

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního
modelování



Aplikace modelu SWAT na povodí Rakovnického potoka

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Pavlásek, Ph.D.

Diplomant:

Zdeněk Široký

2010

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřího Pavláška, Ph.D. Uvedl jsem všechnu literaturu a další prameny, ze kterých jsem čerpal.

V Praze dne 25.8.2010

.....

Zdeněk Široký

Poděkování:

Poděkování patří vedoucímu mé diplomové práce Ing. Jiřímu Pavláskovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc při získávání vstupních dat, cenné rady a připomínky při zpracovávání diplomové práce.

Dále děkuji Ing. Ladislavu Kašpárkovi, CSc., Ing. Adamu Vizinovi a Ing. Stanislavu Horáčkovi za poskytnutí většiny vstupních dat.

Velice si cením pomoci Ing. Františka Šulana při řešení potíží se softwarem a jeho technické pomoci při přípravě srážkových dat.

Za rady, připomínky a konzultace patří můj dík i Lukáši Ing. Jačkovi a Ing. Aleši Balbínovi.

V neposlední řadě děkuji mé přítelkyni Janě Mikešové a svým rodičům za podporu a trpělivost během celého mého studia.

Diploma thesis:

Application Of SWAT Model On Rakovnický Stream Basin

Abstract:

To analyse the impact of human activities in landscape on hydrological processes in watershed areas and for analysis evaluating hazards related to environment changes, mathematical models in cooperation with geographical information systems (GIS) systems has been still more frequently used today. GIS systems can approach to different geodatabase systems storing and managing data about land structure and characteristics which enables areal distribution of parameters of such models.

To bring these models to sufficient level of their performance for particular land area, appropriate testing for such a specific conditions has to be done.

This diploma thesis is focused on application of semi-distributed hydrological model SWAT (Soil Water Assessment Tool) on hydrologic balance assessment of Rakovnický stream basin in Czech Republic. This watershed is among those in this country where the negative impact of climatic conditions changes on hydrological balance has already been observed. Rakovnický stream has an average flow rate of $0,86 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ at the outlet of the basin where it enters Berounka river. The area of the whole catchment is $368,1 \text{ km}^2$.

Firstly, analysis of geographical characteristics and specific input data preparation was done using different GIS tools. After build up model was tested and calibrated using observation data of flow time series for season of 1996 - 2001.

Key words:

climate change, semi-distributed hydrological model, hydrological balance, hydrological cycle, model calibration, surface water hydrology,

Abstrakt:

K posouzení vlivu hospodaření člověka v krajině na hydrologické procesy v povodí a při hodnocení rizik plynoucích z možných změn přírodních podmínek prostředí, se v současné době stále více používají matematické modely v propojení na geografické informační systémy (GIS) disponující databázemi orientovanými na popis struktury a charakteru území. Propojení s GIS systémy pak u těchto modelů umožňuje prostorovou distribuci jejich parametrů.

Aby bylo možné používat takových hydrologických modelů v praxi je nezbytné jejich náležitě testování v daných geografických podmínkách, které je realizované s využitím porovnání výsledků těchto modelů s pozorovanými daty.

Cílem této diplomové práce byla aplikace a testování možnosti využití modelu SWAT v podmínkách povodí Rakovnického potoka (Česká republika) pro stanovení prvků hydrologické bilance. Toto povodí patří mezi oblasti, kde se na hydrologické bilanci výrazně projevuje negativní vliv klimatických změn pozorovaných na území ČR během posledních desetiletí. Území povodí tvoří pahorkatiny, rozloha povodí je 368,1 km² a průměrný průtok v ústí toku je 0,86 m³·s⁻¹.

Nejprve byl proveden rozbor podmínek území a příprava geografických a meteorologických vstupních dat s využitím nástrojů GIS. Sestavený model byl po té kalibrován s využitím měřených průtoků v limniografické stanici Rakovník za období let 1996 až 2001.

Kalibrace modelu nepřinesla příliš uspokojivé výsledky, pro které se následná další aplikace modelu, bez provedení patřičných změn souboru vstupních dat, jeví pro účel hodnocení hydrologického režimu povodí Rakovnického potoka jako problematičtější.

Klíčová slova:

změna klimatu, částečně distribuovaný hydrologický model, hydrologická bilance, hydrologický cyklus, kalibrace modelu, hydrologie povrchových vod,

1	ÚVOD.....	8
2	CÍL PRÁCE.....	9
3	LITERÁRNÍ REŠERŠE.....	10
3.1	Úvod do problematiky - hydrologický režim povodí	10
3.2	Hydrologický systém.....	11
3.3	Model hydrologického systému	12
3.3.1	<i>Klasifikace a využití hydrologických modelů</i>	<i>12</i>
3.3.2	<i>Volba modelu.....</i>	<i>16</i>
3.4	Charakteristika modelu S WAT.....	17
3.5	Vznik a vývoj modelu S WAT	18
3.6	Přehled modelu.....	19
3.6.1	<i>Fáze procesů plošného odtoku</i>	<i>20</i>
3.6.2	<i>Proudění v říční síti (Průchod vody hydrografickou sítí)</i>	<i>25</i>
3.6.3	<i>Vstupní data.....</i>	<i>28</i>
3.6.4	<i>Citlivostní analýza, kalibrace a validace v rámci SWAT</i>	<i>31</i>
3.7	Uplatnění GIS a datového modelu v prostředí S WAT	34
3.8	Zkušenosti s modelem S WAT v ČR!!!!	37
4	GEOGRAFICKÁ CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ.....	38
4.1.1	<i>Geomorfologické členění zájmového území</i>	<i>39</i>
4.1.2	<i>Geologické poměry.....</i>	<i>41</i>
4.1.3	<i>Klimatické poměry.....</i>	<i>43</i>
4.1.4	<i>Charakteristika půdních poměrů.....</i>	<i>46</i>
4.1.5	<i>Povrchový (vegetační) pokryv a využití území</i>	<i>48</i>
4.1.6	<i>Hydrologické poměry území.....</i>	<i>49</i>
5	METODIKA	54
5.1	Příprava vstupních dat pro model S WAT.....	54
5.1.1	<i>Meteorologická data.....</i>	<i>55</i>
5.1.2	<i>Geografická data.....</i>	<i>56</i>
5.2	Sestavení SWAT modelu povodí	62
5.2.1	<i>Adaptace modelového rozhraní podmínkám povodí.....</i>	<i>62</i>
5.2.2	<i>Základní nastavení projektu</i>	<i>62</i>
5.2.3	<i>Konfigurace povodí.....</i>	<i>63</i>
5.2.4	<i>Analýza a vymezení HRU</i>	<i>65</i>
5.2.5	<i>Import meteorologických dat.....</i>	<i>67</i>
5.2.6	<i>Vytvoření sestavy vstupních souborů modelu.....</i>	<i>68</i>
5.3	Kalibrace modelu.....	69
5.3.1	<i>Příprava dat pro kalibraci.....</i>	<i>69</i>
5.3.2	<i>Citlivostní analýza modelu</i>	<i>71</i>
5.3.3	<i>Metody hodnocení průběhu simulace modelu</i>	<i>72</i>
5.3.4	<i>Manuální kalibrace</i>	<i>72</i>

5.3.5	<i>Automatická kalibrace</i>	73
5.4	Hydrologická bilance Rakovnického potoka	73
6	VÝSLEDKY	74
6.1	Výsledky přípravy vstupních dat modelu	74
6.1.1	<i>Srážková data</i>	74
6.1.2	<i>Vstupní vrstva LULC</i>	74
6.1.3	<i>Půdní jednotky</i>	76
6.2	Sestava modelu	77
6.2.1	<i>Konfigurace povodí</i>	77
6.2.2	<i>HRU</i>	79
6.3	Kalibrace a citlivostní analýza	81
6.3.1	<i>Citlivostní analýza</i>	81
6.3.2	<i>Manuální kalibrace</i>	82
6.3.3	<i>Optimální rozsah hodnot parametrů</i>	84
6.3.4	<i>Automatická kalibrace</i>	86
6.4	Bilance povodí Rakovnického potoka	87
7	DISKUSE	89
8	ZÁVĚR	90
9	SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ	91
9.1	<i>Citovaná literatura</i>	91
10	SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	95
11	SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ	96
12	PŘÍLOHY	98

1 ÚVOD

Voda je základní a nenahraditelnou složkou životního prostředí a zachování vodních zdrojů je podmínkou pro existenci a trvale udržitelný rozvoj naší společnosti. Ochrana přirozeného hydrologického režimu území je jednou z hlavních priorit při plánování a řízení hospodaření v krajině.

Význam tohoto kritéria rozhodování v managementu krajiny navíc roste v souvislosti se změnami klimatu globálního i regionálního charakteru pozorovanými v posledních desetiletích. Růst teploty vzduchu zapříčinil výrazné změny v hydrologickém režimu některých, zejména srážkově chudších, povodí, kde růst objemu výparu způsobuje pokles průtoků až k hodnotám blížícím se nule.

Mezi tato povodí patří i povodí Rakovnického potoka, kde byla, v rámci posudku zabezpečení bilančního stavu, situace charakterizována jako nevyhovující požadavkům normy pro zachování minimálního průtoků. Nepříznivý stav hydrologické bilance se projevoval i nedosahováním optimálních výnosů zemědělských plodin v oblasti.

Pro vypracování návrhu vhodných opatření, která by vedla k eliminaci negativních dopadů této situace, byl vytvořen projekt, jehož hlavním cílem bylo provést výzkum a analýzu hydrometeorologických poměrů povodí.

Tato diplomová práce se v souvislosti s výše zmíněným projektem zaměřuje na možnosti využití matematického modelu SWAT pro modelování hydrologického režimu v podmínkách povodí Rakovnického potoka.

V první části je řešena problematika přizpůsobení vnitřních geodatabází modelu a způsob přípravy vstupních dat. Následuje provedení sestavení vlastního modelu povodí a jeho kalibrace s využitím zvolené časové řady průtoků pozorovaných ve stanici Rakovník. Nakonec byl na základě kalibrovaného modelu proveden rozbor hydrologické bilance povodí.

2 CÍL PRÁCE

Cílem této diplomové práce byla aplikace a testování možnosti využití modelu SWAT v podmínkách povodí Rakovnického potoka (Česká republika) pro stanovení prvků hydrologické bilance. Toto povodí patří mezi oblasti, kde se na hydrologické bilanci výrazně projevuje negativní vliv klimatických změn pozorovaných na území ČR během posledních desetiletí.

3 LITERÁRNÍ REŠERŠE

3.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY - HYDROLOGICKÝ REŽIM POVODÍ

Voda obsažená v hydrosféře Země pod vlivem sluneční energie cirkuluje v rámci uzavřeného koloběhu. Dráhy, kterými se voda v různých skupenstvích přesouvá prostorem hydrosféry, tvoří tzv. hydrologický cyklus (Chow, a další, 1988). Při hydrologickém cyklu obecně dochází k neustálému výparu vody z vodních těles (oceánů, řek, jezer apod.), transportu těchto par vzdušnými proudy do prostředí, kde opět kondenzují či desublimují a v podobě srážek se následně vracejí zpět do vodních těles, a to buď přímo nebo povrchovým či podzemním odtokem.

Obecná koncepce hydrologického cyklu je poměrně jednoduchá. Reálně se však jedná o enormně složitý a komplexní systém složený z mnoha navzájem různě propojených cyklů kontinentálních, regionálních až lokálních měřítek (Chow, a další, 1988).

Dle Hrádka a Kuříka (2004) představuje povodí základní územní jednotku, na které je prováděn výzkum odtokových procesů a vzájemných vztahů bilančních prvků hydrologického cyklu. Ve zjednodušeném pojetí lze (z hlediska hydrologie) povodí definovat jako uzavřené území, do něhož z okolí nepřitéká žádná voda povrchovým nebo podpovrchovým prouděním. Srážky, které na povodí spadnou, vyvolávají odtok v uzávěrovém profilu povodí, kam se dostávají (při zjednodušení) formou povrchového a podpovrchového odtoku. Velká část objemu vody se na této dráze povodím odděluje a vrací evapotranspirací zpět do atmosféry. Další část dotuje zásoby podzemních vod.

Proudění (přesun) vody povodím po jednotlivých drahách probíhá za souběžné interakce s prostředím. Tato interakce zahrnuje celou řadu chemických a fyzikálních procesů např. erozi, transport a tvorba biomasy a další.

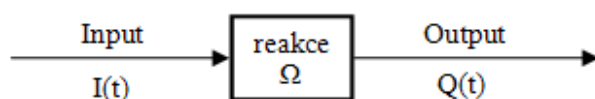
Hydrologický režim daného regionu či povodí je determinován klimatickými podmínkami a fyzikálními faktory jakými jsou topografie, geologie a povrchový pokryv. V současné době se jako velice významný faktor ovlivňující dynamickou rovnováhu hydrologického cyklu ukazuje také činnost člověka (Chow, a další, 1988).

3.2 HYDROLOGICKÝ SYSTÉM

Hydrologie resp. hydrologický režim jakéhokoliv území je v realitě velice složitý komplexní problém, jehož přesný vyčerpávající popis je ve skutečnosti nemožný. Při akceptování určité přijatelné míry zjednodušení je možné pro popis hydrologického režimu území (povodí) užít koncepce systému. Hydrologický cyklus resp. hydrologický režim je s tímto přístupem chápán jako systém (soubor propojených prvků tvořících funkční celek) jehož komponenty jsou precipitace, evaporace, odtok a další fáze (procesy) hydrologického cyklu (Chow, a další, 1988). Systémový koncept byl převzat z kybernetiky a je běžně užíván v současné hydrologické terminologii (Kulhavý, a další, 2000).

Hydrologický systém je pak definován jako struktura o určitém objemu, v prostoru ohraničená, která přijímá vodu a další jiné vstupy, operuje s těmito vstupy dle určitého vnitřního chování a na základě těchto operací produkuje patřičné (odpovídající) výstupy (Chow, a další, 1988). Bauwens (2007) definuje hydrologický systém jako soubor fyzikálních, chemických a biologických procesů, které probíhají na základě jedné či více vstupních veličin a transformují tyto veličiny na jednu nebo více výstupních veličin. Schematicky je hydrologický systém zobrazen na Obr. 1.

Obr. 1 Schéma reprezentující obecné chování hydrologického cyklu
Zdroj: Chow & Maidment, 1988



Pod pojmem chování systému rozumí Kulhavý a Kovář (2000) komplexní reakci systému (Ω) na vstup, obecně transformační funkci povodí (např. jednotkový hydrogram), podle které se transformuje vstupní déšť $I(t)$ do výstupních veličin $Q(t)$. Geografické a fyzikální charakteristiky povodí (např. plocha, stř. sklon, hydraulické drsnosti, půdní poměry, geologické podloží či druh vegetace) pak tvoří základní prvky struktury hydrologického systému povodí.

