

JIHOČESKÁ UNIVERSITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÝ FAKULTA

Bakalářská práce

Hydrologické modely – rozdíly v nárocích na vstupní data

Piacsek Petr

2011

Poděkování

V první řadě chci poděkovat svým rodičům a blízkým za trpělivost, podporu a pomoc v průběhu celého studia.

Chci také poděkovat své přítelkyni slečně Michaele Martínkové, že mi pomáhala s přepisováním textů a měla se mnou trpělivost.

Dále také chci poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Pavlu Žlábkovi, Ph.D. za konzultace a odbornou pomoc při řešení problematiky, panu Ing. Michalovi Jeníčkovi, Ph.D. za konzultaci a umožnění citování jeho práce, určené jako studijní materiál pro posluchače předmětu „Modelování hydrologických procesů I“

Na závěr chci poděkovat paní Mgr. Haně Pexové za jazykovou korekturu, paní Mgr. Janě Sklářové za pomoc při překladu do anglického jazyka a panu Mgr. Radku Cipínovi, za stylistickou korekturu.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval sám

.....

Abstrakt

Voda je jedním ze základních prvků, které jsou nutné pro život na naší planetě. Stále ovlivňuje naši existenci. Koloběh vody, je základním stavebním prvkem, který ovlivňuje zalidnění Země. Bez vody by těžko mohl vzniknout život tak, jak ho známe nyní. Musíme ale brát v úvahu její obrovskou sílu, pokud se nám její užívání vymkne z rukou. Předpovědi povodní a znalost chování vody v povodí při kritických situacích, je pro minimalizaci škod a následků na lidských životech klíčová.

Ve své práci jsem se rozhodl řešit problematiku hydrologických modelů, díky kterým můžeme zvýšit naše znalosti povodí. Ať již z komerčních nebo bezpečnostních účelů, jsou tyto nabyté zkušenosti velkým přínosem. Těžko bychom mohli například ochránit záplavová území, kdybychom nevěděli, jak a kam se voda při povodních může rozlít a kde postavit protipovodňová opatření. Pokud budeme vědět, jak se chová odtok v klidovém stavu a v následných simulacích v extrémních případech, máme v souboji s vodní silou napůl vyhráno. Voda, stejně jako oheň, je dobrý sluha, ale zlý pán.

Summary

Water is one of the basic elements, which are necessary for the life on our planet. It influences our existence all the time. Circulation of water represents the basic structural element influencing population on the Earth. The life nowadays couldn't be formed without water. However, we have to take in account its gigantic power. Flood forecasting and knowledge about its behaviour during critical situations are necessary for reducing the damages and eliminating casualties.

In my graduation work I have decided to solve a problem of hydrologic models thanks to which we can increase our knowledge of river basins. These acquired experience bring significant contribution to commercial purpose and our safety as well. It would be very difficult to save flooded areas if we didn't know which parts will be flooded and where to built constructions against the floods. If we know how the drain will work in quiet state and in simulations of extreme situations, we will be able to defeat the water. Water like fire can be a good servant but a bad master.

Obsah

1. Úvod	7
2. Koloběh vody	8
2.1. Infiltrace	9
2.2. Transpirace a evapotranspirace	9
2.3. Srážky	9
2.4. Odtok vody z povodí	10
3. Hydrologické modely	12
3.1. Základní klasifikace hydrologických modelů	14
3.1.1. Účel a způsob aplikace	15
3.1.1.1. Modely využívané v operativní hydrologii	15
3.1.1.2. Modely aplikované pro návrhovou a projektovou činnost v oblasti vodního hospodářství	15
3.1.1.3. Modely využívané ve výzkumu	16
3.1.2. Simulovaný hydrologický proces a míra komplexnosti	16
3.1.3. Hloubka a komplikovanost vazeb simulovaného odtoku	18
3.1.3.1 Deterministické modely	18
3.1.3.2 Stochastické modely	22
3.1.4 Rozsah časové a prostorové diskretizace	23
3.1.4.1 Celistvé modely	23
3.1.4.2 Distribuované modely	24
3.1.4.3 Semi – distribuované modely	24
3.1.5 Kontinuita výpočtu	25
3.1.5.1 Kontinuální (continuous) modely	25
3.1.5.2 Událostní (event) modely	25
3.2 Výběr vhodného modelu	25
4. Častěji využívané hydrologické modely	27

4.1 SACRAMENTO.....	27
4.1.1. Hlavní komponenty modelu.....	27
4.1.2 Nároky na vstupní data	28
4.2. MIKE-SHE	28
4.2.1 Komponenty modelu.....	28
4.2.2 Nároky na vstupní data	29
4.3 NASIM (Niaderschlag – Abfluss Simulation Model)	30
4.3.1 Hlavní komponenty modelu.....	31
4.3.2. Nároky na vstupní data	32
4.4 HEC-HMS	32
4.4.1 Hlavní komponenty modelu.....	33
4.4.2 Nároky na vstupní data	33
4.5 HYDROG	34
4.5.1 Hlavní komponenty modelu.....	34
4.5.2 Nároky na vstupní data	35
4.6 HBV	35
4.6.1. Hlavní komponenty modelu.....	36
4.6.2. Nárok na vstupní data	36
5. Méně často využívané hydrologické modely	37
6. Závěr.....	42
7. Přehled použité literatury	43

1. Úvod

Matematická reprezentace srážko – odtokového procesu má dlouhou historii, ale teprve zhruba od 80. let minulého století, díky rozvoji počítačové technologie, se stává významným nástrojem hydrologů a vodohospodářů, ať pro operativní předpověď nebo pro návrhové účely (Jeníček, 2007).

Matematický model srážko – odtokového procesu představuje zjednodušený kvantitativní vztah mezi vstupními a výstupními veličinami určitého hydrologického systému (Daňhelka a kol., 2003).

Modelování je důležitým nástrojem ke studování hydrologického cyklu, a to jak pro jeho současný stav, tak také i pro možné budoucí změny klimatu a využívání půdy. Výsledky hydrologického modelování jsou zvláště důležité pro oblasti vodních zdrojů, eventuelních přírodních katastrof a využití vodní energie (Viviroli, 2003).

2. Koloběh vody

Ze zemského povrchu se stále vypařuje voda, která přechází ve formě vodní páry do atmosféry. Výpar vody, neboli evaporace, se uskutečňuje z vodních povrchů, tj. z moří, jezer, řek a rybníků, ale i z povrchu pevné půdy, sněhu a ledu. Krom toho se na výparu podílí také rostliny. Sají totiž z půdy soustavou kořenů vodu, která se pak vypařuje zejména povrchem listů. Tento výpar se označuje jako transpirace. Souhrn evaporace a transpirace představuje tzv. evapotranspiraci. V bilančních úvahách se někdy zmiňuje ještě intercepce, tj. vypaření atmosferických srážek zachycených na rostlinách (Kopáček, Bednář, 2005).

Voda v přírodě se vyznačuje i při svých velkých hmotách, výjmečnou pohyblivostí, je v neustálém pohybu; jednak se přemísťují vodní masy ve stavu kapalném (i pevném) z výše položených míst do nižších působením zemské tíže, jednak vlivem sluneční energie přecházející ze skupenství tuhého (sublimace) a kapalného (vypařování) v plynné (Krešl, 2001).

Z celé planety s za rok vypaří cca 518 600 km³ vody, z čeho připadá asi 86% na oceány a jen 14% na souš. Totéž množství vody za rok spadne na povrch Země, ovšem cca 79% do moří a 21% na souš (Kopáček, Bednář, 2005).

Hydrologie je vědní obor, pojednávající o zákonitostech časového a prostorového výskytu složek oběhu vody na Zemi a jejich vztazích k různým činitelům. Studuje tedy vodu jako zemskou složku – hydrosféru (Krešl, 2001).



Obr.1 Koloběh vody

2.1. Infiltrace

Infiltrace je součástí koloběhu vody. Jedná se o vsakování vody do půdy a propustných hornin. Infiltrace je vedle kondenzací vodních par v půdě a kondenzací vodních par magmatu nejdůležitějším způsobem vzniku podzemní vody (Pitter, 2009).

Dělíme ji na přirozenou a umělou. Přirozená infiltrace je taková, kdy dochází ke vsakování ze srážek, povrchových vod, sněhu. Za umělou infiltraci se pak považuje vsakování vyvolané umělým zaplavením povrchu země. Umělá infiltrace se využívá při získávání pitné vody, v české republice například v Káraném (Ambrožová, 2007).

2.2. Transpirace a evapotranspirace

Výdej vody rostlinami ve formě vodních par do ovzduší (gutace – výdej vodní páry v kapalném stavu) a tvoří tak nejpodstatnější část celkového výparu.

