

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Katedra fyzické geografie a geoekologie



MICHAL JENÍČEK

**APLIKACE MATEMATICKÉHO MODELU NASIM PRO
SIMULACI SRÁŽKO-ODTOKOVÝCH POMĚRŮ
V POVODÍ ČERNÉ VODY**

(diplomová práce)

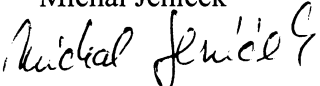
PRAHA 2005

Vedoucí práce: RNDr. Jakub Langhammer, Ph.D.

Rád bych poděkoval RNDr. Jakobovi Langhammerovi, Ph.D. za vedení diplomové práce a za cenné rady a připomínky. Dík patří také Prof. Dr. Achimu Schultemu a dalším pracovníkům katedry aplikované fyzické geografie berlínské Freie Universität za možnost pracovat se srážko-odtokovým modelem NASIM a také pracovníkům Českého hydrometeorologického ústavu, Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního, Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy a Povodí Ohře za poskytnutí datových podkladů pro mou práci a za důležité připomínky k ní.

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci s názvem „Aplikace matematického modelu NASIM pro simulaci srážko-odtokových procesů v povodí Černé vody“ vytvořil pouze na základě vlastních zjištění a s pomocí materiálů uvedených v seznamu použité literatury a seznamu mapových a datových podkladů. Svoluji zapůjčení práce ke studijním účelům.

V Orli dne 29.4.2005

Michal Jeníček


OBSAH:

ABSTRACT	5
1. ÚVOD	6
2. CHARAKTERISTIKA POVODÍ ČERNÉ VODY	8
2.1 GEOGRAFICKÁ POLOHA.....	8
2.2 GEOLOGIE	9
2.2.1 Obecná geologická charakteristika Krušných hor	9
2.2.2 Modelové povodí Černé vody a okolí	11
2.2.3 Hydrogeologický přehled	11
2.3 GEOMORFOLOGIE	12
2.4 PŮDY	12
2.5 VEGETAČNÍ POKRYV	14
2.6 KLIMA.....	15
2.6.1 Srážky.....	15
2.6.2 Teploty	17
2.6.3 Evapotranspirace.....	18
2.6.4 Vítr	20
2.6.5 Sníh	20
2.7 ODTOKOVÉ POMĚRY	20
2.7.1 Obecná charakteristika odtoku.....	20
2.7.2 Povodňové události	21
3. KLASIFIKACE HYDROLOGICKÝCH MODELŮ	24
3.1.1 Rozdělení dle účelu aplikace.....	25
3.1.2 Klasifikace z hlediska typu systému a hydrologického procesu.....	26
3.1.3 Klasifikace podle stupně kauzality.....	26
3.1.4 Klasifikace podle míry časové a prostorové diskretizace.....	29
4. CHARAKTERISTIKA MODELU NASIM.....	31
4.1 VŠEOBECNĚ	31
4.2 HYDROLOGICKÉ SYSTÉMY A PROCESY.....	32
4.2.1 Složky hydrologického cyklu v modelu NASIM	32
4.2.2 Komponenty a procesy.....	34
5. ZPRACOVÁNÍ VSTUPNÍCH DAT	49
5.1 STAVOVÉ CHARAKTERISTIKY POVODÍ	49
5.1.1 Digitální model terénu	49
5.1.2 Vytvoření elementárních ploch.....	50
5.1.3 Vytvoření odezvové funkce povodí (Zeitflächenfunktion).....	50
5.1.4 Hydrografické a hydrometrické charakteristiky	52
5.1.5 Půdy	52
5.1.6 Vegetační pokryv.....	54
5.2 ČASOVÉ ŘADY	54
5.2.1 Datové podklady.....	54
5.2.2 Kontrola platnosti dat (validace).....	55
5.2.3 Srážky.....	55
5.2.4 Teploty	56
5.2.5 Evapotranspirace.....	57
5.2.6 Průtoky	57
5.3 POTENCIÁLNÍ ZDROJE CHYB PŘI SBĚRU A PRÁCI S DATY.....	57
6. PRŮBĚH A VÝSLEDKY SIMULACÍ.....	59
6.1 OBECNÝ POSTUP SIMULACE V S-O MODELU NASIM.....	59
6.1.1 Sestavení systémového plánu (projektu) vybrané události.....	59
6.1.2 Zadání vstupních podmínek a parametrů simulace	61

6.1.3	Kalibrace.....	63
6.1.4	Interpretace výsledků	66
6.2	MODELOVÁNÍ ODTOKOVÝCH POMĚRŮ V OBDOBÍ 1995 – 2002	66
6.3	SIMULACE ZVÝŠENÍ PRŮTOKU V ČERVNU 1996	67
6.3.1	Synoptické příčiny a průběh povodně	67
6.3.2	Nastavení počátečních podmínek a parametrů simulace	67
6.3.3	Kalibrace.....	68
6.3.4	Výsledky modelu	69
6.4	SIMULACE LETNÍ POVODŇOVÉ UDÁLOSTI V ČERVENCI 1996	71
6.4.1	Synoptické příčiny a průběh povodně	71
6.4.2	Nastavení počátečních podmínek a parametrů simulace	72
6.4.3	Kalibrace.....	73
6.4.4	Výsledky modelu	73
6.5	SIMULACE JARNÍ POVODNĚ V BŘEZNU 1999	75
6.5.1	Synoptické příčiny a průběh povodně	75
6.5.2	Nastavení počátečních podmínek a parametrů simulace	76
6.5.3	Kalibrace.....	77
6.5.4	Výsledky modelu	78
6.6	VERIFIKACE MODELU NA UDÁLOSTI Z ČERVENCE 2002	80
6.6.1	Synoptické příčiny a průběh povodně	80
6.6.2	Nastavení počátečních podmínek a parametrů simulace	80
6.6.3	Kalibrace.....	81
6.6.4	Výsledky modelu	81
7.	DISKUZE.....	84
7.1	VÝBĚR VHODNÉHO MODELU.....	84
7.2	SHROMÁŽDĚNÍ DAT A MOŽNÉ ZDROJE CHYB A NEJISTOT	85
7.3	VOLBA VHODNÉHO MĚŘÍTKA	86
7.4	VÝBĚR METOD VÝPOČTU.....	87
7.5	NASTAVENÍ VSTUPNÍCH PODMÍNEK.....	88
7.6	KALIBRACE PARAMETRŮ	88
7.7	SMĚRY DALŠÍHO ROZVOJE A UPLATNĚNÍ S-O MODELŮ	90
7.7.1	Trendy ve využívání různých přístupů.....	90
7.7.2	Vazba na geografický informační systém (GIS).....	90
7.7.3	Využití radarových odhadů srážek a metod DPZ.....	91
7.8	SHRNUTÍ	91
8.	ZÁVĚR	92
9.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	94
10.	SEZNAM MAPOVÝCH A DATOVÝCH PODKLADŮ.....	98
10.1	MAPY	98
10.2	DATOVÉ ZDROJE	98
11.	SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A PŘÍLOH	99
11.1	OBRÁZKY	99
11.2	TABULKY	100
11.3	PŘÍLOHY.....	100
	PŘÍLOHOVÁ ČÁST	101

ABSTRACT

A rainfall-runoff modeling is nowadays a dynamically developing department of hydrology and water management. This development is caused by a rapid progress of computers and information technologies. This evolution provides the mankind with new possibilities to use water as its basic need and at the same time to evolve an effective protection against it. The aim of this thesis is to give some basic information about rainfall-runoff modeling, various approaches to it, methods and possibilities of application. To achieve this aim a concrete hydrologic model was chosen and with its help a rainfall-runoff processes in a small catchment of Černá voda in Krušné hills was simulated.

Three runoff events were chosen as calibration periods (for model adjustment). These events represent three different reasons causing floods (or better to say discharge enhancement). One of them was caused by a rain storm and its consequence was a flash flood in the catchment. The second one was typical long-time rain which caused extremely strong discharge response. The last one was a spring flood that occurred after a sudden snow melting. At the end a calibrated model was verified in flashflood that happened in July 2002.

1. ÚVOD

Hydrologické modelování srážko-odtokových procesů je v současné době dynamicky se rozvíjejícím odvětvím hydrologie a vodního hospodářství. Je to dáno především stále trvajícím rozvojem počítačové techniky a informačních technologií, který dal nové možnosti k uspokojení odvěké potřeby společnosti využívat vodu jako zdroj své obživy a zároveň vyvíjet účinnou ochranu před jejími negativními vlivy.

Cílem této diplomové práce je podat základní informace o nejrůznějších přístupech k hydrologickému modelování, metodách uplatňující se při reprezentaci srážko-odtokového procesu a možnostech aplikace a dalšího vývoje tohoto odvětví hydrologie. K dosažení uvedeného cíle byl vybrán konkrétní srážko-odtokový model, s jehož pomocí byly simulovány odtokové poměry v povodí Černé vody v Krušných horách.

Diplomová práce je členěna do šesti hlavních částí. První je věnována charakteristice povodí Černé vody z fyzicko-geografického hlediska, přičemž největší důraz je kladen na ty geosféry, které mají pro modelování srážko-odtokového procesu největší význam. Mezi ně patří klima, odtokové poměry a také charakteristiky půd a půdního profilu. Krátké pasáže jsou věnovány také geologickým a geomorfologickým podmínkám a vegetačnímu pokryvu. Kapitola je doplněna přehlednými mapami a nezbytnými grafy.

Ve druhé části je uveden všeobecný úvod k hydrologickému modelování. Je provedeno krátké zhodnocení dostupné literatury, hlavní důraz je kladen na klasifikaci srážko-odtokových modelů podle doporučení WMO (World Meteorological Organisation). Z tohoto pohledu se modely dělí na stochastické (s pravděpodobnostní složkou) a deterministické, které se dále rozdělují do skupin fyzikálně založených modelů (white-box), modelů koncepčních (gray-box) a tzv. black-box modelů. Existují však i další dělení podle různých hledisek.

Třetí kapitola je věnována charakteristice koncepčního modelu NASIM, který byl použit pro simulaci odtokových poměrů povodí Černé vody. Jsou zde rozebrány jednotlivé komponenty modelu, které jsou použity pro reprezentaci srážko-odtokového procesu. V těchto komponentách probíhají procesy intercepce, infiltrace, perkolace a odtok (nejprve v podobě povrchového a podpovrchového, později prezentovaný jako postup vody v korytě). Pro výpočet uvedených procesů se používají různé metodiky (často pojmenovány po svém autorovi), které jsou v kapitole stručně a snad srozumitelně vysvětleny.

Zpracování vstupních datových podkladů je náplní další části. Data jsou rozdělena na stavové veličiny a časové řady. Je charakterizován postup zpracování jednotlivých podkladů, které byly buď poskytnuty jejich správci, nebo získány vlastním terénním průzkumem. Důležitou podkapitolu tvoří potenciální chyby při sběru a práci s daty, ze kterých mohou vycházet možné nejistoty při aplikaci modelu.

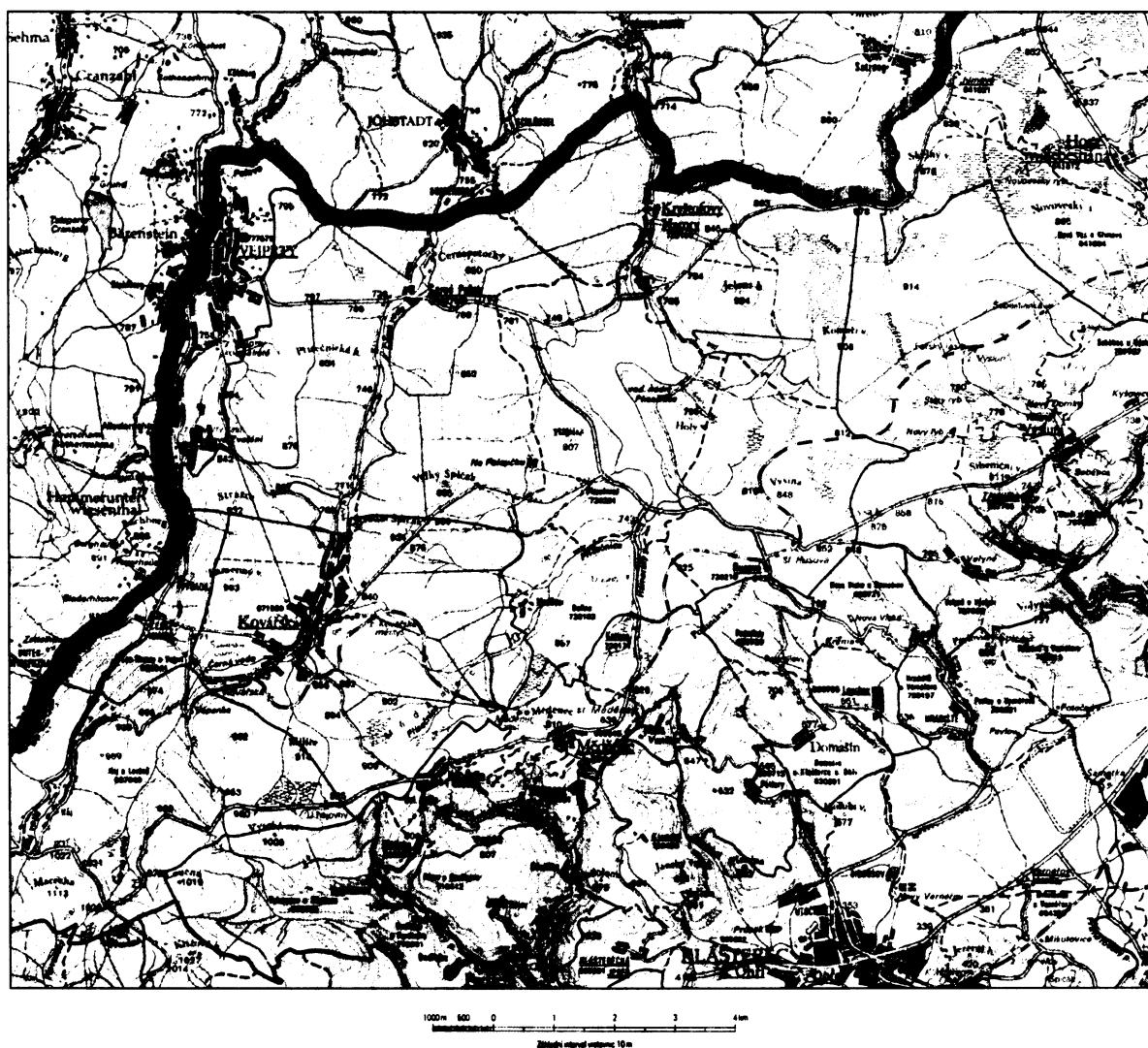
Samotným průběhem a výsledky modelování se zabývá sedmá kapitola. Nejprve je charakterizován postup sestavení projektu konkrétní simulace, jakýsi algoritmus řešení daného hydrologického problému. Důležitým krokem je kalibrace, tedy určité přizpůsobení modelu daným podmínkám. Ta byla provedena na třech událostech náhlého zvýšení průtoku, a to v červnu 1996 (letní z přívalových srážek), červenci 1996 (letní z regionálních dešťů) a březnu 1999 (zimní následkem tání sněhu), přičemž jako vstupní podmínky byly zadány výsledky z kontinuální simulace 1995-2002. Správnost nakalibrovaného modelu byla ověřena (verifikována) na povodni z července roku 2002.

Poslední kapitola je věnována diskuzi, jejímž cílem je snaha identifikovat možné nejistoty a problémy spojené se simulací určité události. Největší nejistota panuje v interpretaci datových podkladů, zadání počátečních podmínek a následné kalibraci modelu. Diskuze se neomezuje jen na charakteristiku potíží vznikajících při konkrétním použití modelu, ale snaží se také postihnout problémy a nejistoty modelovacích technik v obecnější rovině.

2. CHARAKTERISTIKA POVODÍ ČERNÉ VODY

2.1 GEOGRAFICKÁ POLOHA

Povodí Černé vody se nachází ve střední části Krušných hor, východně od nejvyšší hory Klínovce (1244 m n. m.). K závěrovému profilu v obci Černý Potok (50°29'23" s.š, 13°04'45 v.d) zaujímá plochu 31,4 km². Povodí je protáhlé, s délkou 12 km a šířkou v průměru 3 km, orientované od JJZ na SSV. Krátce pod Černým potokem opouští Českou republiku a jako říčka Schwarzwasser ústí do Preßnitz (Přísečnice), která je pravým přítokem Zschopau. Polohu zájmového území vystihuje mapa na obr. 2-1 a nechybí ani trojrozměrný model povodí (obr. 2-2).

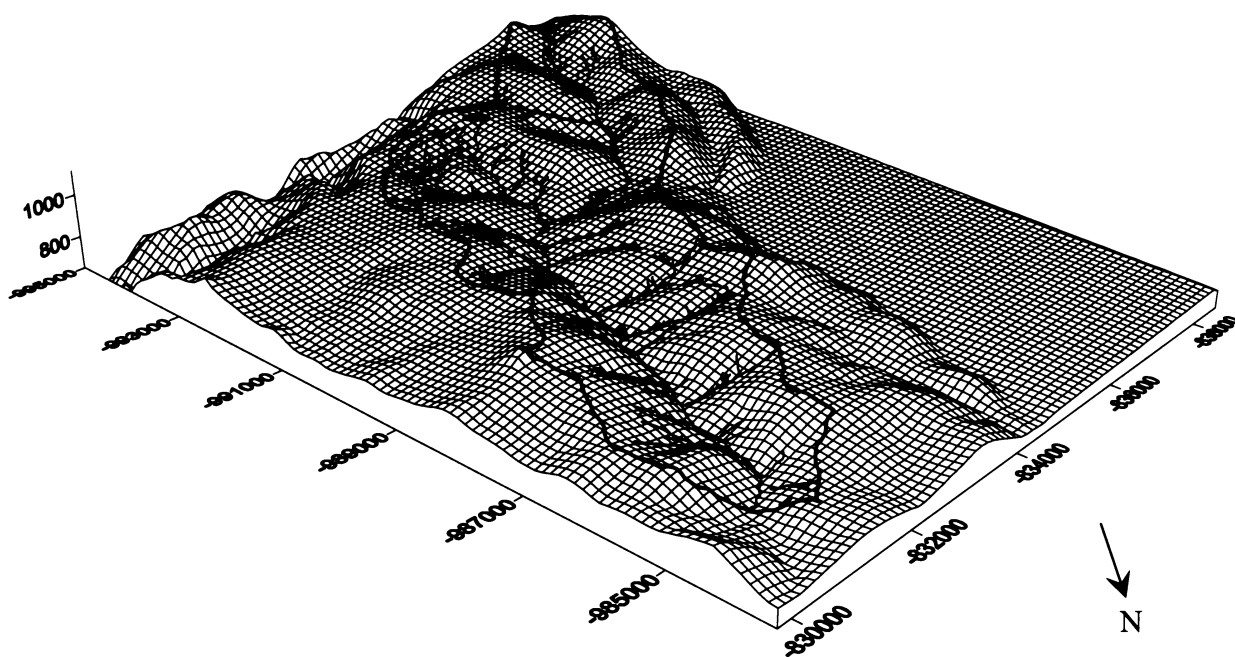


*Obr. 2-1: Mapa povodí Černé vody
(Zdroj: ZM 1:50 000, ČÚZK)*

Nejvyšším bodem povodí Černé vody je Macecha (1113 m), nejnižším limnigrafická stanice Černý potok (foto v příloze 6) geodeticky zaměřená ve výšce 715,03 m n.m (nadmořská výška nuly vodočtu). Dalšími významnými vrcholy jsou Meluzína (1094 m), Loučná (1019 m), Velký Špičák (965 m) nebo Přísečnická hora (854 m). Průměrná nadmořská výška povodí je 884,2 m n.m.

Pramen Černé vody se nachází pod sedlem mezi Meluzínou a Loučnou ve výšce 1045 m n.m. Délka hlavního toku od pramene po vodočet v Černém potoce je 13,6 km.

Administrativně spadá území do Karlovarského a Ústeckého kraje a zasahuje do katastru obcí Kryštofovy Hamry, Kovářská a Háj u Loučné.



*Obr. 2-2: Trojrozměrné schéma povodí Černé vody
(převýšeno 3x)*

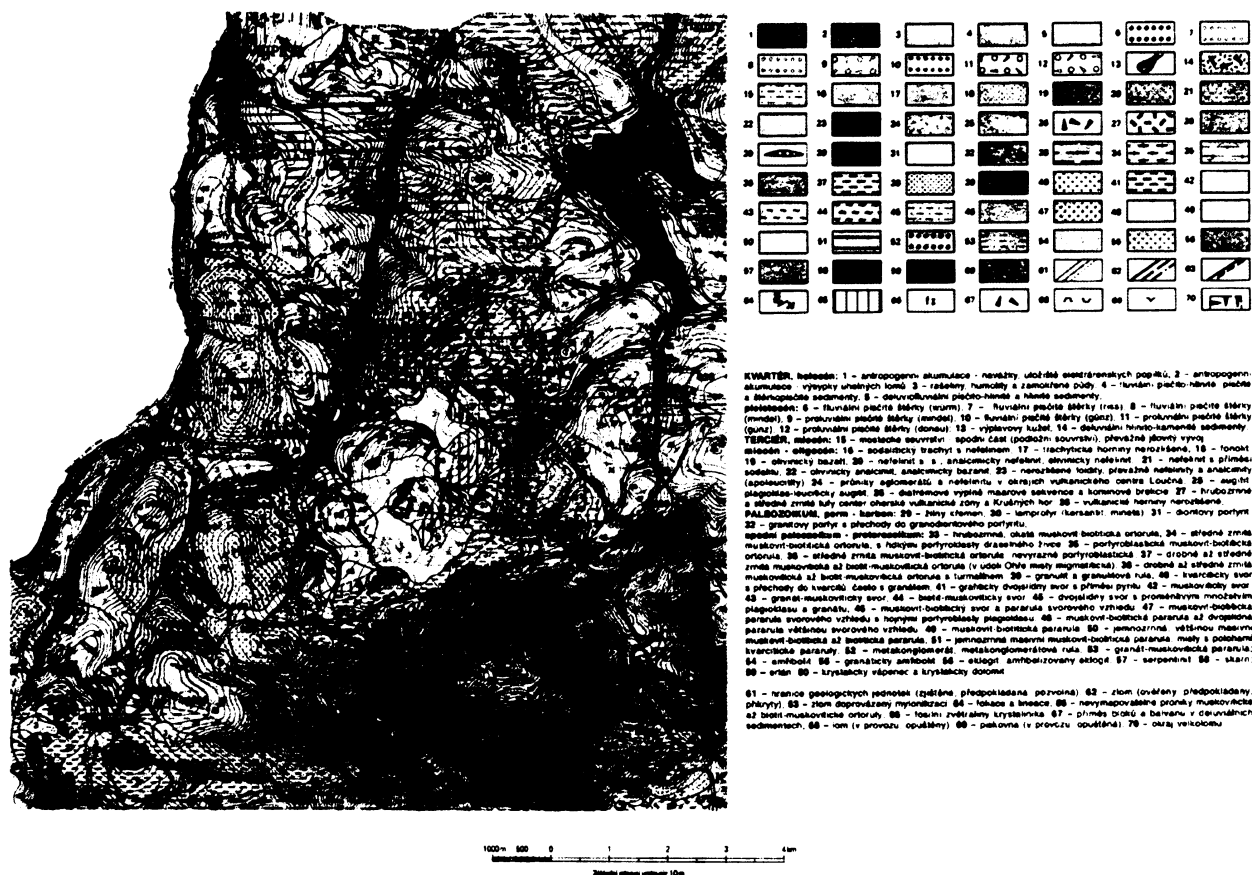
2.2 GEOLOGIE

2.2.1 Obecná geologická charakteristika Krušných hor

Krušné hory tvoří spolu se Smrčínami složité antiklinorní pásmo, které je tvořeno převážně krystalickými břidlicemi a granitoidy. Geologicky náleží k oblasti Sasko-durynské nazývané též saxothuringikum. Na jihu je krušnohorská soustava omezena krušnohorským zlomem, i když horniny této jednotky dosahují místy i na jih od něj pod pánevní sedimenty až k litoměřickému zlomu (ŠKVOR, 1975). Krušnohorské krystalinikum pokračuje také na severozápad do Saska, kde se později noří pod mladší sedimentární útvary. Osa antiklinoria se sklání k ZJZ.

Vznik celého pásma se datuje do období kadomské (též assytské)¹ orogeneze v prostoru prekambriických (algonkických) nebo i starších hornin. Pozdější variské vrásnění stmelilo starší krystalinikum s epizonálními metamorfity (sedimenty kambria až siluru) (SVOBODA et al., 1964). V posledních stádiích orogeneze pronikají do této varisko-assytské stavby mohutné intruze granitoidů krušnohorského plutonu (ZOUBEK, 1963).

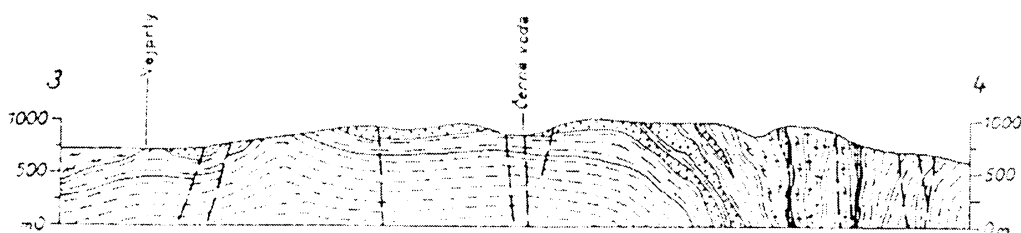
V druhohorách a ve starším terciéru dochází na většině území Krušných hor k výzdvihům. Cenomanská mořská transgrese zasáhla pouze nejvýchodnější část oblasti. Větší význam pro vývoj Krušných hor mělo až období třetihorního vulkanismu. Nejvíce vulkanických těles proniká ve střední části Krušných hor, v oblasti Jáchymova a Loučné (SVOBODA, 1964). Celé pásmo získalo dnešní podobu ve svrchním miocénu a v pliocénu při pohybech na podkrušnohorském zlomu (pro celý Český masív známo jako saxonská tektogeneze). V kvartéru se dále utváří reliéf vlivem eroze a také dochází k akumulaci rašelinišť. Na obr. 2-3 je uvedena geologická mapa zájmového území.



Obr. 2-3: Geologická mapa povodí Černé vody a okolí (zdroj: Geologická mapa 1:50 000, ČGS)

Zajímavý je pohled na příčný severo-jížní geologický řez, kde je jasně patrný ohyb těles ze zarovnané oblasti na severu směrem ke krušnohorskému zlomu na jihu (obr. 2-4).

¹ kadomský – označení pro pekambriický orogenetický cyklus i jeho závěrečné vrásnění. Datuje se na rozhraní prakambrium – kambrium, tedy asi 570 mil. let BP (PETRÁNEK, 1993).



Obr. 2-4: Severo-jížní geologický řez zájmovým územím

(Zdroj: Škvor, 1975)

2.2.2 Modelové povodí Černé vody a okolí

Zájmová oblast povodí Černé vody a jejího širšího okolí náleží ke střední nejvyšší části Krušných hor. Je budována sérií svorových rul až pararul s metakonglomeráty. Různé druhy ortorul tvoří několik velkých a řadu menších deskovitě omezených těles, které určují celkový geologický ráz oblasti. Z příměsí jsou charakteristické různé vložky skarnů² s magnetitem, známé z oblasti mezi Vejpřty, Loučnou a Kláštercem nad Ohří. V povodí se také nachází čočky karbonátových hornin, zejména krystalických vápenců a dolomitů. Jde převážně o oblast Vápenky a Vápenného vrchu v jižní části povodí Černé vody, kde je několik karbonátových poloh. Největší z nich byly až 30 m mocné. Většina těchto čoček byla ale počátkem 20. století úplně vytěžena (ŠKVOR, 1975). Další oblasti výskytu krystalického vápence jsou známy z okolí Vykmánova a Rájova asi 5 km JV od obce Kovářská. Z geologického hlediska jsou významná také tělesa různých druhů amfibolitů. V řešeném povodí mají největší zastoupení mezi Meluzínou (1094 m) a Křížovým vrchem (1027 m).

2.2.3 Hydrogeologický přehled

Hydrogeologické poměry Krušných hor jsou závislé jednak na jejich morfologii a jednak na petrografické charakteristice hornin. Celý region náleží ke krušnohorské zřidelní oblasti, která je charakteristická vývěry juvenilního CO₂. Díky tomu je tato oblast dobře prozkoumána.

Charakteristická morfologie zlomového pásma zapříčiňuje oběh podzemní vody převážně vadózního původu směrem k okrajovým zlomům do pánví. Poměrně mělký a rychlý oběh vody v puklinách je důvodem její malé mineralizace. Nejlepší zvodnění je v žulách (spíše ve východní části Krušných hor), špatný oběh puklinových vod mají naopak horniny metamorfované, které mají v povodí Černé vody největší zastoupení (ZOUBEK, ŠKVOR et al., 1963). Plošně nerozsáhlý, ale pro režim nezanedbatelný, je výskyt podzemní vody v puklinách karbonátových čoček, například v okolí Vápenky jižně od obce Kovářská (viz. výše). Výrony podzemních vod jsou vzhledem ke

² skarn – kontaktně přeměněné nečisté vápence nebo dolomity obohacené Si, Al, Fe a dalšími prvky, často bohaté i na růdní minerály jako magnetit nebo chalkopyrit (PETRÁNEK, 1993).

geomorfologii a tektonice soustředěny do četných hlubokých údolí a jsou převážně suťového charakteru.

Režim podzemní vody je vzhledem k jejímu původu výrazně ovlivňován srážkami. Vydátnost pramenů je tedy často rozkolísaná v závislosti na změně srážkových poměrů. V oblastech náhorních plošin mají na režim podzemní vody také velký význam četná rašeliniště. Ta jsou ale důležitá i pro charakteristiku odtoku vody povrchové.

2.3 GEOMORFOLOGIE

Modelové povodí Černé vody se nachází ve vrcholové části Krušných hor a zasahuje do podcelků Loučenské a z malé části i Klínovecké hornatiny, konkrétně do okrsků hornatin Přísečnické a Jáchymovské (CZUDEK, 1972). Má charakter slabě zvlněné pahorkatiny, která se směrem k severu svažuje. Hlavní údolí toku je zlomově podmíněné s průběhem k SSV. Nejvyšší vrcholy jsou většinou zaoblené, ale občas se na nich nacházejí skalní výchozy, které mnohdy mají svůj původ v třetihorním vulkanismu (Meluzína, Velký a Malý Špičák).

Obsáhlou charakteristiku o geomorfologii hřebenové oblasti Krušných hor podává například Král (1968). V této studii zmiňuje i problematiku paroviny a vyčleňuje několik denudačních úrovní, z nichž nejvyšší se nacházejí na hlavním rozvodí v okolí Klínovce a směrem k západu i k východu se stupňovitě snižují. Na těchto plošinách jsou četná vrchoviště, což lze dokumentovat i na půdní mapě (pro sledované území na obr. 2-5). Samotný Klínovec, Fichtelberg a ostatní nejvyšší vrcholy jsou tvary podmíněné geologickou strukturou.

Nejvýraznější vliv na současnou podobu Krušných hor mělo ale působení periglaciálních procesů v pleistocénu, při nichž docházelo k formování svahů, a to převážně mrazovým zvětráváním a soliflukcí. V povodí Černé vody je například dokumentován mohutný soliflukční proud na JZ od Kovářské, který pravděpodobně způsobil změnu odvodňování na SV do Kovářské, oproti původnímu směru do Polavy (KRÁL, 1968).

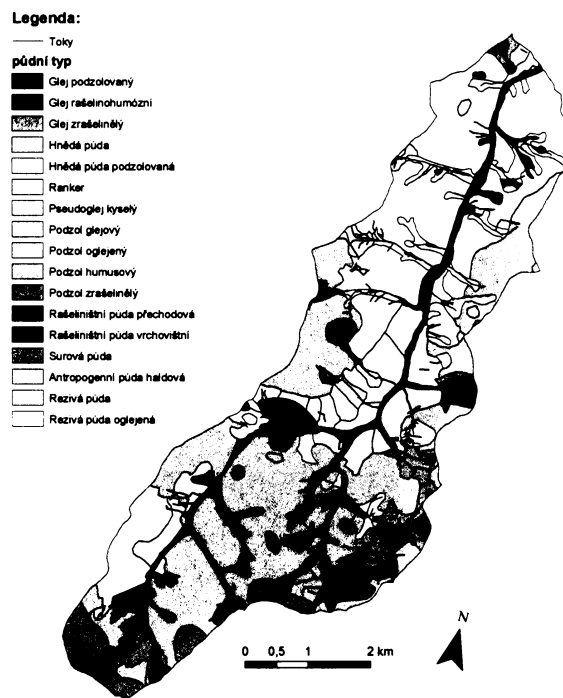
Pro hydrologické modelování má bezpochyby geomorfologie území nesporný význam. Jako vstupní data zde slouží například digitální model reliéfu nebo údaje o sklonitosti povodí a tvaru koryta. Mírně zvlněný ráz krajiny skýtá i možnosti uplatnění protipovodňových opatření netechnického rázu.

2.4 PŮDY

Vlastnosti půdního profilu, zvláště pak ty hydrologické, patří mezi nejvýznamnější faktory ovlivňující charakter odtokového režimu. Podle nehortonovské teorie povrchového odtoku je právě

svrchní (aerická) vrstva půdy důležitou transportní zónou, ve které probíhá transformace srážek ve výsledný průtok v recipientu.

Sledované povodí se nachází v nadmořských výškách mezi 700 a 1100 metrů nad mořskou hladinou a tomu odpovídá i zastoupení hlavních půdních typů (viz. mapa na obr. 2-5). Nejrozšířenějším typem ve spodní části povodí jsou kambisoly různých subtypů (slabě a silně kyselé, oglejené nebo humózní) a na různých substrátech (příloha 7). Ve vyšších nadmořských výškách jsou nejčastěji zastoupeny podzoly. Na plochých rozvodích vznikají dobré podmínky pro vývoj rašelinných a glejových půd. Ty mají bezesporu svůj vliv na povrchový i hypodermický odtok. Z půd již méně zastoupených stojí za pozornost rankery nebo surové půdy a také ty půdy, jejichž mateční horninu tvoří třetihorní vulkanity (vrcholy Meluzíny nebo Velkého a Malého Špičáku).



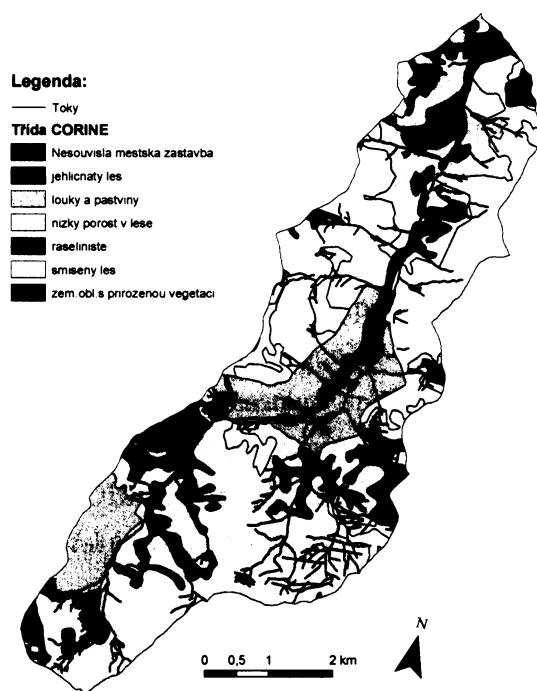
Obr. 2-5: Rozšíření půdních typů v povodí Černé vody
(digitalizováno podle pedologické mapy 1:50 000, ČGS)

Pro výpočet transformační funkce povodí při srážko-odtokovém procesu mají význam především hydrologické charakteristiky jednotlivých půdních druhů, jako jsou například polní kapacita, koeficient nasycené hydraulické vodivosti nebo retenční schopnost půdy. Proto model NASIM vyžaduje zadání těchto charakteristik pro každou vrstvu konkrétního půdního typu. Z nich poté pomocí konceptu lineární nebo nelineární kaskády počítá výsledný odtok (HYDROTEC, 2003A). Více bude o této problematice pojednáno v kapitole 4.