3.3 MODEL HYDROLOGICKÉHO SYSTÉMU

Předmětem analýzy hydrologického systému je zkoumání jeho chování a následné provádění prognóz výstupních veličin na základě získaných poznatků (Chow, a další, 1988). Velice rozšířenou metodou studia a předpovědi chování hydrologického systému je hydrologické modelování.

Model hydrologického systému (dále jen „model“) je určitou aproximací reálně existujícího hydrologického systému. Strukturu modelu tvoří sada rovnic vyjadřujících vztah mezi vstupy a výstupy modelu, které představují měřitelné hydrologické veličiny (Chow, a další, 1988).

3.3.1 Klasifikace a využití hydrologických modelů

Existuje řada různých typů modelů. Konstrukce a přístup každého modelu k jednotlivým komponentám hydrologického systému se vždy odvíjí od účelu jeho užití, časového a prostorového měřítka řešeného problému, dostupnosti prostředků pro vytvoření funkčního modelu atd. (Bauwens, 2007). S postupným vývojem oblasti modelování se na základě podobnosti resp. odlišnosti jednotlivých pojetí vyčlenily různé kategorie modelů. Klasifikace do těchto kategorií pak případnému řešiteli usnadňuje výběr vhodného modelu pro daný problém (Jenček, 2007a).

3.3.1.1 Hledisko časové a prostorové diskretizace.

Vzhledem k otázce prostorového uspořádání modelů lze v současnosti vymezit tři skupiny hydrologických modelů. Patří sem tzv. celistvé modely s parametry a veličinami vztaženými k celému analyzovanému systému (dílčí povodí), distribuované modely s hodnotami parametrů rozdělených v prostoru povodí prostřednictvím sítě elementárních odtokových ploch a modely částečně distribuované představující kompromisní koncepci optimální kombinace obou výše uvedených přístupů.

Vzhledem k časové délce výpočetního kroku lze rozlišovat modely kontinuální a epizodní (diskrétní). Kontinuální modely simulují hydrologické procesy nebo hydrologickou bilanci pro každý časový interval zpravidla delšího (ročního až mnohaletého) období za účelem rekonstrukce či prognózy chování hydrologického systému (Kulhavý, a další, 2000). Epizodní modely jsou využívány k modelování

určitých významných hydrologických událostí (epizod), krátkodobého a výrazně nespojitého charakteru. Využívají pouze kratších úseků datových řad specifického charakteru a zvláštního významu např. záznamy o přívalových srážkách (Hrádek, a další, 2004).

3.3.1.2 Účel a využití modelů

Z hlediska využití rozdělují Bauwens (2007) modely do třech skupin. První skupinu tvoří modely, které se uplatňují při procesu rozhodování resp. výběru optimálních řešení společensko-hospodářských problémů. Patří sem modely pro účely plánování, návrhové účely a modely pro operativní řízení a kontrolu v oblasti vodního hospodářství. Dvě zvláštní skupiny tvoří modely určené pro hydrologický výzkum a modely navrhované pro generování či doplnění dat hydrologických veličin.

3.3.1.3 Hledisko typu modelovaného hydrologického systému

Dalším hlediskem klasifikace je typ (úroveň) hydrologického systému a procesu, jež je modelem reprezentován. Existují tak modely popisující komplexní systémy jako např. systém říčních sítí, nádrží a jezer nebo systémy celých povodí. Druhá skupina modelů se blíže zaměřuje na jednotlivé elementární části hydrologického systému např. zvodnělé vrstvy, jednotlivé nádrže nebo malé odtokové plochy (Jeníček, 2007a).

3.3.1.4 Modely jako fyzické nebo abstraktní

Jedno ze základních členění vyplívá z prostředků použitých při sestavení modelu. Chow a Maidment (1988) tak rozdělují modely v hydrologii na fyzické a abstraktní. Mezi fyzické modely patří tzv. „scale modely“ neboli měřítkové modely např. hydraulický model přelivu nádrže či model části koryta toku a tzv. analogové modely, které jsou zkonstruovány z prvků jiného fyzikálního systému vykazujícího však podobné vlastnosti zkoumaného prototypu. V případě abstraktních (matematických) modelů je hydrologický systém popsán souborem matematických rovnic propojujících vstupní a výstupní veličiny.

3.3.1.5 *Matematické (abstraktní) modely*

Matematické modely mají dlouhou historii, avšak až díky rozvoji počítačových technologií se stávají významným nástrojem hydrologů a vodohospodářů (Jeníček, 2007a). Tyto modely lze dále členit dle několika hledisek.

Hlavní členění matematických modelů vyplývá ze stupně příčinnosti (kauzality) vzájemných vztahů vstupních a výstupních veličin (i jejich vztahů k parametrům modelu) a z míry uplatnění nahodilosti v těchto vztazích. Modely se tak rozlišují na stochastické (statistické) nebo deterministické (někdy také fyzikálně založené) (Chow, a další, 1988).

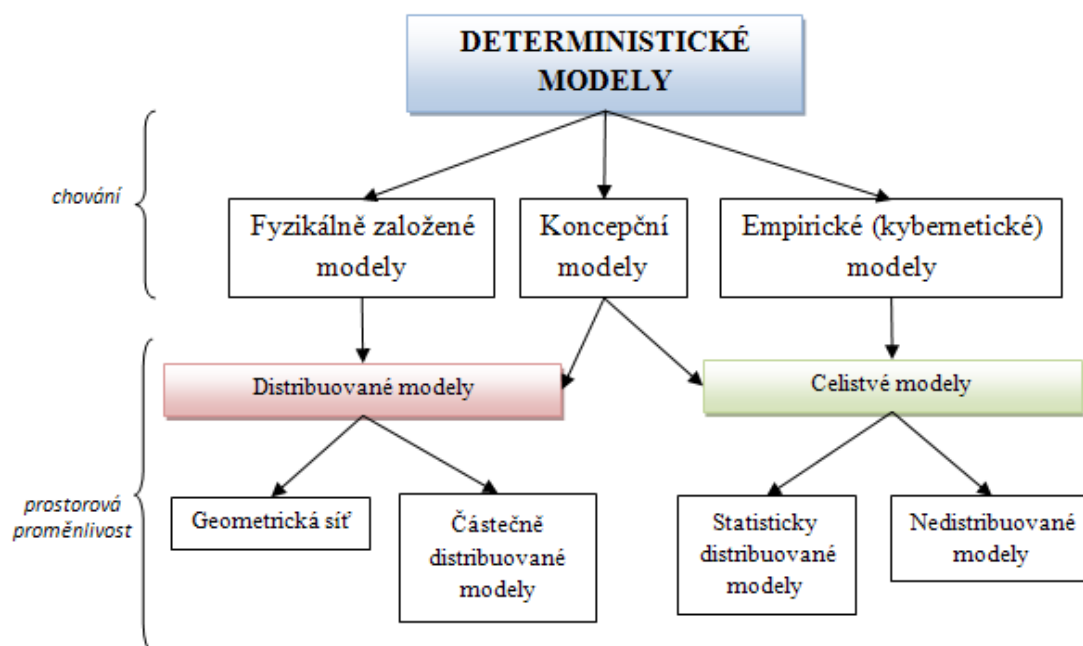
Stochastické modely

Stochastické modely ve své struktuře nezahrnují vazbu mezi příčinou a důsledkem (Kulhavý, a další, 2000). Jelikož vstupní a výstupní veličiny jsou zde nahodile proměnné a podléhají určitému pravděpodobnostnímu rozdělení, nemají fixní hodnotu v daném časoprostoru (Chow, a další, 1988). Výstup těchto modelů je vždy alespoň částečně náhodným jevem.

Deterministické modely

V případě deterministických modelů naopak neplatí pro proměnné veličiny žádné pravděpodobnostní rozdělení a vzájemné vztahy těchto proměnných (i vztahy k parametrům modelu) jsou ryze příčné (Kulhavý, a další, 2000). Tyto modely nepřipouští náhodnost, čili daný vstup vždy generuje stejný výstup (Chow, a další, 1988). Podrobnější členění deterministických modelů převzaté z literatury (Kulhavý, a další, 2000) je patrné ze schématu na Obr. 2.

Obr. 2 viz kovář kulhavý
Zdroj:



Empirické (kybernetické) modely

Empirické (parametrické, analytické či „black-box“) modely ve své struktuře neberou v úvahu řídicí fyzikální zákony, nýbrž používají pouze empiricky odvozené vztahy mezi vstupními a výstupními veličinami. Příkladem těchto modelů jsou neuronové sítě (Brimicombe, 2003).

Fyzikálně založené modely

Tuto skupinu modelů zastupují převážně modely hydrodynamické. Jsou založeny na fyzikálních principech jako jsou zákon zachování hmoty, hybnosti a energie a výhradně patří do kategorie modelů s prostorově rozdělenými parametry (Kulhavý, a další, 2000). Přírodní zákony zastupují ve struktuře tohoto typu modelu parciální diferenciální rovnice např. rovnice kontinuity. Tyto rovnice jsou prostřednictvím určitého numerického schématu a na základě čtvercové či trojúhelníkové geometrické sítě diskretizovány do rovnic diferenčních. Při zadání potřebných parametrů, proměnných a počátečních resp. okrajových podmínek pak model tyto rovnice řeší. Většinou se zde jedná o modely elementárních částí hydrologického systému např. modely proudění v nenasycené zóně, proudění podzemní vody a hlavně modely

povrchového odtoku. Méně je komplexních fyzikálně založených modelů jako např. model SHE (Système hydrologique Européen) (Abbott, 1986), které řeší i vzájemné interakce dílčích procesů.

Konceptuální modely

Konceptní deterministické („grey-box“) modely jsou ve zjednodušeném pojetí založené na základě fyzikálních zákonů. Současně se částečně opírají o různé empiricky odvozené vztahy. Tyto modely potlačují prostorovou složku parametrů a adresují jejich změny určitým předpokládaným reprezentativním bodům. Hodnoty prostorových souřadnic se pak stávají parametry řešení (Kulhavý, a další, 2000). Jejich aplikace nevyžadují tolik zkušeností, protože parametry jsou zde také často fyzikální podstaty (Bauwens, 2007).

Konceptní modely jsou používány k analýze různých hydrologických režimů povodí. Matematicky popisují hlavní procesy hydrologického cyklu, tedy procesy povrchové, podpovrchové a korytové (Kulhavý, a další, 2000).

Mohou pracovat v kratších časových krocích jako tzv. epizodní modely pro účely modelování krátkodobých procesů nebo v delších časových intervalech, jako modely kontinuální, pro účely modelování hydrologické bilance. Některé z těchto modelů jsou velice flexibilní a mohou fungovat pro oba uvedené typy úloh.

Mezi bilanční konceptní modely řadí Kulhavý a Kovář (2000) například modely: WYM (Water Yield Model) (Williams La Seur, 1976), SMD (Soil Moisture Deficit) (Kovář, 1994), BILAN (Kašpárek), TOPMODEL (Beven, 1986), (Blažková, 1993).

Příkladem modelu použitelného pro epizodní i bilanční úlohy je model SWAT (Soil Water Assessment Tool), použitý v této diplomové práci, a některé další modely např. HEC 1, CREAMS, SWRRB, EPIC, ANSWERS nebo AGNPS (Tripathi, et al., 2003).

3.3.2 Volba modelu

Vzhledem k již zmíněné složitosti a vysoké míře neurčitosti v oblasti hydrologie je třeba respektovat fakt, že neexistuje žádný universální model, jehož aplikace by i bez ohledu na specifické podmínky daného problému vedla k racionálním závěrům

(Bauwens, 2007). Volba a spolehlivost aplikace každého modelu vždy vychází z míry teoretické i praktické znalosti podmínek prostředí, které je předmětem modelování (Brimicombe, 2003).

V rámci této studie byl použit model SWAT ve verzi ArcSWAT 2.1.6 pro ArcGIS 9.2 SP6 vydaný jako finální verze modelu SWAT 2005.

3.4 CHARAKTERISTIKA MODELU SWAT

SWAT (Soil Water Assessment Tool) je nástroj pro modelování procesů na úrovni středních až velkých povodí s převážně zemědělským využitím území. Byl vyvinut pro výzkumné centrum USDA Agricultural Research Service (ARS) v USA. Jak vyplývá z doslovného překladu názvu modelu („nástroj pro hodnocení půdy a vody“), model je určen k vyhodnocování dopadů hospodaření v krajině na hydrologické poměry a erozní procesy, transport plavenin a stav znečištění toků ze zemědělských ploch (Neitsch, a další, 2005).

Jedná se o komplexní částečně distribuovaný fyzikálně založený až koncepční model umožňující epizodní i dlouhodobé kontinuální simulace fyzikálních procesů vázaných na hydrologický cyklus a to na základě dat o hydrometeorologických, topografických, půdních, vegetačních a popř. agrotechnických poměrech povodí. Aplikace modelu může probíhat na různých úrovních vzhledem k zaměření projektu resp. dostupnosti dat. Základem je simulace jednotlivých prvků hydrologické bilance. Při rozšíření základní sestavy vstupních dat jsou možné další specifické oblasti využití jako např. transport sedimentů, transport živin nebo pesticidů v povodí (Arnold, a další, 1998).

Protože významná část vstupních dat je prostorového charakteru (půdní data, srážková data a další) a je třeba GIS nástrojů na jejich přípravu pro vstup do samotného algoritmu modelu, je nástroj SWAT od roku 1998 koncipován a vyvíjen jako extenze GIS aplikací. Tyto verze pak těží z vlastností uživatelského rozhraní GIS aplikací (např. ESRI, Redlands, Kalifornie). Jsou vydávány jako nekomerční software

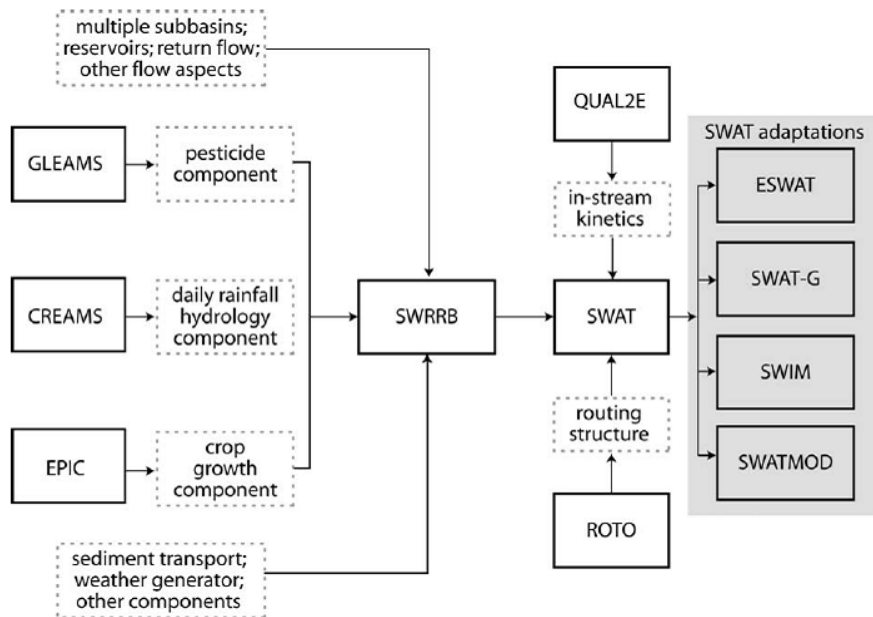
s modifikovatelným zdrojovým kódem (FORTRAN) a tím i širokou již celosvětovou spoluprací na jejich dalším vývoji (Olivera, a další, 2006).