Je určována komplexem činitelů a představuje celek vzájemně spojených procesů pohybu vody z půdy rostlinou do atmosféry a přechodem vlahy v listu z kapalného stavu do plynného (Krešl, 2001).

Transpiraci ovlivňují především meteorologické faktory výparnosti a faktory fyziologické (regulace otevírání průduchů a pohyb vody rostlinou) a vlhkost půdy, popř. množství dostupné vody pro rostliny (Budagovskij, 1964).

V přírodě probíhá současně výpar jak na plochách s vegetačním krytem, tak i výpar z půdy. Součet těchto jevů nazýváme evapotranspirací (Krešl, 2001).

2.3. Srážky

Primárním vstupem do hydrologické bilance vody v povodí jsou srážky. Srážky jsou výsledkem kondenzace nebo desublimace vodní páry v ovzduší, na povrchu půdy, předmětů a rostlin. Kondenzace je změna skupenství vody v ovzduší z plynného na

kapalné. Desublimace je změna skupenství vody v ovzduší z plynného přímo na pevné (Hrádek, Kuřík, 2002).

Po dopadu srážek na zemský povrch jsou srážky zadržovány pokrývným porostem úměrně mocnosti těchto částí a době trvání srážek. Významnou roli hrají také akumulční prostory povodí – povrchové mikrodeprese, mokřady, nádrže aj. Ta část srážek, která je zachycena na půdním povrchu a na hrabance, je nazývána povrchová akumulace (Krešl, 1999).

2.4. Odtok vody z povodí

Povodí je základní hydrologickou oblastí. Zkoumáme zde odtokové procesy, zjišťujeme vzájemný vztah bilančních prvků (Kuřík, 2001).

Vyjadřuje bilanční rovnicí:

$$O = S - E \pm \Omega,$$

O – odtoková výška,

S – srážky,

E – evapotranspirace,

Ω – množství vody, snižující nebo zvyšující zásoby vody podzemní a podpovrchové.

Podrobnější popis procesu tvorby a rozdělení odtoku na jeho jednotlivé složky je často citován. Podrobné rozdělení rychlé odezvy odtoku na srážky:

1. Povrchový odtok

- Odtok z překročení infiltrace (Infiltration excess overland flow)
- Odtok z překročení nasycení (Saturation excess overland flow)

2. Podpovrchový odtok

- Odtok makropóry a jinými preferenčními cestami (Macropores and other preferential flow paths)

- Odtok mělkou permeabilní vrstvou (Throughflow in a shallow permeable layer)
- Odtok způsobený zvýšením hladiny podzemní vody (Wavelike mobilization of water table)

Mezi pomalé složky odtoku pak patří:

1. nenasycené podpovrchové proudění,
2. proudění podzemní vody.

(Brutsaert, 2005)

3. Hydrologické modely

Hydrologické modelování je definováno jako systém převážně fyzikálních procesů, působící na vstupní proměnné, jež pak transformuje ve výstupní veličiny. V matematickém vyjádření jde o algoritmus řešení soustavy rovnic, které popisují strukturu a chování systému (Clarke, 1973).

Hydrologické modely slouží k analýze prostorově proměnného hydrologického chování námi zvoleného celku. Zvolit správný model může být, pro rozsáhlá povodní obtížné, neboť v takových případech pracujeme s velkým množstvím dat. Nepřesný výběr může vést k nejistotě, která nám přinese jen větší množství práce. Proto je důležité hydrologické modely stanovovat přesně, abychom se vyhnuli těmto problémům. (Shrestha).

Při operativním provozu hydrologických předpovědních modelů lze celý proces rozdělit na tři části :

1. První z nich zahrnuje přípravu a zpracování dat pro běh modelu (sběr dat, primární zpracování a kontrola, zpracování dalších informací o stavu sledovaných ukazatelů, včetně očekávaných změn – např. manipulace na nádržích, předpověď srážek, aj.)
2. Druhou částí je vlastní zpracování předpovědi hydrologických prvků pro zvolené časové období a prostor (bod). Přitom v průběhu výpočtů může docházet k interaktivním zásahům obsluhy modelu (změna stanovených podmínek, operativní změna parametrů, případně odstranění chyb vstupních dat, které nebyly podchyceny v průběhu první fáze)
3. Poslední, třetí fází je interpretace výstupu (předpovědi) pro potřeby jejího dalšího využití, např. pro řízení vodohospodářských systémů, protipovodňových opatření, či ochranu životního prostředí. Výstup modelů může být výstupem pro další aplikace. Údaje o nasycenosti povodí (stavová proměnná srážko – odtokového modelu) jsou využité pro plošně distribuované aplikace, které se snaží posoudit riziko ohrožení území přívalovými povodněmi (flashfloods) nebo pro různé biometrické a

agrometeorologické aplikace, operující s vlhkostními charakteristikami půdy. Použití předpovědí průtoků v hydrologických modelech, simulující zaplavení území v okolí vodních toků za povodní, je dobře známým využitím výstupů těchto modelů. Poněkud zanedbávanou otázkou je však interpretace předpovědi pro laickou veřejnost, ačkoliv v současnosti stále sílí tendence pravidelného uveřejňování operativních předpovědí

(Daňhelka, 2007)

Cílem matematického modelování hydrologických procesů je vyjádření časové nebo časově-prostorové závislosti určených veličin, charakterizujících hydrologický režim modelovaného objektu, tj. povodí nebo jeho část (Kulhavý, Kovář, 2000).

Práce s modely

Pro práci s modely se udávají postupy ve formě pracovních schémat. Vedle základní úlohy při modelování, to je výběru či vytvoření matematického algoritmu užitím vhodných rovnic popisujících pohyb vody a transportu látek, jsou klíčové další důležité okruhy úloh:

1. Správné definování problému (tzn. návrh konceptuálního modelu), který zahrnuje:
 - stanovení cílů modelování
 - vymezení zájmové oblasti, její geometrie, zvrstvení a základní popis prostředí
 - stanovení prostorového měřítka a volba dimensionalit problému
 - stanovení časového měřítka
 - určení sledovaných procesů (přítomnost preferenčního proudění, definice probíhajících chemických procesů a další)
 - zpřesnění cílů modelování
2. Naprosto zásadním úkolem je stanovení seriózních numerických hodnot parametrů hydraulických charakteristik případně dalších charakteristik

zadávaných v simulovaném procesu (podíl preferenčního proudění a jeho charakteristiky, disperzivita apod.).

(Císlerová, Vogel, 2008)

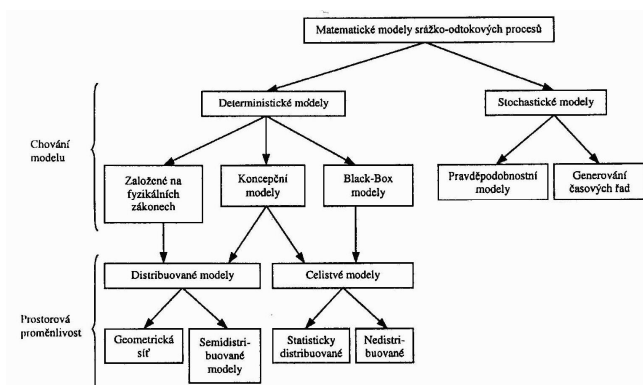
3.1. Základní klasifikace hydrologických modelů

Do dnešní doby byla vyvinuta celá řada modelů, které se od sebe odlišují různými přístupy k jednotlivým komponentům 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 použít při řešení konkrétní problematiky (Jeníček, 2007).

Hydrologické modely můžeme dělit podle:

1. účelu a způsobu aplikace
2. simulovaného hydrologického procesu a míry komplexnosti
3. hloubky a komplikovanosti vazeb
4. požadovaného rozsahu časové a prostorové diskretizace
5. kontinuity výpočtu

(Zeman, 1995)



Obr. 2 Klasifikace hydrologických modelů (Becker, 1988)

3.1.1. Účel a způsob aplikace

Zde můžeme modely rozdělit na tři kategorie:

1. modely využívané v operativní hydrologii
2. modely aplikované pro návrhovou a projektovou činnost v oblasti vodního hospodářství
3. modely využívané ve výzkumu

(Jeníček, 2007)

3.1.1.1. Modely využívané v operativní hydrologii

Vstupní data tvoří, krom stanovených veličin, také údaje z automatických meteorologických stanic a radarů. Data jsou automaticky předávána modelu, prioritou je rychlost zpracování a to především na krátkodobou předpověď vodního stavu či průtoku v určitém profilu. V praxi se jedná o více specializovaných modelů (postup povodňové vlny, proudění podzemní vody), které společně s dalšími programovými prostředky (pro sběr a zpracování dat) tvoří předpovědní systém (FFS – Flood Forecast System)

3.1.1.2. Modely aplikované pro návrhovou a projektovou činnost v oblasti vodního hospodářství

Dlouhodobější řešení protipovodňové ochrany (např. stavba přehrad, poldrů a hydrotechnická či hydromeliorační opatření), ale také použití hydrologických nebo hydraulických modelů užitých při řešení různých technických staveb od plavebních kanálů, čističek odpadních vod (ČOV) až po mosty. Lze také modelovat srážko-odtokové procesy v povodí pro různé vstupní podmínky

(Jeníček, 2007)

3.1.1.3. Modely využívané ve výzkumu

Možnosti dalšího vývoje modelu, výzkum jednotlivých komponent srážko-odtokového procesu a jejich přesnější popis. Pro tyto účely jsou zřizovány tzv. experimentální povodí s nadstandardní sítí stanic (Jeníček, 2007).