2.5 VEGETAČNÍ POKRYV

Jako vstupní stavová veličina do koncepčního modelu mají informace o vegetačním pokryvu nesporný význam. Zásadním způsobem ovlivňuje rychlost povrchového odtoku a rychlost infiltrace. Svoji roli hraje také intercepce.

Povodí Černé vody je od 70. let stejně jako ostatní vrcholové partie střední a východní části Krušných hor postiženo rozsáhlým poškozením a zničením lesních porostů díky vysoké koncentraci škodlivých látek v atmosféře (SO_2 , CO_2 , NO_x , atd.). Tato imisní kalamita měla za následek rozsáhlé odlesnění, které mělo samozřejmě svoji odezvu i ve změně odtokových poměrů (urychlení odtoku, zvýšená eroze). I když se během 90. let obsah škodlivých látek podstatně snížil, následky zůstanou ještě dlouhou dobu zřejmé.



Obr. 2-6: Mapa vegetačního pokryvu
(Zdroj dat: CORINE – Landcover)

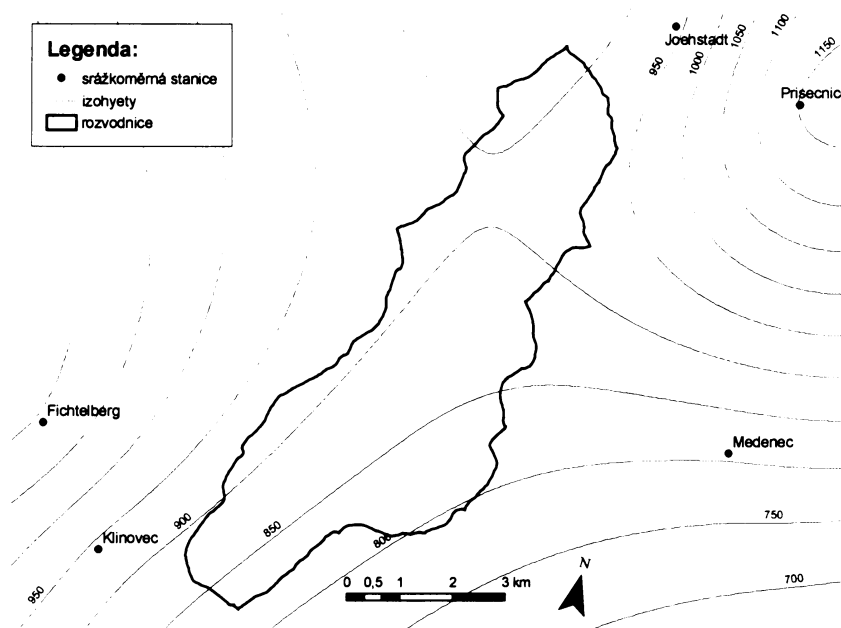
Pro hodnocení krajinného pokryvu jsou využita data z databáze CORINE – Landcover, která byla vytvořena analýzou satelitních snímků (obr. 2-6). Získané informace sloužily především pro vymezení elementárních odtokových ploch („Elementarfläche“) a také pro určení transformační (odezvové) funkce povodí („Zeitflächenfunktion“).

2.6 KLIMA

Střední část Krušných hor, do které spadá i povodí Černé vody, náleží převážně do okrsku CH6, tedy chladného a vlhkého s dlouhotrvající zimou (QUITT, 1971). Nejvyšších polohy v okolí Klínovce nebo Meluzíny spadají do okrsku CH4. Nejvýraznější vliv na podnebí má z regionálního hlediska stavba celého území. Hřeben Krušných hor má průběh od severovýchodu k jihozápadu a vytváří tímto jakési nárazníkové pásmo pro jednotlivé frontální systémy postupující ve střední Evropě převážně od severozápadu. Orografie pásma, která je charakteristická postupným zvyšováním nadmořské výšky v Německu až do peneplenizovaných hřebenových oblastí v Česku a poté prudkým poklesem do údolí Ohře ke Krušnohorskému zlomu, vytváří vhodné podmínky pro uplatnění návětrného (též orografického) efektu, a tím také zvýšení srážkových úhrnů na německé straně horského pásma. Na jihovýchod od Krušných hor se naopak vytváří srážkový stín. Frontální systémy, které postupují od severozápadu, nemají na své cestě od Atlantského oceánu výraznější překážky. Nejenom tyto faktory mají za následek vysoké srážky a rychlý odtok a bývají jednou z příčin vzniku velkých povodní. Ta (zatím) poslední nastala v srpnu 2002, kdy stanice Cínovec zaznamenala v tomto období vůbec nejvyšší úhrn srážek (406 mm od 11.8 do 13.8).

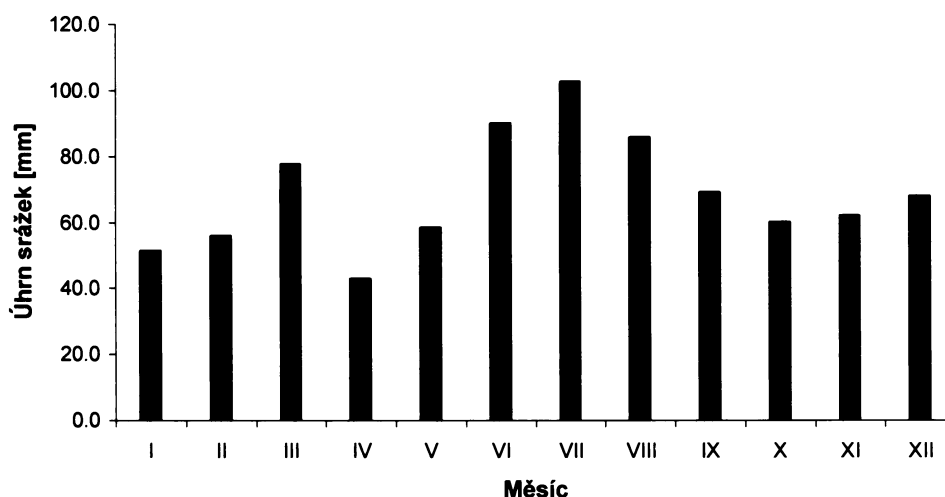
2.6.1 Srážky

Jak již bylo uvedeno, je celkový úhrn, časové i prostorové rozložení srážek silně závislé na geomorfologii území. Povodí Černé vody je ukloněno k severozápadu a právě odtud přichází většina frontálních systémů přinášející významné srážky. Velký význam pro celkový úhrn i rozložení má orografický efekt, který vlivem nuceného výstupu vzduchu způsobuje zesílení srážek na návětrných stranách hor (SOBÍŠEK et al., 1993). Tento fakt je zřejmý i z obrázku 2-7 (vezmeme-li v úvahu, že nadmořská výška se v povodí zvyšuje od severu k jihu).



Obr. 2-7: Izohyety ročního průměrného úhrnu srážek ve střední části Krušných hor
(Interpolace prováděna metodou spline za období 1991-2003, zdroj dat: ČHMÚ, DWD, Povodí Ohře)

Právě skutečnost, že oblasti s nejvyšším úhrnem srážek (Jöhstadt, Přisečnice) nejsou totožné s oblastmi kolem hlavního hřebene (zde se nacházejí stanice Měděnec a Klínovec), je podle mého názoru důsledek orografického efektu. Pouze stanice Fichtelberg (1213 m n. m.) vykazuje vysoký srážkový úhrn, ta ale leží na návětrné straně jižně od hlavního hřebene. V následujícím grafu je naznačeno měsíční rozložení srážek na stanici Měděnec.



Obr. 2-8: Průměrné měsíční úhrny srážek na stanici Měděnec
(Za období 1991-2002, zdroj dat: ČHMÚ)

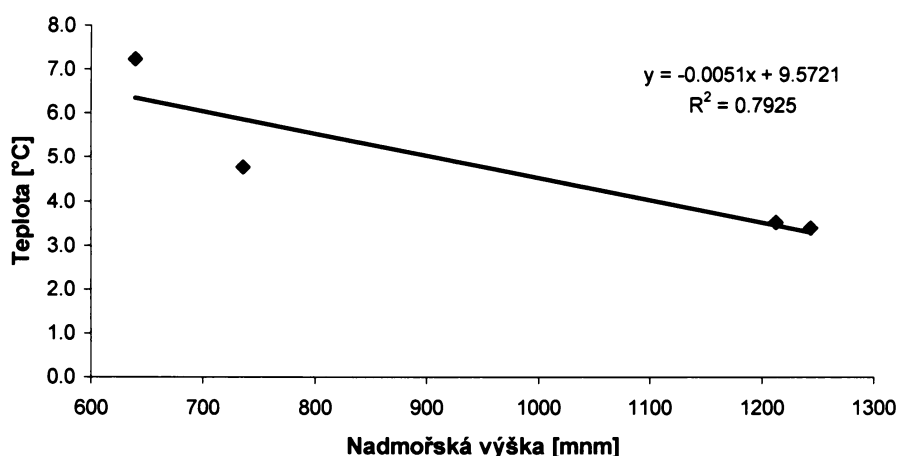
Z grafu vyplývá, že maximum srážek spadne v letním období (v červenci 102,7 mm). Podíváme-li se na charakter letních srážkových událostí, zjistíme, že se většinou jedná o přivalové deště krátkého trvání. Z událostí od roku 1995 (podrobnější data) je to nejvýrazněji vidět 10.7.2002, kdy na srážkoměrné stanici Měděnec spadlo za dvě hodiny 50,4 litrů na m² (průměr na celém povodí byl 36,7 l/m²). Jen v několika případech ale vyvolají tyto extrémní srážky výraznější odtokovou odezvu. Například 22.7.1995 byl na Fichtelbergu naměřen srážkový úhrn 70,4 mm (průměr na povodí 40,1 mm), kulminační průtok na vodočtu Černý potok byl ale tento den pouze 0,206 m³/s, což nedosahuje ani hodnoty dlouhodobého průtoku ($Q_a = 0,385 \text{ m}^3/\text{s}$). Na tomto příkladu lze dokumentovat silnou závislost velikosti a tvaru odtokové křivky na počátečních podmínkách, především na nasycení půdního profilu. Stejně tak existuje velká variabilita v prostorové distribuci srážek. Příkladem je opět událost z 10.7.2002, kdy na Měděnci a v Jöhstadtu spadlo kolem 50 mm vody (50,4 resp. 49,8 mm), na Fichtelbergu naproti tomu pouze 18,9 mm a na Klínovci 14,8 mm. Maximální denní úhrny srážek z vybraných stanic jsou zobrazeny v následující tabulce.

	Měděnec	Klínovec	Jöhstadt	Fichtelberg
22.7.1995	49,6	36,2	33,4	70,4
28.7.1995	46,6	20,8	51,8	19,2
31.8.1995	39,8	43,8	44,5	62,9
1.9.1995	36,8	39,2	50,7	51,0
12.6.1996	31,8	18,6	54,1	25,9
8.7.1996	43,3	52,7	55,5	35,8
7.7.2001	32,1	58,4	38,0	57,4
10.7.2002	50,4	14,8	49,8	18,9
11.8.2002	44,7	45,5	36,5	60,0
12.8.2002	89,8	103,6	112,1	137,8

*Tab. 2-1: Maximální denní srážkové úhrny na vybraných stanicích v mm
(Data z let 1995 – 2002, zdroj ČHMÚ, DWD)*

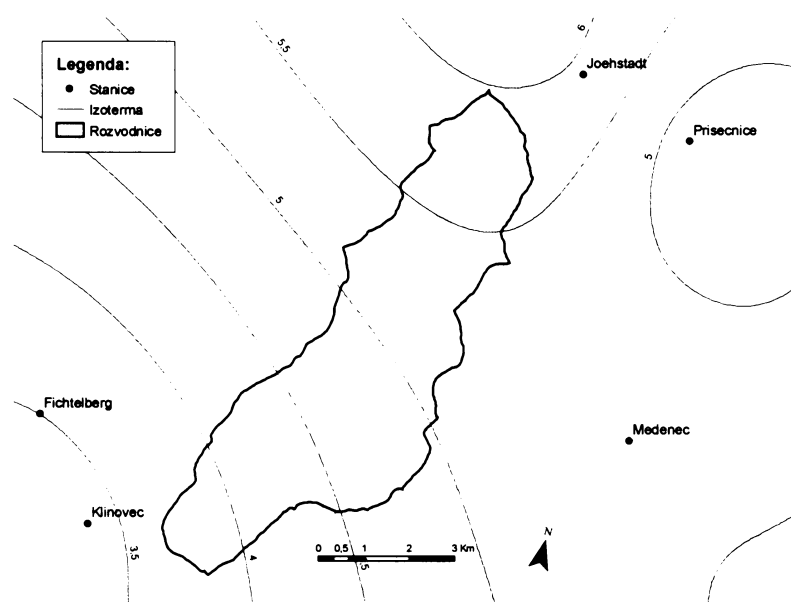
2.6.2 Teploty

Oproti srážkám vykazují teploty mnohem vyšší závislost na nadmořské výšce (obr. 2-9). Průměrná roční teplota změřená na stanici Přísečnice (735,9 m n. m.) dosahuje hodnoty 5,0 °C, zatímco na stanici Fichtelberg (1213,0 m n. m.) je to 3,7 °C (v obou případech za období 1991-2003). Tato závislost ale není vždy jednoznačná. V zimě se často vytváří výšková tlaková výše, kdy do vyšších hladin atmosféry proudí teplý vzduch. Při zemi se tvoří nízká oblačnost, v níž teplota s výškou klesá, od její horní hranice dochází ale k teplotní inverzi.



Obr. 2-9: Závislost průměrné roční teploty na nadmořské výšce

Rozložení průměrných ročních teplot na povodí a v jeho těsném okolí znázorňuje mapa na obr. 2-10. Nejchladnějším měsícem je leden, na stanici Přísečnice (735,9 m n. m.) je průměrná teplota tohoto měsíce $-3,5\text{ °C}$ (1955 – 2002). Nejtepleji je naopak v srpnu, kdy průměrná teplota na téže stanici dosahuje 13 °C .



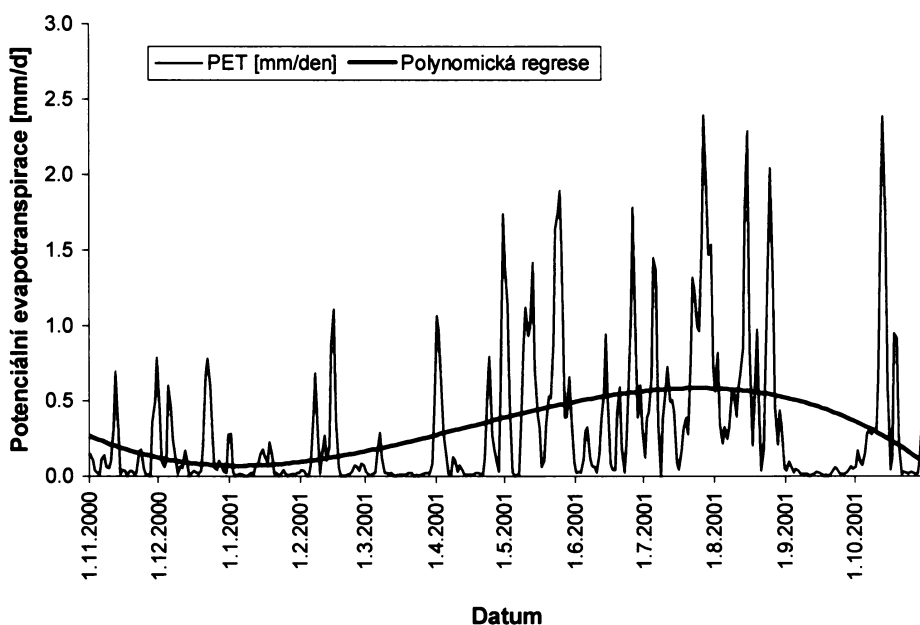
Obr. 2-10: Mapa izoliní průměrných ročních teplot vzduchu na povodí Černé vody
(Interpolace prováděna metodou spline za období 1995-2001, zdroj dat: ČHMÚ, DWD, Povodí Ohře)

2.6.3 Evapotranspirace

Evapotranspirace je další z meteorologických faktorů, který hraje významnou roli při transformaci srážky na výsledný odtok (průtok v závěrovém profilu). Srážky, odtok,

evapotranspirace a změna zásob vody v povodí (poslední dvě položky se souhrnně označují jako ztráty) spolu vytváří bilanční rovnici oběhu vody v přírodě.

Evapotranspiraci tvoří dvě složky – evaporace (fyzikální výpar z abiotických složek geosféry) a transpirace (spotřeba vody vegetací). Získat data o aktuálním výparu je často velmi složité a náročné. Proto se jako vstup do hydrologických modelů většinou používá tzv. potenciální evapotranspirace (PET). Ta vyjadřuje maximální možný výpar z volné vodní hladiny při aktuálních meteorologických podmínkách (teplotě, tlaku, vlhkosti vzduchu, síle větru, množství globálního záření atd.). PET je možné spočítat na základě mnoha přístupů, nejrozšířenější je asi Penmanova metoda (je ale náročná na vstupní data). U modelu NASIM probíhá výpočet podle Haudeho. Více bude o této problematice pojednáno v kapitole 4.



Obr. 2-11: Potenciální evapotranspirace (podle Haudeho) za hydr. rok 2001 na stanici Fichtelberg v mm/d
(Zdroj dat: DWD)

V předchozím grafu je uvedena potenciální evapotranspirace na Fichtelbergu v mm/d za hydrologický rok 2001, spočítaná metodou podle Haudeho. Proměnné tvoří jen teplota, relativní vlhkost a tzv. Haudeho faktor. Výpočet probíhá v programu TimeView firmy Hydrotec a výsledný textový soubor slouží jako vstup do samotného modelu. Celkový objem potenciálního výparu v roce 2001 (116,7 mm) tvoří více než osminu celkových srážek (950,7 mm). Zbytek se podílel na povrchovém či podpovrchovém odtoku. V zimním období je PET prakticky nulová. Teplota a vlhkost vzduchu jsou podle všeho nejvýraznější klimatické faktory, které potenciální evapotranspiraci ovlivňují.

2.6.4 Vítr

Vítr není v modelu NASIM zásadním faktorem ovlivňující odtok. Svoji roli vstupní veličiny hraje pouze v případě, že je použit pro výpočet potenciální evapotranspirace (např. podle Penmana), nebo je zahrnut ve sněhové komponentě. Data o rychlosti, popřípadě směru větru jsou ale hůře dostupná (jen na klimatologických stanicích) a nebývají tedy standardním vstupem do hydrologického modelu.

2.6.5 Sníh

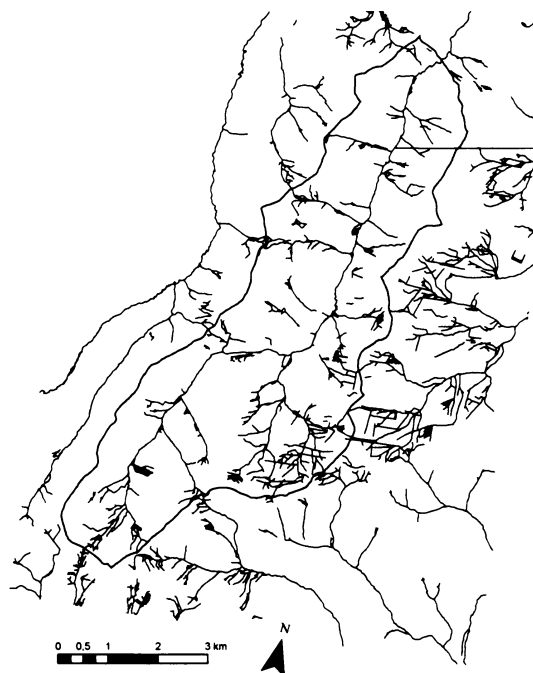
Sněhová komponenta je důležitou součástí každého modelu. Náhlé tání sněhových zásob (často společně se snížením průtočnosti koryta vlivem ledových nápěchů) je z dlouhodobého hlediska jednou z nejčastějších příčin vzniku povodní v našich podmínkách. Tomu odpovídá i graf uvedený na obrázku 2-13. K tomu, aby takové povodně vznikly, je nutná souhra několika faktorů jako jsou náhlé zvýšení teploty a dešťové srážky v celém vertikálním profilu atmosféry od nížin až po horské oblasti. Také vítr sehrává významnou roli v podobě rychlejšího výparu. V centrální části Krušných hor je maximum sněhové pokrývky převážně v březnu, poté dochází k jejímu tání. V závislosti na podmínkách dochází ke zvýšenému odtoku nebo ke vzniku povodní (např. v letech 1981, 1999, 2000 a 2005).

Problematika tání sněhové pokrývky je složitá a často náročná na vstupní data, která nejsou vždy k dispozici. Více o tom bude pojednáno v kap. 4.

2.7 ODTOKOVÉ POMĚRY

2.7.1 Obecná charakteristika odtoku

Černá voda pramení na úpatí hory Meluzína ve výšce 1045 m n. m. a je součástí říčního systému toku Mulde, která je levostranným přítokem Labe. Délka toku na českém území činí asi 15,5 km a po soutok s říčkou Preßnitz (Přísečnice) má délku zhruba 20 km. Schéma říční sítě vystihuje obr. 2-12. Ještě na českém území byla v obci Černý Potok zřízena limnigrafická stanice (nadmořská výška nuly vodočtu 715,03 m n. m.). Plocha povodí vztažená k této stanici je 31,41 km² a délka toku 13,6 km. Průtoky se zde zaznamenávají od roku 1965.



Obr. 2-12: Schéma říční sítě s vyznačením hranice povodí
(Zdroj dat: ZABAGED)

Dlouhodobý průměrný průtok je $0,385 \text{ m}^3/\text{s}$, což odpovídá odtokové výšce 387 mm a specifickému odtoku $12,26 \text{ l/s/km}^2$. Maximální průměrný denní průtok byl naměřen dne 12.8.2002 – $16 \text{ m}^3/\text{s}$, kulminační průtok povodňové vlny dosáhl ale tentýž den hodnoty $36 \text{ m}^3/\text{s}$. Minimální hodnota průtoku $0,028 \text{ m}^3/\text{s}$ (28 l/s) byla naměřena v období od 18.7.1977 do 24.7.1977.

2.7.2 Povodňové události

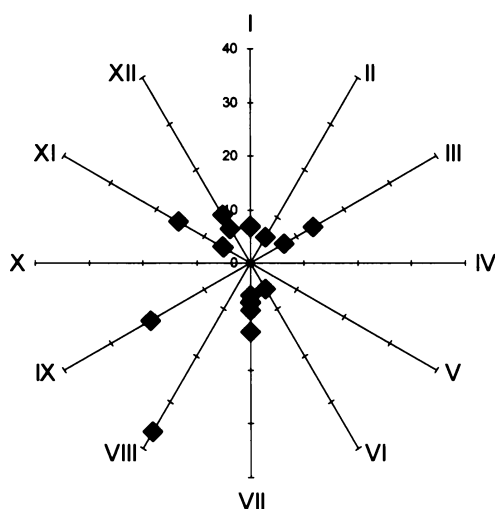
Povodní rozumíme takovou hydrologickou situaci, při níž množství protékající vody z různých důvodů překročí kapacitu koryta (MATĚJÍČEK, HLADNÝ, 1999). To se děje buď zvýšením průtoku a nebo zmenšením průtočnosti koryta (např. ledovou zácpou nebo sesuvem). Vodní tok se začne rozlévat a zaplavuje přilehlá území. Je potřeba si uvědomit, že povodeň je jev v přírodě normální a zcela běžný. Škody jsou způsobeny pouze člověku, a to ve chvíli, kdy se voda dostane do střetu s jeho činností.

Povodně mohou být způsobeny nejrůznějšími příčinami. Matějíček a Hladný (1999) rozlišují následující typy povodní:

- letní typ povodně následkem
 - krátkodobých přivalových dešťů
 - regionálních dešťů
- zimní a jarní typ povodně následkem

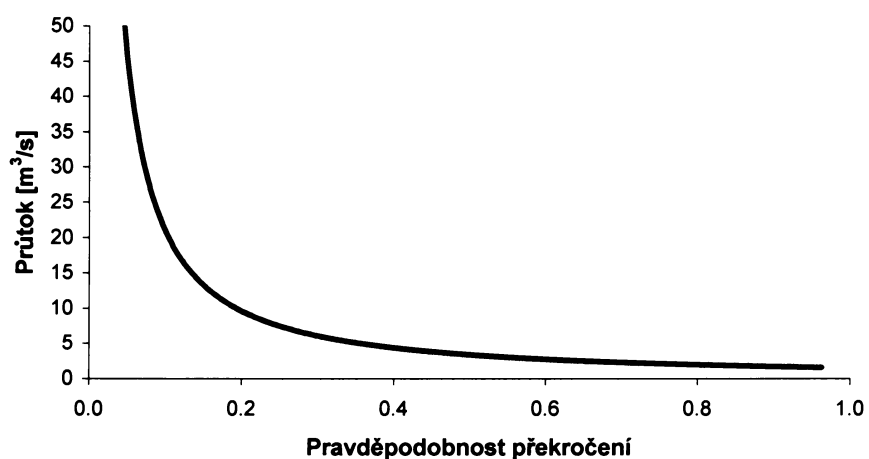
- tání sněhu
- vytváření a pohybu ledu v toku
- povodně z jiných specifických příčin

Od roku 1975, kdy jsou k dispozici kulminační průtoky, bylo na limnigrafu v Černém potoce zaznamenáno 19 případů, kdy překročil kulminační průtok hodnotu $5 \text{ m}^3/\text{s}$ (obr. 2-13). Je potřeba si ale uvědomit, že do databáze byl vždy zaznamenáván jen nejvyšší průtok v měsíci. Případy, kdy došlo v jednom měsíci ke dvěma povodním, nejsou zohledněny. Z těchto událostí jich 8 proběhlo v letních měsících (duben až říjen) a 11 v zimních (listopad až březen). To ale nemusí nutně znamenat, že všechny zimní události byly způsobeny táním sněhu (doprovázené většinou silnými dešťovými srážkami). Ve třech případech se například jedná o události z listopadu, kdy nemusela být vodní hodnota sněhu ještě vysoká a povodně mohly být způsobeny výhradně dešťovými srážkami (za přispění dalších faktorů, například zmrzlou půdou).



Obr. 2-13: Velikost kulm. průtoků a sezonalita výskytu povodní na stanici Černý potok v letech 1975 – 2002
(Zdroj dat: ČHMÚ)

Důležitou charakteristikou velikosti povodně je její opakovatelnost, tedy hodnota, která poskytuje informaci o pravděpodobnosti překročení určitého jevu, v tomto případě průtoků. Pro její určení se využívá křivka překročení průtoků. Výsledná informace prezentovaná jako N-letost má význam v oblasti plánování vodohospodářských staveb a je také například důležitou součástí územních plánů správních subjektů (obcí, krajů). V případě jejího použití v srážko-odtokovém modelu se jedná vlastně o stochastickou složku daného modelu. Experimentální křivka překročení průtoků pro závěrový profil v Černém potoce je znázorněna na obrázku 2-14.



Obr. 2-14: Experimentální křivka překročení ročních průtoků za období 1975-2002
(Zdroj dat: ČHMÚ)

Pro simulaci povodňových událostí (nebo událostí náhlého zvýšení průtoku, které podle výše zmíněné definice nemusí být vždy povodněmi) jsem vybíral ty, jejichž srážkové úhrny (případně ve spojení s táním sněhu) způsobili větší odtokovou odezvu (zvýšení průtoku). Hodnotil jsem letní i zimní události vybrané z let 1995 – 2002 (nejlepší dostupnost všech dat). Jejich podrobnější popis je uveden v kapitole 6, která se zabývá vlastními simulačními procesy a postupy.

3. KLASIFIKACE HYDROLOGICKÝCH MODELŮ

Matematická reprezentace srážko-odtokového procesu má dlouhou historii, ale teprve zhruba od 80. let minulého století se díky postupnému rozvoji počítačových technologií stává významným nástrojem hydrologů a vodohospodářů, ať už pro operativní předpověď nebo pro návrhové účely.

Matematický model srážko-odtokového procesu představuje zjednodušený kvantitativní vztah mezi vstupními a výstupními veličinami určitého hydrologického systému (DAŇHELKA et al., 2002). Ten je definován jako systém převážně fyzikálních procesů, působící na vstupní proměnné, jež pak transformuje ve výstupní veličiny. V matematickém vyjádření jde tedy o algoritmus řešení soustavy rovnic, které popisují strukturu a chování systému (CLARKE, 1973 In: FLEMING, 1979).

Na úvod je také vhodné definovat rozdíl mezi modelem a procedurou. Deterministický model je matematicky jednoznačně definovaný proces. Jedná se například o matematické vyjádření vztahu srážka-odtok na daném povodí. Příkladem může být jednotkový hydrogram. Naproti tomu je procedura (též metodika) souhrnem na sebe navazujících kroků (modelů nebo dalších programů). Proceduru tvoří například programové prostředky, sloužící ke sběru a transformaci dat, dále vlastní výpočetní postupy a v neposlední řadě i programy pro prezentaci výsledků (DAŇHELKA et al., 2002).

Obecnou i podrobnější charakteristikou hydrologických modelů, jejich klasifikací nebo možnostmi a omezeními využití se zabývají četné studie a publikace, u nás například Buchteleho (2002A, B), Daňhelky (2002), Kulhavého a Kováře (2000) nebo Řiřicové a Krejčího (2002). Ze zahraničních příspěvků je vhodné zmínit například publikaci Bevena (2001), Schumana (2000), Blöschchla a Graysona (2002) a mnoha dalších. Využitelné informace poskytují také obsáhlé publikace věnované hydrologii, například Baumgartner, Liebscher (1996), Dyck (1978) nebo Maidment (1993). Mnoho z těchto i dřívějších přístupů je zahrnuto v metodikách a doporučeních WMO (World Meteorological Organisation), například Becker, Serban (1990) nebo WMO (1983).

Hydrologické modely našly svoje uplatnění při řešení nejrůznějších problémů, které by se daly shrnout do tří kategorií:

1. operativní hydrologické předpovědi
2. návrhová a projekční činnost v oblasti vodního hospodářství
3. výzkumná činnost

V prvním případě se jedná o aplikaci modelu v operativní hydrologii, kdy vstupní data tvoří mimo stavové veličiny také okamžité údaje z automatických meteorologických stanic nebo radarů. Data jsou v tomto případě automaticky předávána modelu a prioritou je rychlost jejich zpracování a

převedení na krátkodobou předpověď vodního stavu či průtoku v určitém profilu. Tato výsledná informace může být doplněna o výstupy z modelů šíření povodňové vlny a určení záplavového území.

Ve druhém případě jde jednak o dlouhodobější řešení protipovodňové ochrany (např. stavba přehrad, poldrů, změna vegetačního pokryvu a další hydrotechnická či hydromeliorační opatření), ale také je použití hydrologických či hydraulických modelů užitečné při řešení nejrůznějších technických staveb od plavebních kanálů, čističek odpadních vod až po mosty.

Pod třetí kategorií využití hydrologického modelu se skrývají možnosti dalšího vývoje modelu, výzkum jednotlivých komponent srážko-odtokového procesu a jejich přesnější popis. Pro tyto účely jsou často zřizována tzv. experimentální povodí s nadstandardní sítí měřících stanic.

V neposlední řadě mohou výstupy z hydrologického modelu sloužit jako vstupní veličiny dalších modelů (například modelů šíření znečištění ve vodním prostředí).

Do dnešní doby byla vyvinuta celá řada modelů, které se od sebe odlišují různými přístupy k jednotlivým komponentám srážko-odtokového procesu nebo ke struktuře zkoumaného povodí často v důsledku toho, za jakým účelem a pro jakou oblast byl model vyvíjen. Postupem času se ukázaly podobnosti nebo naopak odlišnosti v jednotlivých pojetích, podle kterých se pak hydrologické modely začlenily do různých kategorií. Klasifikace by měla uživateli pomoci s výběrem vhodného modelu, který je použitelný pro řešení konkrétní problematiky. Zde uvedená klasifikace podle WMO (World Meteorological Organisation) vychází z několika principů (BECKER, SERBAN, 1990):

- účel aplikace modelu
- typ systému, který je simulován
- zohlednění hydrologického procesu, který je modelován
- princip příčiny a důsledku
- míra časové a prostorové diskretizace

3.1.1 Rozdělení dle účelu aplikace

Jak je již uvedeno výše, modely se podle tohoto principu dělí na ty, které se používají pro operativní předpovědi průtoků, pro návrhové a plánovací účely v oblasti vodního hospodářství a pro výzkumné potřeby.

3.1.2 Klasifikace z hlediska typu systému a hydrologického procesu

Podle typu systému lze modely dělit na elementární a komplexní. Přehled jednotlivých typů podle WMO je uveden v tabulce 3-1:

Číslo	Typ simulovaného systému	ID
1.	Elementární systém	
1.1	Hydrotop (elementární jednotka s konstantními charakteristikami)	HU
1.2	Méně až středně velké odtokové plochy	SA
1.3	Zvodnělé vrstvy	AQ
1.4	Říční síť	RR
1.5	Nádrže a jezera	RL
2.	Komplexní systémy	
2.1	Systém říčních sítí, nádrží a jezer	CS
2.2	Povodí nebo velké odtokové plochy	CB

Tab. 3-1: Typy hydrologických systémů
(Podle WMO in DAŇHELKA et al., 2002)

Přehled rozdělení modelů podle typu simulovaného procesu je uveden v tabulce 3-2.

Číslo	Hydrologické parametry a procesy	ID
1.	Vlhkost půdy, evapotranspirace	ES
2.	Podzemní voda, hladina, průtok	SG
3.	Průtok a vodní stav v korytě	
3.1	- s časovým krokem <1 den	QF
3.2	- s časovým krokem >1 den	QM
4.	Teplota vody, ledové podmínky a další proměnné	TW
5.	Splaveniny a související parametry	QS
6.	Kvalita vody	WQ

Tab. 3-2: Hydrologické procesy a související proměnné použité při klasifikaci modelů
(Podle WMO in DAŇHELKA et al., 2002)

3.1.3 Klasifikace podle stupně kauzality

Podle tohoto kritéria se modely dělí na deterministické a stochastické. Kauzalita je vyjádřena vztahem příčina – důsledek.