3.5 VZNIK A VÝVOJ MODELU SWAT

Prvopočátky vývoje modelu se vážou na několik předešlých modelů organizace USDA-ARS (CREAMS, GLEAMS a EPIC) a její zkušenosti získané za téměř 30 let působení v oblasti modelování. Postupným sloučením těchto modelů, vylepšením některých částí např. peak runoff method, výpočet transmission losses nebo doplněním o další výpočetní komponenty např. generátor počasí nebo modul pro transport sedimentů, dospěl postupně ARS k modelu pojmenovaném SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins). Tento model je považován za přímého předchůdce modelu SWAT a je vyvíjen přibližně od poloviny osmdesátých let (Gassman, a další, 2007).

Označení SWAT dostal až model, který vznikl propojením modelu SWRRB s modelem ROTO (Routing Outputs to Outlet) v rámci iniciativy vyvíjené pro potřebu podpory analýzy managementu vodního hospodářství v indiánských rezervacích na území Arizony a Nového Mexika a jeho dopadu na poměry dolních toků. Oblasti rezervací se rozprostírají na několika tisících kilometrech čtverečných plochy, což pro původní model SWRRB s horním limitem 10 sub povodí znamenalo poměrně těžkopádnou extemí spoluprací s dalším modelem ROTO. V devadesátých letech tedy následovalo spojení těchto dvou modelů v jediný model SWAT, umožňující simulace na rozsáhlých územích. Model prochází od svého vzniku plynulým procesem oprav a rozšiřováním svých schopností. Mezi nejvýznamnější úpravy patří např. včlenění modelu QUAL2E pro výpočty v otevřených korytech (Olivera, a další, 2006).

Obr. 3 Schematizace postupného vzniku a vývoje modelu SWAT, adaptace modelu SWAT
(Gassman, a další, 2007)



3.6 PŘEHLED MODELU

SWAT umožňuje simulace celé řady různých fyzikálních procesů probíhajících v povodí při dvou základních úrovních prostorového členění. Povodí je rozčleněno na sub povodí, která jsou dále členěna na územní jednotky vyznačující se stejnou hydrologickou odezvou resp. homogenními půdními a vegetačními charakteristikami a způsobem obhospodařování. Tyto plošné celky jsou označovány jako HRU (hydrologic response units) (Gassman, a další, 2007).

Zatímco jednotlivá dílčí povodí jsou prostorově a polohově vymezena, členění na jednotlivé HRU probíhá stochasticky, tedy stanovením procentního podílu plochy sub povodí ke každé kombinaci vstupních charakteristik území (půdních, vegetačních a pod.), bez specifikace polohy v rámci daného dílčího povodí (Greem, a další, 2007). Tím se model SWAT vzhledem k prostorové diskretizaci posouvá od kategorie distribuovaných modelů směrem modelům celistvým a proto je označován jako model částečně distribuovaný. Tento přístup zajišťuje modelu SWAT úsporu při provádění výpočetních operací a tím vyšší výkonnosti ve srovnání s plně distribuovanými modely

zejména při simulacích procesů na velkých povodích v dlouhodobém časovém období (Bekiaris, a další, 2005).

Základem jakékoliv úspěšné aplikace modelu SWAT je správné vystižení (zachycení) reálných procesů hydrologického cyklu modelovaného území (Neitsch, a další, 2005).

Rovnice hydrologické bilance je řešena na úrovni HRU systémem čtyř vertikálně uspořádaných reservoárů představujících vodní zásobu sněhu, objem vody v půdním profilu (0 – 2 m), zásobu podzemní vody v mělké zvodni¹ (2 – 20 m) a zásobu podzemní vody v hluboké zvodni² (>20 m). Odtok z každého dílčího sub povodí je pak dán rovnicí (3.1) jako vážený součet objemu odtoku ze všech HRU jednotek nacházejících se uvnitř tohoto dílčího povodí. Váhovým faktorem v tomto výpočtu je velikost plochy jednotlivých HRU jednotek (Rouhani, a další, 2007).

$$O_{\text{subpov}} = \frac{\sum_{i=1}^N (O_{\text{HRU}_i} \cdot A_{\text{HRU}_i})}{A_{\text{subpov}}}, \quad (3.1)$$

kde N je počet HRU jednotek v dílčím povodí, O_{HRU_i} značí odtok z i-té HRU, O_{subpov} je odtok z dílčího povodí, A_{subpov} značí velikost plochy dílčího povodí a A_{HRU_i} označuje velikost plochy dané HRU.

Simulace hydrologického cyklu povodí může být v rámci modelu SWAT rozdělena do dvou hlavních fází – „land phase“ a „routing phase“ hydrologického cyklu (Neitsch, a další, 2005).

3.6.1 Fáze procesů plošného odtoku³

V rámci této fáze SWAT modeluje procesy pohybu vody, sedimentů, živin a pesticidů směrem k hlavní vodoteči dílčího povodí (Neitsch, a další, 2005).

Model zde řeší procesy, jako jsou srážky, evapotranspirace, intercepce, plošný povrchový odtok, perkolace, hypodermický odtok a odtok podzemní vody a to na základě systému propojených nádrží reprezentujících tyto jednotlivé procesy. Bilance

¹ shallow aquifer

² deep aquifer

³ land phase

těchto nádrží pak tyto procesy zastupují v rovnici celkové hydrologické bilance uvažované prostorové jednotky. Rovnice hydrologické bilance je dána vztahem (3.2) a její platnost je základním principem hydrologického cyklu v rámci SWAT.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}(i)} - Q_{\text{surf}(i)} - E_{a(i)} - W_{\text{seep}(i)} - Q_{\text{gw}(i)}) \quad (3.2)$$

SW_t [mm] značí konečný obsah vody v půdě za dobu t dnů, SW_0 [mm] je počáteční obsah vody v půdě, $R_{\text{day}(i)}$ [mm] je množství srážek v i -tém dni, $Q_{\text{surf}(i)}$ [mm] je objem povrchového odtoku i -tého dne, $E_{a(i)}$ [mm] značí objem evapotranspirace za i -tý den, $W_{\text{seep}(i)}$ [mm] označuje množství vody přesunuté z půdního profilu do vadózní zóny a $Q_{\text{gw}(i)}$ [mm] je objem vody proudící jako odtok podzemní vody z mělké zvodně.

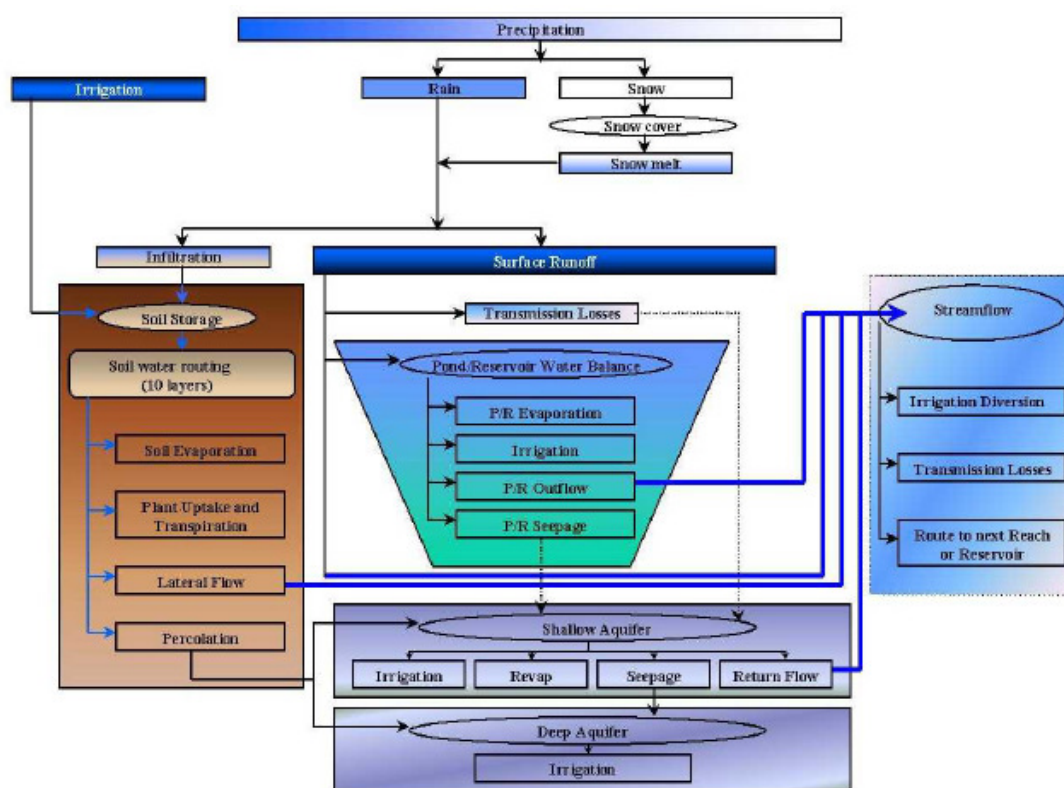
3.6.1.1 Klimatické a meteorologické procesy

Simulace klimatických podmínek povodí je v modelu SWAT zajištěna na základě zadání měřených dat minimálních a maximálních teplot a relativní vlhkosti vzduchu, srážek, sluneční radiace a rychlosti větru. Alternativou v případě omezených dat o klimatu je možnost použití interního nástroje, který generuje denní hodnoty klimatických veličin nezávisle pro každé dílčí povodí a to na základě vstupních dat průměrných měsíčních hodnot (Neitsch, a další, 2005), (Srinivasan, a další, 1998).

3.6.1.2 Hydrologické procesy

Atmosférické srážky jsou zachytávány vegetačním pokryvem nebo dopadávají přímo na povrch půdy. Z povrchu půdy se část srážkové vody postupně infiltruje do půdního profilu a část začne odtékat po povrchu formou nejprve plošného, později soustředěného povrchového odtoku až dosáhne koryta vodního toku povodí, kde vyvolá krátkodobou odezvu (vlnu). Voda infiltrovaná v půdním profilu může být půdou zadržena a později evapotranspirována zpět do atmosféry nebo může prostoupit do podzemních vrstev a formou podzemního odtoku proudit směrem k systému povrchových toků odvodňujících území, kde se postupně projevuje dlouhodobou odezvou (Mays, 2001). Systém potenciálních drah pohybu vody v rámci hydrologického cyklu simulovaného modelem SWAT zobrazuje schéma na obrázku ()

Obr. 4 Schéma systému potenciálních drah proudění vody v modelu SWAT
 Zdroj: Arnold a další (1998)



Povrchový odtok

Povrchový odtok se utváří v závislosti na sklonu zemského povrchu. SWAT nabízí dvě varianty výpočtu výšky povrchového odtoku – metodu SCS CN křivek (USDA-SCS, 1972) a způsob známý jako Green & Ampt infiltrační metodu (Green and Ampt, 1911). Metoda Green & Ampt počítá počáteční ztrátu o kterou je zmenšena výška povrchového odtoku jako ztrátu infiltrací přímo dovozenou z Darcyho zákona jako funkci sacího tlaku na čele zvlhčení, výšky výtopy a nasycené hydraulické vodivosti (Bauwens, 2007). Vzhledem k rychlostem infiltrace však není možné užití této metody pro denní a delší výpočetní krok což je případ právě této práce.

Metoda SCS CN využívá převážně empirických vztahů. Číslo křivky je funkcí propustnosti půdy, vegetačního krytu a předcházejících půdních vlhkostních poměrů. Jsou definovány tři možné situace vlhkostních poměrů – I. suché (zároveň však nad bodem vadnutí), II. průměrné a III. vlhké (vlhkost > polní vodní kapacita a blíží se

stavu nasycení). Při situaci různorodých vlhkostních poměrů (I – III) je možné číslo křivky stanovit jako v situaci II.

Kulminační průtok je v modelu SWAT řešen s využitím modifikované verze metody označené jako „rational method“ (Arnold, a další, 1998). Tato metoda umožňuje výpočet kulminačního průtoku generovaného plochou A a vyvolaného srážkou o intenzitě i podle vztahu daného rovnicí (3.3)

$$q = C \cdot A \cdot i \cdot (T, d) , \quad (3.3)$$

kde parametr C je odtokový součinitel plochy A, intenzita srážky i je funkcí intervalu opakování T a doby trvání d rovné doby koncentrace plochy A (Bauwens, 2007).

Číslo odtokové křivky (CN), využitelná vodní kapacita (SOL_AWC) a nasycená hydraulická vodivost (K_sat) jsou klíčovými parametry při generování povrchového odtoku (NEITSCH, a další, 2002).

Perkolace

Voda infiltrovaná do půdního profilu může dále prosakovat podložím a vadózní zónou až se dostane do mělké či hluboké podzemní zvodně. Časová prodleva mezi okamžikem, kdy voda prosákne nejspodnější vrstvou půdního profilu a okamžikem dosažení podzemního kolektoru závisí na charakteru geologického podloží a hloubce hladiny zvodně (NEITSCH, a další, 2004). V modelu průsak z dané půdní vrstvy nastává pouze za podmínky, kdy obsah půdní vody této vrstvy přesáhne hodnotu polní vodní kapacity, při čemž níže položená vrstva není saturována (Neitsch, a další, 2005). Metoda bilance nádrží je zde navíc kombinována s modelem puklinového proudění podzemní vody. Klíčovým parametrem perkolace je v rámci modelu SWAT nasycená hydraulická vodivost (K_sat)

Hypodermický odtok

Hypodermický odtok, z každé vrstvy půdního profilu, je zde řešen modelem „kinematic storage“ (Sloan et al., 1983) a je stejně jako průsak nejvýrazněji ovlivňován hodnotou parametru K_sat, hydraulickou nasycenou vodivostí.