3.1.2. Simulovaný hydrologický proces a míra komplexnosti

Toto dělení je úzce spjato s dělením předcházejícím. V zásadě lze modely dle tohoto hlediska (uvažovány jsou pouze modely s relevantním vztahem k našim geografickým podmínkám) rozčlenit na:

- modely sněhové
- modely srážko-odtokového procesu
 - modely půdní vlhkosti
 - jednotkový hydrogram
- modely nádrží
- modely simulující pohyb vody v korytě
 - Hydrologické modely
 - Hydraulické modely
- komplexní systémy řešící komplex hydrologických procesů v povodí (systému)

(Daňhelka, 2007)

U typu procesu, který je modelován, lze rozlišit jedna-li se o model výpočtu půdní vlhkosti, evapotranspirace, proudění podzemí vody, proudění v korytě (postup povodňové vlny), šíření znečištění nebo režim splavenin (Jeníček, 2007).

Tvorba odtoku z povodí se skládá z mnoha elementů, jež nelze ve snaze o komplexní simulaci hydrologického cyklu v povodí vynechat. Toto rozdělení je svým způsobem vžitě, ale není absolutní. Dělení by mohlo být ještě podrobnější, modely však většinou ve svých procedurách integrují vzájemně reagující prvky (Daňhelka, 2007)

Simulovaných položek a elementů procesu odtoku je však celá řada:

1. srážky,
2. teplota,
3. potenciální, resp. aktuální evapotranspirace,
4. akumulace tání sněhu
5. akumulace kapalných srážek ve sněhové pokrývce a její odtok
6. interese na vegetačním krytu a na půdě bez krytu na počátku srážkové aktivity
7. intenzita infiltrace a povrchová retence
8. půdní voda (kapilární a gravitační)
9. proudění pod povrchem terénu (hypodermický odtok)
10. perkolace – proudění vody do hlubších půdních vrstev
11. základní odtok a retence vody ve zvodních
12. přímý odtok (povrchový odtok)
13. koncentrace vody do koryt toků (jednotkový hydrogram)
14. postup vody korytem a transformace hydrogramu v korytě a nivě
15. vliv vodních nádrží
16. odběry vody a další antropogenní ovlivnění odtoku

(Zeman, 1995)



Obr. 3 Struktura a jednotlivé položky aktivit v rámci provozu modelu v reálném čase

Vyjmenované položky můžeme rozdělit do několika skupin :

1. atmosférická skupina (1 až 4)
2. skupina ztrát (5 až 8)
3. skupina proudění (odtoky a proudění) všech forem (9 až 14)
4. antropogenní skupina (15 až 16)

(Zeman, 1995)

Z pohledu dvouúrovňového členění modelování jsou do první skupiny zahrnuty body 1 a 2 a do druhé body 3 a 4 (Becker, Němec, 1984)

3.1.3. Hloubka a komplikovanost vazeb simulovaného odtoku

Srážko-odtokový proces je ovlivňován společným působením deterministických a scholastických vlivů, jejichž míra působení je dána samotnou podstatou přírodních jevů (Kulhavý, Kovář, 2000)

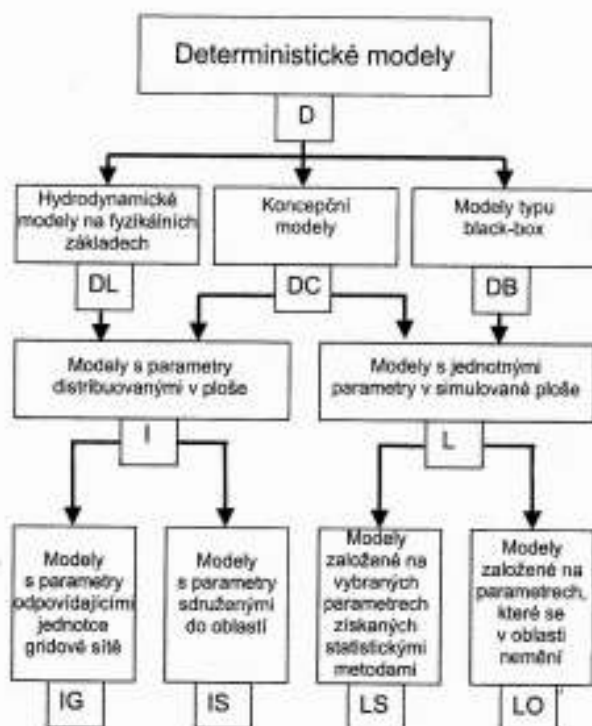
Hydrologické procesy vždy obsahují deterministické a scholastické prvky, a proto musí modely popisující jejich chování obsahovat elementy charakteristické pro oba vstupy (Zeman, 1995).

Přesto však můžeme hydrologické modely rozčlenit dle jejich hlavního principu na deterministické a scholastické.

3.1.3.1 Deterministické modely

Deterministická modely jsou vždy spojovány s časovými proměnnými, pro které neplatí žádné rozdělení pravděpodobností (např. kolem jejich průměrných hodnot) a jejichž vzájemné vztahy (i vztahy k parametrům modelu) jsou ryze příčinné, neboli deterministické (Kulhavý, Kovář, 2000)

Existuje celá řada deterministických modelů, které se od sebe odlišují svojí strukturou, fyzikálním přístupem, či časovou a prostorovou diskretizací (Jeníček, 2007)



Obr. 4 Klasifikace deterministických modelů dle WMO (Becker, Serban, 1990)

Hydrodynamické modely na fyzikálních základech (white box)

Mají přesně definované fyzikální vztahy (termodynamiky, hydrodynamiky, hydrostatiky, chemie, atd.). Na rozdíl od konceptních modelů, je jejich nevýhodou velká složitost systémů a vztahu komplikující operativnost daných modelů (datová a časová náročnost výpočtu) (Daňhelka, 2007).

Tato skupina modelů je reprezentována převážně „hydrodynamickými modely“, představující opačný extrém modelu kybernetických. Modelové přístupy, založené na fyzikálním základě, se snaží respektovat principy zachování hmoty, hybnosti a energie. Patří do kategorie modelů s geometricky rozdělenými parametry (Zeman, 1995)

Pro sestavení a interpretaci hydrologického modelu je nutné mít k dispozici následující informace:

- přírodní zákony, podle kterých proces probíhá a je popsán formou parciálně diferenciálních rovnic (rovnici kontinuity, pohybovou rovnicí, atd.);
- geometrický systém (čtverečnou nebo trojúhelníkovou sít', atd.) potřebný pro diskretizaci diferenciálních rovnic do rovnic diferenčních (tj. numerických);
- numerické schéma umožňující převedení výchozích rovnic do diferenčního tvaru s využitím geometrického systému, uvažovaného v čase poloze;
- potřebné hydrodynamické a hydraulické proměnné a parametry ve výpočtových bodech geometrické sítě;
- počáteční a okrajové podmínky úlohy.

(Kulhavý, Kovář, 2000)

Kybernetické modely

Přístup kybernetického modelování ignoruje změny stavových veličin a zkoumá průběh procesu výhradně z hlediska transformační funkce. Využívá metod systémové analýzy z oboru kybernetiky ke zkoumání chování systému a nezajímá se o strukturu. Uplatňuje se proto u hydrologických systémů s jednotným chováním a jednoduchou strukturou, ale pouze tam, kde kromě vstupních dat jsou alespoň z části známé odpovídající údaje výstupní, aby z jejich vzájemného vztahu bylo možné funkci chování identifikovat (Kulhavý, Kovář, 2000)

V jejich případě jsou vztahy dány empirickým odvozením bez definování přesných hydrologických vztahů a parametrů uvnitř systému. Vzhledem k empirickému odvozování příčin a následků jsou tyto modely závislé na datových setech pro toto odvození, vyžadují tedy „častou“ recalibraci. Klasickým zástupcem tohoto typu modelů jsou modely založené na neuronových sítích. Modely tohoto typu dosud nenašly uplatnění v operativní předpovědní praxi, probíhá však jejich výzkum a testování, mimo jiné i v ČR. Jejich nevýhodou je nemožnost operativní kontroly smysluplnosti výstupu a nemožnost zásahů obsluhy do výpočtu (Daňhelka, 2007).