3.1.3.1 Deterministické modely

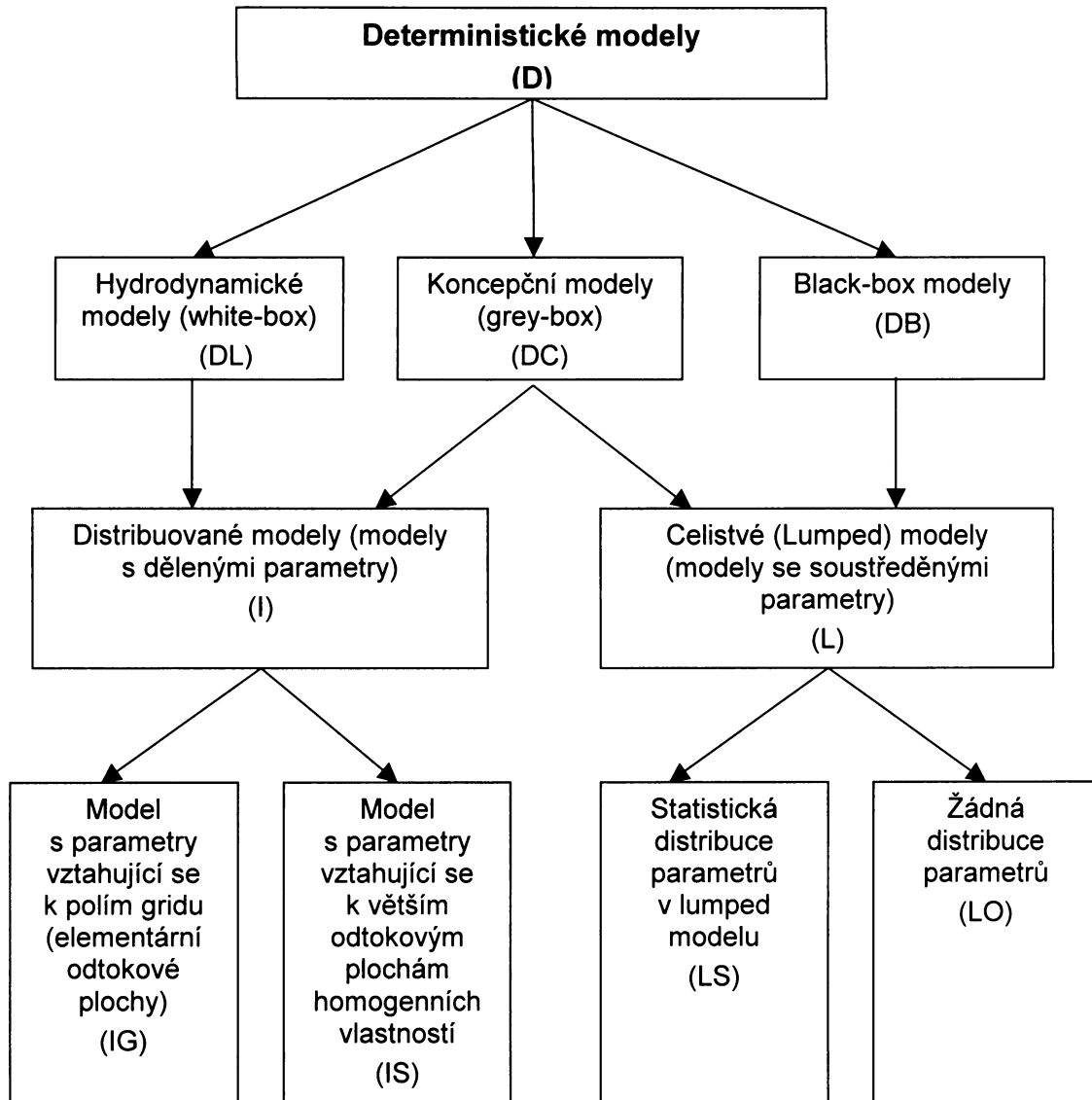
Modely této kategorie jsou popsány vztahem závislých proměnných (výstupní veličiny) a nezávislých proměnných (vstupní stavové veličiny):

$$y = f(x, a) \quad (3.1)$$

kde a jsou koeficienty nebo parametry popisující chování systému.

Existuje celá řada deterministických modelů, které se od sebe odlišují svojí strukturou, fyzikálním přístupem, či časovou a prostorovou diskretizací. Zde jsou uvedeny hlavní skupiny deterministických modelů (také obr. 3-1.):

- **DL (Deterministic, Hydrodynamic Laws)** – tyto modely jsou založeny na fyzikálním popisu srážko-odtokového procesu a snaží se respektovat zákony zachování hmoty, hybnosti a energie (KULHAVÝ, KOVÁŘ, 2000). Mohou využívat teoretické poznatky z hydrodynamiky, termodynamiky, chemie, nebo biologie (DAŇHELKA et al., 2002). Označují se také jako „white-box“ modely.
- **DC (Deterministic, Conceptual)** – tento přístup reflektuje fyzikální zákony ve zjednodušené (koncepční) formě a obsahuje i určitou dávku empiricky odvozených vztahů (BECKER, SERBAN, 1990). Koncepční modely potlačují prostorovou složku a předpokládají, že ke změnám stavových parametrů dochází v určitých reprezentativních bodech (KULHAVÝ, KOVÁŘ, 2000). Původně spojitý systém je tímto prostorově diskretizován. Modely se poté řeší pomocí obyčejných diferenciálních rovnic. Díky spojení fyzikálního a empirického přístupu je tato skupina označována jako „grey-box“ modely.
- **DB (Deterministic, Black-box)** – modely neberou v úvahu řídicí zákony, ale používají pouze empiricky odvozený vztah mezi vstupními a výstupními veličinami. Procesy probíhající uvnitř systému zůstávají skryty (odtud pojmenování „black-box“). Ukazuje se, že použití těchto modelů pro operativní účely je výhodné spíše u malých povodí, se zvětšující se dobou předpovědi (cca 6 hod) se jeví již výhodnější aplikace fyzikálně strukturovaných koncepčních modelů (BUCHTELE, 2002B). Klasickým příkladem DB modelů jsou neuronové sítě.



*Obr. 3-1: Klasifikace deterministických modelů
(Zdroj: BECKER, SERBAN, 1990)*

3.1.3.2 Stochastické modely

Stochastické modely primárně neobsahují vazbu mezi příčinou a důsledkem. Lze je rozdělit do dvou základních skupin:

- **SP (Stochastic Probabilistic)** - pravděpodobnostní modely. U těchto modelů jsou jednotlivé hydrologické parametry jako například maximální či minimální průtok, vodní stavy nebo podzemní odtok charakterizovány určitým pravděpodobnostním rozdělením (BECKER, SERBAN, 1990).
- **ST (Stochastic Time series generation)** – modely generování časových řad. Použití těchto modelů je možné při extrapolaci časových řad pozorovaných parametrů, přičemž se

zachovávají jejich statistické charakteristiky (BECKER, SERBAN, 1990). Příkladem mohou být ARMA modely (Autoregressive Moving Average).

Z uvedeného vyplývá, že parametry získávané ve stochastických modelech jsou obvykle vztaženy ke konkrétním bodům (stanicím), na kterých jsou měřeny. Již jen v obecnější formě jsou začleňovány do jednotlivých systémů uvedených v tabulce 3-1. Naproti tomu jsou proměnné v deterministickém přístupu vztahovány k přímo k těmto definovaným systémům.

V praxi se dost často využívá obou přístupů. Stochastická složka je přítomna nejen ve většině modelů v oblasti plánování a projekční činnosti vodohospodářských staveb, ale někdy se využívá i v operativní hydrologii, zejména pro dlouhodobé předpovědi (DAŇHELKA et al., 2002). Obecně lze ale říci, že deterministický přístup v současnosti převažuje.

V komplexním, deterministickém přístupu lze jen stěží postihnout všechny vstupní parametry a proměnné, které ovlivňují výstupní veličiny. Každý takový model je zatížen určitou chybou, která je složena ze dvou dílčích chyb – vlastní chyba modelu a chyba měřených veličin. Obě je možné popsat určitým pravděpodobnostním rozdělením (BECKER, SERBAN, 1990).

3.1.4 Klasifikace podle míry časové a prostorové diskretizace

3.1.4.1 Časová diskretizace

Míra časové diskretizace je většinou určována podle způsobu použití modelu. Pro operativní předpovědi, povodňové studie, modelování šíření znečištění nebo transportu plavenin či splavenin se běžně užívá hodinový až denní krok, pro bilanční modely může být délka výpočtového kroku i vyšší (týden, měsíc). Je třeba zdůraznit, že i jednotlivé časové proměnné mohou mít různý časový krok, stejně tak nemusí být stejný ani časový krok týž vstupních a výstupních veličin (DAŇHELKA et al., 2002). Tato skutečnost charakterizuje i model NASIM.

Jiné rozdělení vychází z časové kontinuity výpočtu. Rozlišeny jsou modely kontinuální (simulují delší i víceleté období) a epizodní (simulace probíhá jen pro dílčí události – povodně nebo hydrologické sucho). Kontinuální modely jsou většinou používány na velkých územích, kde jsou povodně častěji způsobeny regionálními dešti, epizodní modely mají naproti tomu větší uplatnění při simulaci přívalových srážek postihující menší povodí.

3.1.4.2 Prostorová diskretizace

Problematika prostorové diskretizace je poněkud složitější. Uživatel výběrem vhodného modelu vlastně vytváří jeho topologii. V zásadě se rozlišují dvě hlavní kategorie – distribuované a celistvé (lumped) modely. V poslední době se také vyčleňuje kategorie modelů semi-distribuovaných:

Celistvé modely

Častěji se označují jako lumped modely. Parametry charakterizující povodí (stavové veličiny i časové řady) jsou vztahovány k celému nebo dílčímu povodí. Protože se většinou jedná o bodově měřené hodnoty (srážky na stanici, průtoky v závěrovém profilu), využívá se nejrůznějších geostatistických metod pro jejich převedení na hodnoty plošné. Více o těchto metodách bude pojednáno v kapitole 5. Příkladem celistvého modelu (též modelu se soustředěnými parametry) je americký model HEC-HMS (Hydrologic Engineering Centre – Hydrologic Modelling System).

Distribuované modely

Označují se také jako modely založené na distribuovaných parametrech. Tento přístup bere v úvahu prostorovou variabilitu vstupních parametrů, které jsou transformovány na parametry výstupní, vykazující také variabilitu v prostoru. V tomto pojetí (které přesněji vystihuje skutečné chování systému) je povodí rozděleno sítí – gridem (čtvercovým nebo i trojúhelníkovým) na elementární odtokové plochy. Pro každé políčko gridu existuje charakteristická hodnota parametru. Velikost gridu bývá různá, maximálně však do jednoho kilometru, aby byla zaručena platnost řídicích rovnic (BECKER, SERBAN, 1990).

Semi-distribuované modely

Princip semi-distribuovaných modelů spočívá v rozdělení povodí na elementární odtokové plochy (hydrotopy), které se (narozdíl od předchozí kategorie) vyznačují homogenními prostorovými parametry, například stejným půdním druhem a vegetačním pokryvem. Semi-distribuované modely se stále častěji aplikují, protože představují optimální kombinaci obou výše uvedených přístupů. Při určování odtokových ploch semi-distributivních modelů je třeba vzít v úvahu jednak prostorovou distribuci jednotlivých parametrů hydrologického systému (povodí), a také je třeba respektovat rozdělení územních charakteristik ovlivňující odtokový režim jako například topografii, půdní podmínky, vegetační pokryv nebo hydrogeologii (BECKER, SERBAN, 1990).

Model NASIM, který je v této práci využit pro simulaci odtoku z povodí Černé vody, patří právě do skupiny semi-distributivních modelů, kde základní odtokovou jednotkou je tzv. elementární plocha („Elementarfläche“).

4. CHARAKTERISTIKA MODELU NASIM

4.1 VŠEOBECNĚ

Srážko-odtokový model NASIM (Niederschlag-Abfluss Simulation Modell) německé firmy Hydrotec GmbH je vyvíjen od počátku 80. let jako nástroj pro podporu hydrologů a ekologů při plánování nejrůznějších vodohospodářských systémů a také jako součást, která je využívána pro hydrologickou předpověď (HYDROTEC, 2003A).

Podle klasifikace uvedené v kapitole 3, patří NASIM do skupiny koncepčních deterministických modelů, využívající semi-distributivní přístup dělení parametrů a proměnných veličin. Zároveň je možné zakomponovat i stochastickou složku (pomocí produktu Kludon), a to hlavně při dlouhodobých předpovědích nebo při plánování vodohospodářských staveb. Model je možné využít jednak jako kontinuální s delším výpočtovým krokem a jednak jako epizodní, kde je možné použít krok kratší (např. hodinový). NASIM také využívá některých jiných programů ke zpracování vstupních dat a také k prezentaci dat výstupních. Jedná se hlavně o spolupráci s firmou ESRI (ESRI, Inc. Redlands, CA, USA) a jejím produktem ArcView 3.x, pro který existují různé extenze, například pro zpracování vstupních dat. Pro prezentaci výsledků se používá program TimeView, je ale možno využít i softwaru dalších firem. NASIM je možné používat například pro řešení následujících problémů:

- simulace průchodu povodňových vln v libovolném časovém kroku jak na přírodních tak na urbanizovaných povodích
- vypracování projektů protipovodňové ochrany, podpora systémů krizového řízení
- modelování nízkých průtoků například pro výpočet šíření znečištění ve vodních tocích
- podpora řízení a manipulací na vodohospodářských objektech (přehrady, poldry, kanály, odběry vody, zavlažování)
- stanovení hydrologické bilance
- scénáře dlouhodobého vývoje založené na modelech klimatických změn
- výpočet statistických veličin (N-letost, M-denní průtoky)

V současné době je NASIM nejvíce využíván ministerstvem životního prostředí ve spolkové zemi Nordrhein-Westfalen, používá se ale i pro projekty aplikovaného výzkumu v různých institucích a univerzitách po celém Německu (např. na Freie Universität Berlin).

NASIM je možné používat jak na počítačích s operačním systémem Windows (od Win95) tak na UNIXových OS (Solaris).

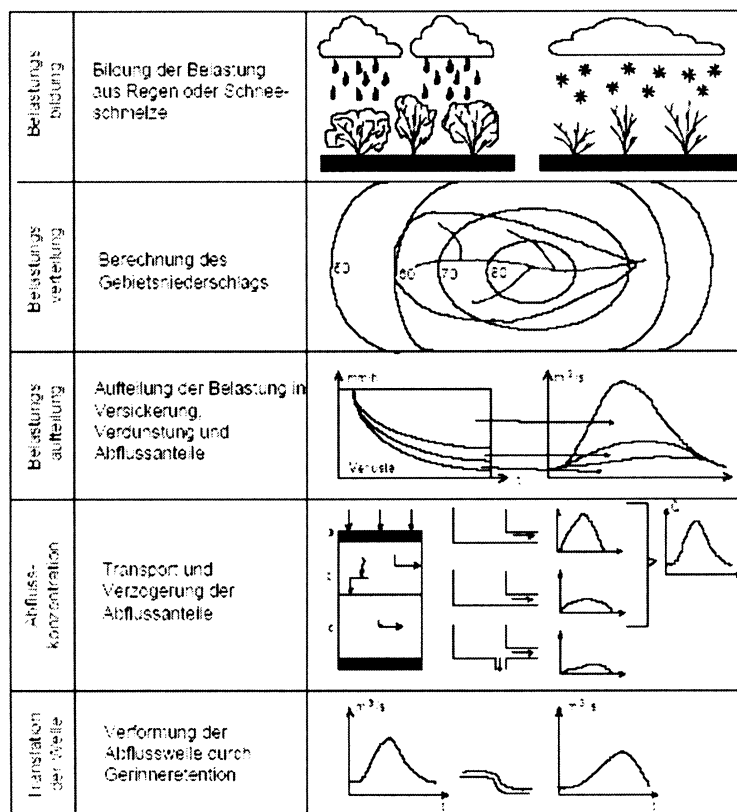
4.2 HYDROLOGICKÉ SYSTÉMY A PROCESY

V této kapitole budou popsány jednotlivé systémy a procesy hydrologického modelu NASIM, na které jsou aplikovány, resp. kterými jsou popsány komponenty srážko-odtokového procesu.

4.2.1 Složky hydrologického cyklu v modelu NASIM

Model NASIM zobrazuje ucelenou představu koloběhu vody od generování srážek až po výsledný průtok v závěrovém profilu a umožňuje tím simulaci jeho komponent (viz. také obr. 4-1):

- Generování srážek (Belastungsbildung)
- Prostorová distribuce srážek (Belastungsverteilung)
- Separace složek odtokového procesu (Belastungsaufteilung)
- Koncentrace odtoku (Abflusskonzentration)
- Pohyb a transformace vlny v korytě (Wellentransport)



Obr. 4-1: Schéma srážko-odtokového procesu
(HYDROTEC, 2003A)

4.2.1.1 Generování srážek (Belastungsbildung)

Srážky vypadávají buďto ve formě deště nebo sněhu. Děje se tak v závislosti na teplotě. V prvním případě se jedná o okamžité zatížení povodí, ve druhém případě jde nejprve o akumulaci sněhu a poté o jeho tání. V modelu NASIM se tento proces počítá kombinovanou metodou „Temperature Index/Snow-Compaction“.

4.2.1.2 Prostorová distribuce srážek (Belastungsverteilung)

Převedení bodových hodnot naměřených srážek na plošné hodnoty reprezentující dílčí povodí (semi-distributivní přístup) lze v modelu dosáhnout různými způsoby:

- ruční přiřazení časových řad srážek k jednotlivým dílčím povodím („Teilgebiet“), například metodou Thiessenových polygonů
- automatické přiřazení řad v závislosti na vzdálenosti těžiště dílčího povodí od srážkoměrné stanice nebo v závislosti na nadmořské výšce
- určení vah jednotlivých časových řad pomocí srážkového modelu (HYDROTEC, 2003A)

4.2.1.3 Separace složek odtokového procesu (Belastungsaufteilung)

Jde o kvantitativní a kvalitativní vyjádření dílčích složek hydrologického cyklu tedy ztráta intercepce, evapotranspirací a dále akumulace vody v mikrodepresích, infiltrace a perkolace. Obecně jsou tyto složky představovány jako vertikálně uspořádané nádrže o určité kapacitě (BUCHTELE, 2002A). Jakmile voda přesáhne kapacitu horní nádrže (např. intercepce), začne plnit nádrž spodní (např. infiltrace).

V NASIMu je k tomuto účelu využíván model půdní vlhkosti. Ten v obecné formě představuje výpočet hydrologické bilance povodí, kde srážky slouží jako vstup, a výstup reprezentuje objem odtoku v závěrovém profilu společně s evapotranspirací za určitý čas (WMO, 1983). Voda, která vypadává ve formě deště, je nejprve zachycena vegetací, kde se částečně vypařuje. Tento proces je označován jako intercepce. Do té se v NASIMu započítává i akumulace v mikrodepresích. Procesy, které značně ovlivňují půdní vlhkost, jsou infiltrace, evapotranspirace a perkolace, vztahy mezi těmito procesy a vlhkostí půdy nejsou ale lineární. Při výpočtu je možné použít lineární i nelineární model půdní vlhkosti (zaleží především na charakteru vstupních dat).

4.2.1.4 Koncentrace odtoku (Abflusskonzentration)

Přirozené plochy (neurbanizované)

Transport půdní vody v aerické (interflow) a nasycené zóně (bazální odtok) se popisuje pomocí konceptu lineárních nebo nelineárních nádrží (např. DYCK, 1978, BEVEN, 2001). Pro výpočet

povrchového odtoku byl vyvinut postup založený na jednotkovém hydrogramu s následnou retencí. Jsou-li k dispozici data digitálního modelu terénu, je možné pro každé dílčí povodí vypočítat odezvou funkci povrchového odtoku (Zeitflächenfunktion), která na ose x udává čas t a na ose y plochu, která se za čas t odvodní. K tomu je možné využít extenzi „Zfl“ programu ArcView 3.x, která vznikla spoluprací firem Hydrotec a ESRI. Není-li DMT k dispozici, vychází se při výpočtu povrchového odtoku ze zjednodušené představy o topografii povodí (resp. jeho dílčích částí).

Urbanizované plochy

Odtok na zastavěné části povodí je v modelu NASIM počítán odděleně. Stejně jako v předchozím případě se využívá modelu lineární nebo nelineární nádrže. Oproti přírodním plochám jsou upraveny některé parametry, například velikost intercepce, rychlosti proudění nebo retence.

Proudění v hlubších zónách podzemní vody

Model NASIM umožňuje také rozlišovat mezi geografickými (topografickými) a geologickými hranicemi povodí a upravovat tak externí přítok nebo odtok do/z povodí.

4.2.1.5 Pohyb a transformace vlny v korytě (Wellentransport)

Srážko-odtokový model NASIM aplikuje na postup povodňové vlny v korytě nebo kanále upravenou metodu Kalinin-Miljukov. Ta spočívá v nalezení jednoznačného vztahu mezi odtokem a příslušným objemem povodňové vlny pro pevně daný, tzv. charakteristický úsek vodního toku (HYDROTEC, 2003A).

4.2.2 Komponenty a procesy

Tato část popisuje jednak dílčí elementy, na kterých v modelu NASIM probíhá odtok a také procesy, jimiž se tento odtok řídí. Příkladem může být dílčí povodí (Teilgebiet), které slouží jako územní hierarchická jednotka, na které probíhají jednotlivé procesy (infiltrace, interflow, postup vlny korytem apod.). V následujícím textu charakterizují jen ty komponenty a procesy, které jsou relevantní pro modelové povodí Černé vody.

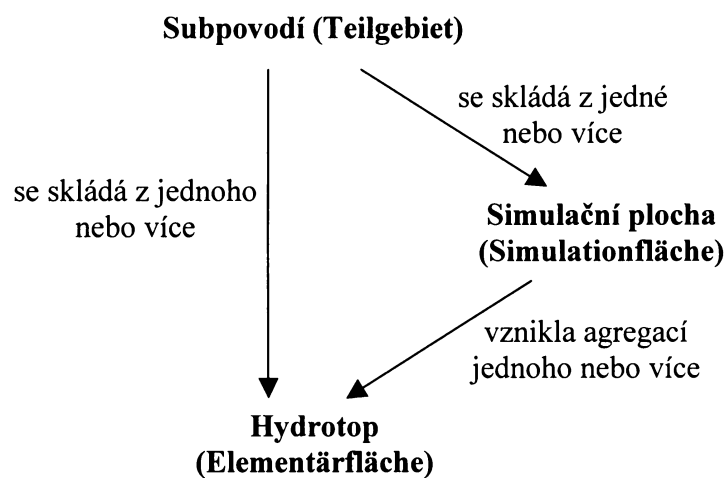
4.2.2.1 Elementární plocha (Elementarfläche)

Aby se snížil počet parametrů a zároveň se zachovala prostorová variabilita stavových veličin povodí, byly dílčí povodí rozčleněny na jednotky s podobnými odtokovými vlastnostmi, tzv. elementární plochy (Elementarfläche).

Elementární plocha (hydrotop) je hydrologicky homogenní jednotka se stejným půdním typem a vegetačním pokryvem, která zároveň náleží k jednomu subpovodí. Pokud jsou k dispozici digitální data (GIS-vrstvy) těchto veličin je možné pro stanovení hydrotopů využít nástavbu programu ArcView – „NASIM-Verschneidung“. Jejím výstupem je vrstva „efl.shp“, vytvořená jako průnik výše uvedených vstupních vrstev.

4.2.2.2 Simulační plocha (Simulationfläche)

Simulační plochy vznikají agregací ploch elementárních. Jsou to části subpovodí nebo subpovodí samotná a skládají se z jedné nebo více elementárních ploch (obr. 4-2).



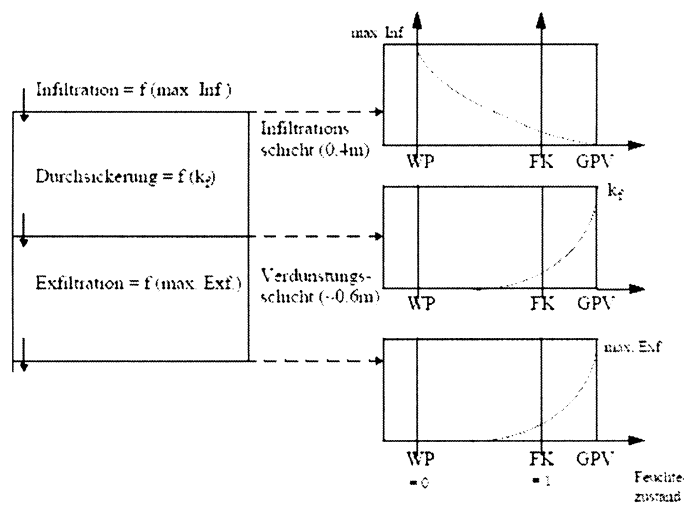
*Obr. 4-2: Hierarchie prostorových jednotek modelu NASIM
(HYDROTEC, 2003A)*

Proces agregace hydrotopů na simulační plochy je v modelu NASIM automaticky řízen. Uživatel může pouze vybrat metodu „aggregiere alles“ (sloučit vše) nebo „aggregiere gleiches“ (sloučit stejné). V prvním případě dojde ke sloučení všech elementárních ploch jednoho subpovodí do jedné simulační plochy. Ve druhém případě se do jedné simulační plochy sloučí pouze ty hydrotopy, které mají stejný půdní a vegetační pokryv. Ve většině případů se používá varianta „aggregiere alles“, ve které je výpočet časově méně náročný a přitom vrací postačující výsledky. Jen v případech, kdy jsou půdní procesy přímo cílem studie (např. modely šíření znečištění podzemní vody), se používá metoda „aggregiere gleiches“.

Při agregaci je třeba vzít v úvahu také skutečnost, že nedochází jen k horizontálnímu, ale i k vertikálnímu slučování hydrotopů. Každá elementární jednotka může mít jiný počet horizontů s různými hydrologickými vlastnostmi. Pro výpočet modelu půdní vlhkosti jsou nutné údaje o maximální infiltraci a exfiltraci (prosakování do hlubších vrstev půdního profilu). Proto se před vlastní agregací hydrotopy normalizují, aby měly stejný počet horizontů se stejnými vlastnostmi.

Jednotlivé parametry se určují na základě zadaného koeficientu hydraulické vodivosti k_f . V modelu NASIM si může uživatel vybrat z následujících typů normalizací:

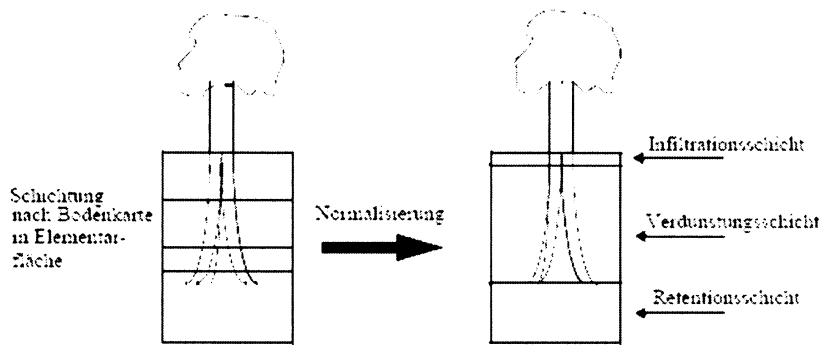
1. **žádná normalizace** – při výpočtu budou respektovány uživatelem zadané mocnosti a vlastnosti horizontů půdního profilu
2. **lineární model půdní vlhkosti** – vertikální agregace všech horizontů až do hloubky prokořenění (není – li zadána jiná, pak 1 metr)
3. **dvouvrstvý model** – při použití této normalizace budou vytvořeny dvě vrstvy. První infiltrační do hloubky 40 cm a druhá výparná (nebo perkolační) opět do hloubky cca. 1 m, odkud může díky kořenům probíhat transpirace (obr. 4-3).



Obr. 4-3: Dvouvrstvý model půdní vlhkosti.

WP – bod vadnutí (Welkepunkt), FK – polní kapacita (Feldkapazität), GPV – pórovitost (Gesamtporenvolumen)
(HYDROTEC, 2003A)

4. **třívrstvý model** – tento přístup předpokládá tři vrstvy – infiltrační, výparnou a retenční (obr. 4-4):
 - infiltrační vrstva – svrchní vrstva do cca. 40 cm
 - výparná vrstva – navazuje na infiltrační, sahá do maximální hloubky prokořenění (cca 1 m)
 - retenční vrstva – až do maximální hloubky půdního profilu. Vymezuje se, aby se odlišila retenční schopnost půdy a bazálního odtoku.



Obr. 4-4: Třivrstvý model normalizace půdních parametrů
(HYDROTEC, 2003A)

Pro většinu případů je firmou Hydrotec doporučená metoda agregace všech elementárních ploch daného subpovodí při použití dvou nebo třívrstvého modelu.

Při normalizaci jsou jednotlivé parametry přepočítávány. Hloubka prokořenění, mocnost horizontu a další půdní i vegetační charakteristiky vznikají váženým průměrem (podle plochy daného hydrotopu), hydraulický koeficient je počítán harmonickým průměrem podle mocnosti každé vrstvy.

4.2.2.3 Dílčí povodí (Teilgebiet)

Dílčí povodí (subpovodí) jsou v NASIMu odtokové plochy, které mají podobné hydrologické, morfologické a topografické vlastnosti. Jejich vytvoření je nezbytnou součástí sestavení struktury modelu.

K dílčím povodím nebo jejím částem (simulační plochy, elementární plochy) se vztahují veškeré výpočty složek hydrologického cyklu (povrchového, podpovrchového odtoku, evapotranspirace, atd.). Vztahují se k nim také vstupní údaje jako například srážky nebo teploty, které jsou transformovány a distribuovány jednotlivým subsystémům (ve smyslu tabulky 3-1 v kap. 3).

4.2.2.4 Transportní element (Transportelement)

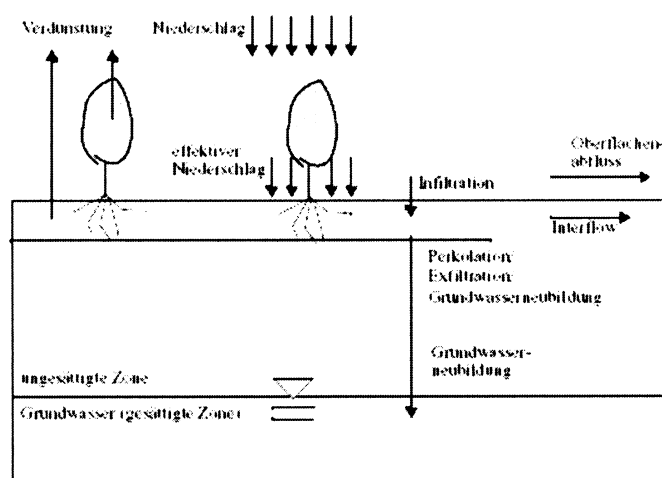
Jako transportní element jsou v modelu NASIM označovány následující systémy:

- Abzweig (odbočka)
- Gerinne (koryto)
- Kanal (kanál)
- Speicher (nádrž)

System „Gerinne“ je popsán v samostatné podkapitole 4.2.2.10. Komponentou „Abzweig“ nebo „Kanal“ je možné modelovat přepady, jezy, převody vody do jiných povodí apod. System „Speicher“ se používá v případě, že se v povodí nachází jezera, přehrady nebo například poldry. Algoritmy, kterými se řídí procesy probíhající v těchto elementech, jsou popsány v dokumentaci k modelu (HYDROTEC, 2003A).

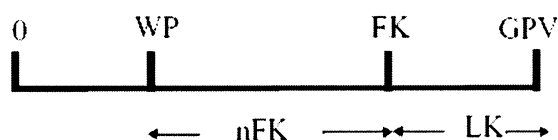
4.2.2.5 Model půdní vlhkosti (Bodenfeuchtmodell)

Struktura a hlavní procesy charakterizující v modelu NASIM komponentu počítající proudění v půdním profilu jsou znázorněny na obr. 4-5.



*Obr. 4-5: Struktura modelu půdní vlhkosti
(HYDROTEC, 2003A)*

Ještě než se budu věnovat procesům probíhající v jednotlivých komponentách půdního modelu, je vhodné vysvětlit několik důležitých oblastí charakterizující množství vody v půdě. Jednoduché schéma je na následujícím obrázku. Zkratky v něm použité vychází z německých názvů a v dalším textu budu pro větší přehlednost používat právě tyto zkratky.



*Obr. 4-6: Hlavní charakteristiky určující množství vody v půdě
(HYDROTEC, 2003A)*

Celkový objem pórů (GPV – Gesamtporenvolumen) označuje maximální množství vody, které je půda schopna pojmout. FK (Feldkapazität) tedy polní kapacita označuje oblast půdní vlhkosti, pod níž není voda vázána gravitací a nedochází tedy k perkolaci. Bodem vadnutí (WP – Welkepunkt) je vymezena hranice, pod kterou nemůžou rostliny přijímat kořeny půdní vodu. Voda v oblasti mezi GPV a FK (LK - Luftkapazität) podléhá gravitaci, v oblasti nFK (nutzbare Feldkapazität – použitelná polní kapacita) je naproti tomu vázána kapilárními silami a gravitaci nepodléhá.

Model půdní vlhkosti, který je v NASIMu aplikován, je koncepční deterministický model. Výpočet parametrů se provádí v diskretizovaném čase i prostoru. Je možné také simulovat proudění ve více vrstvách (např. horizontech). Uživatel si může vybrat, bude-li výpočet probíhat podle lineárního nebo nelineárního konceptu. V případě nelineární simulace (podle metody Bear/Holtan) existuje více variant proudění v nenasycené zóně půdního profilu (interflow). Celkem si uživatel vybírá z následujících variant:

- lineární koncept s variantou „Interflow – Direktabfluss“ (interflow-přímý odtok)
- nelineární koncept s variantou „Interflow in oberster Schicht“ (interflow v nejsvrchnější vrstvě)
- nelineární koncept s variantou „Interflow in alle Schichten“ (interflow ve všech vrstvách)
- nelineární koncept s variantou „Interflow – Direktabfluss“

Uvedené možnosti jsou vysvětleny v kapitole 4.2.2.8. Další kombinace vznikají při rozdílných postupech normalizace parametrů, popřípadě slučování vrstev různých elementárních ploch. Při výpočtu procesů v jednotlivých vrstvách je také zohledňována skutečnost, jde-li o horizont prokořeněný (probíhá transpirace) či nikoliv. Pro nenasycené prokořeněné vrstvy platí následující bilanční vztah:

$$\frac{dwv}{dt} = ia - ex - if - ev \quad (4.1)$$

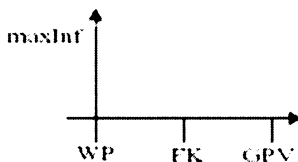
kde wv je obsah vody v půdě, ia aktuální intenzita infiltrace, ex značí intenzitu exfiltrace (perkolace do spodnější vrstvy), ev je míra aktuální evapotranspirace a if označuje aktuální interflow (vše v mm/h). V případě, že se jedná o neprokořeněnou vrstvu, odpadá člen ev . V půdě probíhají následující hydro-pedologické procesy:

Infiltrace

NASIM počítá infiltraci z údajů o aktuální vlhkosti půdy a srážkové intenzitě. Výsledná hodnota je rovna minimu potenciální infiltrace (závislá právě na vlhkosti půdy) a intenzitě srážky (ale jen té části, která dosáhne povrchu, tedy po odečtení intercepce a evapotranspirace):

$$ia(t) = \min(ip(t), nb(t)) \quad (4.2)$$

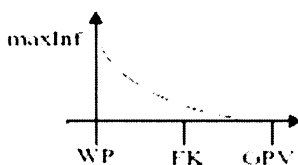
kde $ia(t)$ je aktuální intenzita infiltrace, $nb(t)$ označuje intenzitu srážky, která dopadne na povrch a $ip(t)$ je potenciální míra infiltrace (vše v mm/h). Výpočet $ip(t)$ probíhá v závislosti na aktuální půdní vlhkosti nejsvrchnější vrstvy. K tomu je možno využít dva různé koncepty. V prvním z nich klesá potenciální (maximální) infiltrace se zvyšujícím se množstvím vody v půdě lineárně:



Pak platí:

$$ip(wv) = \max Inf \cdot \left(\frac{GPV - wv}{GPV - WP} \right) \quad (4.3)$$

Ve druhém případě se jedná o nelineární pokles podle Holtana (DYCK, 1978), který spíše odpovídá skutečnosti a je pro simulaci doporučený:



Zde platí analogie:

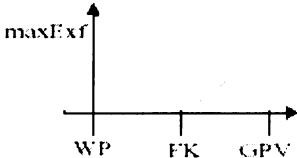
$$ip(wv) = \max Inf \cdot \left(\frac{GPV - wv}{GPV - WP} \right)^{1,4} \quad (4.4)$$

Hodnoty maximální infiltrace, objemu pórů v půdě i bodu vadnutí zadává uživatel pro každý půdní druh do souboru BOART.dbf (viz. kap. 5).