Základní odtok

Část objemu vody infiltrované do půdního profilu se průsakem postupně dostane do systému podzemních zvodní. SWAT toto prostředí modeluje systémem dvou

kolektorů pro každé dílčí povodí – mělce a hluboce položenou zvodně. Mělce položený kolektor ústí do sítě vodních toků stejného povodí jako tzv return flow, zatímco hluboko položené zvodně svým průtokovým množstvím ovlivňují průtok vodních toků na území vně uvažovaného povodí (Arnold et al., 1993). V prostředí mělce položených zvodní lze vyčlenit složku průsaku do systému hluboko položených zvodní, složku odběrů podzemních vod, složku přísunu vody z výše položených vrstev půdního profilu a dále se zde projevuje také složka výparu.

Tyto procesy významně ovlivňuje parametr „groundwater revap coefficient“ (GW_REVAP), prahové hloubky pro „revap“ (REVAPMN) a „return flow“ (GWQMN), koeficient poklesu křivky základního odtoku (ALPHA_BF) a také zdržení podzemního odtoku (GW_DELAY) (NEITSCH, a další, 2002).

Objem vody, který se dostane do systému hluboko položených zvodní, je pak modelem považován za ztracený a není tedy dále zahrnut v kalkulacích bilance povodí (Neitsch, a další, 2005). Systému hluboko položených zvodní zahrnuje složku odběru vody ze studní a hlubokých vrtů, objem vody prosáklé ze systému mělkých zvodní. Klíčovým parametrem pro bilanci tohoto prostředí je koeficient průsaku a prahová hloubka uložení systému mělkých zvodní.

Evapotran spirace

Evapotranspirace je souhrnný děj, kterým se část objemu vody dostávající se v podobě srážek na zemský povrch (do povrchových vrstev povodí) vrací zpět do atmosféry (Hrádek, a další, 2004).

Bilanci evapotranspirace je součet objemu transpirace rostlinami a výparu přímo z povrchu půdy či vegetace. Hlavními faktory ovlivňující tyto děje jsou sluneční záření jako zdroj tepla pro vypařování, rychlost větru nad povrchem a specifický vlhkostní gradient výše položených vzdušných vrstev společně ovlivňující transport par od povrchu a v neposlední řadě procesy dodávající vláhu vypařujícímu povrchu (Chow, a další, 1988). Maximální možný výpar z povrchu souvisle pokrytého vegetací za podmínek neomezeného přísunu vláhy a pro dané klimatické podmínky se nazývá potenciální výpar. Aktuální výpar je roven výparu potenciálnímu zmenšenému v obdobích omezeného přísunu vláhy (Hrádek, a další, 2004).

V rámci modelu SWAT jsou k dispozici tři metody stanovení potenciální evapotranspirace (výparu) – metoda „Penman-Monteith“ (Monteith, 1965), „Priestley-Taylor“ (Priestley and Taylor, 1972) a metoda dle Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985). Dodatečnou alternativou je pak zadání měřených hodnot výparu jako dalších vstupních dat.

Metoda Penman-Monteith ve své rovnici zahrnuje prvek řešící množství energie potřebné pro výpar, prvek představující mechanismus odsunu vzdušné vláhly a prvek aerodynamického a povrchového odporu evapotranspirace. Metoda Priestley-Taylor nepočítá s aerodynamickou složkou odporu, při čemž násobí energetický člen určitým koeficientem. V této studii byla použita metoda odvozená Hargreavesem, která ve výpočtu potenciální evapotranspirace (E_0) podle rovnice (3.4) uvažuje extraterestriální radiaci (H_0), minimální, maximální a průměrnou teplotu vzduchu (T_{mn} , T_{mx} a \bar{T}_{av}) a latentní teplo vypařování (λ).

$$\lambda E_0 = 0,0023 \cdot H_0 \cdot (T_{mx} - T_{mn})^{0,5} \cdot (\bar{T}_{av} + 17,8) \quad (3.4)$$

Na základě potenciální evapotranspirace pak SWAT odděleně počítá aktuální výpar z povrchu půdy a vegetačního pokryvu.

3.6.2 Proudění v říční síti (Průchod vody hydrografickou sítí)

V rámci druhé fáze SWAT kontroluje (generuje, determinuje) pohyb vody, sedimentů, živin a pesticidů apod. systémem vodních toků až po uzávěrný profil povodí (Neitsch, a další, 2005). Během tohoto procesu se část vody vypaří z volné hladiny, část může prosáknout dnem koryta toku do podložních zvodní a určitý objem může být odčerpáván pro hospodářské či vodárenské potřeby. Pozitivně ovlivňují bilanci v tocích srážky dopadající přímo na vodní hladinu a přítoky z bodových zdrojů. (Neitsch, a další, 2005), (Arnold, a další, 1998).

Proudění otevřeným korytem (Proudění hlavním korytem povodí)

Průtok korytem hlavního toku povodí je modelován pomocí metody s názvem „variable storage coefficient method“ (1) odvozené Williamsem (1969). Alternativou je pak metoda, kterou navrhl Muskingum (2) (Neitsch, a další, 2005).

Metoda (1) je sestavena na základě rovnice kontinuity (Arnold, a další, 1995), (Neitsch, a další, 2005), která má pro daný úsek koryta tvar:

$$V_{in} - V_{out} = \Delta V_{stor} \quad (3.5)$$

kde V_{in} (m^3) je objem vody vtékající do daného úseku za uvažovaný časový krok, V_{out} (m^3) je objem vody vytékající z daného úseku za uvažovaný časový krok a konečně ΔV_{stor} (m^3) značí změnu celkového objemu vody v uvažovaném úseku za uvažovaný časový krok.

Rovnici (3.5) můžeme přepsat do následujícího tvaru:

$$q_{in,av} + \frac{V_{stor,1}}{\Delta t} - \frac{q_{out,1}}{2} = \frac{V_{stor,2}}{\Delta t} + \frac{q_{out,2}}{2} \quad (3.6)$$

kde Δt značí délku časového kroku [s], $q_{in,av}$ [$m^3 s^{-1}$] je dán výrazem $\frac{q_{in,1} + q_{in,2}}{2}$, $q_{in,1}, q_{in,2}$ [$m^3 s^{-1}$] značí přítok na počátku resp. na konci časového kroku, podobně $q_{out,1}, q_{out,2}$ [$m^3 s^{-1}$] je intenzita odtoku z daného úseku na počátku resp. na konci časového kroku a $V_{stor,1}, V_{stor,2}$ [$m^3 H_2O$] vyjadřují objem vody daného úseku koryta na počátku resp. na konci časového úseku.

„Travel time“ TT je vyjádřen vztahem

$$TT = \frac{V_{stor}}{q_{out}} = \frac{V_{stor,1}}{q_{out,1}} = \frac{V_{stor,2}}{q_{out,2}} \quad (3.7)$$

Substituce rovnice (3.7) do vztahu (3.6) a následná úprava vede k rovnici

$$q_{out,2} = \left(\frac{2 \cdot \Delta t}{2 \cdot TT + \Delta t} \right) \cdot q_{in,av} + \left(1 - \frac{2 \cdot \Delta t}{2 \cdot TT + \Delta t} \right) \cdot q_{out,1} \quad (3.8)$$

vyjadřující vztah mezi „tr time“ a „storage coefficient“ (koeficient zásoby) SC, který je z této rovnice možno vyjádřit jako

$$SC = \frac{2 \cdot \Delta t}{2 \cdot TT + \Delta t} \quad (3.9)$$

Platnost (existence) vztahu vyjádřeného následující rovnicí (3.10)

$$(1 - SC) \cdot q_{out} = SC \cdot \frac{V_{stor}}{\Delta t} \quad (3.10)$$

a jeho substituce do rovnice (3.8) pak dává vztah, který po převedení všech členů do jednotek objemu vyjadřuje rovnice (3.11)

$$V_{out,2} = SC \cdot (V_{in} + V_{stor,1}) \quad (3.11)$$

Metoda, kterou odvodil Muskingum je běžnou hydrologickou metodou modelování postupu povodňové vlny říčním korytem při proměnlivém vztahu mezi průtokem a zásobou vody v nádrži (Chow, a další, 1988)

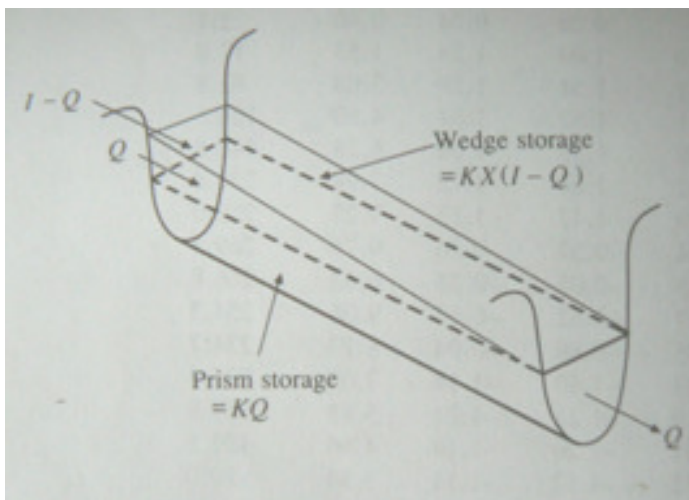
Základním předpokladem je zde rovněž platnost rovnice kontinuity dána vztahem (3.5). Protože q a S jsou zde neznámými, je třeba další rovnice, která by popisovala vztah těchto proměnných. Obecné vyjádření takové rovnice je tzv. „storage function“ (zásobní funkci), která má obecný tvar:

$$S = KQ + KX(I - Q) \quad (3.12)$$

kde S značí celkový objem daného úseku koryta, V je objem vody přiteklé do daného úseku za uvažovaný časový krok, Q [m³ H₂O] je objem vody vyteklé z daného úseku za uvažovaný časový krok (Bauwens, 2007). Muskingum vyjádřil „Storage function“ pomocí dvou objemových složek - vedge a prism složky objemu viz Obr. 5.

Obr. 5

(Chow, a další, 1988)



Prism složka představuje objem uvažovaného úseku koryta při konstantním průřezu (profilu). Při postupu průtokové vlny korytem toku je inflow větší než outflow což se na uvažovaném úseku koryta projeví přírůstkem objemu ve tvaru klínu. Během fáze recese popřechodu vlny naopak outflow převyšuje inflow což dá vzniknout zápornému objemu tvaru klínu. Za předpokladu, že velikost plochy profilu je úměrná průtoku z úseku koryta, je prismatické složky objemu rovna výrazu KQ a objem wedge složky roven výrazu $KX(I - Q)$, kde X (Chow). Součtem obou složek a následnou algebraickou

úpravou dostaneme rovnici (3.13) vyjadřující storage funkci použité v rámci metody Muskingum (Chow).

$$V_{stored} = K(xq_{in} + (1 - x)q_{out}) \quad (3.13)$$

Perkolace dnem koryta

Ztráty vody způsobené propustností dna koryta se vyskytují v případech vysychavých vodních toků nebo na povodích, kde je říční síť dotována ze systému podzemních vod jen po určitou část roku popř. vůbec nikdy. Model SWAT tyto řeší metodou, kterou odvodil Lane.

Řešení vlivu vodních nádrží

Rezervoárem je v rámci SWAT každá vodní nádrž na vodním toku povodí, do které přitéká voda ze všech povodí výše položených (Neitsch, a další, 2005) Ve vodní bilanci nádrže je zahrnuta složka přítoku a odtoku, objem srážek spadlých na hladinu nádrže, výpar z volné hladiny, průsak dnem nádrže a diversions. Důležitou charakteristikou nádrže je velikost plochy, která výrazně ovlivňuje výšku výparu, srážek a průsaku.

3.6.3 Vstupní data

Struktura vstupních dat hydrologických modelů je většinou různorodá. Protože hydrologické procesy probíhají v čase a prostoru, zahrnuje soubor vstupních dat zpravidla složku prostorovou (geografická data) i složku chronologickou (časové řady).

Současné technologie GIS vytváří podmínky širšího propojení uvedených dvou typů datových struktur (Kulhavý, a další, 2000).

SWAT je schopen řešit řadu procesů, od těch základních ovlivňujících hydrologický režim povodí, až po ty více specifické. Model hydrologického režimu tvoří nejdůležitější součást každé simulace a zásadně ovlivňuje průběh dalších fyzikálních procesů, jejichž simulace je však v prostředí SWAT pouze volitelná. Zejména od účelu simulace resp. množství zvolených modelovaných procesů se pak tedy odvíjí i množství a povaha vstupních dat, která jsou pro její provedení zapotřebí. Množství vstupních dat dále ovlivňují zvolené výpočetní metody.

3.6.3.1 Meteorologická data

Podnebí daného povodí určují energetická a vláhová data. Model umožňuje vstup časových řad srážkových a klimatických dat z měřených záznamů (denní, případně i kratší krok) nebo nabízí možnost generování takových časových řad na základě vstupních dat průměrných měsíčních hodnot pro zadané klimatické stanice. Rozsah těchto dat vyžadovaných modelem SWAT je dán také volbou metody výpočtu potenciální evapotranspirace.

3.6.3.2 Geografická data

Díky širokému rozšíření aplikačních GIS technologií napříč celým spektrem hospodářských a správních aktivit v poslední době došlo ke zlepšení podmínek v oblasti distribuce a zpracování geodat (vrstev GIS, celých geodatabází). V hydrologii to umožňuje realizace časoprostorových analýz či prognóz lépe vystihujících skutečné procesy v povodích.

Základní sestavu prostorových vstupních dat modelu SWAT tvoří model terénu, data o krajinném pokryvu (využití území a zastoupení vegetace) a data o půdním pokryvu povodí. Volitelnou součástí dat pak může být vrstva sítě vodních toků (hydrografické sítě), data zachycující prostorové uspořádání monitorovacích systémů, vrstvy mapující významné vodohospodářské objekty (vodní díla, hydro-meliorační či protierozní opatření) nebo výskyt bodových zdrojů znečištění.

Data o využití území a vegetační pokryv

Vzhledem k značnému rozšíření a zažitosti pojmů landcover (LC) a land use (LU) v našich odborných kruzích upouštím v tomto textu od používání - buď poměrně nepřesných nebo jaksi nešikovně zdlouhavých - českých protějšků.