Modely neberou v úvahu řídicí zákony, ale používají jen odvozený empirický vztah mezi vstupními a výstupními veličinami. Procesy probíhající uvnitř systému zůstávají skryty (odtud pojmenování black-box) (Jeníček, 2005).

Koncepční modely

Tento model vychází z těsného kontaktu s přírodní podstatnou jevu a snaží se získat analogii struktury modelu se strukturou zkoumaného jevu. Pro úspornost řešení a minimalizaci požadavků na zdroje informací o parametrech objektu, vyhýbá se tento přístup prostorovým vztahům ve vyjádření parametrů a předpokládá, že k prostorovým změnám stavových veličin dochází pouze v určených reprezentativních bodech objektu (Kulhavý, Kovář, 2000)

Reflektují fyzikální zákony ve zjednodušené (koncepční) formě a obsahuje i určitou dávku empiricky odvozených vztahů (Becker, Serban, 1990).

Díky tomu je zabezpečena dostatečná transparentnost chování systému z pohledu obsluhy, které může na základě svých zkušeností a dalších, v modelu nezohledněných či příliš schematizovaných informací, ovlivnit výsledek modelu. Mezi koncepční modely patří naprostá většina operativně předpovědních modelů (Daňhelka, 2007).

Užívají se k simulování různých hydrologických režimů povodí a podle účelu volíme i délku časového kroku Δt . Pro účely modelování hydrologické bilance se obvykle volí $\Delta t \geq 1$ den, pro účely modelování jednotlivých krátkodobých hydrologických procesů je voleno Δt kratší podle charakteru simulovaného procesu (Kulhavý, Kovář, 2000).

Popisují hlavní procesy hydrologického cyklu (Becker, Serban, 1990).

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 (Jeníček, 2007).

V kontextu koncepčních modelů nás zajímají procesy:

- povrchové – intercepce, evapotranspirace, povrchová retence a akumulace v mikro a makro depresích, formování povrchového odtoku a svahový odtok, atd.

- podpovrchové – infiltrace, půdní odtok, vláhová dynamika, proudění podzemní vody, tvorba základního odtoku, atd.
- korytové – vznik soustředěného odtoku, transformace odtoku v údolnici atd.

(Kulhavý, Kovář, 2000)

V posledních letech jsou intenzivně rozvíjeny metody „scalingu“, nebo „krigingu“, které na základě geostatistických principů (statistické kovariance a variogramů) umožňují za určitých podmínek aplikace určení „representativních hodnot“ povodí, nebo jeho částí (Maidment, 1993).

Teorie scalingu i krigingu jsou založeny na předpokladu homogenizace dat, získaných z různých míst povodí (např. půdní parametry). Scaling je metoda využívající „váhy“ (scaling factor) měřeného bodu, přičemž bodově měřené hodnoty jsou transformovány s minimalizací jejich rozptylu. Kriging je „váhová“ interpolace plošně měřených hodnot s minimalizací součtu čtverců jejich odchylek (Kutílek, Nielsen, 1994).

3.1.3.2 Stochastické modely

Stochastické modely v hydrologii představují skupinu modelů, které se dají charakterizovat absencí vazeb mezi příčinou a následkem hydrologického jevu v rámci charakterizovaného systému (Zeman, 1995).

Pro potřeby operativní hydrologie lze využít stochastické pravděpodobnostní modely. Ty operují s pravděpodobnostním rozdělením hydrologických funkcí, či prvků (průtok, vodní stav, objem). Rozdělení a funkce jsou nejčastěji charakterizovány statistickými (momentovými) charakteristikami (aritmetický průměr, směrodatná odchylka, součinitel variace a šikmosti aj.). Stochastické modely jsou v hydrologii využívány spíše pro řešení navrhovaných veličin, případně pro dlouhodobé předpovědi, kde klesá vliv aktuálních podmínek (stavových proměnných) v povodí (Daňhelka, 2007).

Pravděpodobnostní modely (SP, Stochastic Probabilistic)

U těchto modelů jsou jednotlivé hydrologické parametry, jako například maximální či minimální průtok, vodní stavy nebo podzemní odtok, charakterizovány určitým pravděpodobnostním rozdělením.

Generování časových řad (ST, Stochastic Time series generation)

Po užití těchto modelů je možné při extrapolaci časových řad pozorovaných parametrů, přičemž se zachovávají jejich statistické charakteristiky. Příkladem mohou být ARMA modely (Autoregressive Moving Average).

(Becker, Serban, 1990)

3.1.4 Rozsah časové a prostorové diskretizace

Hlavním smyslem předpovědních modelů je vystihnout změnu daného hydrologického prvku (průtok, nasycení, odtok aj.) v daném prostoru (profil, povodí aj.) a v čase. Schopnost tohoto dosáhnout je podmíněná také časovou a prostorovou diskretizací modelu (Daňhelka, 2007).

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 (Jeníček, 2007).

3.1.4.1 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 (Jeníček, 2007).

Jsou velmi jednoduché, relativně nenáročné na vstupní data (zejména na jejich kvantitu) a jsou většinou robustnější, s větší stabilitou výpočtu (fatální chyby jsou většinou méně časté, snadněji detekovatelné a odstranitelné) (Daňhelka, 2007).

3.1.4.2 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 (Jeníček, 2007).

Výhodami distribuovaných modelů jsou:

- vystižení prostorové variability hydrologických a meteorologických vstupů. U plošně rozsáhlejší oblasti se při simulacích nelze vyhnout jejich plošné a časové distribuci – průměrná hodnota v takovém případě není dostatečná
- vystižení prostorové variability charakteristik povodí (reliéf, charakteristiky půd a vegetačního krytu, které opět ovlivňují skladbu odtoku a jeho rychlost)
- vystižení prostorové nerovnoměrnosti antropogenních vlivů a dalších procesů v povodí

(Daňhelka, 2007)

3.1.4.3 Semi – distribuované modely

Princip semi-distribuovaných modelů spočívá v rozdělení povodí na elementární odtokové plochy (hydrotopy), které se (na rozdíl 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), jednak třeba respektovat rozdělení územních charakteristik ovlivňující odtokový režim jako například topografii, půdní podmínky, vegetační pokryv nebo hydrogeologii (Becker, Serban, 1990).

3.1.5 Kontinuita výpočtu

Dle způsobu řešení kontinuity je můžeme dělit na kontinuální a událostní modely

3.1.5.1 Kontinuální (continuous) modely

Využívají přenos stanovených proměnných a podmínek z jednoho výpočtu do výpočtu následujícího. Výpočty jsou prováděny pravidelně, prakticky denně, tak aby stanovené proměnné odpovídaly skutečnosti a nedošlo k přerušení kontinuity jejich přenosu

3.1.5.2 Událostní (event) modely

Jsou počítány jen pro povodňové události v délce trvání několika hodin až dní. Počáteční podmínky výpočtu jsou většinou nastaveny jako průměrné, nebo na základě vypočítaných ukazatelů.

(Daňhelka, 2007)

3.2 Výběr vhodného modelu

První numerické simulační modely byly vyvinuty před 35 lety. V posledních patnácti letech byla ve světové literatuře publikována celá řada výpočetních algoritmů na různé úrovni obecnosti. Specifikace existujících modelů je možné najít například v publikacích EPA, většina uvedených informací však rychle stárne. Aktualizovanou nabídku simulačních modelů je vhodnější hledat na Internetu, použitelné webové adresy jsou uvedeny na konci této práce.

Je možné sledovat dva trendy ve vývoji modelů. Na jedné straně jsou vyvíjeny kompaktní modely pro PC, určené pro širokou veřejnost odborníků zabývajících se problematikou proudění vody a šíření kontaminantů v praxi, na druhé straně jsou vyvíjeny komplexní modely pro multiprocesorové superpočítače využívající možnosti vektorových a paralelních procesorů.