Exfiltrace

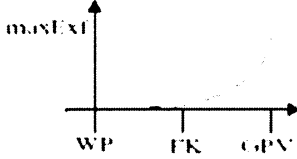
Exfiltrací se rozumí perkolace do hlubších vrstev půdního profilu. Je počítána na základě aktuální půdní vlhkosti a stejně jako v případě infiltrace je možné použít lineární nebo nelineární model.

Při použití lineárního vzestupu exfiltrace se zvyšující se vlhkostí platí následující vztah:



$$ex = \begin{cases} 0 & wv < FK \\ \max Ex \cdot \frac{wv - FK}{GPV - FK} & wv \geq FK \end{cases} \quad (4.5)$$

Doporučený je ale opět nelineární vzestup (BEAR, 1972), kdy exfiltrace začíná na 70 % polní kapacity:

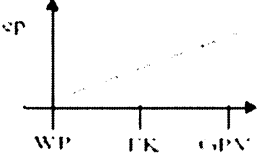


$$ex = \begin{cases} 0 & wv < WP + 0,7 \cdot nFK \\ kf \cdot \left(\frac{wv(t) - 0,7 \cdot nFK}{GPV - 0,7 \cdot nFK} \right)^3 & wv \geq WP + 0,7 nFK \end{cases} \quad (4.6)$$

V rovnici nFK označuje polní kapacitu a kf nasycenou hydraulickou vodivost.

Aktuální evapotranspirace

Výpočet evapotranspirace se provádí metodou podle Ostrowskeho, která jako parametry používá aktuální vlhkost půdy a její polní kapacitu. Změna evapotranspirace v závislosti na půdní vlhkosti se předpokládá jako lineární a platí pro ní vztah:



$$ev(wv) = \begin{cases} 0 & wv < WP \\ (ep(t) \cdot \text{anteil}) \cdot \frac{wv - WP}{GPV - WP} & wv \geq WP \end{cases} \quad (4.7)$$

$ep(t)$ – potenciální evapotranspirace (mm/h), $anteil$ – poměrná část objemu pórů v aktuálně počítané vrstvě na objemu pórů všech prokořeněných vrstev.

Interflow

Charakteristikou a výpočtem proudění v nenasycené vrstvě půdního profilu se zabývá podkapitola 4.2.2.8.

Výpočet půdní vlhkosti probíhá podle konceptu nelineární kaskády (O'CONNOR, 1976, DISKIN, NAZIMOV, 1995), kdy každá z vrstev představuje jednu nádrž. Každá z nádrží má svůj přítok reprezentovaný infiltrací (je možné do něj také zahrnout kapilární vztlak) a odtok, který se skládá z interflow, evapotranspirace a exfiltrace. Z případného přebytku v nejsvrchnější vrstvě pak vzniká povrchový odtok.

4.2.2.6 Intercepce

Komponentou „intercepce“ je v NASIMu simulováno dočasné zadržení srážky na vegetaci, odkud se buď vypaří nebo propadne na povrch. Z tohoto hlediska představuje tento proces nádrž. Jakmile dojde k jejímu naplnění, začíná proces odtoku. Pro povrch vegetace platí následující bilanční rovnice:

$$P_b = P - I_V - I_S \quad (4.8)$$

kde P_b je srážkový úhrn, P je srážka na srovnávací ploše bez vegetace, I_V je ztráta intercepce, popřípadě výpar z povrchu rostlin a I_S je objem vody dočasně zadržený na vegetaci. V každém čase odpovídající časovému kroku je vždy spočítán objem intercepce (objem nádrže):

$$I_{neu} = I_{alt} + dt \cdot (N - V_{pot}) \quad (4.9)$$

I_{neu} – objem nádrže (intercepce) v mm na konci každého časového kroku

I_{alt} – objem nádrže v mm na začátku časového kroku

dt – velikost časového kroku v hodinách

N – Srážkový úhrn v mm/h

V_{pot} – potenciální evapotranspirace v mm/h

Uživatel zadává hodnotu maximální intercepce pro každý typ vegetačního pokryvu. Jako volitelný parametr může také zadat její roční chod.

4.2.2.7 Povrchový odtok

Pro každou simulační plochu (kap. 4.2.2.2) jsou počítány procesy probíhající v půdě nebo na jejím povrchu. Celkový odtok se skládá z odtoku povrchového a podpovrchového, který se dále dělí na bazální (v nasycené zóně půdního profilu) a interflow (v nenasyčené zóně půdního profilu). Platí tedy vztah:

$$O_{celk} = O_p + O_I + O_B \quad (4.10)$$

kde O_{celk} je celkový odtok, O_p povrchový odtok, O_I interflow a O_B je podzemní (bazální odtok). Všechny části jsou v modelu provázány systémem lineárních nádrží (viz. např. DYCK, 1978).

Hydrologickým subsystémem „Gebietsoberfläche“ (povrch) se v modelu NASIM modeluje povrchový odtok. Odlišuje se odtok ze zastavěných a přírodních ploch, přičemž za přírodní plochu se považuje takový povrch, na kterém může probíhat infiltrace. Oba procesy se simulují odděleně. Vzhledem k charakteru modelovaného povodí Černé vody se budu v dalším textu věnovat pouze odtoku z přírodních ploch.

Pro transformaci srážky ve výsledný odtok používá model metody jednotkového hydrogramu, pro zohlednění retence pak model lineární nádrže (DYCK, 1978, BEVEN, 2001).

Metoda jednotkového hydrogramu

Tento postup je založen na aplikaci funkce, která charakterizuje odezvu systému na určitý impuls (srážku). V NASIMu je tato funkce nazývána jako „Zeitflächenfunktion“ (časoprostorová funkce) a platí pro ní:

$$\int_0^t Zfl(t') dt' \quad (4.11)$$

Jedná se tedy o plochu, která se v dílčím povodí odvodní za čas t_0 a je možné ji spočítat dvěma způsoby:

- pomocí rozšíření „Zfl“ programu ArcView 3.x (ESRI, Inc. Redlands, CA, USA). Tato extenze je součástí instalačního balíku produktu NASIM. Je ale potřeba mít k dispozici data digitálního modelu terénu ve formě gridu a dále vrstvy (shapefiles) dílčích povodí a případně toků a využití půdy. Více o této možnosti bude pojednáno v kapitole 5, která se zabývá zpracováním datových podkladů.
- v případě, že data nutná pro výpočet odezvové funkce systému nejsou k dispozici (především DMT), je možné vycházet z idealizovaného popisu povodí, který uživatel nadefinuje. Výše zmíněnou funkci pak NASIM vytvoří.

V obou uvedených případech vytvoří NASIM externí ASCII soubor TAPE20, který je ve speciálním formátu a slouží jako vstupní charakteristika povodí.

Model lineární nádrže pro znázornění retence

Povrchová retence je zobrazována pomocí modelu lineární nádrže (DYCK, 1978, O'CONNOR, 1976). Tato metoda předpokládá dočasné zadržení vody na povrchu, který představuje lineární nádrž, pro kterou existuje přítok a odtok a která má svůj objem. Tyto tři parametry jsou v čase proměnné. Časově invariantní je naproti tomu tzv. retenční konstanta, která vyjadřuje poměr mezi objemem nádrže a odtokem z ní. To znamená, že existuje lineární závislost těchto dvou parametrů:

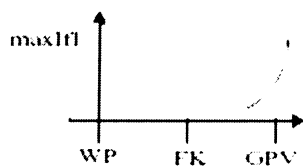
$$V(t) = k \cdot O(t) \quad (4.12)$$

kde $V(t)$ je objem nádrže v čase t , k je retenční konstanta a $O(t)$ je odtok z nádrže. Retenční konstanta se při simulaci určuje pomocí doby koncentrace nebo doby prodlení, kterou zadává uživatel a je také možné ji zohlednit v kalibraci.

4.2.2.8 Interflow

Interflow je další ze tří složek, která se podílí na celkovém odtoku z povodí. Touto komponentou se modeluje proudění v nenasycené (aerické) zóně půdního profilu. Aby se interflow odlišil od povrchového a bazálního odtoku, jsou všechny části považovány za samostatné nádrže a pomocí konceptu lineární kaskády počítány. Uživatel si může vybrat z několika variant výpočtu a to buď „Interflow direkt“ (proudění v aerické zóně probíhá, jakmile intenzita deště překročí rychlost infiltrace), „Interflow in der obersten Schicht“ (probíhá pouze v nejsvrchnější vrstvě) nebo „Interflow in alle Schichten“ (probíhá ve všech vrstvách půdního profilu). Při výpočtu se vychází z předpokladu, že se zvětšující se půdní vlhkostí stoupá interflow (v mm/h) nelineárně a to podle následující rovnice:

$$if = \begin{cases} 0 & wv < nFK + 0,4 \cdot (GPV - FK) \\ kf \cdot \left(\frac{wv(t) - (0,4 \cdot (GPV - FK) + FK)}{GPV - (0,4 \cdot (GPV - FK) + FK)} \right)^3 & wv \geq nFK + 0,4 \cdot (GPV - FK) \end{cases} \quad (4.13)$$



Voda procházející aerickou zónou se do toku dostává s určitým zpožděním, které je větší než u povrchového, ale menší než u bazálního odtoku. Tuto dobu prodlevy jinak také retence lze určit z analýzy odtokové křivky (hydrogramu) a lze ji také zohlednit při kalibraci modelu.

4.2.2.9 Bazální odtok

Komponentou „Basisspeicher“ je modelován podzemní odtok každého dílčího povodí. Slouží jako retenční prostor, do kterého perkolací proudí voda z hořejší „nádrže“ interflow téhož povodí nebo přijímá vodu z téže nádrže, ale z jiného, výše ležícího subpovodí. Základní odtok je modelován pomocí metody lineární kaskády a výsledkem je kromě odtoku do níže ležícího povodí také konstantní odtok do hlubších vrstev podzemní vody (Leakage). Při kontinuálních simulacích s delším výpočtovým krokem je možné tento proces zahrnout i podrobněji.

4.2.2.10 Proudění vody v korytě

Transportním elementem „Gerinne“ (koryto) je v NASIMu modelován postup a transformace vlny v říční síti. Cílem je určit jednak dobu postupu a také její retenční efekt vždy pro určitý úsek toku. K tomu jsou použity následující metody vycházející z jednorozměrné (1D) reprezentace proudění v korytě (např. VALENTA, 2002):

- výpočet postupu vlny korytem pomocí metody Kalinin-Miljukov (viz. např. DYCK, 1978 a 1983, HYDROTEC, 2003A) s využitím reprezentativních příčných profilů.
- výpočet postupu vlny korytem metodou Kalinin-Miljukov, případně údolní nivou s využitím měrné křivky průtoku
- výpočet postupu a retence vlny v údolní nivě

Oproti klasické Kalinin-Miljukov metodě používá NASIM pro retenci v korytě koncept nelineární kaskády, díky níž je možné lépe modelovat také jeho vybřežení (HYDROTEC, 2003A). Pro výpočet proudění stanovuje NASIM následující postup:

1) Výpočet měrné odtokové křivky

Aby bylo možné spočítat parametry metody Kalinin-Miljukov (viz. níže), je nutné znát vztah mezi vodním stavem a odpovídajícím průtokem v průtočném profilu každého dílčího povodí. Pokud

máme tyto údaje k dispozici, je možné je společně z geometrií koryta zadat jako externí ASCII soubor TAPE18. V opačném případě počítá NASIM průtok a vodní stav podle Gauckler-Manning-Stricklera (v Německu často používaná metoda, v literatuře bývá uváděno jen Manning-Strickler):

$$Q = k_{st} \cdot R^{2/3} \cdot A \sqrt{I} \quad (4.14)$$

Q – průtok v reprezentativním profilu v m^3/s

k_{st} – koeficient drsnosti povrchu podle Stricklera (Manninga)

R – hydraulický rádius

A – plocha průtočného profilu v m^2

I – sklon koryta

Pro výpočet je tedy nezbytné změřit parametry koryta, jeho sklon a stanovit koeficient drsnosti. Ten je možné získat z rozboru literatury (např. ROUB, PECH, 2003, BAUMGARTNER, LIEBSCHER, 1996) a má také vztah ke koeficientu c v klasické Chezyho rovnici (výše zmíněný vztah je vlastně její modifikací).

2) Výpočet parametrů metody Kalinin-Miljukov

Podstata použité metody spočívá v rozdělení toku na tzv. charakteristické úseky stejné délky, které by měly mít takovou velikost, aby se u nich dala předpokládat stacionarita (ustálenost) proudění (v každém profilu charakteristického úseku je stejný průtok). Pro tyto úseky pak platí:

$$L_{char} = \frac{Q}{I} \cdot \frac{dh}{dQ} \quad (4.15)$$

kde L_{char} je délka charakteristického úseku, Q je průtok v m^3/s , I značí sklon koryta a dh/dQ směrnici linearizované konsumpční křivky (platící pro střed char. úseku). Protože je tento výpočet závislý na velikosti průtoku, použije se průměr charakteristických délek různých průtoků v daném profilu.

Druhým parametrem je určení retenční konstanty K nádrže. Pro její výpočet je uváděn vztah (DYCK, 1983):

$$K = L_{char} \cdot Q(h) \cdot \frac{dh}{dQ} \quad (4.16)$$

3) Výpočet odtoku v korytě

Celková retence a průtok v korytě každého subpovodí jsou počítány na základě konceptu nelineárních nádrží, které představují jednotlivé charakteristické úseky.

4) Retence údolní nivy

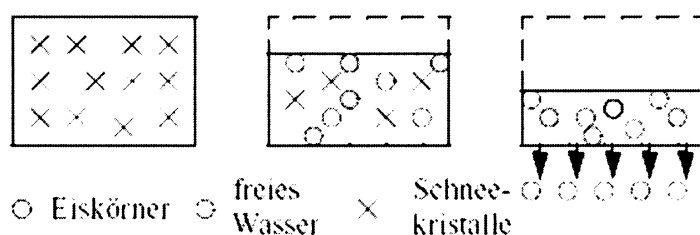
Retence vody po vyběžení toku je počítána dvěma způsoby. Jednak je možné zadat kritickou hodnotu, nad kterou dochází k rozlívání do údolní nivy. Retence je pak počítána pomocí samostatné lineární nádrže. Ve druhém případě se vychází pouze z profilu koryta.

Pro přesnější pochopení metod, které se používají pro simulaci postupu a retence vody v korytě, odkazují na četné publikace a studie. Kromě základních učebnic hydrologie a hydrauliky (BAUMGARTNER, LIEBSCHER, 1996, DYCK, 1978), jsou to příspěvky O'Connora (1976), Diskina a Nasimova (1995), Camacha a Leese (1999), Valenty (2002) a mnoha dalších.

4.2.2.11 Sníh

Sněhová komponenta je do modelu zahrnována v případě, že dopadající srážky jsou v pevném skupenství. V tu chvíli se začíná počítat s procesy akumulace a tání sněhu.

Model NASIM využívá k modelování těchto procesů v Německu rozšířenou kombinovanou metodu teplotního indexu (Temperature Index) a Snow-Compaction (předpokládá odtok vody ze sněhu při zhutnění $0,4 - 0,45 \text{ g/cm}^3$). Akumulace, komprese a tání sněhové pokrývky je zjednodušeně vyjádřena v následujícím schématu (obr. 4-7):



Obr. 4-7: Akumulace, komprese a ablace sněhové pokrývky
(HYDROTEC, 2003A)

Sněhová komponenta modelu NASIM počítá výšku sněhové pokrývky, její vodní hodnotu (obojí v mm) a intenzitu tání (v mm/h). Pro celkovou vodní hodnotu sněhu platí vztah:

$$W(t) = W(0) + t \cdot N - \int_0^t A(t) dt \quad (4.17)$$

kde $W(t)$ je vodní hodnota sněhu v čase t , $W(0)$ je původní vodní hodnota, N značí intenzitu srážky v mm/h a $A(t)$ je intenzita tání (ablace) v mm/h.

Jakmile je překročena kritická hodnota hustoty sněhu (poměr vodní hodnoty sněhu a výšky pokrývky, obvykle 0,4), dochází k odtoku přebytečné vody. Z parametrů používaných při výpočtu má na intenzitu tání sněhu největší vliv teplota, dodatečné srážky a sluneční záření. Další parametry jako rychlost větru, vlhkost vzduchu nebo teplo, které předává kapalná srážka sněhové pokrývce, je možné zohlednit v kalibraci.

Vstupní data sněhové komponenty tvoří srážky, teploty a případně další charakteristiky definované pro každé dílčí povodí. Veškerá voda z tání sněhu je předávána hydrologickému systému „Intercepce“.

5. ZPRACOVÁNÍ VSTUPNÍCH DAT

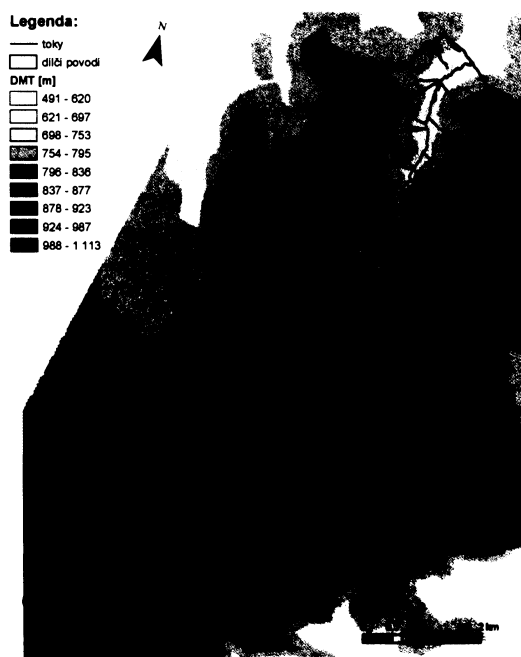
Výsledky každého hydrologického modelu jsou jednoznačně závislé na kvalitě a reprezentativnosti vstupních dat. Důležitá je také jejich správná interpretace, protože se většinou jedná o bodové hodnoty měřené na stanicích, které jsou převáděny na hodnoty plošné, v případě semi-distribovaného přístupu reprezentující dílčí povodí nebo jeho součásti – elementární plochy (hydrotopy). Data potřebná pro simulace je možné rozdělit do dvou hlavních skupin:

- 1) stavové charakteristiky povodí
- 2) časové řady

5.1 STAVOVÉ CHARAKTERISTIKY POVODÍ

5.1.1 Digitální model terénu

Digitální model terénu (DMT) je důležitý pro rozdělení povodí Černé vody na dílčí povodí tak, aby byla respektována topografie území. Je ale také nezbytný pro vytvoření odezvové funkce systému (Zeitflächenfunktion). Vektorový DMT, který mi poskytl Český úřad zeměměřický a katastrální (ČÚZK), pochází z databáze ZABAGED, jež vznikla digitalizací základních map 1:10 000. Pro potřeby modelu bylo potřeba převést tento vektorový soubor vrstevnic do gridové podoby. K tomu byl využit program ArcView firmy ESRI. Výsledný grid je zobrazen na obr. 5-1.



Obr. 5-1: Digitální model terénu povodí Černé vody s vyznačením dílčích povodí a říční sítě

5.1.2 Vytvoření elementárních ploch

Elementární plochy (Elementarflächen) jsou základní odtokové jednotky povodí (hydrotopy) definované jako plochy se stejným půdním typem a vegetačním pokryvem, které náleží právě jednomu dílčímu povodí. Tyto plochy jsou sestavovány prostřednictvím rozšíření pro ArcView 3.x (ESRI, Inc., Redlands, CA, USA) „Verschneidung“. Uživatel zadává cestu ke GIS-vrstvám tg.shp (dílčí povodí), boden.shp (půdní typy) a lntz.shp (vegetační pokryv). Výsledkem je vrstva efl.shp, která vznikne jako průnik uvedených vstupních vrstev.

5.1.3 Vytvoření odezvové funkce povodí (Zeitflächenfunktion)

Odezvová funkce povodí popisuje povrchový odtok z povodí bez možnosti její retence. Tato funkce vrací pro určitý časový interval plochu dílčího povodí, která se za tento interval odvodní. Dobou koncentrace se označuje čas od středu příčné srážky až po dobu, kdy se odvodní celé povodí. Cílem je vytvořit externí ASCII soubor TAPE20, který obsahuje uvedené údaje a slouží jako standardní vstup do srážko-odtokového modelu NASIM. Výpočet probíhá v programu ArcView 3.x za použití speciální extenze „Zfl“. Dialog pro nastavení parametrů výpočtu je na obr. 5-2.

Obr. 5-2: Výpočet odezvové funkce povodí v ArcView pomocí extenze „Zfl“

Pro výpočet funkce je nezbytné zadat různé parametry a vrstvy (shapefiles). Zde jsou uvedeny nejdůležitější z nich:

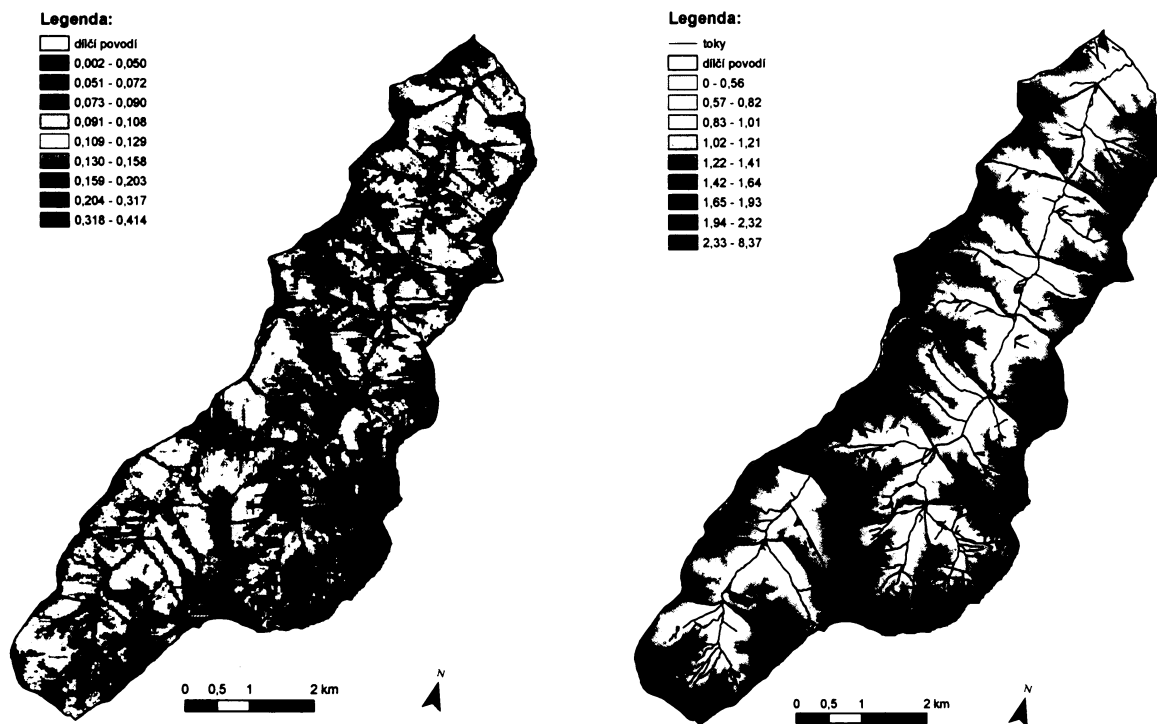
- Digitální model terénu ve formě gridu
- Shapefile s dílčími povodími (tg.shp)
- Shapefile s údaji o říční síti (fluss.shp)
- Parametr „Oberlieger-Schwellwert“ (prahová hodnota), který označuje plochu povodí, pod kterou již začíná ronový odtok
- Průměrná rychlost postupu vlny korytem. Tato hodnota byla vlastním měřením stanovena na 0,414 m/s.
- Hodnota KS tedy koeficient drsnosti různých povrchů podle typu vegetace. Je možné použít průměrnou hodnotu (v případě povodí Černé vody byl koeficient KS odhadnut na 8) nebo do tabulky Intz.dbf (údaje o landcoveru) zadat hodnoty pro každý typ vegetačního pokryvu. Při výpočtu pak není použita hodnota z dialogu, ale z této tabulky.
- „Anfangfließstiefe“ a „Endfließstiefe“ – počáteční a koncová hloubka vody tekoucí po povrchu (než začne ronový odtok). Hodnoty ležící mezi jsou lineárně interpolovány.

Pro rychlost povrchového odtoku se používá podobná rovnice jako v případě korytového odtoku podle Manning-Stricklera (SCHUMANN et al., 2000):

$$v(t) = KS \cdot H(t)^{2/3} \cdot \sqrt{I} \quad (5.1)$$

kde $v(t)$ je rychlost v m^3/s , KS označuje koeficient drsnosti, $H(t)$ je hloubka povrchového odtoku a I je sklon.

Jak je uvedeno výše, pro modelování je nejdůležitější sestavení souboru TAPE20. Jsou ale vytvořeny i různé datové soubory užitečné pro srozumitelnější zobrazení výsledků. Příkladem je gridové téma rychlostí povrchového odtoku nebo dob koncentrace v rámci dílčích povodí (obr. 5-3).



Obr. 5-3: Rychlosti povrchového odtoku (v m/s) a doby dotoku v dílčích povodích (v hod)

5.1.4 Hydrografické a hydrometrické charakteristiky

Tyto údaje jsou nutné především pro sestavení odezvové funkce povodí (Zeitflächenfunktion) nebo pro výpočet postupu vlny v korytě metodou Kalinin-Miljukov. V první řadě jde o vytvoření struktury modelu, tzn. rozdělení povodí na dílčí části (Teilgebiete). To bylo provedeno v programu ArcGIS za pomoci georeferencované topografické mapy a vrstvy říční sítě. Výsledkem je soubor *tg.shp* (také na obr. 5-3).

Jedním z parametrů, který je také nutný pro sestavení odezvové funkce povodí, je rychlost proudění vody v korytě. Zjištění této hodnoty jsem provedl v terénu, za pomoci hydrometrické vrtule, kdy byla provedena měření ve třinácti reprezentativních profilech (odpovídá třinácti subpovodím).

Pro výpočet postupu vlny korytem jednorozměrného (1D) modelu je nutné znát příčné profily koryta, případně údolní nivy v reprezentativních bodech každého dílčího povodí. Tyto profily byly vybrány, za pomoci totální stanice změřeny a poté spolu s drsností (koef. n podle Manninga) a sklonem koryta zaneseny do sestavovaného projektu (viz. kap 6 a obr. 6-2).

6-2

5.1.5 Půdy

Zpracování informací o půdních typech, půdních druzích a jejich hydrologických charakteristikách je jedním z nejdůležitějších kroků při shromažďování datových podkladů. Zároveň jsou tyto informace zatíženy velkou variabilitou v čase i v prostoru a tedy i možnou

chybou. Informace o vlastnostech a charakteristikách půd potřebných pro zpracování dat podávají například publikace Bezvodové (1985), Němečka et al. (1990), Nováka (2003), Beara (1972) nebo Scheffera a Schachtschabla (1992).

Cílem je pro každý půdní typ určit jeho průměrný počet vrstev a pro každou vrstvu zjistit její půdní druh, na který se potom vážou charakteristiky důležité při výpočtu půdního modelu (např. bod vadnutí, polní kapacita, objem pórů, koeficient nasycené hydraulické vodivosti, apod.). Výsledkem jsou tabulky BODENTYP.dbf a BOART.dbf, které jsou jedněmi ze vstupních tabulek importovaných do projektu.

K dosažení tohoto cíle byla nejprve digitalizována část půdní mapy 1:50 000 (list 01-44 Vejprty) vydávaná Českou geologickou službou (ČGS) (obr. 2-5). Poté byly jednak za pomoci výsledků z komplexního průzkumu půd – KPP (ŠIMBERSKÝ, 1967A a 1967B) a jednak vlastním odběrem vzorků a jejich rozborem (částečně vlastním a z části provedený Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půdy ve Zbraslavi – VÚMOP) stanoveny půdní druhy zjištěných vrstev (horizontů). Celkem bylo takto analyzováno 12 vzorků z různých částí povodí (6 z KPP a 6 vlastních). Výše uvedené hydrologické charakteristiky byly k jednotlivým půdním druhům doplněny podle norem, které vydává DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, nyní DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V). Na obr. 5-4 je uveden příklad souboru BODENTYP ve formátu dBASE (*.dbf).³

	A	B	C	D	E	F	G	L	M	N
1	BODÉN ID	NAZEV	ANZSCH	BOART_ID1	DICKE1	BOART_ID2	DICKE2	NFK	NLK	KF
2	V	surova puda	2	12	0.15	4	0.50	132.50	203.00	16.70
3	K	ranker	2	12	0.15	4	0.50	132.50	203.00	16.70
4	Xh	antropogenni puda hald	2	12	0.15	4	0.50	132.50	203.00	16.70
5	O	pseudoglej	4	8	0.20	7	0.15	240.00	419.00	16.70
6	Oa	pseudoglej kysely	4	8	0.20	7	0.15	240.00	419.00	16.70
7	H	hneda puda	4	5	0.20	4	0.20	176.00	305.00	16.70
8	Hp	hneda puda podzolovana	3	5	0.14	9	0.20	165.00	252.20	16.70
9	Z	reziva puda	4	3	0.22	4	0.11	174.10	317.20	16.70
10	Zg	reziva puda oglejena	2	10	0.16	9	0.31	111.40	150.50	16.70
11	Ph	podzol humusovy	2	12	0.15	4	0.50	132.50	203.00	16.70
12	PG	podzol glejovy	2	12	0.15	4	0.70	170.50	265.00	16.70
13	Pt	podzol zraselinely	2	13	0.15	5	0.70	223.50	302.50	10.95
14	Gp	glej podzolovany	2	12	0.15	4	0.70	170.50	265.00	16.70
15	Gr	glej raselinohumozni	4	3	0.18	3	0.10	190.40	354.20	16.70
16	Gt	glej zraselinely	2	13	0.15	5	0.70	223.50	302.50	10.95
17	Tp	raselinistni puda prec	2	13	0.15	6	0.70	314.50	400.50	4.20
18	Tv	raselinistni puda vrch	2	13	0.15	6	0.70	314.50	400.50	4.20
19	Pg	podzol oglejeny	2	12	0.15	4	0.70	170.50	265.00	16.70

Obr. 5-4: Část tabulky BODENTYP.dbf s půdními typy a jejich hydrologickými charakteristikami

³ Určení půdních druhů vychází z německé klasifikace, která je začleňuje do tříd podle trojúhelníkového klasifikátoru. Změna oproti české klasifikaci je především v rozdílných intervalech klasifikace do tříd jíla – hlína – písek (hranice jsou 0,002, 0,063 a 2 mm). Z této skutečnosti vycházely i drobné komplikace při sjednocování s klasifikací použitou při KPP.

Další půdní parametry nezbytné pro správný běh modelu jsou doby retence odtoků v nasycené a nenasyčené zóně půdního profilu. Tyto hodnoty byly stanoveny analýzou hydrogramu a byly také zohledněny při kalibraci.

5.1.6 Vegetační pokryv

K hodnocení vegetačního pokryvu byla využita databáze CORINE – Landcover, která vznikla analýzou satelitních snímků z let 1990-92. Na základě spektrální odrazivosti různých povrchů člení území do cca 30 tříd. Pro povodí Černé vody je zobrazena na obr. 2-6. Data z této gisové vrstvy byla použita pro určení elementárních odtokových ploch povodí. Pro každý typ vegetačního pokryvu je také možné určit koeficient drsnosti KS, který je použit pro výpočet odezvové funkce povodí. Z literatury je také možné odvodit hodnoty maximální intercepce nebo prokořenění (HYDROTEC, 2003A).

5.2 ČASOVÉ ŘADY

Výsledkem zpracování časových řad srážek, teplot, evapotranspirace a průtoků bylo vytvoření textových ASCII souborů ve speciálním formátu *.uvf (Umlandverband Frankfurt). Každý takovýto soubor obsahuje hlavičku, ve které jsou obsaženy například údaje o názvu časové řady, identifikátoru (ID), průměrné nadmořské výšce oblasti, pro kterou jsou data platná, jednotce, ve které jsou hodnoty zobrazeny, nebo počátečním a koncovém datu časové řady. Hlavní část souboru tvoří dva sloupce, z nichž první je datum a druhý obsahuje vlastní hodnoty. Tyto soubory jsou poté importovány do NASIMu prostřednictvím okna „Kalenderzeitreihen“.

5.2.1 Datové podklady

Pro zpracování dat jsem měl k dispozici následující podklady:

- denní úhrny srážek ze stanic Klínovec a Měděnec, který mi poskytl ČHMÚ, a denní úhrny srážek ze stanic Fichtelberg a Jöhnstadt poskytnuté Deutsche Wetterdienst (DWD)
- desetiminutové srážkové úhrny z Fichtelbergu (DWD)
- denní průměrné teploty vzduchu z Klínovce (ČHMÚ), Přísečnice (povodí Ohře), Fichtelbergu a Marienbergu (DWD)
- další meteorologické charakteristiky z Klínovce, Fichtelbergu a Marienbergu (např. relativní vlhkost, vodní hodnota sněhu)
- průměrné denní průtoky z limnigrafické stanice Černý Potok (ČHMÚ)
- měsíční kulminační průtoky ze stanice Černý Potok (ČHMÚ)

- neoficiální (nezanesené v databázi CLIDATA) hodinové průtoky z Černého Potoka (ČHMÚ-Ústí nad Labem)
- průtoky, popř. vodní stavy ze 7:00 SEČ z převodu na jezu Černé vody (odtok do nádrže Přísečnice) (povodí Ohře)

Řady byly poskytnuty pro různá časová období, při jejich zpracování a následné simulaci byla ale použita jen data z let 1995-2002 (největší konzistence a dostupnost všech druhů dat).

5.2.2 Kontrola platnosti dat (validace)

Dříve než započala vlastní práce s časovými řadami, byla provedena jejich kontrola. Na ověření homogenity jak srážkových tak teplotních dat byla použita metoda podvojných součtových čar (DMA – Double Mass Analysis), kdy byly porovnávány vždy dvě sousední stanice (jedna jako sledovaná a druhá jako kontrolní). Jednotlivé časové řady byly také graficky zobrazeny, aby se předešlo výskytu nahodilých chyb.