Řada textů sdružuje data o využití území a data o vegetačním pokryvu pod pojem „land use“. Toto může působit poněkud nepřesně a tak si pro účel této práce dovolím stručné upřesnění. Sklenička (Sklenička, 2003) definuje pojem Landcover jako kombinaci Land use (tedy využití krajiny) a vegetačního pokryvu aktuální v daném čase pro danou územní jednotku zemského povrchu. LC je tedy zpravidla širší pojem zahrnující jednotlivé dílčí atributy krajiny včetně land use. Pro označení skupiny dat o využití a vegetačním pokryvu území je tedy v rámci tohoto textu použito označení

„landcover“. Členění plochy povodí do jednotlivých tříd LC zobrazuje Obr. 16 a procentní zastoupení těchto tříd v rámci zájmového území vyjadřuje graf Gr. 3 v příloze B na straně 72.

Půdní data

Vedle srážkových poměrů a morfologických charakteristik ovlivňuje hydrologický režim povodí charakter půdního pokryvu a hydrologické vlastnosti půd, kterými jsou zejména vodopropustnost (infiltrace) a schopnost zadržení vody půdou (retenční vodní kapacita). Infiltrace a retence půd závisí na řadě půdních charakteristik, které existují v interakci jak s vodou, tak mezi sebou navzájem (Kulasová, a další, 2004). Mezi tyto charakteristiky patří zejména:

- zrnitostní složení půdního profilu
- strukturní stav profilu
- hloubka půdy (vztažená k matečí hornině či a hladině podzemní vody)
- vlastnosti jílové frakce (ovlivňující především objemové změny)
- skeletovitost profilu
- pórovitost (charakter, velikost, rozmístění)
- obsah humusu a jeho složení
- výskyt horizontů či vrstev s odlišnými vlastnostmi (např zrnitost)

Přehled půdních veličin, které model SWAT vyžaduje je uveden v tabulce Tab. 1.

Tab. 1 Přehled půdních veličin, které model SWAT

veličina	jednotky	název SWAT
hloubka půdy	mm	SOL_Z
objemová hmotnost	g cm^{-3}	SOL_BD
využitelná vodní kapacita	% celk. objemu půdy	SOL_AWC
nasyčená hydraulická vodivost	mm h^{-1}	SOL_K
fyzikální jííl (do 0,002 mm)	% hmotnosti	CLAY
prach (0,002 - 0,05 mm)	% hmotnosti	SILT
písek (0,05 - 2 mm)	% hmotnosti	SAND
obsah skeletu (nad 2 mm)	% celk. hmotnosti	ROCK
K-faktor rovnice USLE	původní US jednotky	USLE_K

3.6.4 Citlivostní analýza, kalibrace a validace v rámci SWAT

Matematické modely představují vždy určité zjednodušení skutečně probíhajících procesů. Do výpočetních algoritmů často vstupují veličiny (parametry), které nelze přímo změřit a jejich hodnoty jsou známe pouze přibližně (fyzikální vlastnosti půd, stav vegetace atd.). Před každou aplikací modelu je zpravidla třeba nastavit optimální hodnoty těchto parametrů, tak, aby bylo dosahováno spolehlivých předpovědí při zachování fyzikální podstaty algoritmu modelu. Nalezení optimálního rozsahu hodnot parametrů a optimální kombinace parametrů modelu je předmětem citlivostní analýzy a kalibrace. Validace pak slouží k ověření výsledků provedené kalibrace modelu.

3.6.4.1 Citlivostní analýza

U komplexních modelů, jakým je právě nástroj SWAT, je velmi důležité správné chápání parametrů a znalost jejich vlivu na jednotlivé modelované procesy. Při provádění kalibrace je pak možno zaměřit se na omezenější množství těch nejdůležitějších parametrů a tím výrazně zefektivnit práci (Holvoet, a další, 2005).

Model SWAT využívá celou řadu parametrů, jejichž množství může působit značné potíže při kalibraci. Z tohoto důvodu byl vkomponován (přidán) nástroj pro citlivostní analýzu, který je schopen určit rozsah parametrů, ve kterém dochází nejvýznamnějšímu ovlivnění výstupních hodnot v závislosti na proměnlivosti vstupu (van Griensven, a další, 2002).

Tento nástroj spouštěný přímo z uživatelského rozhraní SWAT využívá metodu LH-OAT, která kombinuje metodu OAT (One-Factor-At-a-Time) a metodu LH (Latin Hypercube) (van Griensven, a další, 2002).

3.6.4.2 Kalibrace modelu

Kalibrace spočívá v provedení nastavení optimálních parametrů modelu pro dosažení přijatelné shody mezi měřenými a simulovanými hodnotami modelovaných veličin (Bauwens, 2007).

Proces kalibrace začíná počátečním odhadem parametrů prováděným většinou na základě znalostí podmínek modelovaného území nebo s využitím výsledků předchozí citlivostní analýzy. Následuje provedení simulace a porovnání vypočtených a měřených hodnot výstupních veličin. K vyhodnocení shody mezi měřenými a simulovanými hodnotami se používá řada kritérií a statistických ukazatelů, mezi které patří např. koeficient korelace, koeficient determinace, procentní objemová chyba nebo koeficient účinnosti předpovědi (Horvát, 2009). Ukazatele použité v této práci jsou popsány v kapitole 3.6.4.4.

Obecně lze říci, že kalibrace je neodmyslitelnou součástí procesu aplikace každého empirického a většiny konceptuálních modelů. U fyzikálně založených modelů by neměla být kalibrace nutná vzhledem k fyzikální podstatě a měřitelnosti jejich parametrů. Je však třeba si uvědomit, že ani sebelepší model nebude nikdy dokonale napodobovat reálně probíhající procesy a proto i zde je mnohdy kalibrace parametrů na místě (Bauwens, 2007).

3.6.4.3 Validace modelu

Validací se rozumí provedení simulace za použití parametrů optimálních hodnot (nalezených zpravidla předchozí kalibrací) a časových řad vstupních veličin (na kalibraci nezávislých) a následné ohodnocení dosažené shody.

Kalibrace a validace modelu je klíčovým momentem pro snížení míry nejistoty resp. zvýšení spolehlivosti předpovědi a tedy důležitým krokem pro jeho efektivní využití (White, a další, 2005).

3.6.4.4 Kritéria hodnocení průběhu simulace modelu

Pearsonův koeficient korelace udává míru a orientaci lineární závislosti měřených O_i a simulovaných P_i hodnot a jeho výpočet je dán vztahem:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (3.14)$$

kde \bar{O} a \bar{P} značí průměr pozorovaných resp. simulovaných hodnot. R nabývá hodnot od -1 do +1. R blízký se k +1 značí pozitivní lineární závislost (křivky obou řad se shodují v monotónnosti) a naopak R jdoucí k -1 značí negativní lineární závislost (křivky obou řad mají opačnou monotónnost).

Procentní objemová chyba VE je indikátor míry přesnosti předpovědi celkového množství odtoku a vypočte se podle vztahu:

$$VE = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (3.15)$$

Často používaným ukazatelem je koeficient účinnosti předpovědi E (Nash and Sutcliffe, 1978), který je dán vztahem:

$$E = 1 - \frac{\sum_i^N (O_i - P_i)^2}{\sum_i^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (3.16)$$

kdy $E = 1$ znamená úplnou shodu měřených a vypočtených hodnot, $E = 0$ značí předpověď odpovídající svou úspěšností průměru a $E < 0$ znamená, že přesnější předpovědí než simulace modelu je dlouhodobý průměr (Horvát, 2009).

Druhá mocnina členů obsažených v rovnici (3.16) způsobuje značnou citlivost ukazatele na výskyt odchylek měřených a vypočtených hodnot při extrémních povodňových průtocích. Každé nadhodnocení takového extrému modelem může negativně zkreslit hodnotu E. Tuto citlivost lze eliminovat použitím absolutních diferencí, což vede k modifikovanému tvaru výpočtu ukazatele E danému rovnicí (3.17) (White, a další, 2009).

$$E' = 1 - \frac{\sum_i^N |O_i - P_i|}{\sum_i^N |O_i - \bar{O}|} \quad (3.17)$$

3.6.4.5 Automatická kalibrace

K nalezení optimálních parametrů modelu existuje celá řada automatických metod. V rámci integrovaného programového nástroje SWAT je při kalibraci používán postup známý jako Shuffled Complex Evolution algorithm (SCE-UA). Jedná se o globální lokalizační algoritmus pro minimalizaci objektivní funkce pro maximálně 16 parametrů (Duan, a další, 1994).

Algoritmus SCE-UA nejprve v rámci definovaného rozsahu náhodně určí počáteční (první) populaci parametrů. Populace je poté rozdělena do několika komplexů,

při čemž v každém z nich je nezávisle rozvinut simplexový algoritmus. Systém uspořádání do komplexů je opakovaně měněn, tak, že algoritmus v nově zformovaných komplexech bere v úvahu informace zjištěné na základě komplexů předcházejících (Green, a další, 2007).

Van Griensven a Bauwens (2001) popsali metodu, kterou je definována objektivní funkce pro každou výstupní neznámou veličinu. Kritérium shody simulovaných a pozorovaných hodnot vychází z objektivní funkce metody SSQ (Sum Of Squares Method). Algoritmus SCE-UA pak hledá kombinaci parametrů (θ^*) obsahujících p volných parametrů ($\theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_p^*$), které odpovídají minimu objektivní funkce SSQ (Green, a další, 2007). Objektivní funkce metody SSQ je dána vztahem:

$$SSQ = \sum_{i=1}^n [X_i - Y_i]^2 \quad (3.18)$$

kde X_i, Y_i a n jsou měřené hodnoty, simulované hodnoty a počet dvojic měřených a simulovaných hodnot.

3.7 UPLATNĚNÍ GIS A DATOVÉHO MODELU V PROSTŘEDÍ SWAT

Modelování hydrologických procesů povodí či regionů v koncepčně deterministickém pojetí a s využitím prostorové distribuce parametrů představuje mimo jiné zacházení s poměrně velkými objemy dat (Brimicombe, 2003). Jelikož značná část vstupních i výstupních dat v této oblasti modelování jsou prostorového charakteru (geografická data a parametry), je velmi výhodné či přímo nutné využití prostředků GIS a některých technologií s nimi spojenými (Olivera, a další, 2006).

Literatura (Sui, a další, 1999) zmiňuje několik hlavních směrů v problematice propojení GIS a hydrologických modelů. První z nich spočívá v zahrnutí GIS přímo do hydrologického modelu, což umožňuje zpracovávání prostorových (tzv „preprocessing“ a „postprocessing“) dat přímo v prostředí modelu. Příkladem je např. model WMS vyvinutý jako samostatná větev modelu HEC-1. V opačném případě se jedná o vkomponování hydrologického modelu do prostředí GIS. Od tohoto směru se však dle literatury (Jeníček, 2007b) již ustupuje a jsou dále vyvíjeny spíše pouze dílčí nástroje GIS pro zpracování prostorových a časových dat a jejich export do modelu. Příkladem

jen např. GeoHMS, GeoRAS nebo ArcHydro. Jako nejčastější koncepci uvádí literatura (Jeníček, 2007b) tzv. volnou vazbu mezi GIS a modelem. GIS v tomto případě zajišťuje „preprocessing“ a převod dat do modelem akceptovaného formátu a opačně. Přímé programové propojení mezi GIS a modelem zde neexistuje nebo je minimální. Propojení může fungovat např. na základě platformy .NET, jako je tomu právě u rozhraní ArcSWAT.

Druhou významnou otázkou je problematika spravování a organizace dat. Z důvodu velkých objemů používaných a produkováných dat byl u rozhraní modelu SWAT (program ArcSWAT 2005) vyvinut speciální datový model („ArcGIS-SWAT data model“) (Oliviera, a další, 2006). Struktura tohoto datového modelu je v jádru založena na principu relační geodatabáze a současně částečně využívá osvědčený koncept datového modelu ArcHydro. Díky vyspělým technologiím vyvinutým v oblasti relačních geodatabází (např. optimalizované vyhledávací metody, komplexní agregované výpočty apod.) je tak zajištěna optimalizace správy a organizace dat.

Datový model ArcGIS-SWAT tvoří dvě databáze. Dynamická geodatabáze („project database“ neboli projektová databáze) soustřeďující údaje o objektech konkrétního modelovaného systému v rámci uživatelem definovaného projektu a statická databáze („non-project-specific database“ neboli standardní databáze), která obsahuje data obecně platného charakteru (Olivera, a další, 2006). Projektová databáze je definována uživatelem zvlášť pro každý konkrétní vytvářený model povodí. Kdežto standardní databáze (SWAT2005.mbd) je součástí standardně instalované verze rozhraní ArcSWAT a skládá se s dílčích databází obsahujících standardní parametry různého typu. Například tabulka „crop“ obsahuje parametry jednotlivých významných vegetačních druhů (druhů zemědělských plodin, druhů dřevin apod.) a současně také parametry neurbanizovaných krajinných jednotek předdefinovaných pomocí klasifikace NLCD. Druhým příkladem může být tabulka „urban“, která obsahuje atributy urbanizovaných krajinných jednotek předdefinovaných na základě klasifikace NLCD. Tyto tabulky pak v některých svých polích odkazují na další části databáze, odkud jsou pro model čerpány data týkající se např. způsobu kultivace půdy či používání pesticidů a

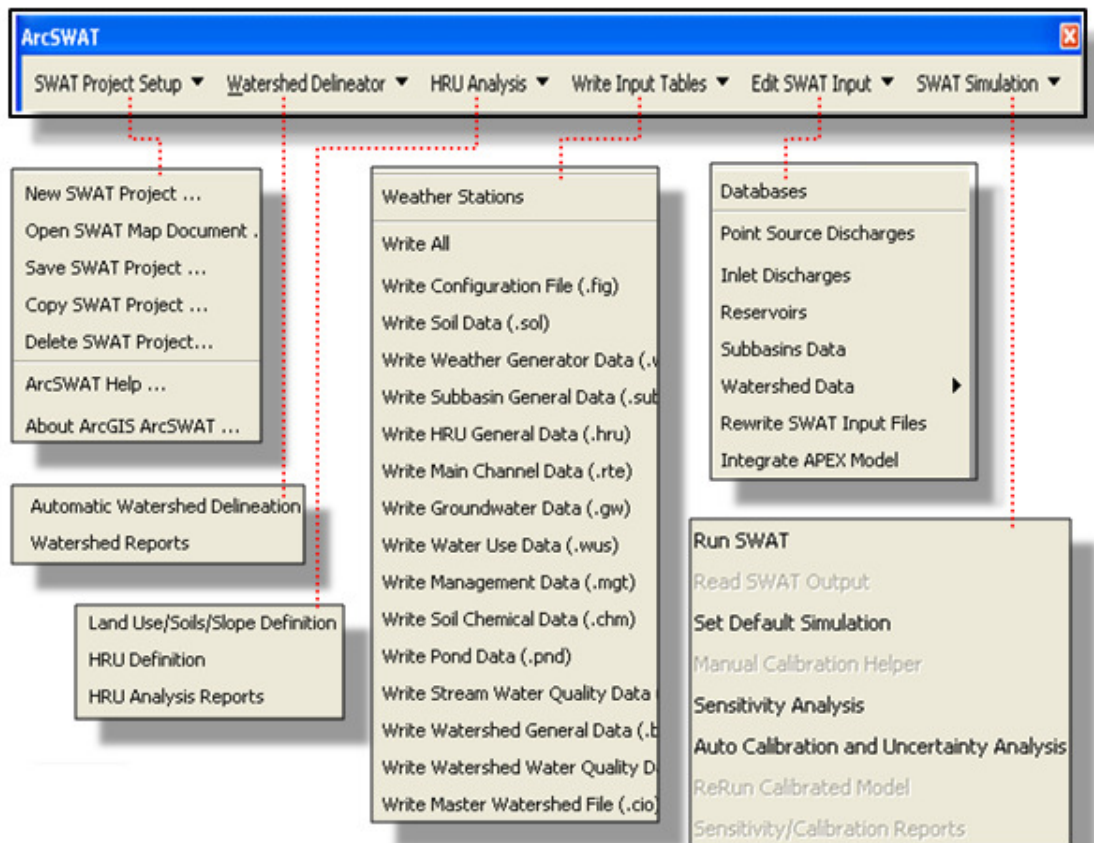
hnojiv u dané pěstované plodiny nebo hodnoty odtokového součinitele urbanizovaných území.