V publikacích týkajících se hydrologie a půdní fyziky je možno nalézt celou řadu klasifikačních kritérií simulačních modelů. Místo hledání nejvhodnějšího kritéria, doporučuje se pro aplikaci v inženýrských úlohách při provádění výběru vhodného modelu vybírat v následujících kategoriích:

- čistě deterministický versus stochastický model
- stochastický vs. deterministický s prostorově variabilními proměnnými
- black-box modely vs. modely s různým stupněm rozlišení jednotlivých procesů
- funkcionalistický vs. mechanistický model
- fyzikální vs. empirický model
- výzkumný vs. manažerský model
- rychlostní vs. kapacitní model

Uvedené kategorie znamenají nutnost posuzování problému na nejrůznějších úrovních a podle názoru autorů reprezentují klíčový výběr z existujících, mnohdy rozsáhlých (a často nedokonalých) klasifikačních systémů (Císlarová, Vogel, 2008)

4. Častěji využívané hydrologické modely

4.1 SACRAMENTO

Srážko-odtokový model Sacramento patří mezi nejznámější a nejrozšířenější modely. Lze ho charakterizovat jako koncepční fyzikální model založený na principech pohybu vody v povodí. (Daňhelka, 2007).

Flexibilním koncepčním modelem, sloužící jak pro účely simulace srážko-odtokových epizod (s krátkým krokem), tak i kontinuální hydrologické bilance. Model je poměrně složitý, má 15 parametrů, z nichž některé jsou optimalizovány. Model bývá využíván s uplatněním scénářů klimatických změn (Buchtele, 1994).

Model byl odvozen pro simulaci odtoku z dešťových srážek a často je kombinován s modelem tání sněhu SNOW17 pro použití i v zimním období. Model operuje se soustavou vertikálně a horizontálně uspořádaných zón, resp. nádrží. Voda vstupující do systému je v jednotlivých zónách buď zadržována (např. intercepce), odčerpávána vegetací při evapotranspiračním procesu, pikoluje (infiltruje) do systému níže položených zón, anebo je v podobě šesti různých složek celkového odtoku transportována do říční sítě (Daňhelka, 2007).

4.1.1. Hlavní komponenty modelu

- evapotranspirace
- vázaná (kapilárně vázaná) voda (Tension Water)
- volná voda (Free Water)
- povrchový odtok (Surface Flow)
- horizontální odtok (Lateral Drainage)
- vertikální odtok – perkolace (Vertical Drainage)

Základem půdního modelu je horní a spodní zóna. Obě mohou obsahovat vázanou i volnou vodu. Jakmile se v horní zóně naplní nádrž vázané vody, začne se plnit nádrž obsahující volnou vodu a současně pikoluje do spodní zóny. Po překročení kapacity horní nádrže, začne povrchový odtok. Voda proudící do spodní nádrže plní nejprve její vázanou část a poté i volnou část. Odtok z těchto dvou zón se nazývá základní (bazální) odtok. Celkový odtok je tvořen součtem odtoků ze všech dílčích zón.

(Smith a kol., 2000)

4.1.2 Nároky na vstupní data

Vzhledem k tomu, že se jedná o půdní vlhkostní model, jsou velmi důležitá data vyjadřující hydrologické charakteristiky půdy (obsah pórů, polní kapacita, hydraulická vodivost, apod.) (Jeníček, 2005).

4.2. MIKE-SHE

Srážko-odtokový model MIKE-SHE dánské firmy DHI (Danish Hydraulic Institute) patří do skupiny koncepčních distribuovaných, případně semi-distribuovaných modelů se schopností simulovat jak kontinuálně, tak pouze epizodně. Jedná se o propracovaný model s vazbou na GIS, se kterým je možné řešit širokou škálu hydrologických úkolů, např. analýzu, plánování a řízení v oblasti vodních zdrojů, posuzování vzájemných interakcí mezi povrchovou a podzemní vodou nebo řešení technických zásahů v povodí. Modulární systém umožňuje vývoj a zapojení dalších komponent jako například model šíření znečištění, eroze a transportu sedimentů, řešení zavlažování atd. Protože se jedná o poměrně komplexní modelovací systém, je také často aplikovaný (DHI, 2010).

4.2.1 Komponenty modelu

Srážko-odtokový model MIKE-SHE se skládá z více komponent, které počítají objem a distribuci vody v jednotlivých fázích odtokového procesu (Graham a Butts, 2005).

Srážky (dešťové i sněhové) do modelu vstupují ve formě časových řad ze srážkoměrných stanic, případně mohou být v externích programech (GIS) spočítány charakteristické hodnoty pro jednotlivá pole výpočetního gridu. V případě potřeby si model přizpůsobí vstupní data požadovanému časovému kroku. Systém MIKE-SHE obsahuje také model akumulace a tání sněhu (energetická bilance i degrese-day). Aktuální evapotranspirace a intercepce je počítána z časových řad, pokud jsou uživatelem zadány. Povrchový odtok z povodí je založen na 2D metodě konečných diferencí šíření vlny a využívá stejnou velikost pole gridu jako v případě podzemního odtoku. Podpovrchový odtok v nenasycené zóně půdního profilu počítá proudění v zóně mezi povrchovým odtokem a hladinou podzemní vody. MIKE-SHE zahrnuje několik metod výpočtu od jednoduchého dvouvrstvého modelu, přes gravitační model proudění až po model založený na řešení Richardsovy rovnice. Všechny uvedené přístupy vyžadují zadání specifických vlastností půdy (pórovitost, nasycená hydraulická vodivost apod.). Proto byla vytvořena databáze půd a osevních plodin, která nezbytné hydrologické a hydraulické charakteristiky obsahuje. Model proudění podzemní vody (2D nebo 3D) vychází z modelu MODFLOW a je založený na metodě konečných diferencí. Pro popis postupu vlny v korytě je používána komponenta MIKE11, která je i samostatným ID routing modelem. Samostatný MIKE-SHE poskytuje možnosti simulace postupu vlny například pomocí metod Muskingum a Muskingum-cunge založených na řešení kinematické resp. difuzní formy St. Venantových rovnic (rovnice kontinuity a momentová rovnice) (Jeníček, 2005).

4.2.2 Nároky na vstupní data

Srážko odtokový model MIKE-SHE vyžaduje data, která jsou pro tento typ modelu běžná. Pracuje s ASCII formáty, které jsou lehce editovatelné v běžných textových editorech, případně využívá data z vlastní databáze půd a prostřednictvím GIS nadstaveb zpracovává i prostorová data ve formátu ESRI shapefile. Důležité jsou vlastní data zaměřená přímo v povodí – odebrání půdních vzorků (komponenta proudění v nenasycené zóně), zaměření příčných profilů koryta, výpočet nebo odhad drsnosti součinitelů (MIKE11) nebo získávání analýzou satelitních leteckých snímků (aktuální i historická data vegetačního pokryvu) (Jeníček, 2005).

4.3 NASIM (Niaderschlag – Abfluss Simulation Model)

Srážko-odtokový model NASIM (Niaderschlag – Abfluss Simulation Model) je vyvíjen německou firmou Hydrotec GmbH 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.

NASIM patří do kategorie koncepčních deterministických modelů, využívající semi-distribovaný přístup dělení parametrů a proměnných veličin. Zároveň je také možné zakomponovat i stochastickou složku (pomocí produktu Kludon), a to hlavně při dlouhodobých předpovědích nebo při plánování vodohospodářských staveb.

(Hydrotec, 2003)

Model reprezentuje srážko-odtokový proces pomocí několika samostatných komponent, k jejichž využívání používá celou řadu osvědčených metod (pro sníh temperature – index, pro infiltraci metodu exponenciálního poklesu, pro přímý odtok metodu, která využívá jednotkového hydrogramu, pro odtok v korytě metodu Kalini-Miljukov).

Pro zpracování prostorových dat byly vyvinuty nadstavby ArcView, další komponenty byly vyvinuty například pro zpracování časových řad a výsledků simulací. Nevýhodou modelu pro aplikaci mimo území Německa je skutečnost, že je poměrně těsně vázaná na německé datové zdroje a specifické formáty dat. To do jisté míry ztěžuje, ale však nevylučuje, aplikaci v zahraničí.

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 universitách po celém Německu.

(Schlute a kol., 2007)

4.3.1 Hlavní komponenty modelu

Srážko-odtokový proces je v modelu NASIM reprezentován následujícím způsobem:

- 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.“
- Prostorová distribuce srážek (Belastungsverteilung) – převedení bodových hodnot naměřených srážek na plošné hodnoty reprezentující dílčí povodí (semi-distribovaný přístup), lze v modelu dosáhnout různými způsoby. Jedná se o ruční nebo automatické přiřazení časových řad srážek dílčím povodím nebo je možné využít tzv. srážkový model vyvinutý tvůrci modelu.
- Separace odtoku (Abflusskonzentration) – transport půdní vody v aerické (interflow) a nasycené zóně (bazální odtok) se popisuje pomocí konceptu lineárních nebo nelineárních nádrží. 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. Není-li DMT k dispozici, vychází se při výpočtu povrchového odtoku ze zjednodušené představy o topografii povodí (resp. jeho dílčích částí).
- 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, 2003).