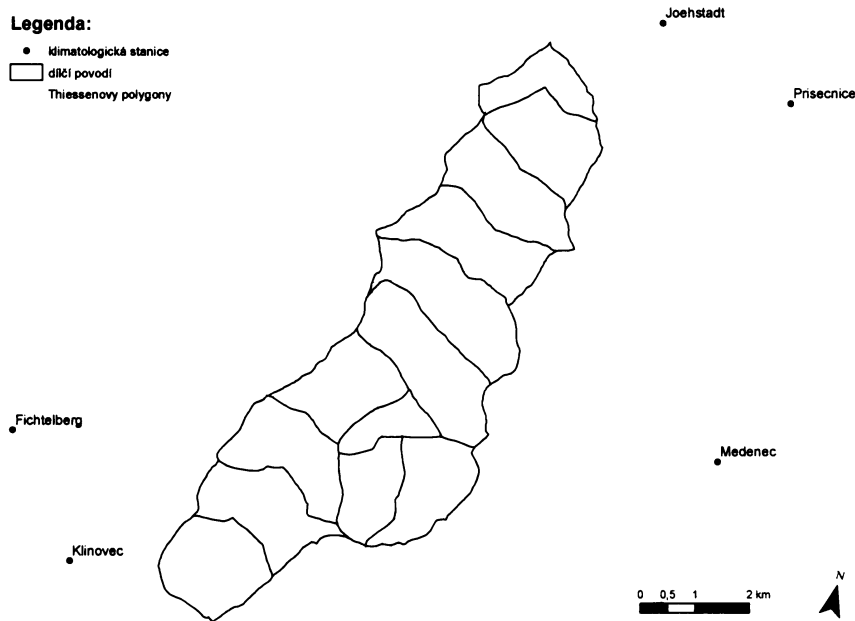
Větším problémem bylo ale doplnění chybějících dat. K tomu byla použita metoda korelace se sousední stanicí. Pomocí Pearsonova koeficientu byla určena stanice, která vykazuje se stanicí, jejíž data doplňujeme nejvyšší závislost. Lineární regresí byly odvozeny koeficienty přímk, která nejlépe odpovídá této závislosti (metodou nejmenších čtverců), a chybějící data dopočítána.

5.2.3 Srážky

Cílem zpracování srážkových dat bylo vytvoření souborů *.uvf, které by pro určité časové období (kontinuální nebo epizodní simulace) obsahovalo pro každé dílčí povodí a pro vhodný časový krok (den, hodina) údaje o průměrné srážce. Šlo tedy o určení MAP (Mean Areal Precipitation) a o převedení dat na odpovídající časový krok.

5.2.3.1 Výpočet MAP

Průměrná srážka na celém povodí Černé vody byla stanovena metodou Thiessenových polygonů (obr. 5-5). Použity byly údaje ze stanic Klínovec, Měděnec, Fichtelberg a Jöhstadt. Výsledná průměrná srážka byla spočtena jako vážený průměr srážkových úhrnů na jednotlivých stanicích, kde váhou byla plocha odpovídajícího Thiessenova polygonu (resp. jeho průnik s povodím). Obdobně byla spočtena i MAP pro každé dílčí povodí. Touto metodou byla některým subpovodím přiřazena data pouze z jedné stanice (v horní části povodí je vliv především Klínovce a Měděnce, v dolní pak Jöhstadtu, stanice Fichtelberg má vliv pouze na malých plochách několika málo dílčích povodí).



Obr. 5-5: Rozdělení povodí Thiessenovými polygony při počítání MAP

5.2.3.2 Úprava časového kroku

Určování MAP s denním krokem (pro kontinuální simulaci 1995-2002) bylo bez obtíží, protože denní úhrny srážek byly dostupné pro všechny relevantní stanice. Problémem bylo určení MAP s hodinovým krokem, který je pro epizodní simulace nezbytný (odezva povodí na příčinnou srážku je v řádu hodin). Údaje o hodinových (resp. 10 min) úhrnech jsou k dispozici pouze z Fichtelbergu, ostatní stanice je neměří. Vycházel jsem tedy z předpokladu, že denní srážky mají na Fichtelbergu určité rozložení, které je známé a které je pro daný den na všech okolních stanicích stejné. Z tohoto rozložení jsem pro každou hodinu spočítal její váhu (poměr mezi srážkou v dané hodině a denním úhrnem, vzniklo tedy číslo v intervalu 0 a 1) a tuto váhu vynásobil denním úhrnem srážek na příslušné stanici. Výsledkem byla hodinová srážka (hodinová intenzita) na všech potřebných stanicích. Výpočet MAP pak probíhal analogicky jako v případě srážek s denním krokem.

5.2.4 Teploty

Cíl zpracování teplotních řad byl obdobný jako v předešlém případě, tedy převedení bodových hodnot na plošné (stanovení MAT – Mean Areal Temperature) a vytvoření souborů nutné pro běh modelu.

5.2.4.1 Výpočet MAT

Metodika stanovení průměrné teploty vzduchu na povodí (celém či dílčím) je založena na její závislosti na nadmořské výšce (obr. 2-9). Tato závislost byla považována za lineární a pomocí koeficientů k a q regresní přímky a průměrné nadmořské výšky povodí (884,8 m n. m.) byla

spočtena i průměrná teplota vzduchu. MAT pro dílčí povodí vznikla ze stejné závislosti, ale dosazením průměrných nadmořských výšek těchto subpovodí (určeny v ArcView za pomoci rozšíření Spatial Analyst).

Pro odvození průměrných hodnot v denním kroku byla použita data z klimatologických stanic Klínovec, Fichtelberg, Marienberg a Přisečnice. Pro odvození teplot v hodinovém kroku jsem měl k dispozici data pouze ze stanic Fichtelberg a Marienberg.

5.2.5 Evapotranspirace

Získat údaje o aktuálním výparu je velice obtížné a většinou tato data nejsou standardně k dispozici. Proto se v modelu NASIM aktuální evapotranspirace odhaduje na základě evapotranspirace potenciální. Pro její vypočtení existuje mnoho metod, například podle Penmana nebo Turce (DYCK, 1978, MAIDMENT, 1993). NASIM nabízí možnost odvodit potenciální výpar metodou podle Haudeho. Výpočet probíhá v programu pro zpracování časových řad - TimeView firmy Hydrotec. Uživatel zadává časové řady teploty a relativní vlhkosti vzduchu (ve formátu uvf). Další parametr, který TimeView automaticky doplňuje, je faktor zohledňující roční chod evapotranspirace (HYDROTEC, 2003B). Výsledkem je soubor ve formátu uvf, který je společně s ostatními časovými řadami použit jako vstup do vlastního modelu.

5.2.6 Průtoky

Řady průtoků jsou důležité především jako srovnávací soubor při kalibraci modelu. V případě povodí Černé vody, kde jsou při povodních průtoky během dne velmi rozkolísané, se jeví jako optimální použití hodinových hodnot. Ty jsou digitálně zpracované od roku 1995. Důležitým doplňkem jsou i měsíční kulminační průtoky, které upřesní jak hodnotu tak čas kulminace.

Význam všech časových řad může uživatel měnit také během kalibrace, kdy je možné upravit váhu kterékoli řady na kterémkoli dílčím povodí (každá hodnota se přenásobí danou vahou).

5.3 POTENCIÁLNÍ ZDROJE CHYB PŘI SBĚRU A PRÁCI S DATY

Chyby vstupních dat vycházejí ze tří hlavních kategorií:

- 1) *nahodilé chyby* – lze je eliminovat jednak vizuální kontrolou a jednak použitím různých kontrolních metod (podvojná součtová čára, součtová křivka reziduálů, klustrová analýza nebo víceprostorová analýza časových řad) (DAŇHELKA, 2002).
- 2) *systematické chyby měření* – dochází k nim při sběru dat, například díky nevhodnému umístění srážkoměru. Problémem bývá například měření srážek v zimě (sníh a mráz – proto

se používají vyhřívané srážkoměry) nebo zaznamenávání extrémních intenzit, kdy překlopný mechanismus umístěný ve srážkoměru nestíhá měřit všechnu dopadající vodu. K určitým chybám dochází také v tom, že se nerozlišují srážky na plochách s vegetací a bez vegetace. Existují případy, kdy dva vedle sebe stojící srážkoměry, každý založený na jiné bázi měření, zaznamenají úhrn srážek lišící se mezi sebou až o 10 procent.

- 3) *chyby prostorové interpretace* – tyto chyby vychází z použité metodiky pro převádění bodových hodnot na plošné. Například v této práci použitá metoda Thiessenových polygonů pro interpolaci srážek (výpočet MAP) nezohledňuje nadmořskou výšku stanice nebo orografický efekt (i když je to částečně možné provést kalibrací). V případě průměrných teplot vzduchu (MAT), které byly počítány pomocí korelace s nadmořskou výškou, mohou nepřesnosti vznikat díky občasným zimním teplotním inverzím, u kterých je velmi těžké tuto závislost dostatečně správně vystihnout. Chyby mohou vznikat také při interpretaci půdních charakteristik, které se vyznačují velkou variabilitou v čase i prostoru. Tato data se ale dají celkem dobře zohlednit při kalibraci modelu.

S problematikou chyb souvisí také hustota sítě měřících stanic. V povodí Černé vody se nenachází žádná srážkoměrná ani klimatologická stanice, data byla použita ze čtyř srážkoměrných a čtyř klimatologických stanic ležících v těsném okolí. Pro interpolaci srážek regionálního charakteru je hustota staniční sítě dostačující, pro přesné vystižení rozložení přivalových dešťů by ale byla ideální existence jednoho srážkoměru na 1 km² (DAŇHELKA et al., 2002). To ale není z pochopitelných důvodů možné zajistit. Přesto se ale z provedených simulací zdá, že jsou srážková i teplotní data dostatečně reprezentativní.

6. PRŮBĚH A VÝSLEDKY SIMULACÍ

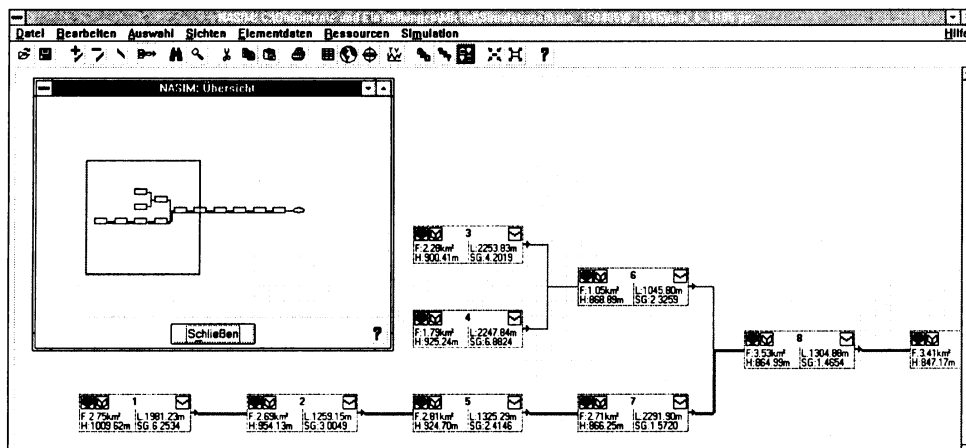
Tato kapitola je věnována vlastnímu průběhu modelování. Jsou popsány obecné kroky nutné pro provedení simulace, jako jsou sestavení projektu, nastavení vstupních podmínek a možností simulace, kalibrace parametrů a interpretace výsledků. Tyto kroky jsou doplněny o konkrétní příklady modelování vybraných událostí. Jako příklad kontinuálního výpočtu bylo vybráno období mezi lety 1995 – 2002, jehož výsledky byly použity jako vstupní podmínky do podrobnějších simulací letních událostí z června a července 1996 a zimní události z března 1999. Tato období byla využita pro kalibraci modelu. Jako verifikační období byla vybrána povodeň z července 2002.

Výběr uvedených povodňových událostí se řídil především dobrou dostupností dat ze všech potřebných oblastí (konzistentní data s co nejmenším časovým krokem). Na hlavním toku se nachází jez, z jehož nadržení (příloha 8) je někdy odebírána voda, která gravitačně proudí podzemním kanálem do nádrže Přísečnice ve vedlejší údolí (foto v příloze 9). Děje se tak za účelem snížení maximálního průtoku případné povodňové vlny (kapacita kanálu je $7,7 \text{ m}^3/\text{s}$). Data o odběrech jsou sice k dispozici (vždy v 7:00 SEČ), je ale velmi obtížné a prakticky nesmyslné zohledňovat je při kalibraci. Proto jsou i uvedené události vybírány tak, aby v jejich průběhu neprobíhaly žádné odběry.

6.1 OBECNÝ POSTUP SIMULACE V S-O MODELU NASIM

6.1.1 Sestavení systémového plánu (projektu) vybrané události

Prvním krokem k sestavení projektu je import dat, konkrétně tabulek bodentyp.dbf, boart.dbf, lntztyp.dbf, tg.dbf a efl.dbf. Informace o těchto souborech jsou uvedeny v kapitole 5. K importu se používá nadstavba „GIS-Import“. Jedinou podmínkou je zadání cesty do adresáře, kde jsou soubory uloženy. Po importu jsou tabulky dostupné pro další operace a je také možné je přímo z programového prostředí měnit. Mezi NASIMem a operačním systémem existuje totiž DDE propojení (Dynamic Data Exchange), díky němuž se mění i zdrojové soubory. Prostřednictvím tabulky, obsahující informace o existenci (popř. i o parametrech) dílčích povodí (tg.dbf), se po importu objeví jednotlivé celky na ploše ve schematizované podobě. Uživatel poté musí určit jejich logickou strukturu (jak jdou po sobě – funkce „Abflussziel ändern“) a vyznačit hlavní tok („Hauptfluss markieren“). Takto interpretované schéma povodí je znázorněno na obrázku 6-1.



Obr. 6-1: Schéma povodí Černé vody v systémovém plánu (NASIM 3.0)

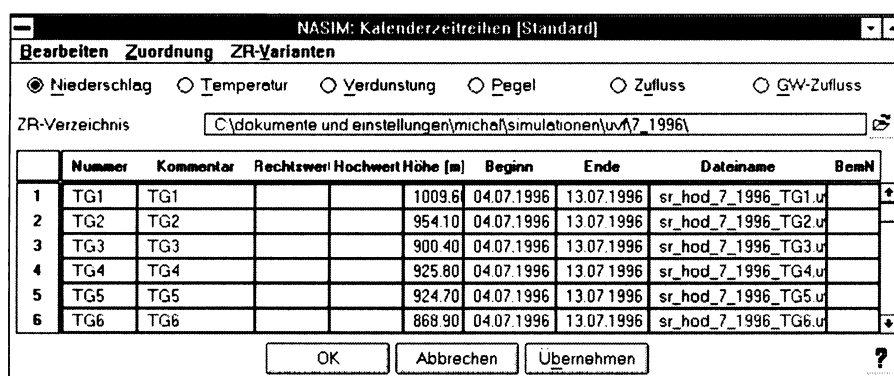
Dalším krokem je zadání reprezentativních profilů pro každé dílčí povodí. Tyto údaje jsou nezbytné pro výpočet translace vlny v korytě metodou Kalinin-Miljukov (viz. kap. 4). Pro tento účel slouží dialog v „Menü → Elementdaten → Transportelement“, kde se nejprve zadává délka hlavního toku v subpovodí (v m) a jeho spád (v %). Poté uživatel nadefinuje profil koryta, případně okolní nivy, a zadá koeficienty drsnosti (obr. 6-2).

	Höhe [m]	Breite l. [m]	Breite r. [m]	Rauheit l. [m ² /s]	Rauheit r. [m ² /s]
1	0.00	0.00	0.00	25.00	25.00
2	0.03	0.30	2.53	25.00	25.00
3	0.32	1.01	3.40	25.00	25.00
4	0.38	1.10	3.62	25.00	25.00

Obr. 6-2: Okno pro zadávání parametrů koryta dílčího povodí (NASIM 3.0)

Následuje import časových řad pro konkrétní simulaci, kterou chceme provést. Správa časových řad je v dialogu „Kalenderzeitreihen“ (obr. 6-3). Zde uživatel zadá cestu k souborům *.uvf, které vytvořil dříve (viz. kap. 5). Časové řady se zde rozdělují na čtyři skupiny – srážky, teploty, výpar a případné průtoky (důležité pro kalibraci modelu). Dále je nutné provést přiřazení

konkrétních řad příslušným subpovodím. To je možné buď ručně, nebo automaticky podle vybraného identifikátoru (ID, názvu, nadmořské výšky, atd.).



Obr. 6-3: Správa časových řad v modelu (NASIM 3.0)

V „Menü → Elementdaten → Abflusskonzentration“ zadává uživatel doby retence povrchového odtoku, interflow a základního odtoku. Ty je možné zhruba odhadnout analýzou hydrogramu nebo pomocí odezvové funkce povodí spočítané NASIMem jako „Zeitflächenfunktion“ (viz. kap. 5). Hodnoty lze poté ještě upravit během kalibrace.

6.1.2 Zadání vstupních podmínek a parametrů simulace

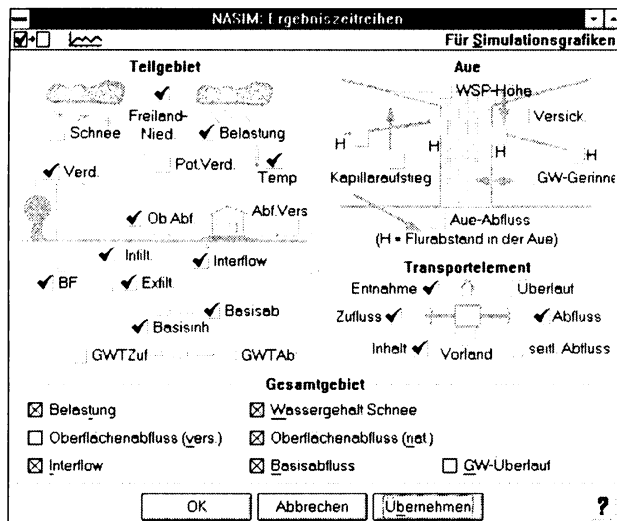
V předchozí části byl vytvořen projekt a nyní je možné přistoupit k vlastní simulaci. Prvním jejím předpokladem je nastavení vstupních podmínek, které charakterizují stav povodí na začátku modelovaného období (obr. 6-4). Pro zvolené povodňové události jsem vycházel z charakteristik, které byly spočítány při kontinuální simulaci pro období 1995-2002. Jedná se především o vlhkostní parametry, například množství vody obsažené v nádržích podzemní vody a interflow, aktuální vlhkost půdy, intercepce nebo vodní hodnota sněhu. Tato data lze přiřadit pro každé dílčí povodí jedinečně, je tedy například možné zohlednit rozdílné zásoby sněhu v různých částech povodí.

Obr. 6-4: Nastavení vstupních podmínek simulace (NASIM, 3.0)

Před spuštěním simulace zůstává ještě zadat její parametry, tedy určit metodiku výpočtu. To provádí uživatel v okně „Simulationsoptionen“ (obr. 6-5), kde vybírá jednak metodu agregace elementárních ploch, způsob normalizace parametrů, postup, podle kterého se počítá půdní vlhkost, a také období a časový krok pro který se má simulace odehrávat. Lze zde také zvolit, jestli bude NASIM počítat s příčnými profily koryta. Podle doporučení tvůrců modelu je možné bez zahrnutí geometrie modelovat pouze kontinuální období s delším časovým krokem (1 den a vyšší) (HYDROTEC, 2003A).

Obr. 6-5: Nastavení parametrů výpočtu (NASIM 3.0)

V okně „Ergebniszeitreihen“ (obr. 6-6) vybere uživatel časové řady procesů, které má NASIM spočítat (přítok, odtok, aktuální evapotranspirace, apod.). Samotný výpočet se spouští v okně „Simulieren“ v menu „Simulation“.



Obr. 6-6: Výběr výsledných časových řad (NASIM 3.0)

6.1.3 Kalibrace

Kalibrací modelu se rozumí optimalizace parametrů použitých při výpočtu s cílem zjistit skutečné chování systému (povodí) a připravit tím srážko-odtokový model, například pro operativní běh. Provádí se na historických událostech, kde je možné pravdivost výpočtu ověřit. Jedná se o kontinuální dlouhodobý proces, při němž se kalibrační parametry mohou měnit se změnami chování systému (KREJČÍ, ŘICICOVÁ, ZEZULÁK, 2002).

Kalibrace má pro přesnost modelu zásadní význam. Pokud jsou totiž ponechány všechny vstupní veličiny nezměněny, bývá výsledný hydrogram (nebo i jiné výstupní řady) nepřesný. Kalibračními postupy lze docílit poměrně dobré shody se skutečnou odtokovou křivkou. Na druhou stranu je nekalibrovaná simulace dobrým prověřením zadaných vstupních dat.

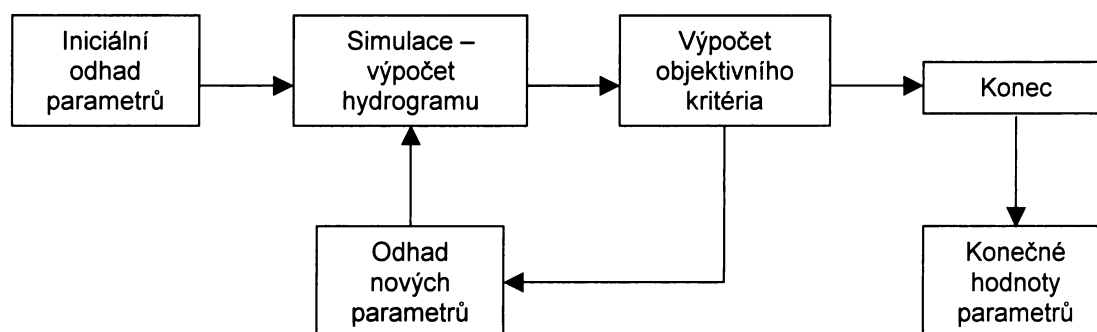
6.1.3.1 Postup při kalibraci parametrů

- 1) *Příprava dat*
- 2) *Odhad počátečních podmínek* – nastavení podmínek na počátku simulace (nasycení půdy, vodní hodnoty sněhu, atd.)
- 3) *Odvození parametrů* na základě znalosti charakteristik a chování zkoumaného povodí. Tyto parametry je možné určit různými metodami automatické optimalizace nebo pouze manuálně na základě zkušeností hydrologa. V současné době se u koncepčních modelů používá spíše kalibrace manuální, protože procesy automatické optimalizace parametrů

často potlačují fyzikální podstatu procesů probíhajících na povodí a modely pak mají charakter tzv. černé skříňky (KREJČÍ, ŘICICOVÁ, ZEZULÁK, 2002). Nicméně metody automatické optimalizace prochází v současné době dynamickým vývojem a existuje tedy reálná možnost jejich významnějšího začlenění do koncepčních modelů (DAŇHELKA, 2002).

- 4) *Verifikace parametrů*. Ověření platnosti parametrů je nutné pro správný běh modelu. Sledují se výsledné výpočty ve srovnání s měřenými veličinami na jiných obdobích, než na jakých byla provedena kalibrace. To je ale podmíněno sítí měřících stanic.

Postup kalibrace vyjadřuje také následující schéma (obr. 6-7):



Obr. 6-7: Strategie kalibrace parametrů S-O modelu
(Zdroj: DAŇHELKA, 2004)

6.1.3.2 Objektivní kritéria správnosti kalibračních parametrů

Při kalibraci modelu sleduje uživatel různá kritéria shody simulovaných veličin s veličinami měřenými. Jedná se vlastně o nějaké číselné vyjádření chyby, například:

- hodnoty kulminačního průtoku
- času kulminace
- procentní objemová chyba VE (volume error)
- koeficient variace PE
- suma absolutních nebo středních kvadratických odchylek

Jak uvádí Refsgaard a Storm (1996), je těžké určit, které kritérium je pro daný účel modelu a pro konkrétní simulovanou proměnou vhodné, a také proto doporučují využít kombinace více kritérií. Toto platí zejména pro simulaci epizodních událostí.

Při modelování byla použita kritéria koeficientu variace a procentní objemové chyby. Zároveň byla sledována velikost kulminačního průtoku. Koeficient variace PE dle metodiky WMO (In: KULHAVÝ, KOVÁŘ, 2000) charakterizuje rovnice:

$$PE = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{skut_i} - Q_{sim_i})^2}{\frac{N}{\bar{Q}}} \quad (6.1)$$

kde Q_{skut_i} je i -tá pořadnice skutečného průtoku, Q_{sim_i} je i -tá pořadnice vypočteného průtoku, N je počet hodnot a \bar{Q} je průměrný průtok (skutečný). Kulhavý a Kovář (2002) uvádí také hodnocení parametru PE (tab. 6-1).

PE	Shoda
0,0 – 0,15	velmi dobrá
0,15 – 0,3	dobrá
0,3 – 0,4	použitelná

*Tab. 6-1: Kritéria shody měřeného a vypočteného hydrogramu
(Zdroj: KULHAVÝ, KOVÁŘ, 2002)*

Procentní objemová chyba VE je určena následující rovnicí (DAŇHELKA, 2002):

$$VE = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim_i} - Q_{skut_i})}{\sum_{i=1}^N Q_{skut_i}} \cdot 100 \quad (6.2)$$

6.1.3.3 Možné problémy a nejistoty kalibrace

U manuální kalibrace se uživatel setkává s mnoha problémy. Jedná se o poměrně časově náročnou proceduru, jejíž řešení bývá často nejednoznačné. To znamená, že zjištěné parametry mohou „sedět“ pro kalibrační období, ale v operativním běhu, kdy jsou pro každou událost jiné podmínky, nemusí být výsledky už natolik přesvědčivé. Často se také stává, že kalibrace může mít více řešení, to znamená, že zvýšení jednoho parametru se dá vykompenzovat snížením jiného, což může platit pro kalibrační období, při verifikaci to ale může být značně odlišné. Kalibraci také

stěžuje fakt, že vliv parametrů na výsledný průtok nemusí být (a nebývá) lineární. Další problémy a nejistoty jsou součástí diskuze v kap. 7.

Výčet událostí využitých pro kalibraci a následnou verifikaci modelu je uveden na začátku této kapitoly. Příklady kalibračních protokolů jsou zobrazeny při rozboru simulovaných událostí (obr. 6-9, 6-13 a 6-17).

6.1.4 Interpretace výsledků

Po proběhnutí simulace si uživatel může prohlédnout výsledky, které se ukládají do samostatného adresáře. Jedná se o celou škálu možností od odtoků z dílčích povodí, přes separaci hydrogramu na jednotlivé složky (povrchový a bazální odtok, interflow), až po výpočet aktuální evapotranspirace, tvorby a intenzity tání sněhové pokrývky nebo informace o plnění a prázdnění údolní nivy (je-li do výpočtu zahrnuta). Nechybí ani podrobná statistika pro každé dílčí povodí nebo jiný systémový element (nádrž, kanál). Díky DDE propojení je možné si výsledky ihned prohlédnout prostřednictvím programu TimeView (Hydrotec, GmbH, Aachen). Časové řady se ukládají v souborech formátu ASCII, takže existuje možnost importu do jiných programů (např. Grapher nebo MS Excel). Výsledky za dílčí povodí se ukládají také do souborů dBASE (*.dbf), takže je možné je zobrazit v ArcView (k tomu slouží extenze „TG-Ergebnisse“ a „TG-Plots“).

6.2 MODELOVÁNÍ ODTOKOVÝCH POMĚRŮ V OBDOBÍ 1995 – 2002

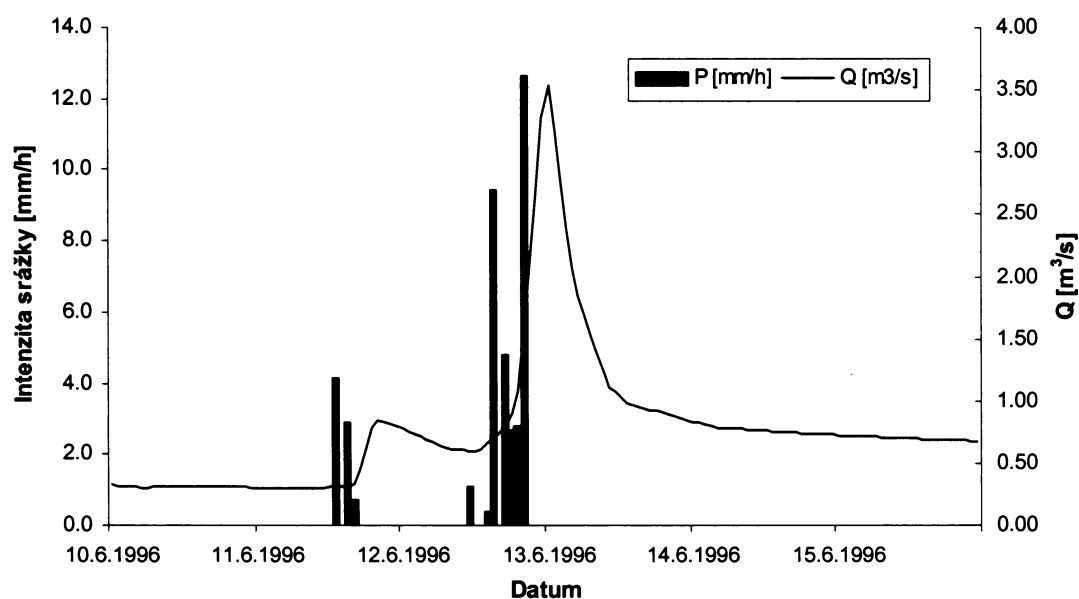
Období 1995 – 2002, do kterého spadají všechny simulované události zvýšených průtoků, bylo vybráno především z důvodu relativně dobré dostupnosti dat. Největší roli hrála skutečnost, že od roku 1995 jsou zpracovány neoficiální hodinové průtoky z limnigrafu v Černém Potoce. Rok 2002 je jako horní hranice zvolen z toho důvodu, že poté přestala fungovat klimatologická stanice na Klínovci, která je z hlediska své polohy velmi důležitá.

Období 1995-2002 bylo modelováno v denním kroku a výsledky byly použity jako vstupní podmínky do simulací jednotlivých událostí. Jednalo se především o informace o nasycení půdního profilu, podzemním odtoku a případně vodní hodnotě sněhu. Vzhledem k delšímu časovému kroku, byly ale získané hodnoty spíše orientační, a především při kalibraci letních událostí jsem také testoval podmínky blízké vypočteným hodnotám. Výsledky byly naproti tomu nepostradatelné pro zadávání vodní hodnoty sněhu a výšky sněhové pokrývky pro každé dílčí povodí (výrazně se projevila závislost těchto proměnných na nadmořské výšce).

6.3 SIMULACE ZVÝŠENÍ PRŮTOKU V ČERVNU 1996

6.3.1 Synoptické příčiny a průběh povodně

Povodňová událost, která proběhla v červnu roku 1996 se nevyznačuje nijak výraznou hodnotou kulminačního průtoku, ale je klasickým příkladem povodně z přivalových dešťů trvající několika hodin. Dne 10.6. a 11.6. byla Česká republika pod vlivem tzv. jihozápadní cyklonální situace SWc₂ (BRÁDKA et al., 1961), která se vyznačuje od jihozápadu postupujícími frontálními systémy přinášející menší srážky. Ty nasýtily půdní profil. Dne 12.6. se vytvořila tlaková níže se středem nad Skandinávií a na naše území začal proudit vlhký vzduch od severozápadu přinášející vydatné srážky, které byly v Krušných horách velmi intenzivní. Průměrný úhrn na povodí činil ve dne 12.6. 33,8 mm. Díky předešlým podmínkám způsobily tyto srážky výraznější odtokovou odezvu. Hydrogram se vyznačuje velmi rychlým a prudkým nástupem a jen o něco pomalejším poklesem. Kulminační průtok na limnigrafu v Černém Potoce byl dosažen dne 13.6. v 0:12 a měl hodnotu 4,16 m³/s. Průběh povodňové vlny a příčinné srážky nejlépe charakterizuje obr. 6-8.



Obr. 6-8: Hodinové intenzity srážek a hydrogram odtoku povodně od 10.6. do 15.6.1996

6.3.2 Nastavení počátečních podmínek a parametrů simulace

Před průběhem simulace je třeba správně odhadnout počáteční podmínky, především nasycení půdního profilu předešlými srážkami. Jako výchozí hodnoty byly použity výsledky z kontinuální simulace s denním krokem z let 1995 – 2002. Vstupní parametry, které byly zadány v okně „Zustände“, jsou obsahem tabulky 6-2. Během kalibrace byly ale testovány i odlišné hodnoty a zkoumán jejich vliv na výpočet.

Komponenta	Stav 10.6.1996
Nádrž intercepce	0 mm
Nádrž podzemní voda	5 mm
Nádrž interflow	0 mm
Nádrž povrchový odtok	0 mm
Nastavení půdní vlhkosti	na 40 % maximální polní kapacity

Tab. 6-2: Počáteční podmínky v povodí dne 10.6.1996

Počáteční hodnoty retence podzemního odtoku, interflow a povrchového odtoku byly analýzou hydrogramu s využitím odezvové funkce povodí nastaveny na 100, 15 a 5 hodin.

Před provedením simulace si uživatel vybírá z několika různých postupů výpočtu půdní vlhkosti nebo metod agregace elementárních ploch a jejich vrstev. Pro model půdní vlhkosti byla vybrána metoda „Interflow direkt“ a pro sjednocení půdních vrstev postup založený na dvouvrstevém nelineárním modelu s optimalizací parametrů („nichtlineare Zweischichtenmodel mit Parameteranpassung“). V rámci jedné simulační plochy byly všechny elementární plochy sloučeny metodou „aggregieren alles“. Okno s obecnými volbami simulace je na obr. 6-5.

6.3.3 Kalibrace

Během kalibrace byly měněny váhy různých parametrů a zkoumán jejich vliv na hydrogram odtoku a distribuci vody do dílčích transportních médií (povrchový a základní odtok, interflow). Časová složka odtoku byla primárně upravována nastavením váhy pro doby retence všech komponent. Změnou půdních parametrů (především vertikální a horizontální hydraulické vodivosti nebo celkového obsahu pórů) se měnilo hlavně procento vody odtékající povrchovým a podpovrchovým odtokem. Změna tohoto poměru uživatelem je poměrně snadná, je ale potřeba respektovat určité limity těchto jevů (odtok probíhá většinou v aerické zóně půdního profilu, povrchově se tak děje jen při prudkých deštích, kdy srážková intenzita překročí infiltrační rychlost, při absolutním nasycení půdního profilu, popřípadě při zmrzlé půdě). Kalibrační protokol simulace v červnu 1996 je uveden na obr. 6-9.

von 0.5 auf 0.3 gesetzt
 18.04.2005 11:14:36 - Faktor Boden-Vert. Leitfähigkeit für SE 5
 von 0.5 auf 0.3 gesetzt
 18.04.2005 11:14:36 - Faktor Boden-Vert. Leitfähigkeit für SE 2
 von 0.5 auf 0.3 gesetzt
 18.04.2005 11:14:36 - Faktor Boden-Vert. Leitfähigkeit für SE 1
 von 0.5 auf 0.3 gesetzt

Eichfaktoren für ausgewählte SE

Niederschlag:	1.00	Verdunstung:	1.00
Versiegelung:	1.00	Boden:	
ab Vers.grad (%):	0.00	Welkepunkt:	1.1500
Schnee:		Feldkapazität:	1.5000
Schmelzrate Temp.:	1.00	Gesamtporenvolumen:	0.6500
Schmelzrate Strahl:	1.00	Max. Infiltration:	1.1000
Retentionen:		Horiz. Leitfähigkeit:	2.5000
Oberflächenabfluss:	2.00	Vertik. Leitfähigkeit für:	
Interflow:	1.25	<input checked="" type="radio"/> alle Schichten:	0.3000
Beseisabfluss:	1.00	<input type="radio"/> Exfiltrationsschicht:	
Versiegelte Fläche:	1.00	Gerinne:	
Teilgebiet:		Geschwindigkeit:	2.00
Basiseisabf.:		Pot. Gerinneversick.:	1.00
Basiseisabf.:		Aue:	
Leakage:	1.00	Leitfähigkeit Gabelna:	
GW-Tief.:		Leitfähigkeit Gw.:	
Prost.:		Ständeranfangsbed.:	
Prost.:		Inhalt GW-Speicher.:	1.00
Interception:	1.00		

OK Abbrechen Übernehmen ?

