
vodohospodářská stavba	Stavba, která samostatně nebo v komplexu s ostatními stavbami slouží účelům vodního hospodářství.

Tab. F-3 Vodní hospodářství

<i>Termín</i>	<i>Definice</i>
topologie	V užším chápání je částí popisu objektu či fenoménu, týkající se jeho vztahů s jinými objekty. Topologické vztahy je přitom možné definovat jen pro dva nebo více objektů navzájem.
geografický prostor	Je absolutní, nebo relativní prostor, vztažený na geografická měřítka. Je lokalizovaný na části zemského povrchu.

Tab. F-4 Geografické informační systémy (GIS)

<i>Termín</i>	<i>Definice</i>
půdní voda	Veškerá voda obsažená v půdě bez ohledu na skupenství, která obvykle nevytváří souvislou hladinu.
podzemní voda	Voda vyplňující dutiny zvodnělých hornin bez ohledu na to, zda vytváří nebo nevytváří souvislou hladinu.
plná vodní kapacita	Hydrolimit; hodnota vlhkosti při úplném zaplnění půdních pórů vodou, odpovídající hodnota vlhkostního potenciálu půdní vody ϕ_w je rovna nule.
polní vodní kapacita	Hydrolimit; charakterizuje maximální množství zavěšené vody v profilu; odpovídající hodnota $pF = 2.0$ až 2.7
bod vadnutí	Hydrolimit; vlhkost půdy, kdy rostliny jsou trvale nedostatečně zásobeny půdní vodou a vadnou, odpovídá smluvně $1,5 \cdot 10^6$ Pa (dříve 15 barům) sacího tlaku ($pF = 4,18$).
využitelná vodní kapacita	Rozdíl hodnot polní vodní kapacity a bodu vadnutí.
zásoba půdní vody	Množství vody v půdním profilu (popř. ve vrstvě), vyjádřené v mm; stanoví se z vlhkosti půdy.
hydrolimit	Hodnota vlhkosti půdy charakterizující pohyblivost a přístupnost půdní vody pro rostliny.
pF půdní vody	Dekadický logaritmus tlakové výšky půdní vody, vyjádřené v cm.
vlhkostní retenční čára	Grafické znázornění závislosti půdní vlhkosti na vlhkostním potenciálu (sacím tlaku).

Tab. F-5 Hydropedologie

PŘÍLOHA G.

Požadavky modelů WBCM-5 a SMAR na datové soubory

A. POŽADAVKY MODELU WBCM-5 NA DATOVÉ SOUBORY

Zdrojový program modelu WBCM-5 je v jazyce FORTRAN a je složen ze 12 programových jednotek. Pro svou úspěšnou implementaci vyžaduje následující údaje, tvořící kompletní datový soubor.

Model WBCM-5 simuluje všechny významné denní hodnoty hydrologického cyklu, zejména však hodnoty prakticky měřitelné a tím i kontrolovatelné. V běžné hydrologické praxi je obecně největší význam přisuzován odtoku, což je dobře monitorovatelný proces. Proto WBCM-5 ve své nejpoužívanější verzi poskytuje kromě jiných hodnot denní odtoky jednak jako finální výsledek a jednak jako vektor proměnných pro stanovení objektivní funkce k optimalizaci modelových parametrů. Všeobecně jsou doporučována dále uvedená denní data, pokrývající celé vegetační období (obvykle IV. – X.). WBCM-5 ve své identifikační fázi požaduje pro úspěšnou implementaci následující data:

- **Formální a obecné údaje**
obsahují název povodí (*CAT*), počet dnů (*JJ*), dekád (*KK*) a měsíců (*MM*) simulovaného období, dále plochu povodí (*AREA*)
- **Logické proměnné**
11 logických údajů řídících algoritmus modelu: *LOPT*, *LPE*, *LNRAD*, *LPAT*, *LHAM*, *LPEN*, *LGW*, *LLEG*, *LPRINT*, *LOW*, *LQD*. Význam těchto symbolů je vysvětlen tištěném komentáři každého výpočtu.
- **Počáteční hodnoty parametrů**
z důvodů objektivního optimalizačního procesu je třeba zvolit počáteční hodnoty optimalizovatelných parametrů co nejrealističtější. Neoptimalizovatelné parametry je třeba určit přesně.
Optimalizované parametry: *SMAX*, *GWM*, *BK*
Neoptimalizované parametry: *WIC*, *FCUL*, *FC*, *POR*, *P1*, *P2*, *P7*, *TUL*, *AREA*
- **Počáteční podmínky simulovaného období**
udávajících vláhové poměry povodí na začátku simulovaného období:
WIR (0) intercepce (mm)
WUL (0) objem vody v akt. zóně (mm)
GWT (0) hladina podzemní vody (cm)
BF (0) základní odtok (mm)
- **Denní meteorologická data**
obsahující kalendářní datum *IDAT*(*J*) / *IMONTH*(*J*) / *IYEAR*(*J*) a denní hodnoty:
RAIN (*J*) výška deště (mm)
TEMP (*J*) průměrná teplota (°C)
RH (*J*) relativní vlhkost vzduchu (-)
a dále v závislosti na vybrané metodě řešení potencionální evapotranspirace *PE*(*J*):
ADS (*J*) délka slunečního svitu (hod.)

$U2 (J)$ průměrná rychlost větru ($m.s^{-1}$)
 $RN (J)$ sluneční radiace (J)

či přímo měřené (nebo předem vypočtené) hodnoty potencionální evapotranspirace $PE(J)$.
 Dále se načítají průměrné měsíční hodnoty teoretické délky dne $TDM (M)$ a měsíční hodnoty atmosférické sluneční radiace $RA (M)$ geografické lokality, ze kterých se v modelu generují příslušné denní hodnoty. Je-li třeba, čtou se dále dílčí albeda povrchu povodí $ALBW (I)$.