4.3.2. Nároky na vstupní data

V modelu NASIM existují dva typy fyzicko-geografických dat (stavové veličiny a časové řady). Do první skupiny se řadí data, která vyjadřují stav systému (povodí) a před začátkem simulace vstupují do modelu jako relativně neměnná. Jedná se například o digitální model terénu (DMT), elementární odtokové plochy (Elementarfläche, základní odtoková jednotka), časoprostorová funkce (Zeitflächenfunktion, jde o kumulativní funkci odtoku z určité plochy v závislosti na čase), půdní charakteristiky nebo údaje o vegetačním pokryvu. K časovým řadám pak patří meteorologické a klimatologické charakteristiky (srážky, teploty, evapotranspirace) a údaje z limnigrafických stanic v takovém časovém kroku, který odpovídá velikosti povodí (pro malá a střední povodí nejlépe v hodinovém). Při práci s daty je potřeba zohlednit i potenciální chyby, které vznikají při jejich sběru a následném zpracování (Jeníček, 2005).

4.4 HEC-HMS

Model HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) je pokračovatelem známého modelu HEC-1 vyvíjeného od 60. let armádou USA. Jedná se především o celistvý (lumped) model se soustředěnými parametry. Současný intenzivní vývoj ale směřuje k vývoji komponent s distribuovanými parametry. Společně s rozvojem GIS se tak zvyšuje uplatnění a možnosti aplikace modelu. Na počátku devadesátých let se oddělila samostatná vývojová větev, model WMS, který směřuje více k modelům distribuovaným a také modelům, ve kterých se výrazně uplatňuje spolupráce s GIS. Model HEC-HMS je široce používaný srážko-odtokový model, který je možné využít k řešení celé řady hydrologických úkolů. Podstatnou výhodou HMS je, že je jako freeware dostupný na internetu (HEC, 2010).

4.4.1 Hlavní komponenty modelu

Komponenta počítající objem odtoku (Runoff-Volume Model) zahrnuje několik modelů, které má uživatel k dispozici. Jedná se například o metodu SCS CN křivek (Soil Conservation Service Curve Number), která je používána pro výpočet objemu odtoku v závislosti na hydrologických vlastnostech půdy, počátečním stavu nasycení nebo jejího využití. Jiné metody, které je možné v HMS využít jsou například konstantní infiltrace, exponenciální pokles, Green-Ampt metoda nebo SMA (Soil Moisture Accounting).

Komponenta přímého odtoku (Direct- Runoff Model) slouží pro výpočet přímého odtoku (tvořený povrchovým odtokem a rychlým podpovrchovým odtokem). V modelu je použita metoda jednotkového hydrogramu (Unit Hydrograph), případně její nejrůznější modifikace.

V komponentě podzemního odtoku (Baseflow Model) má uživatel na výběr například model lineární nádrže, exponenciálního poklesu nebo jednoduchá metoda konstantního odtoku.

V komponentě korytového odtoku (Routing Model) má uživatel možnost simulovat odtok podle více modelů, například Muskingum, Muskingum-Cunge, Lag model, model kinematické vlny, případně modifikace těchto metod. Každá z těchto metod simuluje průtok v závěrovém profilu, přičemž vstupem je průtok v horním profilu, který je brán jako okrajová podmínka. Většina metod je založena na řešení aproximovaných základních rovnic proudění v otevřených korytech – rovnice kontinuity a momentové rovnice, dohromady označována jako St. Venantovy rovnice.

4.4.2 Nároky na vstupní data

Potřeba vstupních dat je u modelu HEC-HMS podobná, jako u modelu MIKE-SHE. Rozdíl je především v půdních charakteristikách, které se odvíjejí od použité metody

CN křivek. V České republice byla vytvořena databáze půdních typů z hlediska jejich hodnoty CN, která je vztažena k hlavní půdní jednotce podle BPEJ

(Jeníček, 2005)

4.5 HYDROG

Srážko – odtokový model HYDROG byl vyvinut pro potřeby spojitě simulace odtoku z povodí s nádržemi (Starý, 1998).

Při napojení na automatizovaný přenos ze srážkoměrných stanic lze v reálném čase předpovídat průtok v libovolném profilu v povodí. V současné době je systém v provozu například na ČHMÚ v rámci působnosti poboček Brno a Ostrava a na Povodí Labe, s. p., Povodí Ohře, s. p. a Povodí Odry, s. p. (Hysoft, 2010).

4.5.1 Hlavní komponenty modelu

Na schematizaci povodí aplikuje HYDROG teorii grafů, kde hrany představují koryta toku, uzly odběrná místa, místa řízení nebo uzly říční sítě. Plochy grafu pak tvoří povodí nebo jejich části. Charakteristiky, které se k plochám vztahují, jsou považovány za konstantní (Jeníček, 2005).

Půdní model respektuje ztrátu infiltrací podle Hartona. Podzemní odtok je zjednodušen tak, že v určitém časovém okamžiku je počítán jako poměr k celkovému podzemnímu odtoku v závěrovém profilu (vážen podle ploch dílčích povodí). Celkový podzemní odtok je simulován jako jedna nádrž a jeho časový průběh je dále řešen pomocí regresního modelu. Proudění vody v korytě se počítá ze St. Venantových rovnic metodou kinematické vlny. Součástí je i model akumulace a tání pokrývky typu degrese-day. Pro simulaci chování vodních děl používá metodu Runge – Kutta IV (Kašpárek, 2006).

4.5.2 Nároky na vstupní data

Pro model HYDROG jsou potřeba obdobné datové vstupy jako v jiných modelech. V zásadě je tento model vyvíjen pro operativní předpověď a díky tomu klade důraz především na správný vstup a interpretaci srážek. Je také možné využít radarových odhadů nebo lze zakomponovat výstupy meteorologického předpovědního modelu ALADIN. Potřebné jsou i časové řady teplot a vodní hodnoty sněhu. Data je také možné operativně spravovat v databázi Aquabase (součástí hydrologického předpovědního systému Aqualog). Další data tvoří především odtoky z nádrží a přítoky do řešeného povodí (pokud existují). Stejně jako v jiných modelech je třeba stanovit stavové charakteristiky povodí (sklon a drsnost povrchu, půdní charakteristiky atd.) (Jeníček, 2005).

Model HYDROG nevyžaduje kontinuální provoz, je ho tedy možné spustit jen v případě výskytu povodně. Počáteční podmínkou je velikost podzemního odtoku (Kašpárek, 2006).

4.6 HBV

Je součástí modelovacího systému IHMS (Integrated Hydrological Modeling System). Tento koncepční model využívaný jak pro krátkodobé, tak kontinuální simulace odtoku z povodí, není sice v Česku moc rozšířený, je ale v širším měřítku využíván v zahraničí, především v zemích severní Evropy (Primožič a kol., 2008).

Sněhový model výpočtu akumulace a tání sněhu je založen na jednoduché metodě degree-day, který pracuje odděleně pro nadefinované výškové a vegetační zóny. Model půdní vlhkosti je hlavní výpočetní procedurou modelu HBV, která počítá tvorbu odtoku. Je řízena třemi parametry Beta, LP a FC. Beta řídí změnu půdní vlhkosti, LP je hraniční podmínka půdní vlhkosti nad kterou evapotranspirace dosáhne potenciální hodnoty a FC je maximální hodnota obsahu vody v půdě (Daňhelka a kol., 2003).

Mezi klasické datové vstupy patří časové řady srážek, teplot vzduchu, které se používají pro výpočet množství vody ve sněhové pokrývce a k výpočtu aktuální evapotranspirace a potenciální evapotranspirace (obvykle měsíční průměry). Výpočet se provádí v denním nebo i kratším časovém kroku v závislosti na účelu modelu a dostupných dat. Ze stanových veličin je třeba zadat obvyklé údaje o povodí (hydrografické, půdní, vegetační charakteristiky) (Primožič a kol. 2008).

4.6.1. Hlavní komponenty modelu

Je celistvým deterministickým koncepčním modelem se semi-distributivními komponenty. Pracuje v denním časovém kroku, má 3 hlavní složky:

- tání sněhu
- bilance půdních vlhkostí
- celkový odtok a jeho transformace korytem

Hydrologický model HBV je vyvíjen od počátku 70. let ve švédském meteorologickém a hydrologickém institutu.