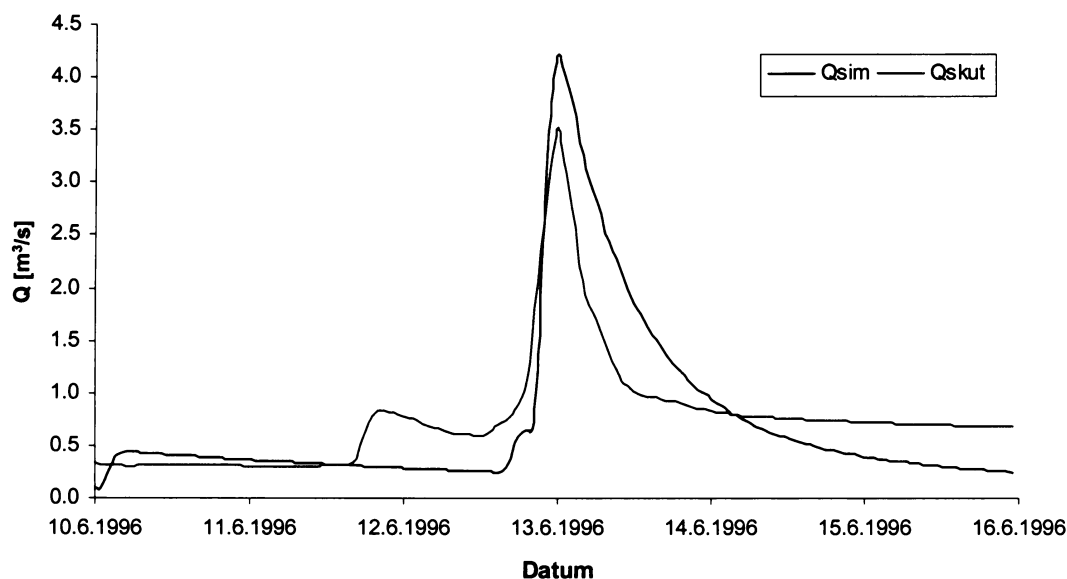
Eichprotokoll mit den Eintragungen aller Faktoränderungen (editierbar)

Obr. 6-9: Kalibrační protokol simulace 10.6. – 15.6.1996

Zmíněné parametry vertikální a horizontální nasycené hydraulické vodivosti doznaly kalibrační největších změn. V případě ponechání váhy vertikální vodivosti na hodnotě 1 (hodnota zadaná pro daný půdní druh ve vstupní tabulce „BOART.dbf“ zůstala tedy nezměněna) docházelo k výrazné tvorbě základního odtoku, což podle mého názoru u povodně způsobené přivalovými dešti neodpovídá skutečnosti. Proto byla hodnota postupně snížena na 1/3 (váha 0,3). Voda, která se nestačila perkolovat do hlubších vrstev půdního horizontu tvořila poté významný povrchový odtok (přístup odpovídající půdním modelům typu „saturation-excess“ – viz. kap. 7 nebo např. JOHNSON et al., 2003). Ten byl ale příliš velký, a proto byl zvýšen parametr horizontální nasycené hydraulické vodivosti, aby voda ve svrchní transportní zóně půdy rychleji odtékala. Zvýšena byla také rychlost postupu vlny v korytě (původně zadaná hodnota vycházela z měření, kdy okamžitý průtok odpovídal zhruba Q_a) a naopak byla snížena celková kapacita pórů (parametr Gesamtporenvolumen).

6.3.4 Výsledky modelu

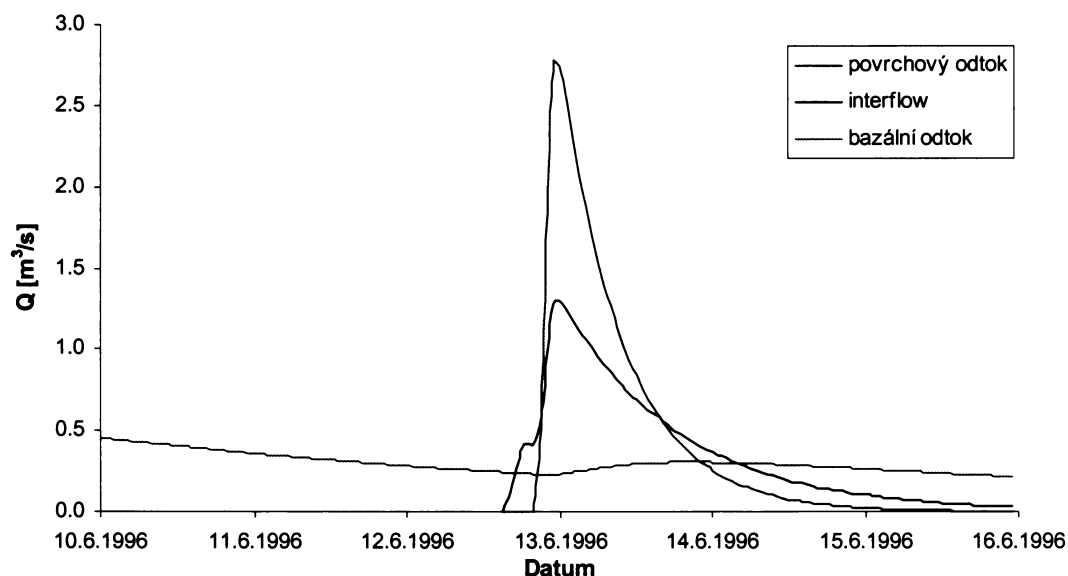
Výsledné časové řady, které si uživatel zvolí, se ukládají do samostatného adresáře buď ve formě ASCII souborů, nebo jako atributová tabulka dBASE, se kterou je možné pracovat například v ArcView za podpory speciálních extenzí „TG-Ergebnisse“ a „TG-Plots“. Na obr. 6-10 je uveden simulovaný a skutečný hydrogram odtoku v závěrovém profilu v Černém Potoce.



Obr. 6-10: Skutečný a simulovaný hydrogram odtoku v Černém potoce od 10.6. do 15.6.1996

Obě křivky vykazují poměrně dobrou korespondenci. Koeficient variace PE dosahuje hodnoty 0,25, což podle kritérií odpovídá „dobré“ shodě. Procentní chyba kulminace VE je -4,4 %. To znamená, že celkový objem simulované povodňové vlny od 10.6. do 15.6.1996 byl nižší, než by odpovídalo skutečnosti. Chyba je ale poměrně nízká. Také se shoduje doba nástupu i čas kulminace povodňové vlny, velký rozdíl není ani mezi hodinovými kulminacemi (4,22 m³/s oproti skutečným 3,53 m³/s, což odpovídá odchylce 19,6 %). Významnější rozdíl nastává až na poklesové větvi, kdy ve skutečnosti došlo k rychlejšímu vyprázdnění, než jaké spočítal model. Tento problém se nepodařilo kalibrací uspokojivě odstranit a je charakteristický i pro verifikační období.

Při kalibraci je důležitá snaha o dodržení fyzikální podstaty simulovaných procesů, tedy určitých hranic, které by neměl daný parametr překračovat. Jako příklad lze uvést separaci odtoku do dílčích složek (povrchového nebo základního odtoku a interflow), kterou může uživatel poměrně jednoduše ovlivnit kalibrací. V přírodě většinou voda odtéká nenasycenou zónou půdního profilu, povrchový odtok se uskutečňuje pouze při srážkách extrémní intenzity, kdy je překročena infiltrační kapacita půdy (platí právě v tomto případě), nebo například je-li půda zmrzlá. Tuto skutečnost je potřeba vzít v úvahu. Na obrázku 6-11 je znázorněna separace hydrogramu na jednotlivé složky pro událost z června 1996.

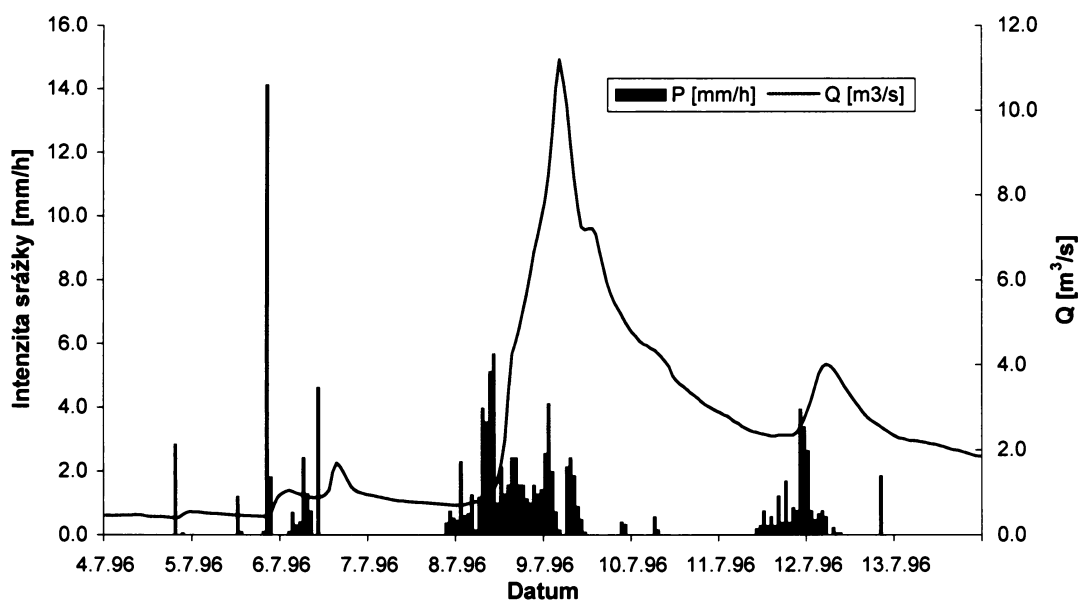


Obr. 6-11: Dílčí složky simulovaného odtoku od 10.6. do 15.6.1996

6.4 SIMULACE LETNÍ POVODŇOVÉ UDÁLOSTI V ČERVENCI 1996

6.4.1 Synoptické příčiny a průběh povodně

Povodňová událost v červenci roku 1996 je příkladem povodně způsobené regionálními dešti delšího trvání a poměrně vysoké intenzity. V první části tohoto období, byla střední Evropa pod vlivem tzv. jihozápadní anticyklonální situace SWc₂ a SWc₃ (BRÁDKA et al., 1961), kdy od jihozápadu postupovaly přes Českou republiku jednotlivé frontální systémy, které byly provázeny bouřkami. Srážky spadlé během 5.7. a 6.7. nasýtily půdní profil a způsobily i slabou odtokovou odezvu. Dne 8.7. začala území Čech ovlivňovat brázda nízkého tlaku vzduchu postupující od Středozemního moře směrem k severovýchodu (dráha Vb) a způsobila vydatné srážky, které byly na návětrných stranách hor orograficky zesilovány. Úhrn srážek za celé období činil 119,6 mm (průměr na povodí), 8.7. spadlo dokonce 50,3 mm. To vyvolalo výraznou odezvu při níž kulminační průtok na stanici v Černém Potoce dosáhl dne 9.7. ve 4:36 ráno hodnoty 12,9 m³/s. Příčinná synoptická situace i celý průběh události (obr. 6-12) je velmi podobný katastrofální povodni ze srpna roku 2002.



Obr. 6-12: Hodinové intenzity srážek a hydrogram odtoku povodně od 4.7. do 13.7.1996

6.4.2 Nastavení počátečních podmínek a parametrů simulace

Počáteční podmínky dílčích povodí na počátku simulace dne 4.7.1996 byly nastaveny v okně „Zustände“ v menu „Elementdaten“. Při jejich zadávání jsem opět vycházel z výsledků kontinuální simulace z let 1995 až 2002. Údaje o nasycení jednotlivých komponent jsou obsahem tabulky 6-3.

Komponenta	Stav 3.7.1996
Nádrž intercepce	0 mm
Nádrž podzemní voda	6 mm
Nádrž interflow	0 mm
Nádrž povrchový odtok	0 mm
Nastavení půdní vlhkosti	na 40 % maximální polní kapacity

Tab. 6-3: Počáteční podmínky v povodí dne 3.7.1996

Doby retence povrchového odtoku, interflow a podzemního odtoku byly stejně jako u předchozího období nastaveny na 5, 15 a 100 hodin.

Metody simulace byly zvoleny stejné jako v případě události z června 1996, tedy dvouvrstvý nelineární model půdní vlhkosti s optimalizací parametrů společně s metodou „Interflow Direkt“. Vrstvy půdního profilu byly sloučeny postupem „aggregieren alles“.

6.4.3 Kalibrace

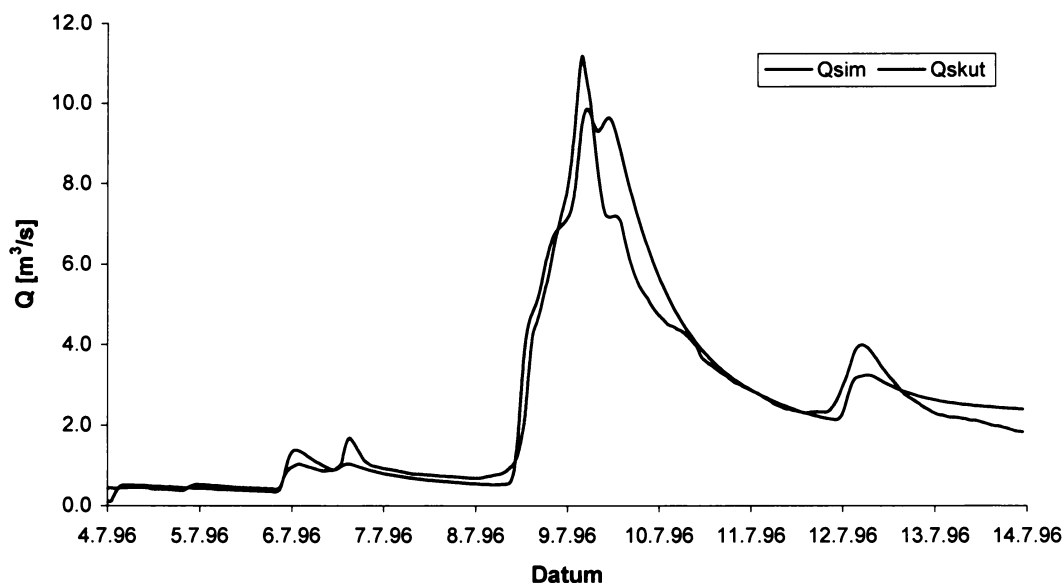
Při kalibraci byla mimo jiné průběžně sledována podobnost s parametry předešlé simulace, aby nedocházelo k výrazným odchylkám. Výsledný kalibrační protokol je zobrazen na obr. 6-13.

Obr. 6-13: Kalibrační protokol simulace 4.7. – 13.7.1996

V kalibraci této události se ještě zvýraznil problém s koncentrací základního odtoku, který tvořil podstatnou část výsledného hydrogramu. Při ponechání původních vstupních hodnot vertikální hydraulické vodivosti se povodňová vlna podstatně zploštila, což bylo způsobeno relativně nižší intenzitou srážek (oproti události z června 1996) a také poměrně malým nasycením půdy předchozími srážkami. Z tohoto důvodu musely být parametry jak vertikální a horizontální hydraulické vodivosti, tak celkového objemu pórů ještě více sníženy. Naproti tomu hodnoty charakterizující retenci jednotlivých komponent odtoku a postupu vody v korytě nemusely být oproti události z června 1996 měněny, protože simulovaný hydrogram vykazoval v tomto ohledu se skutečnou odtokovou křivkou těsnou časovou shodu.

6.4.4 Výsledky modelu

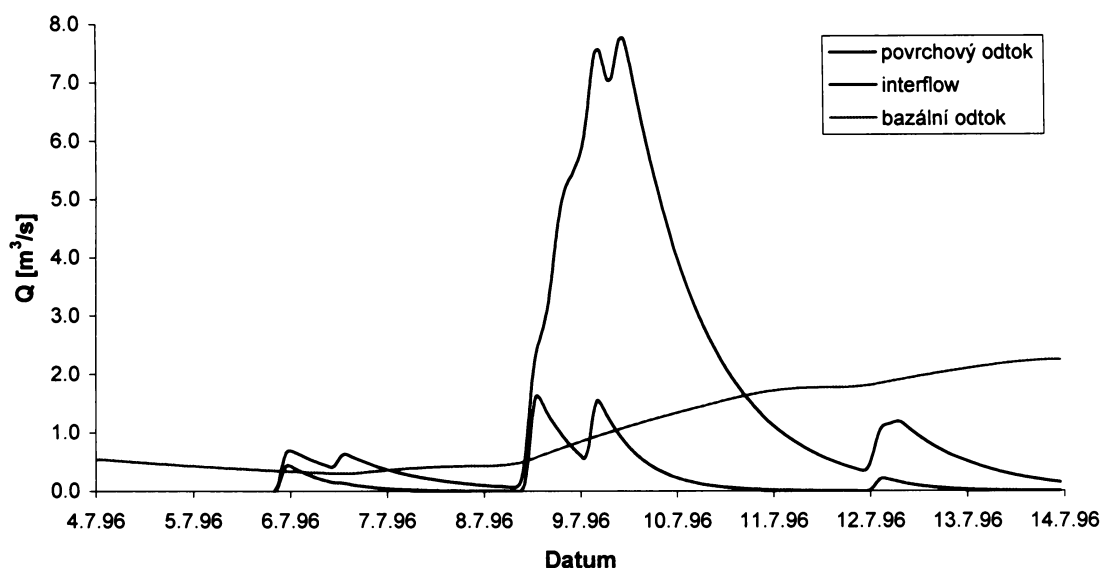
Z prezentovaných výsledků vyplývá poměrně dobrá shoda simulované a skutečné odtokové křivky (obr. 6-14). Koeficient variace má hodnotu 0,14, což je podle kritérií hodnoceno jako „velmi dobrá shoda“, procentní objemová chyba od 4.7. do 14.7.1996 činí 4,61 %.



Obr. 6-14: Skutečný a simulovaný hydrogram odtoku v Černém potoce od 4.7. do 13.7.1996

Drobné rozdíly se vyskytují v případě první vlny srážek. Ty byly velmi intenzivní, a proto hůře modelovatelné. V případě hlavní povodňové vlny mají oba hydrogramy shodný čas nástupu i následné kulminace. Také hodinové maximum průtoku nevykazuje výrazný rozdíl (simulovaných $9,9 \text{ m}^3/\text{s}$ oproti skutečným $11,2 \text{ m}^3/\text{s}$), chyba je 11,9 %. Odchylna nastává až na sestupové větvi hydrogramu. Na modelované křivce jsou vidět dvě maxima, která následují krátce po sobě. Ve skutečnosti bylo maximum pouze jedno a na místě druhého je zřejmá jen určitá změna (zvolnění) poklesu. Tento fakt je podle mého názoru způsoben přece jenom větší kapacitou půdy, než bylo kalibrací dosaženo. Ta se při poklesu intenzity srážek stačí rychleji vyprazdňovat a při jejím dalším zvýšení (v době mezi kulminacemi) přebytečnou vodu pojmout. To se při úpravě příslušných parametrů částečně potvrdilo, došlo tím ale k výraznějšímu poklesu kulminace a objemu povodňové vlny, který se již nepodařilo vyrovnat.

Na obr. 6-15 jsou znázorněny odtokové křivky povrchového a základního odtoku a odtoku z aerické zóny půdního profilu.



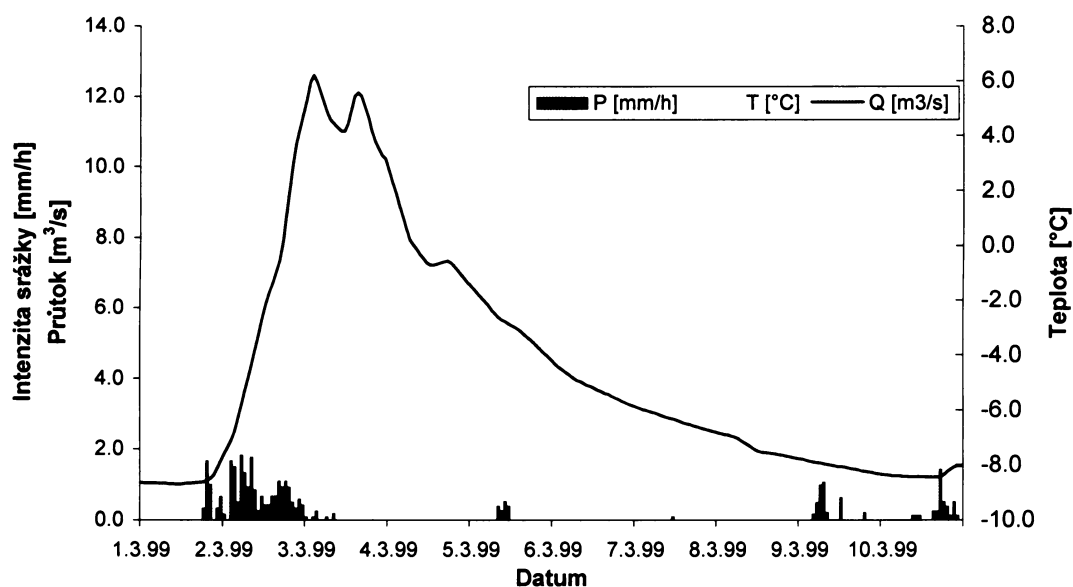
Obr. 6-15: Dílčí složky simulovaného odtoku od 4.7. do 13.7.1996

Separace celkového odtoku do jednotlivých složek tak, jak je znázorněna na obr. 6-15, může podle mého názoru přibližně odpovídat skutečným podmínkám. Intenzita srážky nebyla extrémně vysoká, a proto k povrchovému odtoku docházelo pravděpodobně jen díky překročení nasycení horních vrstev půdy a ani jeho celkový objem nebyl rozhodující. Nejvyšší podíl zaznamenal odtok probíhající v provzdušnělé vrstvě půdního profilu. Bazální odtok začal zvolna stoupat již ve chvíli zvýšení ostatních složek (teoreticky by měl ještě nějakou dobu klesat) a k postupnému snižování docházelo až na konci hlavní vlny.

6.5 SIMULACE JARNÍ POVODNĚ V BŘEZNU 1999

6.5.1 Synoptické příčiny a průběh povodně

Povodeň, která proběhla počátkem března roku 1999, je příkladem povodně způsobené rychlým táním sněhové pokrývky doprovázeného dešťovými srážkami. Na počátku tohoto období byla střední Evropa pod vlivem jihozápadní anticyklonální situace SWc₁ (BRÁDKA et al., 1961) přinášející do Čech srážky, které byly i ve vyšších polohách dešťové. To mělo za následek rychlé tání sněhových zásob, kterých bylo poměrně velké množství (na stanici Klínovec byla 1.3.1999 vodní hodnota sněhu 480 mm). Dne 6.3. začalo být území České republiky pod vlivem tlakové níže, po jejíž zadní straně začal do Čech proudit opět studený vzduch. Celkový úhrn srážek na povodí byl za období od 1.3 do 3.3. sice jen 24,3 mm, díky uvedeným faktorům (společně se zmrzlou půdou) byla ale odtoková odezva výrazná. Kulminační průtok na limnigrafu v Černé Potoce dosáhl dne 3.3. ve 2:18 hodnoty 13,4 m³/s.



Obr. 6-16: Hodinové intenzity srážek, hodinové průměry teplot vzduchu a hydrogram odtoku povodně od 1.3 do 10.3.1999

6.5.2 Nastavení počátečních podmínek a parametrů simulace

Počáteční podmínky ke dni 28.2.1999, při jejichž zadávání jsem vycházel z výsledků kontinuální simulace 1995-2002, jsou obsahem tabulky 6-4.

Komponenta	Stav 28.2.1999
Nádrž intercepce	0 mm
Nádrž podzemní voda	12 mm
Nádrž interflow	0 mm
Nádrž povrchový odtok	0 mm
Nastavení půdní vlhkosti	na 60 % maximální polní kapacity

Tab. 6-4: Počáteční podmínky v povodí dne 28.2.1999

Nepostradatelný význam při zadávání vstupních podmínek měly informace o vodní hodnotě sněhu a výšce sněhové pokrývky (resp. procentního vyjádření poměru těchto dvou hodnot) pro každé dílčí povodí. Jak vyplývá z tab. 6-5, projevila se výrazná závislost mocnosti sněhové pokrývky na nadmořské výšce (v tabulce přibližně platí, že průměrná výška povodí se snižuje se zvyšujícím se ID povodí).

ID dílčího povodí	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Výška sněhové pokrývky [mm]	800	590	590	590	590	420	420	420	420	300	300	50	0
Vodní hodnota/ výška sněhu [%]	18,5	24	24	24	24	33	33	33	33	38	38	40	0

Tab. 6-5: Výška sněhové pokrývky (v mm) a poměr vodní hodnoty sněhu a příslušné mocnosti pokrývky (v %) dne 28.2.1999

Zvolené metody výpočtu (volby simulace) byly stejné jako u předešlých událostí. Použit byl dvouvrstvý nelineární model půdní vlhkosti s optimalizací parametrů s půdními vrstvami sloučenými metodou „aggregieren alles“. Pro interpretaci odtoku v půdě byl aplikován postup „Interflow-Direkt“.

6.5.3 Kalibrace

Kalibrace povodně, která proběhla od 1.3. do 10.3.1999, byla specifická tím, že musely být uvažovány další dva parametry. Prvním z nich byl faktor určující rychlost tání sněhové pokrývky metodou „teplotního indexu“ („Schmelzrate Temp“), druhý pak tentýž faktor, počítaný ale na základě energetických modelů, které zahrnují i množství a intenzitu slunečního záření („Schmelzrate Strahl“). Výsledný protokol je znázorněn na obr. 6-17.

The screenshot shows a window titled "NASIM: Eichung" with a sub-header "Eichprotokoll". It contains a log of simulation steps and a detailed list of calibration factors for selected SE (Schneedeckeneffektivität) parameters. The factors are organized into columns and include values for precipitation, sealing, snow, melt rate, retention, infiltration, and other hydrological parameters. Buttons for "OK", "Abbrechen", and "Übernehmen" are visible at the bottom.

Eichfaktoren für ausgewählte SE:

- Niederschlag: 1.00
- Verdunstung: 1.00
- Versiegelung: 1.00
- Boden:
 - Wetkepunkt: 1.1500
 - Feldkapazität: 1.5000
 - Gesamtporenvolumen: 0.9000
 - Max Infiltration: 1.1000
 - Horiz. Leitfähigkeit: 2.0000
 - Vertik. Leitfähigkeit für:
 - alle Schichten: 0.3000
 - Exfiltrationsschicht: (unchecked)
- Schnee:
 - Schmelzrate Temp.: 0.60
 - Schmelzrate Strahl.: 0.40
- Retentionen:
 - Oberflächeneinfluss: 0.70
 - Interflow: 1.25
 - Basisabfluss: 1.00
 - Versiegelte Fläche: 1.00
- Teilgebiet:
 - Geschwindigkeit: 2.50
 - Pot. Gerinneversick.: 1.00
 - Aue:
 - Leitfähigkeit Gerinne: (empty)
 - Leitfähigkeit Aue: (empty)
 - Standardanfangsbed.: (empty)
 - Inhalt GW-Speicher: 1.00
- Leakage: 1.00
- GW-Tief:
 - Parameter: (empty)
 - Parameter: (empty)
- Interception: 1.00

Buttons: OK, Abbrechen, Übernehmen

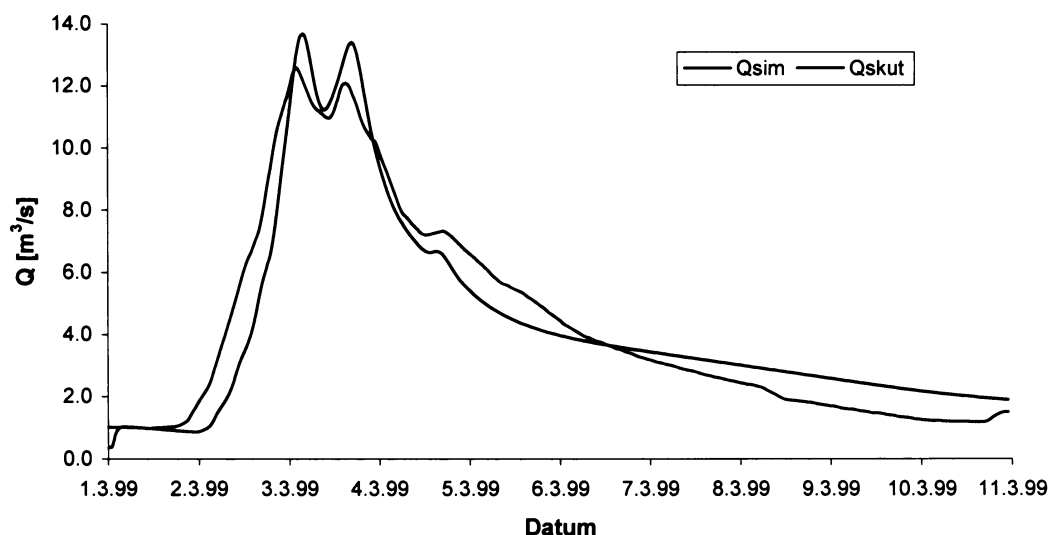
Footer: Eichprotokoll mit den Eintragungen aller Faktoränderungen (editierbar)

Obr. 6-17: Kalibrační protokol simulace 1.3. – 10.3.1999

Vzhledem k tomu, že se jedná o událost způsobenou táním sněhové pokrývky (díky pozitivním teplotám a kapalným srážkám), jsou procesy, které určují odtok, odlišné a výsledné parametry, které byly kalibrací určeny, nabývají oproti předešlým letním simulacím rozdílných hodnot. Nejzásadnější byla změna parametrů ovlivňující rychlost tání sněhu. Zde byly také znovu zohledněny výsledky kontinuální simulace 1995-2002, ze kterých lze zjistit vodní hodnotu sněhu i v dalších dnech (nejen pro den zadávání vstupních podmínek), a je tedy možné srovnat tyto informace s výsledky právě probíhající simulace. Ve srovnání s ostatními simulacemi došlo ke změně parametrů určujících objem pórů v půdě a také faktorů ovlivňujících doby retence komponent odtoku. Podstatně byla například snížena retence u povrchového odtoku – na 3,5 hodiny (v letních simulacích to bylo 5-10 hodin). Podle mého názoru je to způsobeno rozdílnými podmínkami v povodí během zimy, například zmrzlou půdou nebo absencí některé vegetace (nízký porost). Lehce urychlen byl také postup vody v korytě (ze stejných důvodů jako u povrchového odtoku). Parametry, kterých bylo docíleno, nejsou ale podle mého názoru mimo rozsah vymezený okrajovými podmínkami, které se určují s cílem zachování fyzikální podstaty daného procesu.

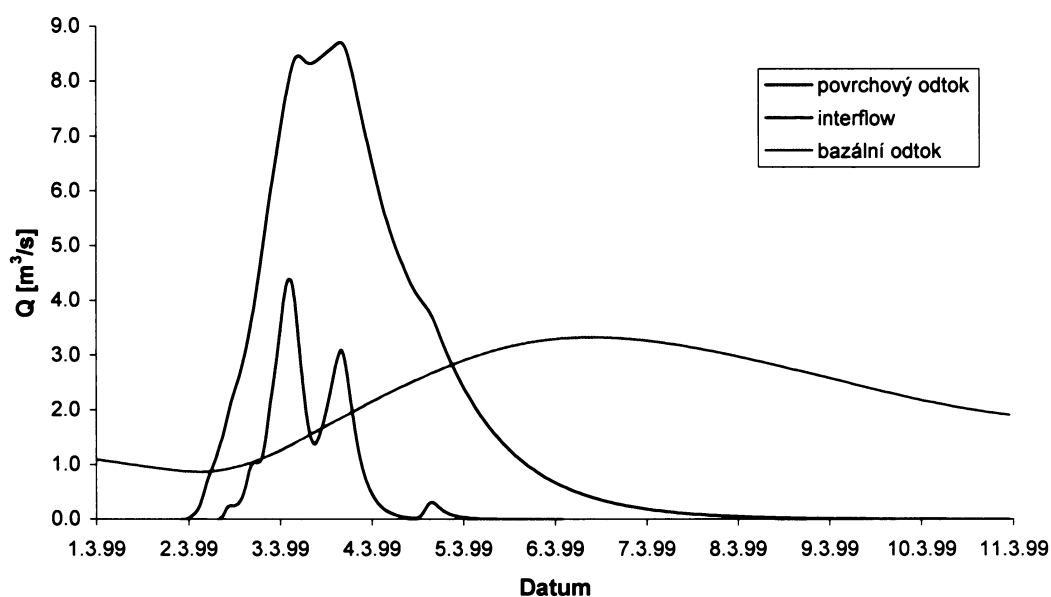
6.5.4 Výsledky modelu

Výsledný hydrogram skutečného i simulovaného odtoku je uveden na obr. 6-18. Kalibrací bylo docíleno uspokojivé shody obou odtokových křivek. Koeficient variace má hodnotu 0,22, což je podle kritérií hodnoceno jako „dobrá shoda“, procentní objemová chyba činí dokonce pouhých 0,7 %.



Obr. 6-18: Skutečný a simulovaný hydrogram odtoku v Černém potoce od 1.3. do 10.3.1999

Nejvýraznější rozdíl obou křivek je pravděpodobně v čase nástupu povodňové vlny. Oproti skutečnému stavu došlo k jejímu zpoždění zhruba o 4 – 5 hodin. Je velmi obtížné odhadnout důvod tohoto zpoždění, možná příčina by mohla spočívat v nepřesném nastavení parametrů, které určují rychlost tání sněhu. Jejich změnou nebylo ale dosaženo významnějšího zlepšení. Jiným důvodem může být také vliv vstupních podmínek, například zmrzlé půdy, což lze jen velmi těžko kalibrací zohlednit. Další vývoj hydrogramu vykazuje poměrně těsnou shodu, chyba kulminace činí 8,7 %. Na sestupové větvi je dobré si všimnout krátkodobého nárůstu průtoku během odpoledne dne 4.3. S největší pravděpodobností se jedná o ukázkou denního chodu průtoku, kdy se vlivem zvýšení teploty a také slunečního záření (na stanici Fichtelberg byl tento den zaznamenán sluneční svit po dobu 2,5 hodin) zvýšila rychlost tání sněhové pokrývky. Zároveň je to nepřímé potvrzení toho, že v tuto dobu ještě ležel v povodí nějaký sníh (jak dokládají výsledky z této epizodní a také z kontinuální simulace, roztál ve střední části povodí poslední sníh právě během 4.3., v nejvyšších polohách se tak stalo až další den). Separované odtokové křivky jednotlivých komponent celkového hydrogramu jsou znázorněny na obr. 6-19.