Obě tyto databáze používají systém objektů („ArcObject“) vyhovující protokolu COM („Component Object Model“), který umožňuje kompatibilitu s dalšími aplikacemi v systému Windows např. MS Access, MS Excel, Matlab aj. (Olivera, a další, 2006).

Rozhraní ArcSWAT sestává z několika modulů (viz. Obr. 6) z nichž část provádí prostorové analýzy geografických parametrů povodí (terén, LULC, počasí, půdní jednotky), část zprostředkovává patřičné propojení datového modelu s vlastním hydrologickým modelem (moduly pro generování a úpravu vstupních souborů) a další část poskytuje podporu při hydrologické analýze a integraci modelu SWAT (nástroje pro citlivostní analýzu, kalibraci) (Srinivasan, a další).

Obr. 6

Zdroj:



3.8 ZKUŠENOSTI S MODELEM SWAT V ČR A VE SVĚTĚ

Matematické modely představují vždy určité zjednodušení skutečně probíhajících procesů. Do výpočetních algoritmů často vstupují veličiny (parametry), které nelze přímo změřit a jejich hodnoty jsou známy pouze přibližně (fyzikální vlastnosti půd, stav vegetace atd.). Před každou aplikací modelu je zpravidla třeba nastavit optimální hodnoty těchto parametrů, tak, aby bylo dosaženo spolehlivých odpovědí při zachování fyzikální podstaty algoritmu modelu. Nalezení optimálního rozsahu hodnot parametrů a optimální kombinace parametrů modelu je předmětem citlivostní analýzy a kalibrace. Validace pak slouží k ověření výsledků provedené kalibrace modelu.

U komplexních modelů, jakým je právě nástroj SWAT, je velmi důležité správné chápání parametrů a znalost jejich vlivu na jednotlivé modelované procesy. Při provádění kalibrace je pak možno zaměřit se na omezenější množství těch nejdůležitějších parametrů a tím výrazně zefektivnit práci (Holvoet, a další, 2005).

Model SWAT využívá celou řadu parametrů, jejichž množství může působit značné potíže při kalibraci. Z tohoto důvodu byl vkomponován (přidán) nástroj pro citlivostní analýzu, který je schopen určit rozsah parametrů, ve kterém dochází nejvýznamnějšímu ovlivnění výstupních hodnot v závislosti na proměnlivosti vstupu (van Griensven, a další, 2002).

Tento nástroj spouštěný přímo z uživatelského rozhraní SWAT využívá metodu LH-OAT, která kombinuje metodu OAT (One-Factor-At-a-Time) a metodu LH (Latin Hypercube) (van Griensven, a další, 2002).

Kalibrace spočívá v provedení nastavení optimálních parametrů modelu pro dosažení přijatelné shody mezi měřenými a simulovanými hodnotami modelovaných veličin (Bauwens, 2007).

Proces kalibrace začíná počátečním odhadem parametrů prováděným většinou na základě znalostí podmínek modelovaného území nebo s využitím výsledků předchozí citlivostní analýzy. Následuje provedení simulace a porovnání vypočtených a měřených hodnot výstupních veličin. K vyhodnocení shody mezi měřenými a simulovanými

hodnotami se používá řada kritérií a statistických ukazatelů, mezi které patří např. koeficient korelace, koeficient determinace, procentní objemová chyba nebo koeficient účinnosti předpovědi (Horvát, 2009). Ukazatele použité v této práci jsou popsány v kapitole 3.6.4.4.

Obecně lze říci, že kalibrace je neodmyslitelnou součástí procesu aplikace každého empirického a většiny konceptuálních modelů. U fyzikálně založených modelů by neměla být kalibrace nutná vzhledem k fyzikální podstatě a měřitelnosti jejich parametrů. Je však třeba si uvědomit, že ani sebelepší model nebude nikdy dokonale napodobovat reálně probíhající procesy a proto i zde je mnohdy kalibrace parametrů na místě (Bauwens, 2007).

Validací se rozumí provedení simulace za použití parametrů optimálních hodnot (nalezených zpravidla předchozí kalibrací) a časových řad vstupních veličin (na kalibraci nezávislých) a následné ohodnocení dosažené shody.

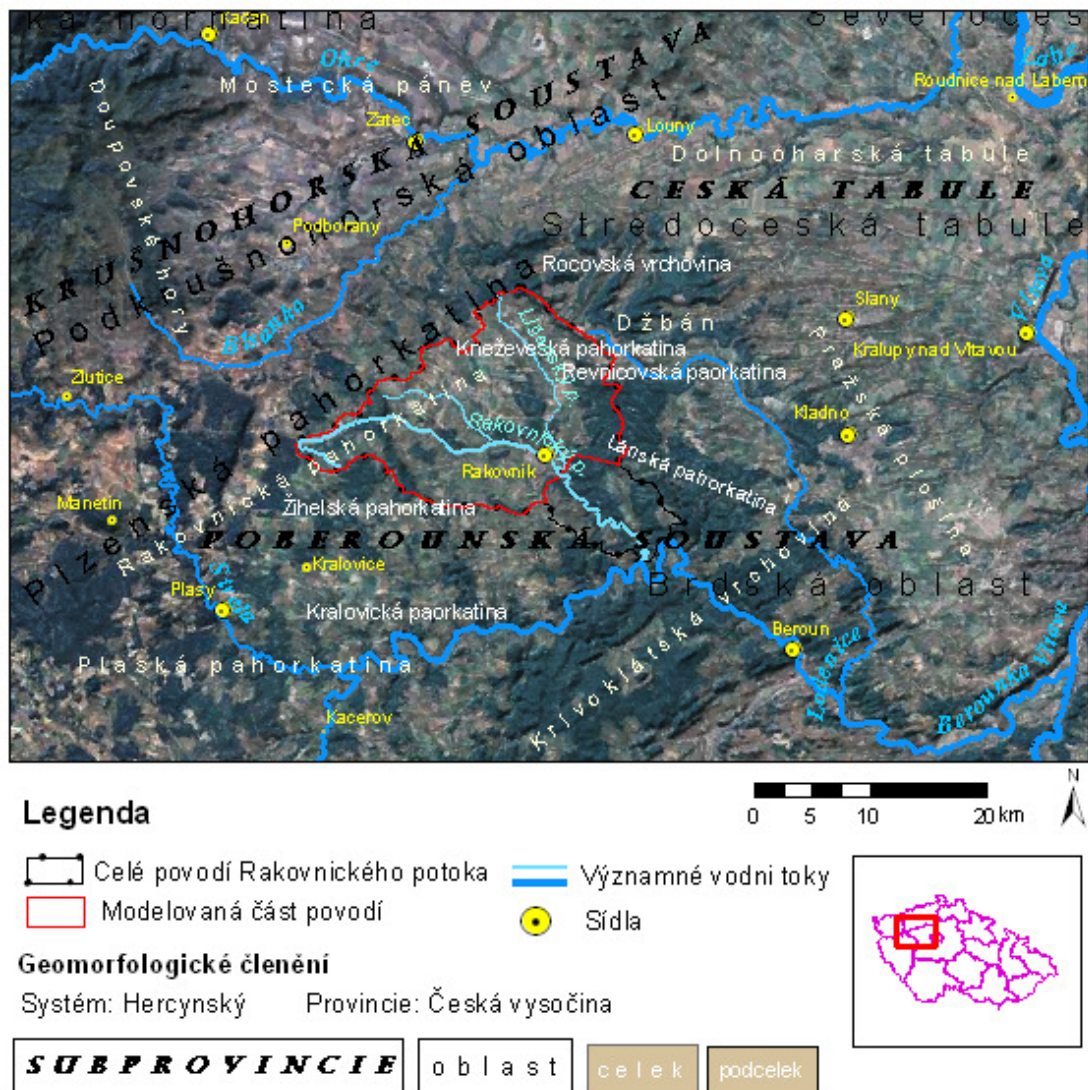
Kalibrace a validace modelu je klíčovým momentem pro snížení míry nejistoty resp. zvýšení spolehlivosti předpovědí a tedy důležitým krokem pro jeho efektivní využití (White, a další, 2005).

4 GEOGRAFICKÁ CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ

Povodí rakovnického potoka se nachází ve středočeském kraji v severní části Plzeňské pahorkatiny. Rakovnický potok pramení v severovýchodní části Žihelské pahorkatiny 1,5 km jihovýchodně od obce Drahouš v nadmořské výšce 569 m n. m. a ve výšce 235 m n. m. pak pod Křivoklátem ústí zleva do řeky Berounky. Celková plocha povodí činí 368,1 km² s délkou toku 48,4 km a průměrným průtokem v ústí 0,86 m³·s⁻¹ (Vlček, 1984).

Pro účel zpracování této diplomové práce byla uvažována pouze střední a horní část povodí o celkové rozloze 302 km² a s uzavřeným profilem v měrné stanici Rakovník (309 m n. m, ř. km 17,79) přibližně 2,5 km jihovýchodně od města Rakovník. Pojmem povodí Rakovnického potoka bude tedy v dalším textu označováno zájmové území této studie.

Obr. 7 Geografická poloha a geomorfologické členění zájmového území



Zdroj: <http://geoportal.cenia.cz>, <http://www.mapy.cz>

4.1.1 Geomorfologické členění zájmového území

Celé zájmové území je součástí subprovincie Poberounská soustava, která náleží k provincii Česká vysočina Hercynského systému. Průměrná nadmořská výška povodí je 407 m a největších nadmořských výšek zde dosahuje Žihelská pahorkatina s Plavečským vrchem (603 m n. m.) při západním okraji povodí. Geomorfologie povodí je patrná z Obr. 7.

Dle dalšího členění je Poberounská soustava zastoupena na většině sledovaného území geomorfologickou oblastí Plzeňská pahorkatina tvořenou převážně zvrásněnými slabě přeměněnými proterozoickými hominami s ostrůvky hlubinných vyvřelin na nichž spočívají permokarbonské a neogenní horniny. Je příznačná zvláště povrchem, v němž se střídají vyvýšené části s plochými sníženinami, místy ční odolné horniny např. bulžníky (Balatka, 1987).

V rámci řešeného území se Plzeňská pahorkatina dělí na dva geomorfologické celky - Rakovnickou pahorkatinu a Plaskou pahorkatinu. Plaská pahorkatina zasahuje částečně při jižní hranici povodí a je zde zastoupena podcelkem Kralovické pahorkatiny, která se vyznačuje méně porušeným erozně denudačním reliéfem se sklonem k údolí Berounky se zbytky třetihorních zarovnaných povrchů na rozvodních hřbetech. Většinu území povodí tvoří Rakovnická pahorkatina se svými mělkými a středně zahloubenými údolními vodními toků či méně častými výraznými svahy na zlomových liniích (Balatka, 1987).

Rakovnická pahorkatina je dále členěna na dva podcelky - Kněžveskou pahorkatinu a Žihelskou pahorkatinu. Žihelská pahorkatina zaujímá oblast západního výběžku povodí a je složena z fylitů tepelsko-barrandienské oblasti, granitoidů čistecko-jesenického masívu a z karbonských sedimentárních hornin. Charakteristické jsou zde výrazné okrajové zlomové svahy a tvary zvětrávání a odnosu žulových hornin (Balatka, 1987).

Nejvýrazněji zastoupeným geomorfologickým podcelkem zájmového území je Kněžveská pahorkatina, členitá strukturně tektonická sníženina mezi Džbánem, Doupovskými horami a Žihelskou pahorkatinou, se stř. nadmořskou výškou 377,6 m, stř. sklonem 3°26' a nejvyšším bodem na vrchu Lišák (462 m). Kněžveská pahorkatina je zbudovaná na sedimentárních horninách permokarbonské kladensko-rakovnické pánve, s erozně denudačním reliéfem širokých rozvodních hřbetů a s plošnými až velmi mírně ukloněnými pliocenními a kvartérními zarovnanými povrchy. Charakteristické jsou mírně až středně ukloněné svahy s odlehlíky a plochými suký. Údolí vodních toků, většinou stromovitého půdorysu, jsou široce rozevřená mělká až středně hluboká. Na východě tuto oblast přetíná pruh akumuláční výplně údolního dna

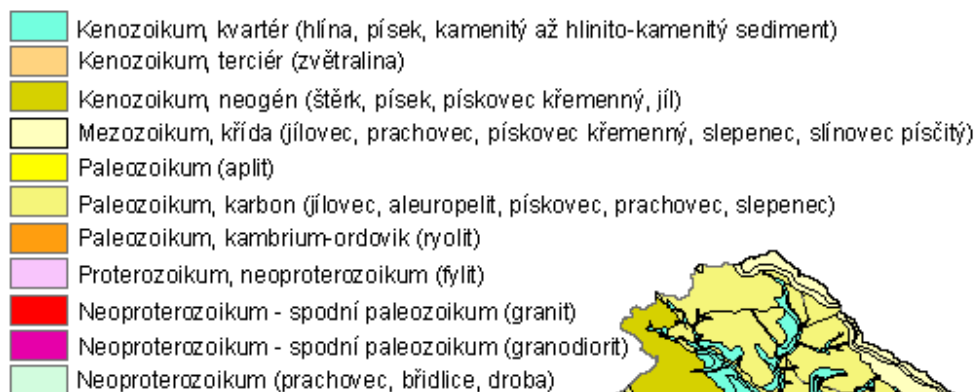
svrchnomiocenního toku, směřujícího k severozápadu k Mostecké pánvi. Místy můžeme pozorovat výrazné erozní rýhy a antropogenní tvary po zaniklé hlubinné těžbě černého uhlí (Balatka, 1987).