(Bergström, 1995)

4.6.2. Nárok na vstupní data

Mezi klasické datové vstupy patří časové řady srážek, teplot (používají se pro výpočet množství vody ze sněhové pokrývky a k výpočtu aktuální evapotranspirace) a potenciální evapotranspirace (obvykle měsíční průměry). Výpočet se provádí v denním nebo i kratším časovém kroku v závislosti na účelu modelu. Ze stavových veličin je třeba znát obvyklé údaje o povodí (hydrografické, půdní, vegetační charakteristiky) (Jeníček, 2005).

5. Méně často využívané hydrologické modely

PREVAH

Semi-distribované hydrologické modelování systému PREVAH (PREcipitation-Runoff-EVApotranspiration HRU Model) provádí koncepčně procesně orientovaný přístup a byl speciálně navržen k vysokohorským podmínkám, jejich variabilnímu životnímu prostředí a klimatu. V tomto modelu jsou dány různé nástroje, kterými bylo docíleno uživatelsky pohodlné modelování:

- DATAWIZARD – import a zpráva hydrometeorologických dat
- WINMET – opětné zpracování meteorologických dat
- GRIDMATH – provádění základních operací s rastrovými daty
- FASOIL – vytváření a zpracování Světové mapy kvality půd
- WINHRU – přepracování prostorových dat a shromažďování jednotek hydrologické odezvy (hydrological response units HRU)
- WINPREVAH – vytváření samotného modelu, dochází k vizualizaci dat a hydrogramu
- WIEWOPTIM – vizualizace a postup kalibrace

Stručný přehled současných aplikací PREVAH ukazuje na velkou flexibilitu modelovacího systému, sahajícího od vodní bilance průběhu povodňových vln až k jejich předpovědi.

(Viviroli, 2008)

SWIM

Model SWIM je vyvíjen v Institutu pro výzkum dopadu klimatu v Potsdami (Potsdam Institute for Climate Impact Research, Německo).

Je určen k modelování hydrologického cyklu, eroze, růstu vegetace a transportu živin v povodích na úrovni mezoměřítko. Model SWIM je možné také využít

k modelování regionálních dopadů změn klimatu a vegetace na hydrologické systémy. Je založen na modelech SWAT a MATSALU, ze kterých přebírá některé výpočtové moduly (evapotranspirace, infiltrace, povrchová a podpovrchový odtok atd.).

K reprezentaci povodí používá, stejně jako SWAT, rozdělení na dílčí povodí, které dále dělí na homogenní odtokové plochy (z hlediska land use a půdních vlastností). Pro zpracování prostorových dat slouží nástroj SWIM/GRASS, který je začleněn do GRASS GIS. V České Republice je model používán ústavem hydrodynamiky AV ČER.

(Košková, Němečková, 2009)

WaSiM – ETH

Model WaSiM – ETH (Water flow and Balance Simulation Model) vyvíjený na institutu atmosféry a klimatu švýcarského federálního technologického institutu v Zürichu, je deterministický model používaný pro velký rozsah prostorových měřítek (méně než 1 km² až do 10 tis. km²).

Jedná se o distribuovaný model vyvíjený pro výzkum časové a prostorové variability hydrologických procesů probíhajících v povodí. Model by měl představovat kompromis mezi podrobným fyzikálním popisem povodí a nároky na vstupní data. Jde o univerzální model používaný pro řešení velké části hydrologických problémů.

(Holländer a kol., 2009)

KINFIL

Model Kinfil (Český zemědělská universita v Praze) patří do kategorie modelů distribuovaných, fyzikálně založených na teorii infiltrace přívalových dešťů a transformace přímého odtoku na svazích povodí a v korytě.

Model využívá fyzicko-geografických charakteristik povodí a hydraulických vlastností půdy, které mohou být získány buď přímým měřením nebo analýzou mapových podkladů. Díky tomu může být model aplikován v nepozorovaných povodích.

Model je primárně určen k odvození kulminačních průtoků při variantních simulacích s různými vstupními podmínkami, např.. změna land use (odlesnění, urbanizace atd.). K výpočtu infiltrace model používá fyzikálně založenou metodu Green-Ampt a nepřímo také využívá konceptu CN křivek.

(Kovář, 2006)

DesQ – MaxQ

Hydrologický model DesQ – MaxQ vyvinul prof. Hrádek. Tento model je určen pro stanovení návrhových charakteristik povodňových vln v nepozorovaných profilech malých povodí vyvolaných přívalovými dešti a pro výpočet ovlivnění maximálních průtoků a objemů povodňových vln změnou charakteristik povodí (DesQ – MaxQ, 2010).

WYM (Water Yield Model)

Kontinuálně řeší s denním časovým krokem potenciální retenci aktivní zóny povodí pro aktuální stanovení změn čísla odtokových křivek CN (Williams, La Seur, 1976).

SMD (Soil Moisture Deficit)

Je modelem hydrologických procesů aktivní zóny povodí, sloužící pouze k simulování půdní vlhkosti v denním časovém kroku (Kovář, 1994).

HYRRROM (Hydrological Rainfall – Runoff Model)

Simuluje zjednodušeně hydrologický cyklus v denním časovém kroku. Simuluje evapotranspiraci, dynamiku půdních vlhkostí, přímý a základní odtok. Model má 15 parametrů, z nichž některé jsou automaticky optimalizovány. Struktura modelu nereflexuje příliš fyzikální principy hydrologických procesů, význam parametrů spočívá spíše v robustním určení tzv. efektivního deště (tj. části, tvořící přímý odtok) (Blackie, Eeles, 1985).

BILAN, POBBIL

Jsou to modely, které v měsíčním časovém kroku simulují potenciální evapotranspiraci, územní výpar a celkový odtok z povodí. Rozdíl mezi oběma verzemi podobné struktury modelů spočívá v prioritním využití dat celkového

odtoku (BILAN) nebo dat stavů podzemních vod (z podzemních vrtů – PODBIL). Oba modely mají 5 parametrů, automaticky optimalizovaných. Jsou převážně zaměřeny k simulaci odtokové složky bilance (Kašpárek, Krejčová, 1990-1993).

IHDM (Institute of Hydrology Distributed Model)

Fyzikálně založený, distributivní (dělený) model, vycházející z numerického řešení parciálních diferenciálních rovnic, popisujících neustálé proudění svahové, soustředěné povrchové proudění a proudění podpovrchové v nenasycené i nasycené zóně. Cílem je snaha o dokonalý fyzikální popis hydrologických a hydraulických procesů. Jeho stavba je velmi sofistikovaná, je náročný na množství kvalitních dat, proto je zejména testován na experimentálních odtokových plochách. Jeho předností jsou velmi solidně zpracované komponenty odtoku (Calver, Wood, 1989).

TOPMODEL

Obdobně jako IHDM není TOPMODEL účelově bilančním modelem, ale ukazuje směr vývoje hydrologického modelování. Je především rovněž zaměřen na simulaci odtoku z proměnlivých zdrojových ploch povodí a pracuje s plošným rozdělením deficitu půdních vlhkostí. Svým zařazením patří do kategorie semi-distributivních modelů (quasi-dělených). Model zpracovává údaje o topografii povodí a jeho půdách do topografických indexů TOPSi. TOPMODEL kromě simulace historických řad rovněž generuje srážkové epizody z daného rozdělení intenzity a trvání dešťů. Využívá spojení s GIS (Geografickým Informačním Systémem) pro automatické vyhodnocení plošných indexů TOPi, TOPSi a dalších parametrů (Blažková, 1993).

Křivka frekvence povodně

Přetrvávajícím problémem v hydrologii je odhad maximálního průtočného množství vody pro stavby na povodích, pokud máme velmi omezené údaje. Nadějný a elegantní přístup k vyřešení tohoto problému je odvození četnosti povodňové křivky, která byla propagovaná Engelsonem (1972, *WaterResour. Res.*, 8(4): 878–898). Za posledních 20 let byla zveřejněna celá řada studií, kde používali tento model. Je zde nová verze stochastického simulátoru srážek, který vychází z modelu TOPMODEL a její aplikace na třech malých povodích (1,87, 4,75 a 25.81 km²) v Jizerských horách v České republice. Tento srážkový model, rozpoznává události podle jejich intenzity

na nízku a vysokou. Porovnáváme zde naměřenou a statistickou srážkovou hodnotu. Křivka frekvence povodně, která vychází z kombinovaného modelu, se používá na periodicky se opakující velké povodně.

Při výpočtu se upravuje jen jeden parametr modelu TOPMODEL a to efektivní průměr propustnosti. Pro dvě menší povodí musí být parametr upraven v závislosti na jejich velikosti. Je dokázáno, že náhodné opakování přívalových dešťů může mít významný vliv na předpovědi stoleté vody a to i tehdy, když docházelo k simulacím na jeden tisíc let, aniž by došlo k překročení parametrů.