Obr. 6-19: Dílčí složky simulovaného odtoku od 1.3. do 11.3.1999

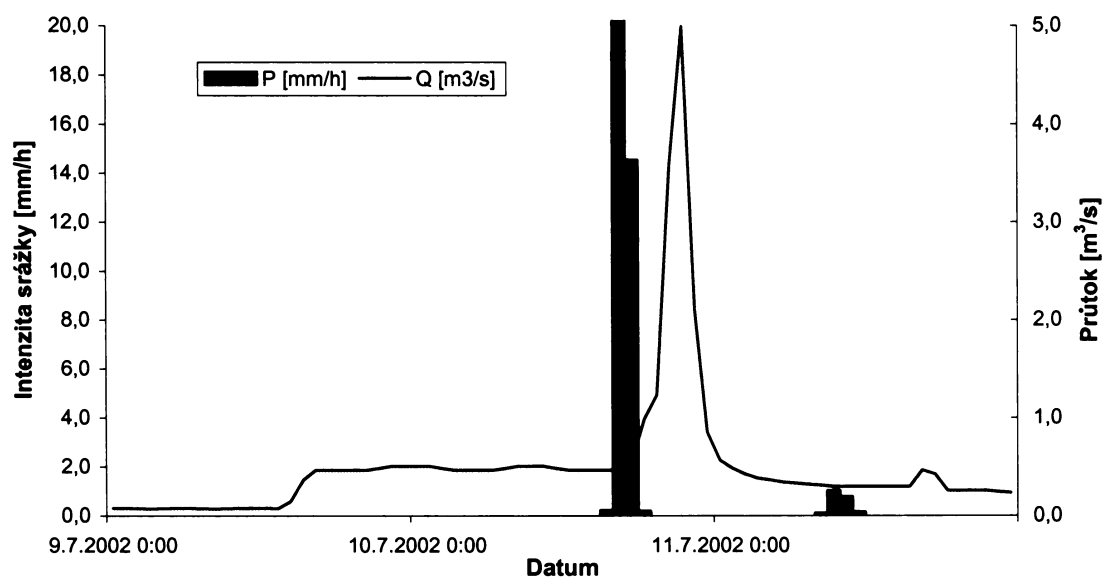
Jednotlivé složky hydrogramu představují podle mého názoru téměř ideální rozdělení charakteristické pro tento typ povodně. Povrchový odtok se uskutečňuje jen v menším množství (není ale nevýznamný) a hlavně v počáteční fázi události, kdy ještě leží sníh a odtok probíhá místy na zmrzlé půdě. Interflow tvoří hlavní část hydrogramu a bazální odtok během hlavní vlny stoupá a svého vrcholu dosahuje až ve chvíli, kdy se povrchový odtok již neuskutečňuje a interflow dosahuje velmi malých hodnot.

6.6 VERIFIKACE MODELU NA UDÁLOSTI Z ČERVENCE 2002

Pro verifikaci nakalibrovaného modelu byla zvolena událost mezi 9.7 a 12.7.2002, při které došlo ke zvýšení průtoku způsobené přívalovou srážkou krátkého trvání.

6.6.1 Synoptické příčiny a průběh povodně

Na počátku období byla Česká republika pod vlivem tlakové výše se středem nad Ukrajinou a po její zadní straně k nám od jihu až jihovýchodu proudil teplý vzduch. Dne 10.7. začala ovlivňovat území Čech brázda nízkého tlaku vzduchu, která se v Krušných horách projevila srážkami velmi krátkého trvání, ale vysoké intenzity. Během dvou odpoledních hodin spadlo na povodí 36,7 mm srážek, na stanicích Měděnec a Jöhstadt byl úhrn ještě vyšší (50,4 mm resp. 49,8 mm). Odtoková odezva na tento přívalový déšť byla velmi rychlá a jak vzestupná, tak poklesová větev hydrogramu se vyznačuje velkou strmostí. Kulminační průtok byl dosažen ve 21:00 hodnotou 7,25 m³/s (v grafu na obr. 6-20 je jen 4,99 m³/s, protože se jedná o hodinový průměr).



Obr. 6-20: Hodinové intenzity srážek a hydrogram odtoku povodně od 9.7 do 12.7.2002

6.6.2 Nastavení počátečních podmínek a parametrů simulace

Počáteční podmínky ke dni 9.7.2002 získané z výsledků dlouhodobé simulace 1995-2002 jsou obsahem tabulky 6-6.

Komponenta	Stav 9.7.2002
Nádrž intercepce	0 mm
Nádrž podzemní voda	1 mm
Nádrž interflow	0 mm
Nádrž povrchový odtok	0 mm
Nastavení půdní vlhkosti	na 15 % maximální polní kapacity

Tab. 6-6: Počáteční podmínky v povodí dne 9.7.2002

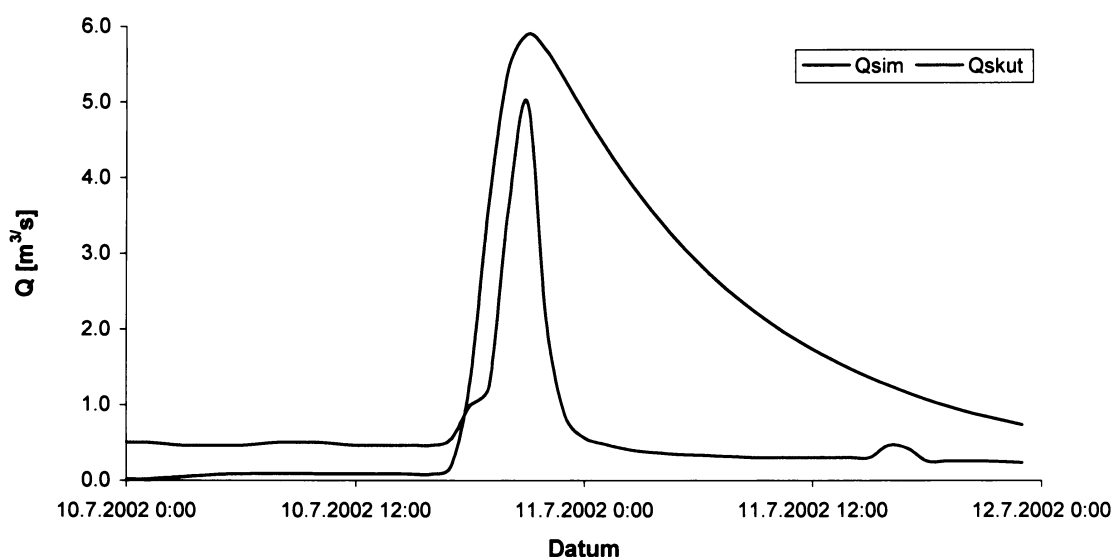
Hodnoty retence podzemního odtoku, interflow a povrchového odtoku zůstaly nezměněny (100, 15 a 5 hodin), stejně tak i volby simulace – dvouvrstvý nelineární model půdní vlhkosti s optimalizací parametrů a „Interflow-Direkt“. Půdní vrstvy byly sloučeny metodou „aggregieren alles“.

6.6.3 Kalibrace

Protože se jedná o verifikační (ověřovací) období, kterým by se měla prokázat správnost dříve nakalibrovaných parametrů modelu, vychází jednotlivé faktory ze simulací z června a července 1996 (parametry simulace z března 1999 nebyly zohledněny, protože se jedná o zimní událost se specifickými podmínkami). U parametrů, které byly u obou kalibrovaných simulací odlišné, byla použita hodnota ležící v intervalu vymezeném těmito hodnotami, s přihlédnutím k charakteru verifikačního období (přívalový déšť krátkého trvání).

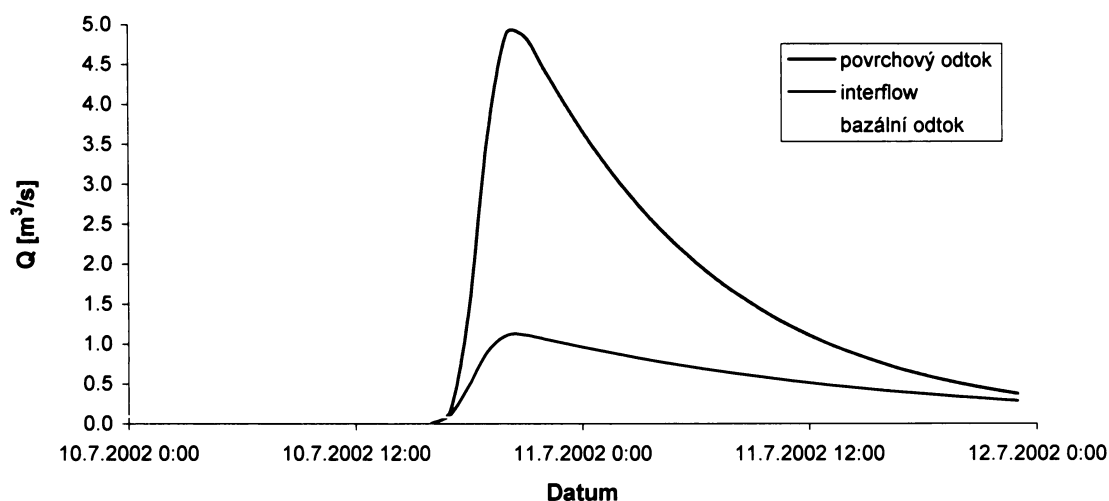
6.6.4 Výsledky modelu

Výsledný hydrogram je uveden na obr. 6-21. Oproti skutečnému hydrogramu je rozdíl již v počátečním průtoku, který je u simulované odtokové křivky nižší. To by bylo možné ošetřit v počátečních podmínkách, poté ale dosahuje simulované vlna vyšší kulminace (v závislosti na vstupních podmínkách až $7 \text{ m}^3/\text{s}$). Čas nástupu vlny je u obou křivek prakticky stejný, také chyba kulminace není vysoká ($1 \text{ m}^3/\text{s}$, což odpovídá 18,3 %). Významný rozdíl je až na poklesové větvi hydrogramu, kdy u simulované křivky dochází k podstatně pozvolnějšimu poklesu. Z velké části je to způsobeno rychlejším povrchovým odtokem, který je v modelu určován na základě vypočítané odezvové funkce povodí – „Zeitflächenfunktion“. Dalším důvodem je otevření převodu do Přísečnice v době po kulminaci (11.7. v 7:00 činil odběr $1,323 \text{ m}^3/\text{s}$), což zapříčinilo skokový pokles průtoku (jez ze kterého je voda odebírána se nachází necelé 2 kilometry nad limnigrafem v Černém Potoce). Právě díky této změně ztrácejí ostatní kritéria shody na relevanci.



Obr. 6-21: Skutečný a simulovaný hydrogram odtoku v Černém potoce od 10.7. do 12.7.2002

Na obr. 6-22 jsou znázorněny složky celkového odtoku. Srážky, které postihly povodí 10.7.2002 byly přívalového charakteru, a proto se odtok uskutečňoval povrchově, a to jednak překročením maximální rychlosti infiltrace některých půd, tak i díky saturaci vrchních vrstev půdního profilu, kde voda nestačila dostatečně rychle perkolovat do hlubších horizontů. Zvýšení bazálního odtoku se v této simulaci vůbec neprojeví, což pravděpodobně neodpovídá skutečnosti, kdy podle mého názoru k mírnému nárůstu dojít mělo. Příčinou je pravděpodobně nízká hodnota vertikální hydraulické vodivosti, díky níž není infiltrující voda předávána hlubším vrstvám půdního profilu. Touto verifikací se potvrzuje poznatek, že je velmi těžké tento parametr odhadnout společně pro povodně způsobené regionálními a přívalovými dešti.



Obr. 6-22: Dílčí složky simulovaného odtoku od 10.7. do 12.7.2002

V přílohové části na konci této práce jsou uvedeny další výsledky z provedených simulací. Jde o charakteristiky různých veličin, které se vztahují ke každému dílčímu povodí. Tyto výsledky byly zpracovány v programu ArcView za pomoci extenze „TG-Ergebnisse“. Z uvedených map je zřejmá prostorová variabilita daného jevu. Konkrétně se jedná o velikost povrchového odtoku a interflow v milimetrech vždy pro den, kdy proběhla kulminace, popřípadě kdy docházelo k hlavnímu vzestupu povodňové vlny (tzn., že byla-li kulminace například ve 2 hodiny ráno, vztahuje se obrázek k předchozímu dni). Příloha 1 charakterizuje událost z června 1996, příloha 2 událost z července 1996, příloha 3 jarní povodeň z března 1999 a příloha 4 verifikační období v červenci 2002. V příloze 5 je zobrazen vývoj maximální vodní hodnoty sněhu ve dnech 1.3., 2.3., 3.3. a 4.3.1999 tak, jak byl modelem NASIM spočítán.

7. DISKUZE

Obecně se problémy a nejistoty spojené s řešením daného hydrologického úkolu pomocí srážko-odtokových modelů dají rozdělit do několika kategorií, které souvisí s jednotlivými fázemi (algoritmem) sestavování modelu:

- výběr vhodného modelu
- shromáždění, validace a interpretace vstupních dat potřebných pro provoz modelu
- volba vhodného měřítka
- výběr metod, kterými lze popsat dílčí procesy srážko-odtokového cyklu
- odhad vstupních a okrajových podmínek simulace
- kalibrace parametrů

Cílem následující kapitoly je charakterizovat uvedené body na základě studia bohatě zastoupené literatury a tyto poznatky poté srovnat s vlastními zkušenostmi získané prací s modelem NASIM.

7.1 VÝBĚR VHODNÉHO MODELU

Výběr vhodného modelu je dán především účelem zpracování dané problematiky. To znamená, že například pro operativní předpověď na velkých povodích použije hydrolog spíše koncepčního distributivního nebo semi-distributivního přístupu, který bude dílčí procesy popisovat ve vztahu k jejich fyzikální podstatě. U menšího (pramenného) povodí se naproti tomu zvyšuje možnost nasazení celistvých modelů a také modelů typu black-box, které nepoužívají fyzikální přístup (viz. např. DAŇHELKA et al., 2002). Výběr modelu ovlivňují i další faktory, jako například stále se rozvíjející vazba na GIS, možnost zapojení dalších programových prostředků, použití radarových odhadů srážek pro operativní běh a samozřejmě také komerční dostupnost modelu.

Použití hydrologického modelu NASIM pro simulaci srážko-odtokových poměrů v povodí Černé vody bylo dáno především nabídnutou možností využít relativně podrobný a zpracovaný koncepční model, který zároveň patří do skupiny těch komerčně hůře dostupných. Tento model v roce 2004 zakoupil institut geografických věd (Institut für Geographische Wissenschaften) berlínské Freie Universität, na které jsem studoval v rámci výměnného programu ERASMUS.

7.2 SHROMÁŽDĚNÍ DAT A MOŽNÉ ZDROJE CHYB A NEJISTOT

Problematicke dat je věnována samostatná kapitola (kap. 5). Při shromažďování datových podkladů je potřeba brát v úvahu nároky modelu na vstupní data. Často totiž nemá uživatel možnost zjistit veškeré informace vztahující se k povodí ať už v důsledku neexistence dat, nebo jejich obtížné dostupnosti (pro operativní využití je také samozřejmě nezbytné, aby data byla okamžitě k dispozici). Z tohoto pohledu je tedy užitečná určitá robustnost modelu (přizpůsobivost daným podmínkám). Příkladem mohou být informace o potenciální evapotranspiraci, která se nejčastěji počítá metodou podle Penmana. Údaje k tomu potřebné (vítr, sluneční záření, atd.) nejsou ale jednoduše dostupné (pokud vůbec). Proto je potřeba najít takové řešení, které využije jen ta data, která může mít hydrolog k dispozici.

V případě modelu NASIM bylo největším problémem získání dat o vlastnostech půdního profilu (zvláště hydrologických – viz. kap. 5). Zatímco ve spolkové zemi Nordrhein-Westfalen, kde byl model vyvíjen, existují digitální informace o půdních druzích a jejich charakteristikách (zvrstvení, polní kapacita, koeficient hydraulické vodivosti, apod.) a jsou jednoduše zpracovatelné do modelu, pro jiná území tato data neexistují, a je proto obtížné je do modelu implementovat (v případě Černé vody to bylo provedeno na základě vlastních měření a rozboru literatury). Dalo by se říci, že informace o půdních datech jsou obecným problémem při aplikaci většiny modelů (model půdní vlhkosti je u koncepčního přístupu nejdůležitější komponentou), a právě proto se na zpracování dat o nich neustále pracuje (u nás např. NOVÁK, 2003). Hydrologické parametry půd tvoří velkou skupinu kalibračních parametrů modelu NASIM, a podle vlastní zkušenosti jejich změna velmi výrazně ovlivňuje výsledný hydrogram. Půdní parametry byly také při kalibraci modelu nejčastěji měněnými. Tato skutečnost by se dala vysvětlit jejich velkou variabilitou, při níž se těžko stanovují obecně platné hodnoty, například, že půdní druh x má koeficient hydraulické vodivosti roven y . Stačí totiž pozměnit míru zhutnění půdy a tentýž koeficient může mít hodnotu o řád jinou. Do jisté míry lze tuto nejistotu snížit podrobným šetřením v terénu, ale ani poté nemusí být výsledek stoprocentní. Z uvedených důvodů byly proto zadané hodnoty (získané z literatury, např. DVWK, 1982, HYDROTEC, 2003A) brány pouze jako orientační. Kalibračními postupy byly tyto charakteristiky dále zpřesňovány (v některých případech se rozpětí pohybovalo až v rozmezí jednoho řádu). Před kalibrací je ale potřeba stanovit určité limitní podmínky, které zaručují zachování fyzikální podstaty jednotlivých procesů. Problém interpretace půdních dat dokládají také Beven (2001), Refsgaard (1997), Kabat et al. (1997) a další.

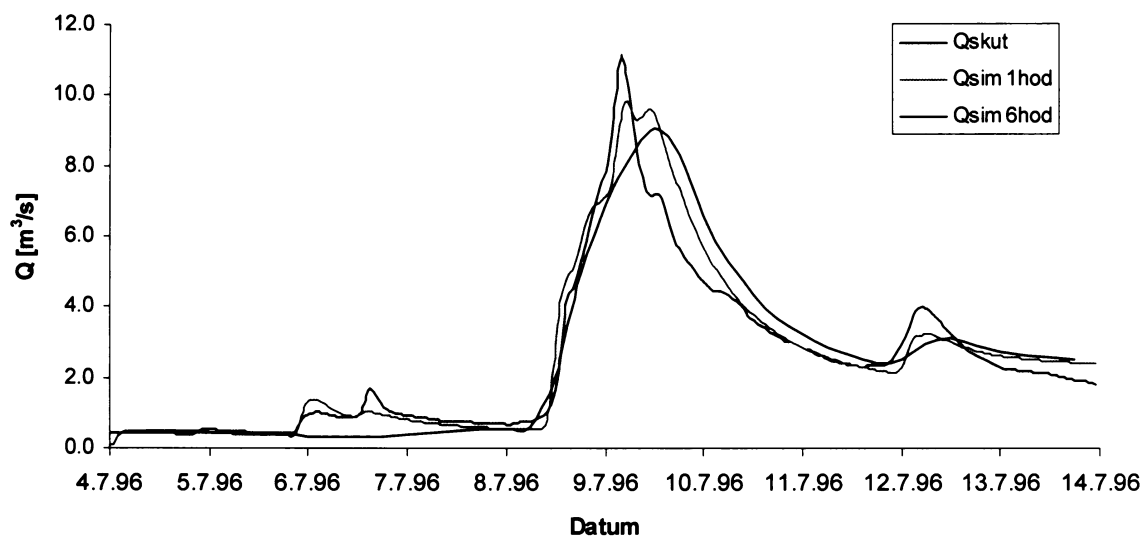
Další nejistoty vznikající při shromažďování a práci s daty vycházejí z podkladů charakteristik koryta, které jsou potřebné pro model postupu vlny. Uživatel zadává pro každé dílčí povodí mimo jiné údaje o reprezentativním profilu koryta a také rychlost proudění v korytě. Měření těchto dat sice není zatíženo nijak velikou chybou (profily byly měřeny totální stanicí, rychlosti pak hydrometrickou vrtulí), nejistoty ale vznikají při výběru „reprezentativního“ místa. Pro správný běh

modelu postupu vlny uvádí Daňhelka (2004) vzdálenost profilů 200 – 500 m. V NASIMu použité vzdálenosti mezi profily vycházely z velikosti dílčích povodí, v průměru se jednalo asi o 1 km. Na druhou stranu moje zkušenosti s použitím modelu ukazují na skutečnost, že změna parametrů koryta nebo rychlosti proudění nemá na výsledný hydrogram takový vliv jako například změna parametrů vztahující se k fázi tvorby odtoku (tedy do té doby než se voda dostane do koryta).

7.3 VOLBA VHODNÉHO MĚŘÍTKA

S problematikou dat souvisí také volba vhodného měřítka, a to jak časového, tak prostorového. Modelování procesů koloběhu vody mezi atmosférou a zemským povrchem vyžaduje znalost chování modelu na změny časového i prostorového kroku. Četné studie např. Finnerty et al. (1997), Koren et al. (1999) nebo Klemeš (1983) dokazují, že při změně prostorového kroku (např. zvětšení pole gridu) dochází ke změně parametrů modelu a ten vyžaduje novou kalibraci. Koren (1999) například testoval různé koncepční modely v rozdílných prostorových krocích a došel k závěru, že při použití stejných parametrů se celkový simulovaný průtok snižuje se zvyšujícím se krokem (u jednoho z testovaných modelů až o 25 %). V případě modelování pouze povrchového odtoku je tento pokles ještě mnohem výraznější (až o 90 %!). Ukázalo se také, že modely, které používají komponentu půdní vlhkosti typu „infiltration-excess“ (povrchový odtok nastává po překročení maximální rychlosti infiltrace), jsou na změny měřítka citlivější než modely typu „saturation-excess“ (k povrchovému odtoku dochází po maximálním nasycení půdy; srážko-odtokový model NASIM kombinuje oba přístupy).

V případě volby časového kroku je potřeba vycházet z mnoha hledisek, jako je účel použití modelu, velikost povodí, dostupnost dat uvažovaného rozlišení a jejich kvalita nebo také rychlost výpočtu (důležité pro operativu). V případě Černé vody byl zvolen krok 1 hodina. Hrubší rozlišení je z hlediska velikosti povodí neopodstatněné (odezva na příčinnou srážku je v řádu hodin; výjimkou byla kontinuální simulace 1995-2002), k jemnějšímu kroku zase nejsou dostupná data (nebo je jejich přepracování na menší časový interval nesmyslné), a proto by jejich užití pravděpodobně nepřineslo významnější zpřesnění. Pro potvrzení této domněnky byla provedena simulace události od 4.7. do 14.7.1996 v časovém kroku 15 min, 30 min, 1 hod a 6 hod. Výsledek výpočtu v kroku 6 hodin ve srovnání se simulací s hodinovým krokem a se skutečným hydrogramem (hodinové průměry průtoku) je uveden na obr. 7-1.



Obr. 7-1: Hydrogram od toku od 4.7. do 14.7 v kroku 1 a 6 hodin ve srovnání se skutečnou odtokovou křivkou

Změní-li se výpočetní krok na 6 hodin, dojde ke zpoždění a také ke snížení kulminačního průtoku povodňové vlny. Zároveň neproběhne odezva na první epizodu srážek dne 6.7. a odezva na srážky spadlé koncem tohoto období (12.7.1996) je také menší a s pozdější kulminací. U jemnějšího časového kroku prakticky nedochází ke změně hydrogramu hlavní povodňové vlny (srážky méně intenzivní, ale trvalé). V případě první srážkové vlny (6.7.), kdy se jednalo o dešť přivalového charakteru, došlo ale k větší odezvě než v případě hodinového kroku. Protože byly tyto srážky velmi intenzivní a model tedy počítal spíše na bázi „infiltration-excess“, potvrzuje se u obou simulací výše popsany závěr, ke kterému došel Koren (1999).

7.4 VÝBĚR METOD VÝPOČTU

Dříve než proběhne výpočet zadává uživatel metody, kterými jsou počítány jednotlivé procesy. Největší možnosti jsou nabízeny při výpočtu modelu půdní vlhkosti (viz. kap 4). Při výběru těchto metod jsem se řídil především doporučeními tvůrců modelu. Přesto byly při kalibraci testovány i ostatní metody a výsledky porovnávány s výstupy podle doporučené metodiky. Hodnocení těchto postupů přesahuje rámec práce a lze odkázat na četné publikace věnující se této problematice, např. Bear (1972), Baumgartner, Liebscher (1996), Beven (2001), Dyck (1978), Maidment (1993) a mnoho dalších.

7.5 NASTAVENÍ VSTUPNÍCH PODMÍNEK

Vstupní podmínky se v NASIMu nastavují pro každé subpovodí v okně „Zustände“. Zadat lze množství vody v nádrži podzemní voda, interflow a povrchový odtok. Je také možné zadat vodní hodnotu sněhu ležící v povodí na počátku simulace a objem vody vázaný intercepční. Nejdůležitější hodnotou je bezesporu nastavení obsahu vody v půdě. K tomu slouží posuvník, na kterém lze nastavit počáteční vlhkost půdy ve vztahu k plní kapacitě nebo kapacitě pórů.

Nastavení počátečních podmínek velmi výrazně ovlivňuje výsledný hydrogram. Je proto důležité tomu věnovat dostatečnou pozornost. Zvláště u epizodní simulace krátkého trvání má nastavení množství vody v půdě výrazný vliv na odtok. Pokud je nastaveno jako malé (například na 30 % maximálního množství vody vázané kapilárními silami) a intenzita deště nepřesáhne maximální infiltrační rychlost, může být všechna voda půdou zachycena a na odtokové křivce se projeví jen mírný nárůst způsobený základním odtokem. Pokud je ale počáteční nasycení vysoké, dojde rychle k naplnění pórů a přebytečná voda odtéká povrchově („saturation-excess“). Proto je vhodné zjistit počáteční nasycení buď přímým měřením (těžko operativně proveditelné), nebo pomocí různých metod (např. API – Antecedent Precipitation Index). V případě simulací epizodních událostí s krátkým časovým krokem (1 hodina) byly jako vstupní data použity výsledky z kontinuální simulace 1995-2002 s denním krokem (viz. kap. 6).

7.6 KALIBRACE PARAMETRŮ

Kalibrace parametrů srážko-odtokového procesu je velmi důležitý krok, který má vliv na správný běh modelu. Hlavní teze a postupy jsou popsány v kapitole 6, v této části jsem se pokusil identifikovat nejčastější problémy a nejistoty s kalibrací spojené a porovnat je se závěry jiných autorů, kteří se hydrologickým modelováním zabývali v nejrůznějších pracích a studiích.

Ve srážko-odtokových modelech se obecně vyskytuje mnoho parametrů, které jsou zatíženy určitou mírou nejistoty. Některé se ponechávají v modelu tak, jak byly změřeny, jiné mohou být později upravovány kalibrací. Počet kalibrovaných parametrů bývá různý u různých typů modelů. U lumped modelů jich může být jen několik, u semi-distributivních modelů mohou teoreticky růst exponenciálně podle počtu elementárních ploch (každou plochu lze kalibrovat zvlášť). Příliš mnoho parametrů je problémem především u koncepčních modelů, kdy popis probíhajících procesů vychází z fyzikální podstaty jevu a správnější by bylo brát v úvahu pouze naměřené údaje nebo hodnoty odvozené na základě rozboru literatury. Proto je nezbytné určit si okrajové podmínky, ve kterých se kalibrovaný parametr může pohybovat. Tuto moji zkušenost potvrzují i četné studie, například Beven (1996), Refsgaard (1996) a další, kteří upozorňují na problém „přeparametrizování“. Kokkonen et al. (2001) využil pro modelování odtoku z malého povodí semi-distributivní model, ve kterém kalibroval pouze dva parametry, a to vodní hodnotu sněhu a

rychlost proudění v korytě. Podle vlastních zkušeností je výsledek opravdu velmi závislý na vodní hodnotě sněhu (v NASIMu se tato informace zadává ve vstupních podmínkách), výrazná citlivost na rychlost postupu vody v korytě se naproti tomu nepotvrdila. Lze ale očekávat, že se tak bude dít při zvětšující se ploše povodí. Pokud jde o časovou složku, je potřeba spíše kalibrovat doby retence dílčích komponent odtoku. Refsgaard (1996) doporučuje při parametrizaci postupovat následujícím způsobem:

- třídy parametrů (půdní druhy, vegetace, atd.) by měly být nastaveny tak, aby bylo možné jednoduše zjistit parametry, nejlépe z již existujících a dostupných dat
- mělo by být ověřeno, které parametry by se měly kalibrovat a které nemusí. Pro první skupinu by měl uživatel určit hraniční podmínky
- celkový počet kalibrovaných parametrů by u koncepčních modelů měl být co nejmenší, a to z důvodů jak metodologických, tak praktických.

Model NASIM umožňuje kalibrovat 22 parametrů, v případě zahrnutí procesů v údolní nivě a proudění podzemní vody v hlubších horizontech do výpočtu, je možné zohlednit dalších pět faktorů. Při kalibraci byly ale měněny váhy pouze u 11 parametrů, z čehož se 6 vztahovalo k proudění vody v půdě, tři k retenci, jeden k proudění v korytě a poslední souvisel se ztrátami intercepce. Kromě toho byly při kalibraci události z března 1999 upravovány parametry vztahující se k rychlosti tání sněhu.

Změnou parametrů maximální infiltrace („Max. Infiltration“) a vertikální a horizontální nasycené hydraulické vodivosti („Vertik. Leitfähigkeit“, „Horiz. Leitfähigkeit“) lze určovat metodický přístup k tvorbě povrchového odtoku. Jde o tzv. model „infiltration-excess“ a „saturation-excess“ (viz. JOHNSON et al., 2003, KOREN, 1999). Sníží-li se parametr maximální infiltrace, dojde při intenzivnějších srážkách k jejímu překročení (typ „infiltration-excess“), zmenší-li se naopak váha určující rychlost vertikální, případně horizontální nasycené hydraulické vodivosti, dojde ke tvorbě povrchového odtoku díky rychlejšímu nasycení horních vrstev půdy (typ „saturation-excess“).

Kalibrace uvedených parametrů společně s dalšími faktory ovlivňující vlastnosti půdy (především celkový objem pórů) je často nutná také pro správnou distribuci vody do dílčích komponent odtoku. Různým nastavením vah parametrů je možné ve většině případů docílit jak pouze povrchového odtoku bez zvýšení odtoku bazálního, tak toho případu, kdy veškerá voda odeče pouze základním odtokem. Odhad správného poměru je na zkušenosti hydrologa a v případě kalibrace událostí na Černé vodě byl brán ohled na četnou literaturu (BEVEN, 2001, DAÑHELKA, 2004, DYCK, 1978, REFSGAARD, 1997 a další).

7.7 SMĚRY DALŠÍHO ROZVOJE A UPLATNĚNÍ S-O MODELŮ

7.7.1 Trendy ve využívání různých přístupů

Koncepční hydrologické modely mají dlouhou historii vývoje, ve které se uplatňují jednak modely se soustředěnými parametry a jednak s distribuovanými parametry. Obecně se za přesnější považují modely distribuované, protože zohledňují prostorovou variabilitu parametrů (srážek, teplot, atd.), a tedy lépe reprezentují fyzikální procesy v povodí probíhající, i když práce Obleda et al. (1994), který testoval různou distribuci srážek v experimentálním povodí, tuto domněnku neprokázala. Další výzkum byl například náplní projektu DMIP – Distributed Model Intercomparison Project (REED et al., 2004, SMITH et al., 2004).

Vývoj byl také zaznamenán ve využívání koncepčních modelů oproti modelům typu „black-box“. Daňhelka et al. (2002) uvádí, že výhody fyzikálně strukturovaného (koncepčního) přístupu v operativní hydrologii jsou prokazatelné už od předstihu předpovědi $\Delta t = 6$ hodin. Naproti tomu se v poslední době vyvíjí modely založené na aplikaci neuronových sítí, které jsou zástupci přístupu „black-box“ (viz. např. STARÝ, 2004).

7.7.2 Vazba na geografický informační systém (GIS)

S rozvojem výpočetní techniky a GIS se rozvíjí také jejich vazba na hydrologické modely. V případě NASIMu je toto propojení znát ve spolupráci firem Hydrotec, GmbH, a ESRI, Inc. jejíž výsledkem jsou nejrůznější rozšíření programu ArcView 3.x, ať už pro zpracování vstupních dat („Verschneidung“, „Zfl“), tak k prezentaci výsledků („TG-Ergebnisse“ a „TG-Plots“). Podobné tendence jsou zřejmé i u dalších modelů, jako například HEC-HMS vyvinutý americkou armádou nebo MIKE SHE dánské firmy DHI. Obecně je možné použít nástrojů GIS při řešení následujících úkolů (z části podle Schumanna et al., 2000).

- stanovení elementárních odtokových ploch vyznačujících se homogenními vlastnostmi
- rozdělení povodí na jednotky stejné plochy (pole gridu) a přiřazení reprezentativních hodnot charakterizující tyto elementy.
- určení směrů odtoku či rychlostí povrchového proudění pro každý bod gridu (s použitím DMT)
- odhad stavových charakteristik povodí reprezentující dílčí území na základě nejrůznějších geostatistických metod
- zpřesnění odhadu parametrů vstupující do koncepčního modelu

7.7.3 Využití radarových odhadů srážek a metod DPZ

Aplikace radarových odhadů srážek skýtá v poslední době významné možnosti využití, především pro operativní běh srážko-odtokových modelů, zejména proto, že data jsou dostupná již v průběhu příčinné srážky, a také proto, že oproti standardnímu měření srážkoměry, reprezentují získané hodnoty podstatně menší území. To je využitelné hlavně při předpovídání povodní způsobené přívalovými dešti. Z těchto důvodů se metodám, které jsou vyvíjeny pro odhad množství srážek na základě radarové odrazivosti (tzv. adjustace), přikládá velký význam (viz. např. DAŇHELKA et al., 2002, FINNERTY et al., 1997, BORGA, 2002). Díky charakteru radarových dat se nabízí jejich využití v distribuovaných (grid-based) modelech (DAŇHELKA et al., 2002).

Určité možnosti může mít podle mého názoru také využití dat z dálkového průzkumu Země, a to především informací o vegetačním pokryvu, na kterém závisí doby retence nebo velikost intercepce. Existuje také možnost na podkladech satelitních snímků odhadovat rozložení a množství sněhové pokrývky.

7.8 SHRNUÍ

Aplikací matematických modelů je vytvářen mocný nástroj pro řešení hydrologických úkolů od operativní předpovědi průtoku, přes řešení protipovodňové ochrany, až po vývoj metod, kterými je popisován srážko-odtokový proces. Konceptní model NASIM, který je v této práci využit pro simulaci povodňových událostí, je všestranný model, který lze použít k řešení všech uvedených úkolů (a celé řady dalších). Jeho nasazení ale vyžaduje poměrně velké množství dat, která jsou často těžko dostupná. Navíc je jejich zpracování a následná kalibrace časově velmi náročný proces. V případě malého pramenného povodí je velmi obtížné a prakticky nereálné nasazení pro operativní předpověď (kterou by vydával ČHMÚ). Jediná možnost je, že by s modelem pracovala přímo obec, či sdružení obcí, pro které představují náhlé povodně (obzvláště v horských oblastech) mimořádné nebezpečí. Otázkou ale zůstává, je-li to pro tyto obce ekonomicky únosné a zda existuje naděje, že se investované prostředky vrátí.

Dalším řešením je využít podobný srážko-odtokový model (s pomocí podrobnějšího modelu postupu vody v korytě a v údolní nivě) k vytvoření systému protipovodňových opatření, které by měly za následek zpomalení odtoku a udržení vody v krajině delší dobu, aby nedošlo k okamžitému zvýšení průtoku. Tato možnost je podstatně reálnější a existují projekty které se tímto zabývají (protipovodňová ochrana horního toku Moravy či Orlice a další).