- **Měřené údaje k identifikaci parametrů a k vyhodnocení shody**

V závislosti na logických proměnných LGW (příp. LRD) a LQD se čtou měřené hodnoty:

Jestliže $LGW = F$ a $LQD = T$:

$QD (J)$ denní odtoky (mm nebo $m^3.s^{-1}$)

Jestliže $LGW = T$:

$GWTD (J)$ denní hloubky podzemní vody v kontrolním profilu (cm)

Jestliže $LGW = F$ a $LQD = F$:

$TQM (K)$ dekádní odtoky (mm)

Kontrolní proměnné

$K1, K2, K3$ k testování kvalitativní správnosti sestaveného souboru dat ($K1 = JJ$,
 $K2 = KK, K3 = MM$).

B. CHARAKTERISTIKY MODELU SMAR A FORMA DATOVÝCH SOUBORŮ

Verze modelu SMAR z roku 1996 je programována v jazyku FORTRAN a je vnitřně členěna na 9 podprogramů. Modul FFW1 a FFW2 slouží k převodu formátů čtených a zapisovaných souborů, modul FFW17 ošetřuje dílčí výpočty statistických charakteristik během nastavování a optimalizace parametrů řešení. Modul FFW42 vypočítává Gamma funkci a jádrem vrstevného modelu je původní procedura, označená FFW121. Modul SMR60B stanoví hodnotu objektivní funkce F a provádí separaci (rozčlenění) složek odtoku. Moduly FFW118, FFW119 a FFW120 vykonávají optimalizaci pomocí metod Simplexní, Rosenbrockovy a Genetické.

Pro zadání vstupních datových řad slouží soubory předem definovaného názvu (např. SRAZKY.PRN; VYPAR.PRN; ODTOK.PRN viz *TAB.G-1*). Řídícím souborem programu je libovolně pojmenovaný soubor (např. SKUTEC.PAR), obsahující veškeré parametry výpočtu. V *TAB.G-1* je uvedena jeho část, formálně přizpůsobená pro spuštění programu v uživatelském prostředí MS Excel 97. Překlad z Fortranu do Visual-Basicu byl realizován na VÚMOP Praha.

Zadávací vstupní formulář modelu SMAR**Tab.G-1**

Tabulka zpracována v programu MS Excel - umožňuje přímou změnu řídicího souboru modelu

Úpravy datových souborů:	Odtok	Srážky	Výpar
Informační data prvního řádku (ITITLE):			
Lokalita:	<i>Dolský potok</i>	<i>Svratouch</i>	<i>Svratouch GGI</i>
Rok (IYEAR):	1997	1997	1997
Data druhého řádku /SPOLEČNÁ pro Q, S, ET/:			
I (je-li I=1, jsou data čtena):	1		
IFREE:	0		
Data třetího řádku /SPOLEČNÁ pro Q, S, ET/:			
Měsíc, Den, Hodina, Minuta, Vteřina prvního vst. Data:	1		
IDT v [sec.]	86400		
L29 (má-li únor 29 dní)	790		
ICODE (průměrné=1; momentální=0)	1		
IUNIT [0 až 4]	1		
Úpravy parametrů výpočtu:			
Plocha povodí [km ²]:	4,63		
Začátek kalibrační periody (prvek řady):	10		
Konec kalibrační periody (prvek):	300		
Začátek verifikační periody (prvek):	301		
Konec verifikační periody (prvek):	365		
	PAR	PARMIN	PARMAX
C: [0 to 1] $E(i) = C^{(i-1)} \cdot E_p$	0,983	0.5	1.0
Z: [mms](Total soil moisture capacity)	400,921	100	600
Y: [mms/T.S](Soil infiltration capacity)	156.226	50	300
H: [0 to 1] (Direct runoff area index)	0.162	0	1
T: [0 to 1] (Potential evaporation factor)	1	0	1.0
G: [0 to 1] (Groundwater runoff coeff.)	1	0	1.0
N: [-] (Parameter n of Nash model)	1,822	1	10
NK: [T.S] (number of time step)	8,976	2	20
KG: [T.S] (number of time step)	9,241	2	360
QG [mms/T.S] – nastavení poč.průtoku	0		
NWARM [warm up period]	10		
M [memory lenght] – délka JH	20		
Optimalizace Genetickým algoritmem:			
NVAR (number of variables)	10		
NPOP (number of population)	100		
NSTR1 (lenth of binary code for variable)	10		
PM (probability of mutation)	0.001		
CM (cmax number of copies)	2		
ISEED (random 0-1, negativ - integer)	-1		
Optimalizace algoritmem podle Rosenbrocka:			
TOLX (velikost hledacího kroku)	1.e ⁻⁶		
TOLF (tolerance splnění odchylky)	1.e ⁻⁷		
ITMXRS (max. počet kroků v cyklu)	2000		
Optimalizace simplex algoritmem:			
ATOL (velikost hledacího kroku)	1.e ⁻⁵		
TOLF (tolerance splnění odchylky)	1.e ⁻⁶		
ITMXSP	1000		
IPRT - tisk výsledků (ANO=1)	0		
Základní nastavení ostatních parametrů (neměnit):			
Název vstupního souboru dat (S):	Srazky.prn		
Název vstupního souboru dat (ET):	vypar.prn		
Název vstupního souboru dat (Q):	odtok.prn		
CAP (mm) [vodní kapacita 1 vrstvy]	25		