(Blažková, 1995)

6. Závěr

Z mé práce vyplývá, že na řešení problematiky srážko-odtokových hydrologických modelů lze nahlížet z několika úhlů. Nejdůležitější je výběr správného modelu, který bude zapadat do krajiny jak stran vstupních dat, tak také svou náročností na vypracování, povolenou odchylkou, možností využitelnosti do budoucna a času, který je nutný k pozorování, aby vstupní data byla co nejpřesnější. Naskýtají se také možnosti vzájemného kombinování hydrologických modelů, jejich vypracování a zobrazení v softwarech ArcGIS a nástavbách k tomu nutných. Musíme si uvědomit, že každý hydrologický model se specializuje na určitou část nebo na určité jevy v povodí. Mnoho z nich se svými vlastnostmi kryje a tak máme široké spektrum volby toho, který je pro nás ideální. Jsou zde pak ale situace, kdy musíme sáhnout po velmi specifických modelech, jelikož vstupní data a de facto celé námi zkoumané území by bylo pro „obecné“ srážko-odtokové hydrologické modely příliš náročné, s vysokou pravděpodobností výskytu chyb atd. V takovýchto případech je nutno zvolit model, který se uplatňuje a využívá jen na podobně náročných územích a povodích. Jak deterministické, tak i stochastické modely řeší stejné území, ale nahlíží na zpracování modelu svou vlastní metodou. Výsledky však v konečném řešení vypadají velmi podobně.

Zájmové organizace si samy zvolí, zda chtějí využívat veřejné nebo komerční modely a hlavně použijí přesně ty, které se pro ně nejlépe hodí.

Tato práce slouží k základnímu, ucelenému přehledu o hydrologických modelech, jejich rozdělení a členění. V následující diplomové práci bych tuto problematiku chtěl rozšířit o použití několika vybraných modelů a jejich aplikaci na zvolené povodí.

7. Přehled použité literatury

1. Ambrožová, J. Aplikovaná a technická hydrobiologie. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2007, 226 s.
2. Becker, A. Marcoscale hydrologic models in support to climate research, IAHS Vancouver, 1987, 168 s.
3. Becker, A. Serban, P. Hydrological models for water-resources system design and operation. Operational Hydrology Report No. 34, WMO, Ženeva, 1990, 80 s.
4. Bergström, S. The HBV model, In Singh, V. P. Computer Model of Watershed Hydrology, Water Resources Publication, Highland Ranch, CO, 1995, s. 443-476
5. Blackie, J. R. Eeles, W. O. Lumped catchment models, In hydrological Forecasting, J. Wiley & Sons, 1985, s. 311-346
6. Blažková, Š. Flood frequency prediction for data limited catchments in the Czech Republic using a stochastic rainfall model and TOPMODEL, The T. C. Masaryk Water Research Institute, Prague. Received 3 March 1995
7. Blažková, Š. Srážko-odtokové modely, založeny na principu jednotkového hydrogramu, Práce a studie VÚV, 1993 sešit 183, Praha, VÚV TGM
8. Buchtele, J. Land use and Streamflow changes in the Labe river basin as simulated by a rainfall-runoff model. In Flow Regimes from Experimental and Network Data (FRIED), IAHS Publ. No. 221, s. 207-212
9. Budagovskij A. I., Vypařování půdní vody, 1964, Moskva,
10. Calver, A. Wood, W. L. On the discretization and cost – effectiveness of a finite element solution for hillslope subsurface flow, Journal of Hydrology, 1989, No. 110, s. 165-179
11. Cídlarová, M. Vogel, T. Transportní procesy ve vadózní zóně, ČÚZK Praha, 2008, 111 s.
12. Clarke, R. T. Mathematical models in Hydrology, Rome, FAO Paper, 1973, No. 19
13. Daňhelka J. Sborník prací Českého Hydrometeorologického ústavu, Praha, 2007, 104 s.

14. Daňhelka, J. a kol., Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. ČZU, Praha, 2003, 214 s.
15. DesQ-MaxQ, Program DesQ-MaxQ, (online), cit. 2010-06-13, <http://www.desq-masq.cz/index.html/>
16. DHI 2010, DHI a.s. (online), cit. 2010-06-13, <http://www.dhi.cz/>
17. Graham, D. N. Butts, M. B. Flexible, integrated watershed modeling with MIKE-SHE, In Singh, V. P. Frevert, D. K. Watershed models, CRC Press, 2005, s. 245-272
18. HEC, Hydrologiy Engenering Center (online), cit. 2010-06-13, <http://www.hec.usace.army.mil/>
19. Holländer, H., M., Blume, T., a kol., Comparative prediction of discharge from an artificial catchment (Chicken Creek) using sparse data, Hydrol. Earth Syst. Sci. 13, s. 2069-2094
20. Hrádek, F., Kuřík, P. Hydrologie, Skriptum FLE ČZU Praha, 2002, 280 s.
21. Hydrotec, GmbH, Dokumentation zu Niederschlag-Abfluss Model NASIM, Hydrotec, Aachen, 2003, 557 s.
22. Hysoft, Hysoft (online), cit. 2010-06-13, <http://hysoft.cz/>
23. Jeníček, M. Klasifikace hydrologických modelů, studijní materiál, použit s dovolením autora a s jeho potvrzením odbornosti, UK Praha, 2007
24. Jeníček, M. Modelování srážko-odtokových procesů pro malá a střední povodí, Geografie – sborník, UK Praha, 2007, 9 s.
25. Jeníček, M. Možnosti využití srážko-odtokových modelů na malých a středně velkých povodích, In Langhammer, J., Vliv změn přírodního prostředí povodí a údolní nivy na povodňové riziko, PřF UK, Praha, s. 112-126
26. Kašpárek, L., Vyhodnocení jarní povodně 2006 na území ČR, (online), cit. 2010-06-13, VÚV, T.G. Masaryka, Praha, 2006, <http://www.chmi.cz/hydro/pov06/>
27. Kašpárek, L., Krejčová, K., Chronologická hydrologická bilance povodí. „Vliv antropogenní činnosti na změny odtokového režimu a vydatnost zdrojů vody“, Výzkumná práce, Praha, VÚV TGM, 1990-1993
28. Kopáček, J. Bednář, J. Jak vzniká počasí, 2005, 263 s.

29. Košková, R. Němečková, S. Assessment of Evapotranspiration simulation in the Malše Basin, *Soil & Water Research*, s. 4, 2, 111-122
30. Kovář, P. The extent of land use impact of water regime, *Plant, Soil and Environment*, 52, 6, 2006, s. 239-244
31. Kovář, P. Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích, *Doktorská disertační práce, LF ČZU Praha*, 1994
32. Krešl, J. *Hydrologie*, Brno, 2001, 125 s.
33. Kulhavý, Z. Kovář, P. Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí, *VÚMOP Praha*, 2000, 123 s.
34. Kutílek, M. Nielsen, D. R. *Soil Hydrology*, McGraw-Hill inc., Deutschland, 1994
35. Maidment, D. R. *Handbook of hydrology*, McGraw-Hill inc. N. York, 1993
36. Pitter, P. *Hydrochemie*, Praha, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2009, 375 s.
37. Primožič, M. Kobold, M. a kol., THE implementation of HBV model the Sava River Basin. *IOP, Conf. Series: Earth and Environmental Science*, s. 1-10
38. Schlute, A. Wenzel, R. a kol. *INTERRAG IIIA Projekt DINGHO, dezentraler, integrierter, und grenzübergreifender Hochwasserschutz im Mittleren Erzgebirge, Hochwasserschutz und Katastrophenmanagement*, s. 6, 25-28
39. Shrestha, R. Input data resolution analysis for distributed hydrological modeling, Department of Urban and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan, Received 13 August 2003
40. Smith, M. B. Koren, V. I. a kol., Evaluation of the advantages of the continuous SAC-SMA model over an event API model, *15th Conference of Hydrology 9.1 – 4.1 2000*, Long Beach, CA
41. Starý, M. *Hydrog-S ver. 2.0, Manuál programu*, 1998, 38 s.
42. Viviroli, D. An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools, Institute of Geography, University of Bern, Hallerstrasse 12, CH-3012 Bern, Switzerland, Received 10 June 2008
43. Williams, J. R. La Seur, W., R. Water Yield Model using SCS Curve Numbers, *Journal of Hydraulic Division*, 1976, HY9, s. 1241-1253

44. Zeman, E. Hydroinformatika a hydrologické modely, ČVÚT Praha, 1994, 90 s.