4.1.2 Geologické poměry

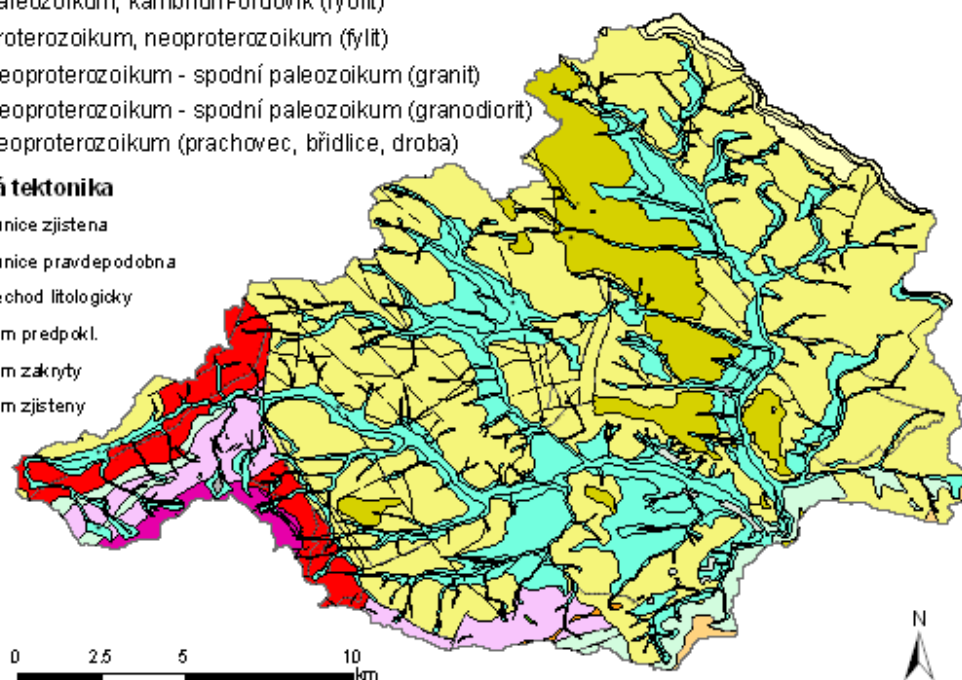
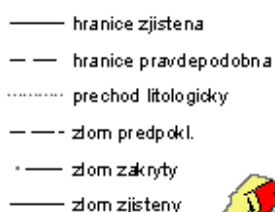
Geologický podklad zájmového území je poměrně různorodý. Horniny vystupující k povrchu jsou zde různého stáří a tím i odlišných podmínek pro zvětrávání, pedogenezi a režim podzemních vod. Členění území z hlediska horninového složení a příslušnosti k daným vývojovým obdobím ukazuje Obr. 8 a Obr. 22.

Obr. 8 Geologické poměry zájmového území - Členění území z hlediska horninového složení a příslušnosti k daným vývojovým obdobím

Chronostratigrafie a horninové složení



Zlomová tektonika



Zdroj: ČGÚ

Převážná část povodí je tvořena paleozoickými sedimenty Permokarbonské rakovnické pánve s poměrně pestrým homínovým složením. V jižní části území najdeme neoproterozoické až paleozoické metamorfity, sedimenty a vulkanity barrandienského regionu a na jihozápadní části území zasahují i neoproterozoické až paleozoické hlubinné magmatity čistecko-jesenického masivu. Mladší horniny jsou zastoupeny denudačními reliktami křídových sedimentů, které sem zasahují při severní hranici z pohoří Džbán resp. Ročovské vrchoviny, neogenními (terciárními) sedimenty tvořící pruh akumulární výplně údolního dna svrchnomiocenního toku táhnoucího se od jihovýchodu směrem k Mostecké pánvi (Balatka, 1987). Povrch, zejména v údolích toků, je kryt vrstvami sedimentů kvartérního stáří.

Horniny barrandienského regionu formující Kralovickou pahorkatinu jsou zastoupeny - břidlicemi, prachovci, drobami a metamorfity těchto hornin v podobě fylitických břidlic, spilitů, fylitů a případně grafitických fylitů.

Vulkanity čistecko-jesenického masivu zde byly vyvrátněny v období přelomu starohor a prvohor kadomským vrátněním a jejich základem jsou středně až hrubě zrnité granity a granitoidy, lokálně proráženy žilnými magmatity (žilný křemen, porfyry). K povrchu vystupují tyto horniny v jihozápadní části povodí, kde prorážejí proterozoické horniny barrandienu. V hlubších vrstvách však zasahují až do podloží sedimentů Rakovnické permokarbonské pánve (Kašpárek, a další, 2010).

Převážnou část reliéfu zájmového území utvářejí sedimenty rakovnické permokarbonské pánve. Základ sedimentární výplně zde tvoří sedimenty kladenského souvrství karbonského stáří tvořené jílovcem, aleuropelity, pískovcem, prachovcem, brekciami, slepenci, arkózami a uhelnými slojemi. V severnější polovině povodí se přidávají sedimenty týneckého souvrství a nadložního slánského souvrství s arkózovitými pískovcem až arkózami, slepenci, aleuropelity, jílovcem a uhelnými slojemi. Sedimentaci dovršuje obdobně (téměř stejně) vyplněné souvrství línské (Kašpárek, a další, 2010). Rozložení jednotlivých souvrství permokarbonské pánve na území povodí zobrazuje mapka na Obr. 23 v příloze.

Sedimenty křídového útvaru jsou zastoupeny jílovcí, prachovci, křemennými pískovci, slepenci či písčítými slínovci. Nezpevněné sedimenty terciéru (písky, štěrky a jíly) pak tvoří říční terasy miocénního stáří.

Z tektonického hlediska je území porušeno zlomy, převažujícím směrem poruch je SZ-JV nebo na ně kolmé zlomy SV-JZ (Kašpárek, a další, 2010).

4.1.3 Klimatické poměry

Z hlediska podnebí patří povodí Rakovnického potoka do oblasti mírně teplé resp. podoblasti mírně vlhké (okrsky B3 a B5) až suché (okrsek B2) (Tolasz, a další, 2007).

4.1.3.1 Srážkové poměry

Dlouhodobé průměrné úhmy srážek ve stanicích na povodí Rakovnického za období 1875–1925, 1901–1950 a 1961–2008 jsou uvedeny v Tab. 2, která dále prezentuje přepočet průměrných úhrnů na základě vztahu mezi nadmořskou výškou stanice a průměrným ročním úhmem daného lineární regresní rovnicí (viz. graf Gr. 1).

Tab. 2 *sdfsdf*

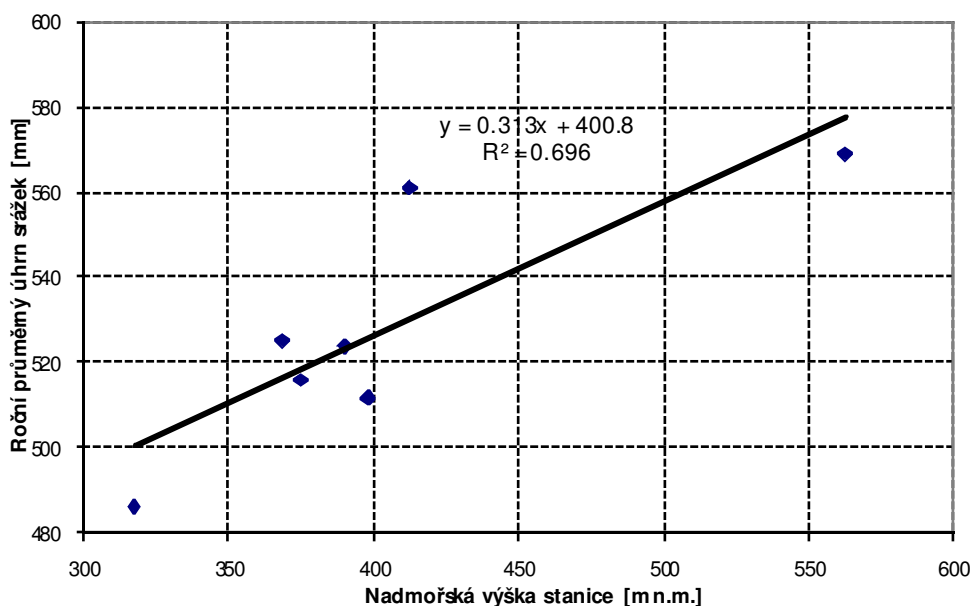
Zdroj: (Kašpárek, a další, 2010)

Stanice	nadmořská výška [m n.m.]	průměrný roční úhrn srážek [mm]		
		1876–1925	1901–1950	1961–2008
Kounov	412		561	514
Kušovice	390	513	524	534
Drahouš	563	594	569	
Petrovice	398	508	512	
Oráčov	375		516	508
Lužná	369	527	525	
Rakovník	318	491	486	491
průměr pro období				
1875–1925	408	527		
1901–1950	404		528	
1961–2008	374			512
průměr po přepočtu na nadmořskou výšku 407 m n.m.				
1875–1925		526		
1901–1950			529	
1961–2008				522

Dlouhodobé průměrné úhmy srážek se pro posuzovaná období příliš neliší, rozdíl mezi obdobími 1901–1950 a 1961–2008 je jen -1,3 %. Je pravděpodobné, že z hlediska dlouhodobých ročních výšek srážek na povodí Rakovnického potoka nedošlo k žádným významným změnám. (Kašpárek, a další, 2010).

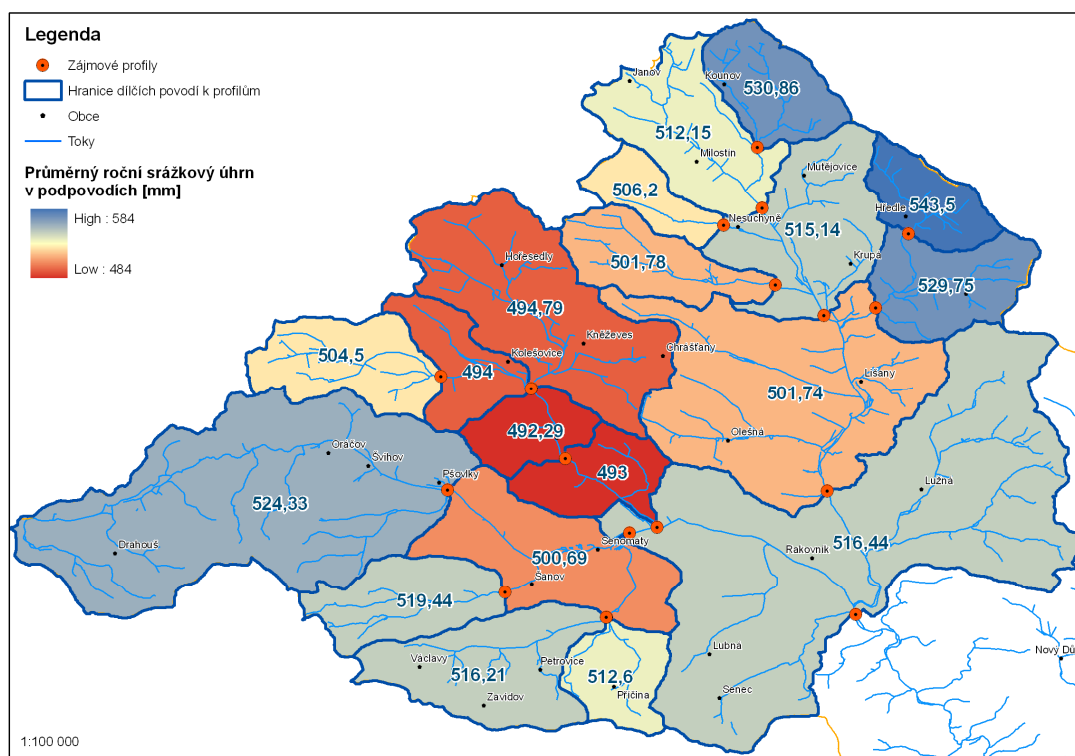
Gr. 1

Zdroj: (Kašpárek, a další, 2010)



Podle grafu Gr. 1, nelze vliv nadmořské výšky na plošnou proměnlivost dlouhodobých srážkových úhrnů na povodí Rakovnického potoka zanedbat. Jak ukazuje mapka ročních úhrnů na Obr. 9 vyčíslených pro jednotlivá subpovodí, oblastmi s nejvyššími úhrny srážek v zájmovém území jsou povodí Kounovského a Krušovického potoka (roční úhrny nad 530 mm) ležící při severovýchodním okraji povodí. V jižní části povodí dosahují úhrny jednotlivých povodí více než 510 mm. Nejnižší úhrny lze pozorovat v severozápadní části území na většině povodích Kolečovického potoka.

Obr. 9
Zdroj: (Kašpárek, a další, 2010)



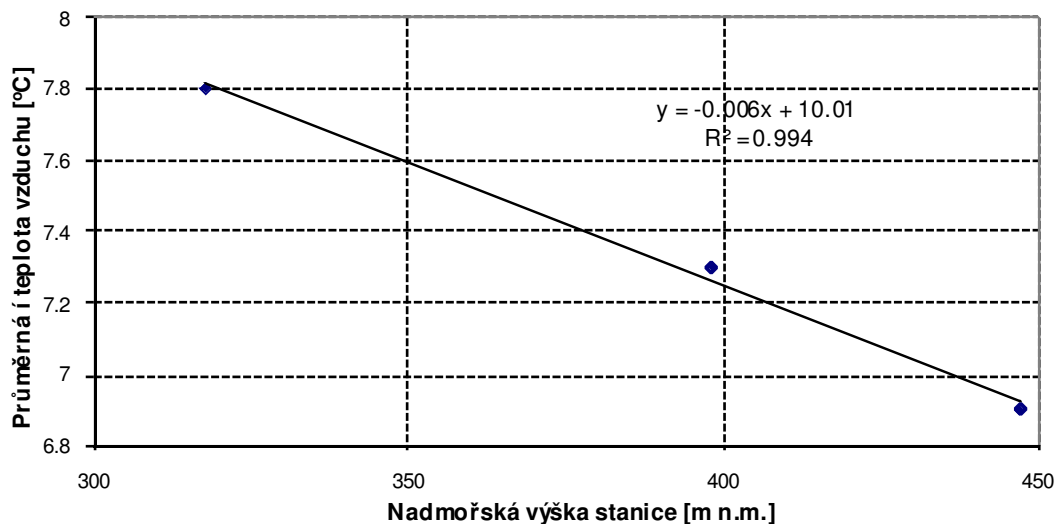
4.1.3.2 Teplota vzduchu

Aktuálnější údaje o teplotě pocházejí z pozorování klimatické stanice Kněževy, která na povodí měří od roku 1995. Průměrná teplota pozorovaná touto stanicí za období 1995 až 2008 je 8,5°C. Teploty na povodí Rakovnického potoka jsou v současné době výrazně vyšší než v první polovině dvacátého století (Kašpárek, a další, 2010).