8. ZÁVĚR

Při aplikaci hydrologického modelu NASIM, kterým byly simulovány srážko-odtokové procesy v povodí Černé vody v Krušných horách byly zjištěny následující poznatky:

- základem úspěchu či neúspěchu je výběr vhodného modelu, který musí odpovídat charakteru projektu, tedy účelu zpracování. Je potřeba dopředu vědět, jsou-li data, která model vyžaduje, dostupná, a samozřejmě také zda se čas a peníze investované do modelu a jeho kalibrace vyplatí.
- koncepční model NASIM německé firmy Hydrotec zobrazuje ucelenou představu o jednotlivých komponentách srážko-odtokového procesu. Možnosti jeho využití jsou široké, od operativní předpovědi na velkých povodích, přes koncepce protipovodňové ochrany všech prostorových měřítek, až po podporu systémů krizového řízení nebo výzkum a vývoj metod popisujících hydrologický cyklus. Spíše se zdá, že více možností skýtá při aplikaci na menších povodích (do stovek km²; díky propracovanému půdnímu modelu), na větších povodích by bylo lepší propojit tento model s podrobnějším modelem proudění v korytě a údolní nivě (i když i u NASIMu se jedná o sofistikovanou komponentu).
- mimořádně důležité je nastavení vstupních podmínek, především pak množství vody, které se nachází v povodí v době před simulací, a to jak v půdním profilu, tak v případné sněhové pokrývce.
- alfou a omegou je kalibrace, tedy přizpůsobení parametrů popisující chování systému. V případě povodí Černé vody byla provedena kalibrace na třech událostech náhlého zvýšení průtoku. Bylo zjištěno, že největší vliv na výsledný hydrogram má změna parametrů, které se vztahují k vlastnostem půdního profilu, především pak vertikální a horizontální nasycené hydraulické vodivosti, maximální rychlosti infiltrace a celkového objemu pórů. U koncepčního přístupu je také velmi důležité, aby se kalibrovaný parametr stále pohyboval v intervalu jeho možné fyzikální platnosti.
- v dnešní době stále se rozvíjejících počítačových a informačních technologií je důležité, aby výsledky bylo dále možné zpracovat v prostředí GIS. Stejně tak je důležité, aby se geografických informačních systémů využívalo i k přípravě vstupních podkladů. Model NASIM tohoto bohatě využívá díky nadstavbám programu ArcView 3.x, s jejichž pomocí jsou vytvářeny elementární odtokové plochy, počítány rychlosti a retence povrchového odtoku a v neposlední řadě existuje možnost interpretace výsledků včetně vytváření tiskových sestav.
- díky charakteru povodí Černé vody, které se nachází na severní straně hřebene Krušných hor jen mírně se svažujícího do Německa, se naskýtá možnost realizace takových protipovodňových opatření, která by byla citlivá ke krajině (změna využití půdy, suché

poldry, malé nádrže, atd.) a zároveň by byla schopna zpomalit odtok vody a zvýšit retenční kapacitu povodí.

Na základě prostudované literatury a zkušeností s použitím modelu se dá očekávat, že dosavadní vývoj výzkumu a aplikace hydrologických modelů bude i nadále pokračovat. Pro reprezentaci srážko-odtokového procesu se používá celá řada přístupů (koncepční vs. black-box, distribuované vs. lumped, atd.), které se budou pravděpodobně dále rozvíjet a profilovat pro konkrétní typy hydrologických problémů. Velmi důležité bude v případě operativního nasazení propojení hydrologického modelu s dalšími systémy a databázemi, které slouží pro sběr, přenos a zpracování vstupních dat, jako jsou například srážky nebo informace z automatických hlásných profilů.

9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- BAUMGARTNER, A., LIEBSCHER, H. J. (1996): Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie. In: Lehrbuch der Hydrologie Bd. 1, Gebr. Borntraeger, Berlin-Stuttgart, 694 s.
- BEZVODOVÁ, B., DEMEK, J., ZEMAN, A. (1985): Metody kvartérně geologického a geomorfologického výzkumu. SPN, Praha, 207 s.
- BOUČEK, J. et al. (2003): Vyhodnocení katastrofální povodně v srpnu 2002. VÚV T.G.M., Praha
- BRÁDKA, J. et al. (1961): Počasí na území Čech a Moravy v typických povětrnostních situacích. HMÚ, Praha, 32 s.
- BEAR, J. (1972): Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier publishing, New York, 764 s.
- BECKER, A., SERBAN, P. (1990): Hydrological models for water – resources system design and operation. Operational Hydrology Report No. 34, WMO, Geneva, 80 str.
- BEVEN, K.J. (1996): A discussion of distributed hydrological modelling. In: Abbott, M.B., Refsgaard, J.C. (1996): Distributed hydrological modelling. Kluwer, Dordrecht, s. 255-279
- BEVEN, K. J. (2001): Rainfall-Runoff Modelling, The Primer. John Wiley & Sons, Chichester, 360 s.
- BLÖSCHL, G., GRAYSON, R. (2002): Flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modellierung. In: Wiener Mitteilungen – Band 164 – Niederschlag-Abfluss Modellierung – Simulation und Prognose, Technische Universität Wien, s. 33-55
- BORGA, M. (2002): Accuracy of radar rainfall estimates for streamflow simulation. Journal of Hydrology, 267, s. 26-39
- BUCHTELE, J. (2002A): Úvod k metodám a modelům hydrologických předpovědí. In: Patera, A. et al. (2002): Povodně: prognózy, vodní toky a krajina. ČVUT, Praha, s. 33 - 35
- BUCHTELE, J. (2002B): Okolnosti ovlivňující využití modelů a tendence v uplatňování různých přístupů. In: Patera, A. et al. (2002): Povodně: prognózy, vodní toky a krajina. ČVUT, Praha, s. 51 - 55
- CAMACHO, L.A., LEES, M.J. (1999): Multilinear discrete lag-cascade model for channel routing. Journal of Hydrology, 226, s. 30-47
- CLARKE, R.T. (1973): Mathematical models in hydrology. Irrigation and Drainage paper No. 19, FAO, Rome
- CZUDEK, T. (1972): Geomorfologické členění ČSR, Studia geographica 23, ČSAV, Brno, 137 str.

- DAŇHELKA, J., KREJČÍ, J., ŠÁLEK, M., ŠERCL, P., ZEZULÁK, J. (2002): Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. ČZÚ, Praha, 214 s.
- DAŇHELKA, J. (2004): Metody v operativní hydrologii. Volitelná přednáška na kfgg PřF UK, nepublikováno
- DISKIN, M.H., NASIMOV, N. (1995): Linear reservoir with feedback regulated inlet as a model for the infiltration process. *Journal of Hydrology*, 172, s. 313-330
- DVWK (1995): Regeln 129/1995 – Bodenkundliche Untersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten zur Standortcharakterisierung, Teil 1 – Ansprache der Böden. DVWK, Bonn
- DVWK (1980): Regeln 115/1980 – Bodenkundliche Untersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten meliorationsbedürftiger Standorte, Teil 1 – Grundsprache der Böden. Verlag Paul Parey, Bonn
- DVWK (1982): Regeln 116/1982 – Bodenkundliche Untersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten meliorationsbedürftiger Standorte, Teil 2 – Ermittlung von Standortkennwerten mit Hilfe der Grundsprache der Böden. Verlag Paul Parey, Bonn
- DYCK, S. (1976): *Angewandte Hydrologie, Teil 1: Berechnung und Regelung des Durchflusses der Flüsse*. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 528 s.
- DYCK, S. (1978): *Angewandte Hydrologie, Teil 2: Der Wasserhaushalt der Flußgebiete*. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 554 s.
- DYCK, S., PESCHKE, G. (1983): *Grundlagen der Hydrologie*. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 388 s.
- FINNERTY, B.D., SMITH, M.B., SEO, D.-J., KOREN, V., MOGLEN, G.E. (1997): Space-time scale sensitivity of the Sacramento model to radar-gage precipitation inputs. *Journal of Hydrology*, 203, s. 21-38
- FLEMING, G. (1979): *Deterministic models in hydrology*. Irrigation and Drainage paper, 32, FAO, Rome, 80 s.
- HYDROTEC, GmbH (2003A): *Dokumentation zu Niederschlag-Abfluss Modell NASIM*. Hydrotec, Aachen, 557 s.
- HYDROTEC, GmbH (2003B): *Time View – Dokumentation*. Hydrotec, Aachen, 163 s.
- HYDROTEC, GmbH (2002): *NASIM GIS-Zusatzmodule - Schnittstellen zu Geographischen Informationssystemen*. Hydrotec, Aachen, 48 s.
- JOHNSON, M.S., COON, W.F., MEHTA, V.K., STEENHUIS, T.S., BROOKS, E.S., BOOL, J. (2003): *Applikation of two hydrologic models with different runoff mechanisms to a hillslope*

- dominated watershed in the northeastern US: a comparison of HSPF and SMR. *Journal of Hydrology*, 284, s. 57-76
- KABAT, P., HUTJES, R.W.A., FEDDES, R.A. (1997): The scaling characteristic of soil parameters: From plot scale heterogeneity to subgrid parametrization. *Journal of Hydrology*, 190, s. 363-396
- KLEMEŠ, V. (1983): Conceptualization and scale in hydrology, *Journal of Hydrology*, 65, s. 1-23
- KOKKONEN, T., KOIVUSALO, H., KARVONEN, T. (2001): A semi-distributed approach to rainfall-runoff modelling – a case study in a snow affected catchment. *Environmental Modelling & Software*, 16, s. 481-493
- KOREN, V.I., FINNERTY, B.D., SCHAAKE, J.C., SMITH, M.B., SEO, D.-J., DUAN, Q.-Y. (1999): Scale dependencies of hydrologic models to spatial variability of precipitation. *Journal of Hydrology*, 217, s. 285-302
- KRÁL, V. (1968): Geomorfologie vrcholové oblasti Krušných hor a problém paroviny. *Rozpravy ČSAV, řada matematických a přírodních věd, ročník 78, sešit 9*, Academia, Praha, 53 str.
- KULHAVÝ, Z., KOVÁŘ, P. (2002): Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí. *VÚMOP, Praha*, 123 s.
- KREJČÍ, J., ŘIČICOVÁ, P., ZEZULÁK, J. (2002): Operativní předpovědní systém. In: Patera, A. et al. (2002): *Povodně: prognózy, vodní toky a krajina*. ČVUT, Praha, s. 57 - 84
- MAIDMENT, D.R. (1993): *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, New York
- MATĚJÍČEK, J., HLADNÝ J.: Co je třeba o povodních vědět předem. In: Matějčíček, J., Hladný, J.: *Povodňová katastrofa 20. století na území České republiky*, MŽP, Praha 1999, str. 6 – 18
- NĚMEČEK, J., SMOLÍKOVÁ, L., KUTÍLEK, M. (1990): *Pedologie a paleopedologie*. Academia, Praha, 552 s.
- NOVÁK, P. et al. (2003): *Zpracování digitálních map hydropedologických charakteristik půd České republiky, Závěrečná zpráva*. VÚMOP, Praha
- OBLED, CH., WENDLING, J., BEVEN, K.J. (1994): The sensitivity of hydrological models to spatial rainfall patterns: an evaluation using observed data. *Journal of Hydrology*, 159, s. 305-333.
- O'CONNOR, K. M. (1976): A discrete linear cascade model for hydrology. *Journal of Hydrology*, 29, s. 203-242
- PETRÁNEK, J. (1993): *Malá encyklopedie geologie*. Jih, České Budějovice, 246 s.
- QUITT, E.(1971): *Klimatické oblasti Československa*, *Studia geographica* 16, ČSAV, Brno, 73 str.

- REED, S.M, KOREN, V.I., SMITH, M.B., ZHANG, Z., MOREDA, F., SEO, D-J. and DMIP Participants (2004): Overall distributed model intercomparison project results. *Journal of Hydrology*, 298, s. 27-60
- REFSGAARD, J.C., STORM, B. (1996): Construction, calibration and validation of hydrological models. In: Abbott, M.B., Refsgaard, J.C. (1996): *Distributed hydrological modelling*. Kluwer, Dordrecht, s. 41-54
- REFSGAARD, J.CH. (1997): Parameterisation, calibration, and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 198, s. 69-97
- ROUB, R., PECH, P. (2003): *Hydraulika – příklady*. ČZÚ, Praha, 159 s.
- SCHEFFER, SCHACHTSCHABEL (1992): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 491 s.
- SCHUMANN, A.H., FUNKE, R., SCHULTZ, G.A. (2000): Application of a geographic information system for conceptual rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 240, s. 45-61
- SMITH, M.B., KOREN, V.I., ZHANG, Z., REED, S.M., PAN, J-J., MOREDA, F. (2004): Runoff response to spatial variability of precipitation: an analysis of observed data. *Journal of Hydrology*, 298, s. 267-286
- SOBÍŠEK, B. et al. (1993): *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*. Academia, Praha, 594 s.
- STARÝ, M. (2004): *Užití umělých neuronových sítí v aplikované hydrologii – zkrácená verze habilitační práce*. VÚT, Brno, 40 s.
- SVOBODA, J. et al. (1964): *Regionální geologie ČSSR, díl I – Český masív, svazek 1 – Krystalinikum*. ÚÚG, Praha, 377 s.
- ŠIMBERSKÝ, V. (1967A): *Komplexní průzkum zemědělských půd ČSSR - průvodní zpráva k výsledkům průzkumu v hospodářském obvodu Přísečnice, hospodářství Vejprty, okres Chomutov*. Expediční skupina pro průzkum půd Praha - Suchdol, 29 str.
- ŠIMBERSKÝ, V. (1967B): *Komplexní průzkum zemědělských půd ČSSR - průvodní zpráva k výsledkům průzkumu v hospodářském obvodu Přísečnice, hospodářství Kovářská, okres Chomutov*. Expediční skupina pro průzkum půd Praha - Suchdol, 28 str.
- ŠKVOR, V. (1975): *Geologie české části Krušných hor a Smrčín*. ÚÚG, Praha, 119 s.
- ŘIČICOVÁ, P., KREJČÍ, J. (2002): Využití hydrologických modelů a perspektivy jejich rozvoje u nás. In: *Počasi – moderní předpovědní metody, prevence a snižování následků katastrof*, ČHMÚ, Praha, s. 36-41
- VALENTA, P. (2002): *Přístupy k řešení průchodu povodně širokou inundací*. In: Patera, A. et al. (2002): *Povodně: prognózy, vodní toky a krajina*. ČVUT, Praha, s. 94 – 98

WMO-No. 168 (1983): Guide to hydrological practices, Volume II – Analysis, Forecasting and other application. WMO, Geneva

ZOUBEK, V. et al. (1963): Vysvětlivky k přehledné geologické mapě ČSSR 1:200 000, list M-33-XIII Karlovy Vary. Nakl. ČSAV, Praha, 290 s.

ZOUBEK, V., ŠKVOR, V. et al. (1963): Vysvětlivky k přehledné geologické mapě ČSSR 1:200 000, list M-33-XIV Teplice a M-33-VIII Chabařovice. Nakl. ÚÚG, Praha, 290 s.

10. SEZNAM MAPOVÝCH A DATOVÝCH PODKLADŮ

10.1 MAPY

- Základní mapa ČR 1:50 000, list 01-44 Vejprty, ČÚZK, Praha, 1998
- Základní mapa ČR 1:50 000, list 01-42 Načetín, ČÚZK, Praha, 1998
- Základní mapa ČR 1:25 000, list 01-441 Vejprty, ČÚZK, Praha, 2003
- Základní mapa ČR 1:25 000, list 01-443 Kovářská, ČÚZK, Praha, 2003
- Geologická mapa ČR 1:50 000, list 01-44 Vejprty, ČGÚ, Praha, 1996
- Půdní mapa ČR 1:50 000, list 01-44 Vejprty, ÚÚG, Praha, 1991
- Digitální mapový model území ČR ZABAGED 1:10 000, listy 01-44-07, 01-44-11, 01-44-12, 01-44-16, 01-44-17, 01-44-21, 01-44-22, ČÚZK, Praha

10.2 DATOVÉ ZDROJE

- Srážková a teplotní data ze stanic Klínovec a Měděnec, ČHMÚ
- Srážková a teplotní data ze stanic Fichtelberg, Jöhstadt a Marienberg, Deutsche Wetterdienst
- Srážková a teplotní data ze stanice Přísečnice, Povodí Ohře, s.p.
- Průtoky z limnigrafické stanice Černý potok, ČHMÚ
- Vodní stavy a průtoky z převodu z jezu na Černé vodě do nádrže Přísečnice, Povodí Ohře, s.p.
- Data vegetačního pokryvu CORINE – Landcover, MŽP ČR

11. SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A PŘÍLOH

11.1 OBRÁZKY

Obr. 2-1: Mapa povodí Černé vody	8
Obr. 2-2: Trojrozměrné schéma povodí Černé vody	9
Obr. 2-3: Geologická mapa povodí Černé vody a okolí	10
Obr. 2-4: Severo-jihní geologický řez zájmovým územím	11
Obr. 2-5: Rozšíření půdních typů v povodí Černé vody	13
Obr. 2-6: Mapa vegetačního pokryvu	14
Obr. 2-7: Izohyety ročního průměrného úhrnu srážek ve střední části Krušných hor.....	16
Obr. 2-8: Průměrné měsíční úhrny srážek na stanici Měděnec.....	16
Obr. 2-9: Závislost průměrné roční teploty na nadmořské výšce.....	18
Obr. 2-10: Mapa izolinií průměrných ročních teplot vzduchu na povodí Černé vody.....	18
Obr. 2-11: Potenciální evapotranspirace (podle Haudeho) za hydr. rok 2001 na stanici Fichtelberg v mm/d.....	19
Obr. 2-12: Schéma říční sítě s vyznačením hranice povodí.....	21
Obr. 2-13: Velikost kulm. průtoku a sezonalita výskytu povodní na stanici Černý potok v letech 1975 – 2002	22
Obr. 2-14: Experimentální křivka překročení ročních průtoků za období 1975-2002	23
Obr. 3-1: Klasifikace deterministických modelů	28
Obr. 4-1: Schéma srážko-odtokového procesu	32
Obr. 4-2: Hierarchie prostorových jednotek modelu NASIM.....	35
Obr. 4-3: Dvouvrstvý model půdní vlhkosti.	36
Obr. 4-4: Třívrstvý model normalizace půdních parametrů.....	37
Obr. 4-5: Struktura modelu půdní vlhkosti	38
Obr. 4-6: Hlavní charakteristiky určující množství vody v půdě.....	38
Obr. 4-7: Akumulace, komprese a ablance sněhové pokrývky.....	47
Obr. 5-1: Digitální model terénu povodí Černé vody s vyznačením dílčích povodí a říční sítě	49
Obr. 5-2: Výpočet odezvové funkce povodí v ArcView pomocí extenze „Zfl“	50
Obr. 5-3: Rychlosti povrchového odtoku (v m/s) a doby dotoku v dílčích povodích (v hod).....	52
Obr. 5-4: Část tabulky BODENTYP.dbf s půdními typy a jejich hydrologickými charakteristikami	53
Obr. 5-5: Rozdělení povodí Thiessenovými polygony při počítání MAP	56
Obr. 6-1: Schéma povodí Černé vody v systémovém plánu (NASIM 3.0).....	60
Obr. 6-2: Okno pro zadávání parametrů koryta dílčího povodí (NASIM 3.0).....	60
Obr. 6-3: Správa časových řad v modelu (NASIM 3.0).....	61
Obr. 6-4: Nastavení vstupních podmínek simulace (NASIM, 3.0).....	62
Obr. 6-5: Nastavení parametrů výpočtu (NASIM 3.0).....	62
Obr. 6-6: Výběr výsledných časových řad (NASIM 3.0)	63
Obr. 6-7: Strategie kalibrace parametrů S-O modelu.....	64
Obr. 6-8: Hodinové intenzity srážek a hydrogram odtoku povodně od 10.6. do 15.6.1996	67
Obr. 6-9: Kalibrační protokol simulace 10.6. – 15.6.1996.....	69
Obr. 6-10: Skutečný a simulovaný hydrogram odtoku v Černém potoce od 10.6. do 15.6.1996	70
Obr. 6-11: Dílčí složky simulovaného odtoku od 10.6. do 15.6.1996	71
Obr. 6-12: Hodinové intenzity srážek a hydrogram odtoku povodně od 4.7. do 13.7.1996	72
Obr. 6-13: Kalibrační protokol simulace 4.7. – 13.7.1996.....	73
Obr. 6-14: Skutečný a simulovaný hydrogram odtoku v Černém potoce od 4.7. do 13.7.1996	74
Obr. 6-15: Dílčí složky simulovaného odtoku od 4.7. do 13.7.1996	75

Obr. 6-16: Hodinové intenzity srážek, hodinové průměry teplot vzduchu a hydrogram odtoku povodně od 1.3 do 10.3.1999.....	76
Obr. 6-17: Kalibrační protokol simulace 1.3. – 10.3.1999.....	77
Obr. 6-18: Skutečný a simulovaný hydrogram odtoku v Černém potoce od 1.3. do 10.3.1999	78
Obr. 6-19: Dílčí složky simulovaného odtoku od 1.3. do 11.3.1999	79
Obr. 6-20: Hodinové intenzity srážek a hydrogram odtoku povodně od 9.7 do 12.7.2002	80
Obr. 6-21: Skutečný a simulovaný hydrogram odtoku v Černém potoce od 10.7. do 12.7.2002	82
Obr. 6-22: Dílčí složky simulovaného odtoku od 10.7. do 12.7.2002	82
Obr. 7-1: Hydrogram odtoku od 4.7. do 14.7 v kroku 1 a 6 hodin ve srovnání se skutečnou odtokovou křivkou	87

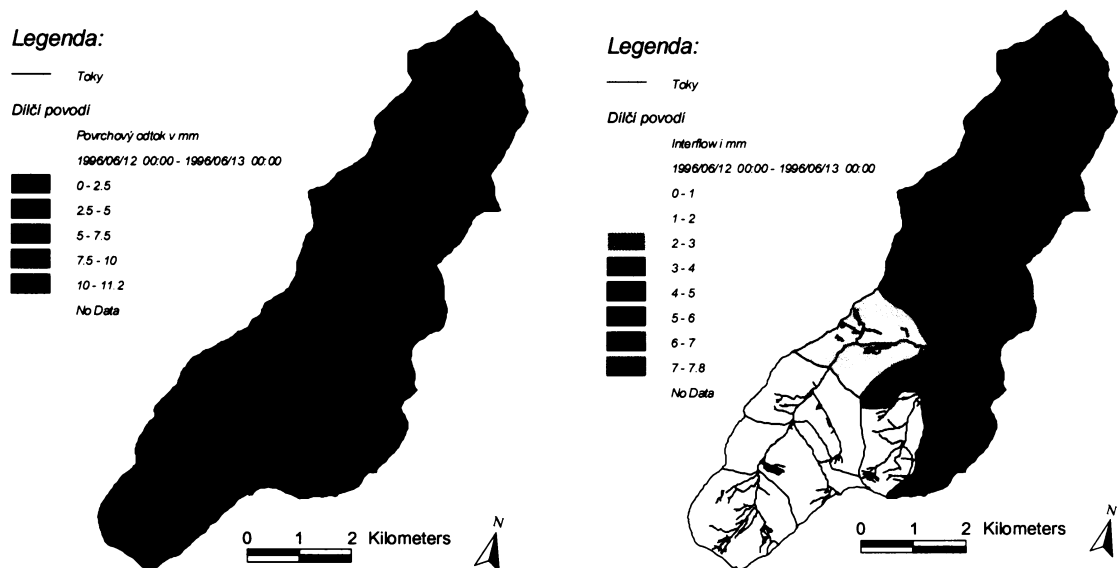
11.2 TABULKY

Tab. 2-1: Maximální denní srážkové úhrny na vybraných stanicích v mm	17
Tab. 3-1: Typy hydrologických systémů	26
Tab. 3-2: Hydrologické procesy a související proměnné použité při klasifikaci modelů	26
Tab. 6-1: Kritéria shody měřeného a vypočteného hydrogramu.....	65
Tab. 6-2: Počáteční podmínky v povodí dne 10.6.1996.....	68
Tab. 6-3: Počáteční podmínky v povodí dne 3.7.1996	72
Tab. 6-4: Počáteční podmínky v povodí dne 28.2.1999.....	76
Tab. 6-5: Výška sněhové pokrývky (v mm) a poměr vodní hodnoty sněhu a příslušné mocnosti pokrývky (v %) dne 28.2.1999.....	77
Tab. 6-6: Počáteční podmínky v povodí dne 9.7.2002	81

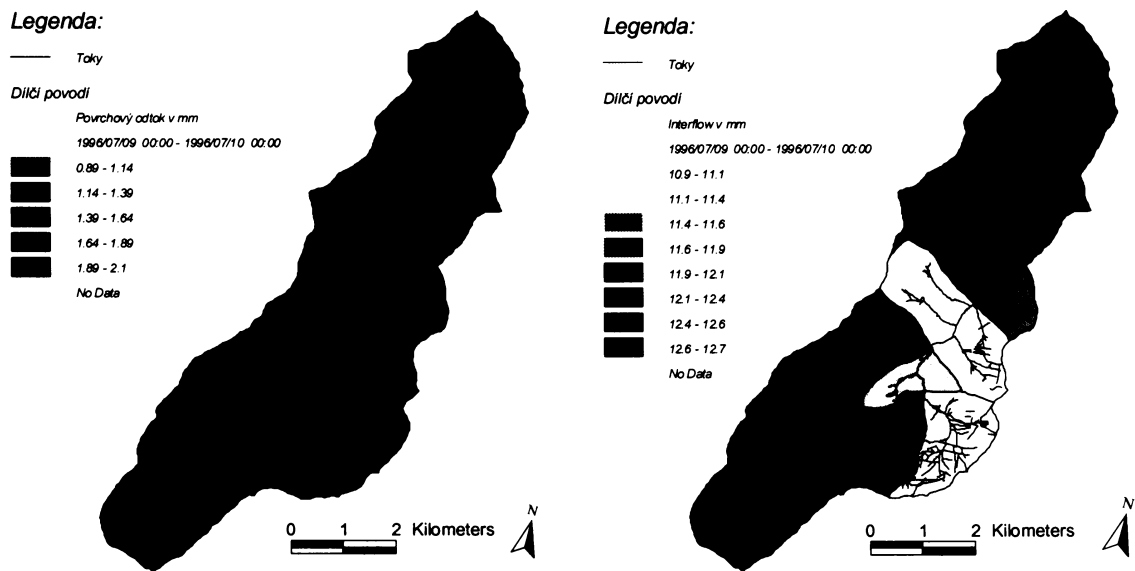
11.3 PŘÍLOHY

Příloha 1: Velikost povrchového odtoku a interflow v mm pro každé dílčí povodí dne 12.6.1996.....	101
Příloha 2: Velikost povrchového odtoku a interflow v mm pro každé dílčí povodí dne 9.7.1996.....	101
Příloha 3: Velikost povrchového odtoku a interflow v mm pro každé dílčí povodí dne 2.3.1999.....	102
Příloha 4: Velikost povrchového odtoku a interflow v mm pro každé dílčí povodí dne 10.7.2002.....	102
Příloha 5: Maximální vodní hodnota sněhu v mm pro každé dílčí povodí ve dnech 1.3., 2.3., 3.3. a 4.3.1999.....	103
Příloha 6: Limnigraf v Černém potoce	104
Příloha 7: Půdní profil (Kambisol podzolovaná)	104
Příloha 8: Nádrž nad jezem.....	104
Příloha 9: Podzemní šachta do Přísečnice.....	104
Příloha 10: Pohled na horní část povodí	104
Příloha 11: Černá voda 2 km od pramene.....	104

PŘÍLOHOVÁ ČÁST



Příloha 1: Velikost povrchového odtoku a interflow v mm pro každé dílčí povodí dne 12.6.1996



Příloha 2: Velikost povrchového odtoku a interflow v mm pro každé dílčí povodí dne 9.7.1996

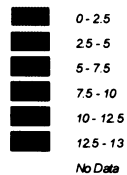
Legenda:

— Toky

Dílčí povodí

Povrchový odtok v mm

1999/03/02 00:00 - 1999/03/03 00:00



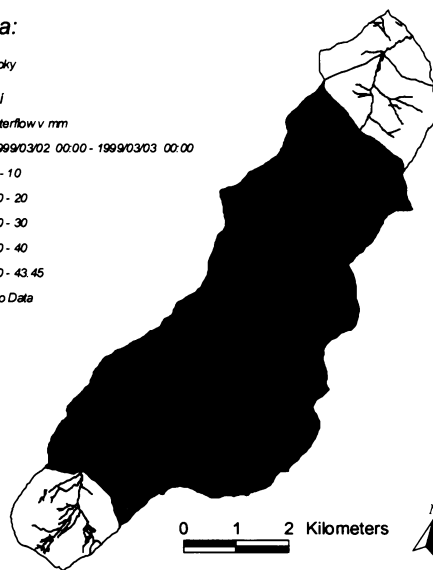
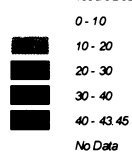
Legenda:

— Toky

Dílčí povodí

Interflow v mm

1999/03/02 00:00 - 1999/03/03 00:00



Příloha 3: Velikost povrchového odtoku a interflow v mm pro každé dílčí povodí dne 2.3.1999

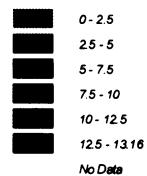
Legenda:

— Toky

Dílčí povodí

Povrchový odtok v mm

2002/07/10 00:00 - 2002/07/11 00:00



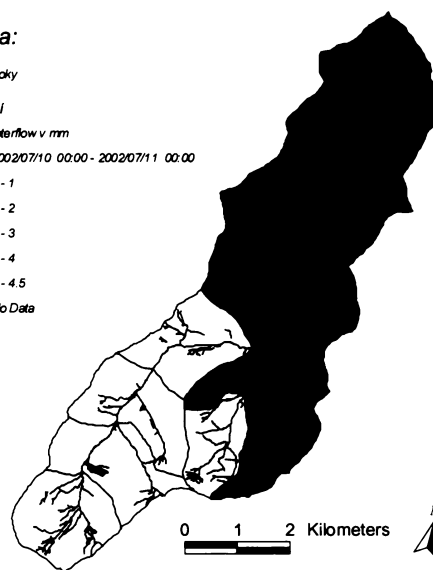
Legenda:

— Toky

Dílčí povodí

Interflow v mm

2002/07/10 00:00 - 2002/07/11 00:00



Příloha 4: Velikost povrchového odtoku a interflow v mm pro každé dílčí povodí dne 10.7.2002

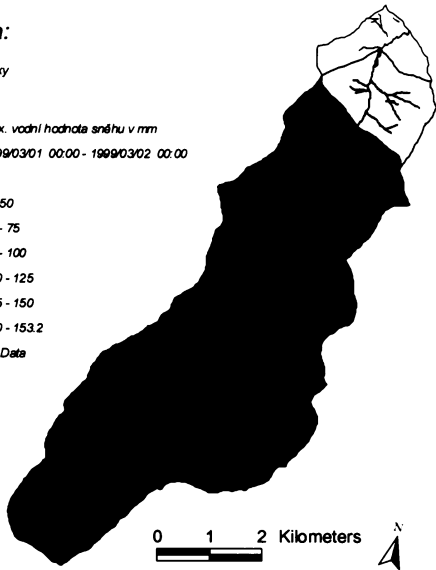
Legenda:

— Toky

Dílčí povodí

Max. vodní hodnota sněhu v mm
1999/03/01 00:00 - 1999/03/02 00:00

0
1 - 50
50 - 75
75 - 100
100 - 125
125 - 150
150 - 153.2
No Data



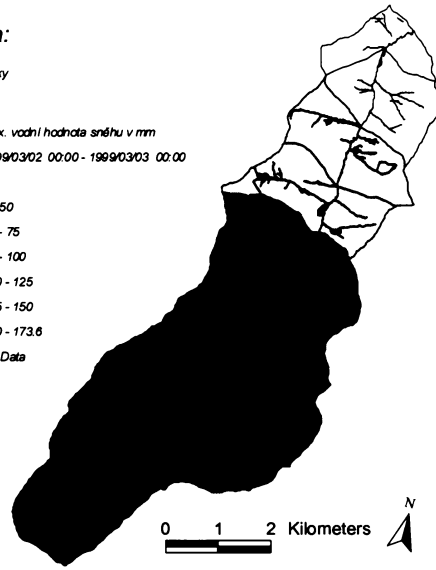
Legenda:

— Toky

Dílčí povodí

Max. vodní hodnota sněhu v mm
1999/03/02 00:00 - 1999/03/03 00:00

0
1 - 50
50 - 75
75 - 100
100 - 125
125 - 150
150 - 173.6
No Data



Legenda:

— Toky

Dílčí povodí

Max. vodní hodnota sněhu v mm
1999/03/03 00:00 - 1999/03/04 00:00

0
1 - 50
50 - 75
75 - 100
100 - 125
125 - 150
150 - 154.67
No Data



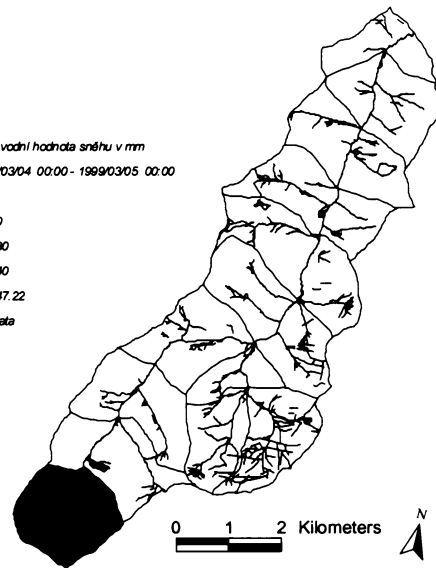
Legenda:

— Toky

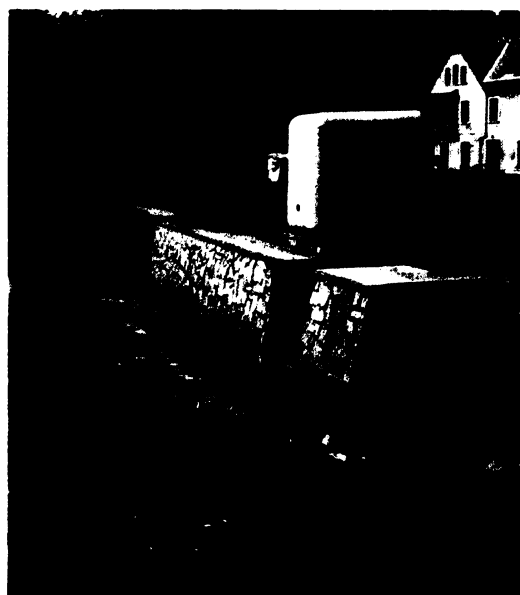
Dílčí povodí

Max. vodní hodnota sněhu v mm
1999/03/04 00:00 - 1999/03/05 00:00

0
1 - 20
20 - 30
30 - 40
40 - 47.22
No Data



Příloha 5: Maximální vodní hodnota sněhu v mm pro každé dílčí povodí ve dnech 1.3., 2.3., 3.3. a 4.3.1999



Příloha 6: Limnigraf v Černém potoce



Příloha 7: Půdní profil (Kambisol podzolovaná)



Příloha 8: Nádrž nad jezem



Příloha 9: Podzemní šachta do Přísečnice



Příloha 10: Pohled na horní část povodí



Příloha 11: Černá voda 2 km od pramene

Foto: autor