Regresní závislost mezi nadmořskou výškou a průměrnou roční teplotou vzduchu je patrné z grafu Gr. 2.

Gr. 2 Vztah mezi nadmořskou výškou stanice a průměrnou teplotou vzduchu v období 1901–1950

Zdroj: (Kašpárek, a další, 2010)



4.1.3.3 Evapotranspirace

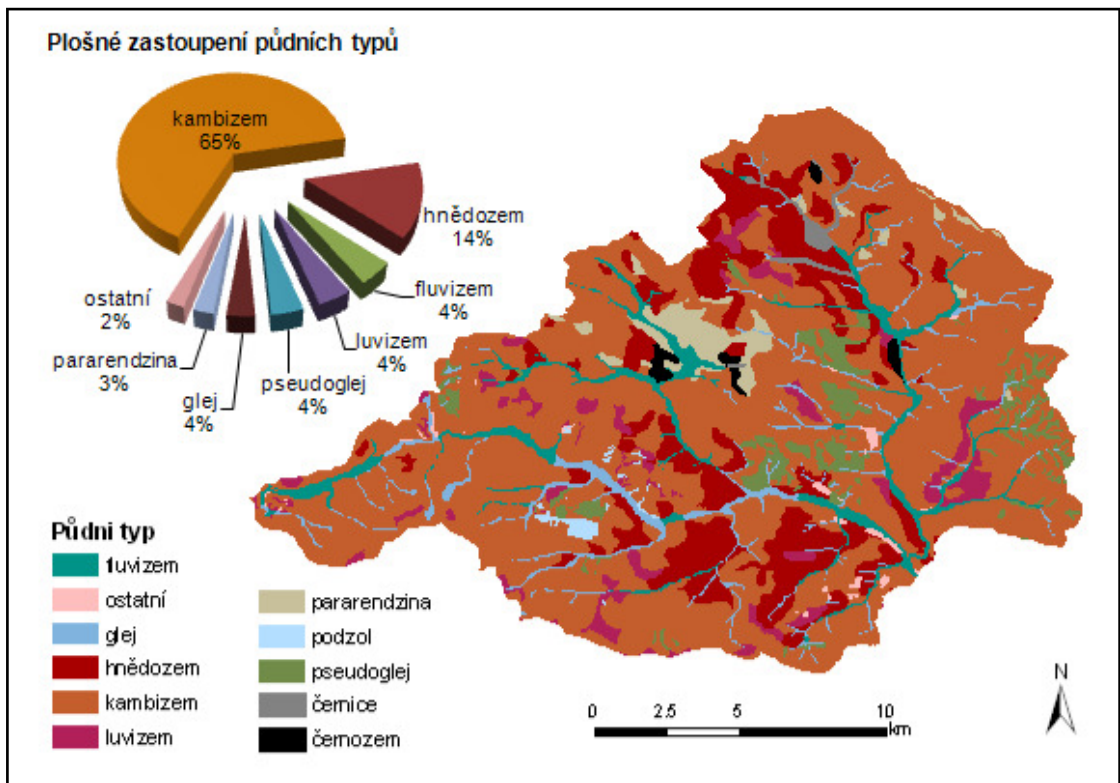
Podle Atlasu podnebí Česka (Tolasz, a další, 2007) se hodnoty potenciální evapotranspirace velmi blíží hodnotám výparu z volné hladiny srovnatelným rovněž s hodnotami referenční evapotranspirace. Roční výpar z volné hladiny resp. referenční evapotranspirace dle této publikace dosahuje na povodí Rakovnického potoka průměrně hodnot 550 až 650 mm za rok.

4.1.4 Charakteristika půdních poměrů

Zastoupení a prostorové rozložení půdních typů v rámci zájmového území ukazuje obrázek Obr. 10. Stejně jako na celém území ČR i zde je nejvíce rozšířeným půdním typem kambizem.

Stratigrafická charakteristika kambizemí je patrná z obrázku Obr. 24 v příloze. U hnědých půd, typicky na zdejších permokarbonských sedimentech, se místy objevuje nápadné červené zbarvení odpovídající barvě matečného substrátu v podloží. Jedná se o skeletovité půdy se zrnitostním složením proměnlivým v závislosti na povaze mateční hominy a silně kolísajícím obsahem humusu. Z hydrologického hlediska patří půdní typ Kambizem především mezi půdy se střední rychlostí infiltrace (0,06–0,12 mm/min), což odpovídá skupině B v hodnocení hydrologických skupin půd (HSP) (Janeček, 2005).

Obr. 10
 zdroj - viz instrukce z AOPK sm louvy!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!



Přibližně 18% území povodí, zejména nižší polohy Rakovnické kotliny, pokrývají půdy ze skupiny půd označované jako luvisoly. Významněji zastoupenými půdními typy této skupiny jsou zde luvizem a zejména hnědozem pokrývající cca 14% plochy povodí.

Hnědozemi jsou půdy středně těžké až těžší s příznivými fyzikálními vlastnostmi a humusovým složením. Z hydrologického hlediska patří hnědozem modální a luvizem modální do půd se střední rychlostí infiltrace (0,06–0,12 mm/min), což je řadí do skupiny B v hodnocení HSP (Janeček, 2005).

V blízkosti vodních toků a v údolních nivách celého povodí jsou nejvíce zastoupeny fluvizemi, gleje a pseudogleje. Fluvizem, neboli nivní půda, patří do skupiny půd fluvisolů. Zmitost nivních půd značně kolísá v závislosti na rychlosti proudění v toku a vzdálenosti od jeho řečiště (Tomášek, 2000). U glejů, na rozdíl od fluvizemí, je půdotvorný proces dán vlivem trvalého stavu nadbytečné vlhkosti.

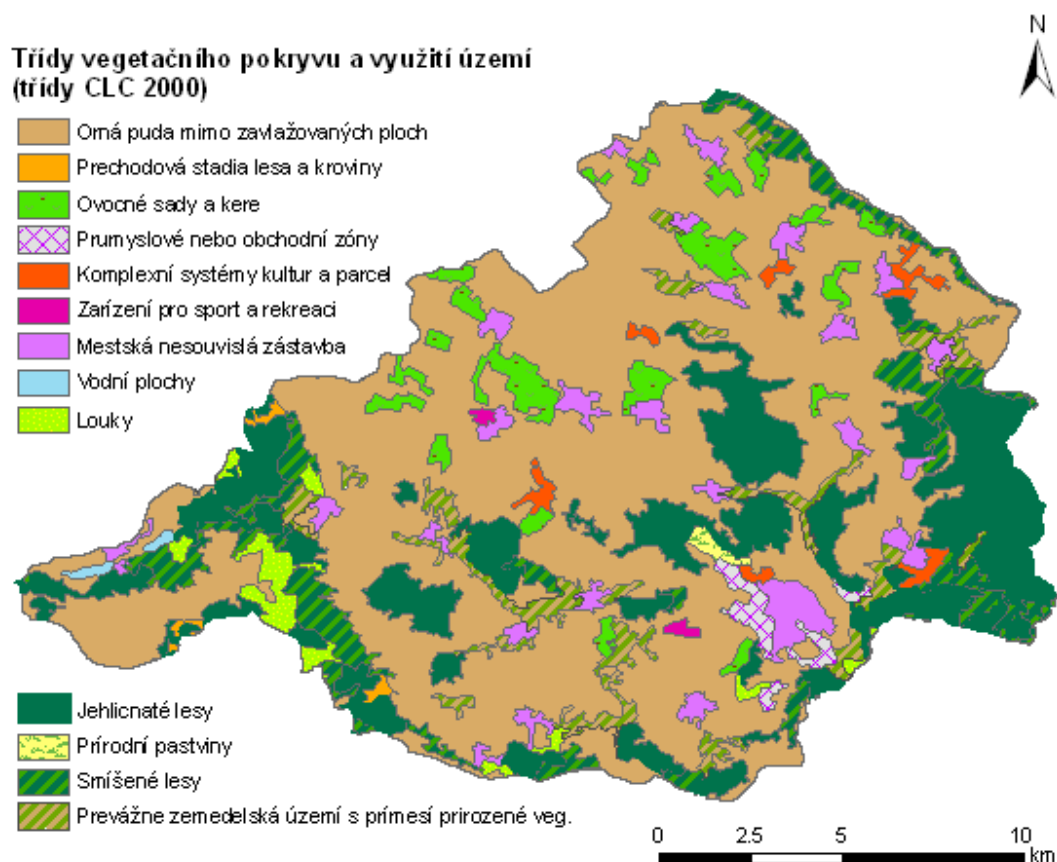
Výskyt pseudoglejů, je vázán především na smíšené písčitojílovité sedimenty terciéru, na menších plošinách rozptýlených v pásmu při západním břehu Líšanského potoka. Jedná se o těžší až těžké půdy se silným sezónním převlhčováním povrchových horizontů spojené a často vyšším obsahem organických látek.

Ve velmi malé míře se na zájmovém území vyskytují půdní typy označované jako pararendziny, černice, čemozemě nebo podzoly.

Z nich stojí za zmínku nejvíce výskyt pararendzin vázaných na zvětraliny karbonátově-silikátových hornin (pískovec, opuka) v okolí Kněževsi. Jedná se o lehké až středně těžké půdy s typickým obsahem karbonátů ve spodině a středním obsahem humusu a časté náchylnosti k vysychání pro jejich mělkost a vyšší skeletovitost.

4.1.5 Povrchový (vegetační) pokryv a využití území

Obr. 11 Členění plochy povodí z hlediska povrchového pokryvu a využití území zdroj:

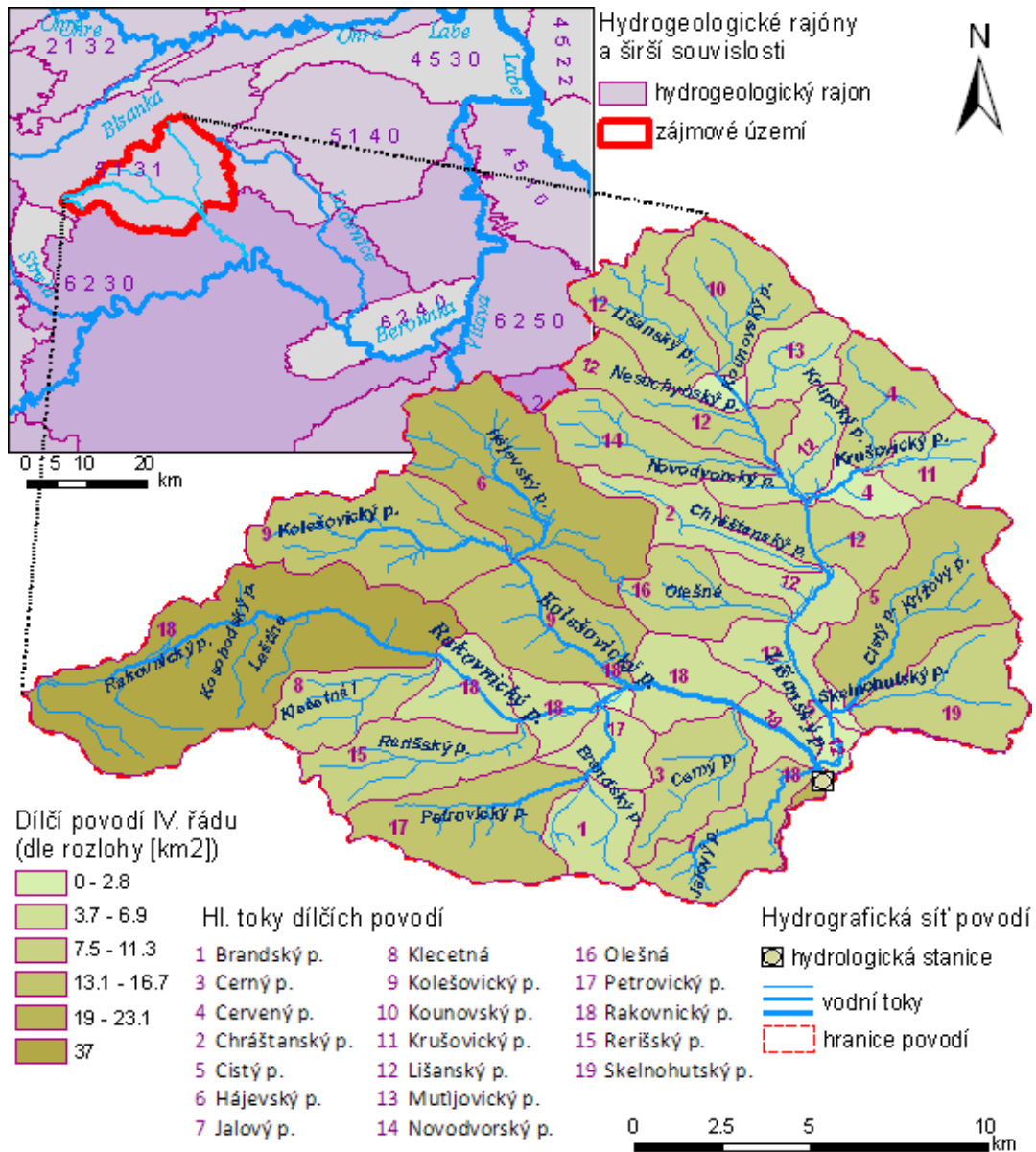


4.1.6 Hydrologické poměry území

4.1.6.1 Hydrografická charakteristika povodí

Rakovnický potok je levostranný přítok řeky Berounky, do které se vlévá v Roztokách přibližně na 62. říčním kilometru. Hydrografická síť povodí a její napojení na širší hydrografickou soustavu je znázorněna na Obr. 12. Největším přítokem je Lišanský potok o délce 19,21 km. V povodí se nachází 224 vodních ploch z přibližnou celkovou rozlohou 131 ha, což činí přibližně 0,4 % plochy celého povodí. Mezi největší z nich patří Velký rybník (40 ha), Dolní Fikač (12 ha) a Homí Fikač (8 ha). Na toku převažují sklony od 2 do 10 ‰, přičemž střední sklon toku činí 6,96 ‰ a sklony nad 40 ‰ se na tocích povodí nevykytují vůbec.

Obr. 12
Zdroj:



4.1.6.2 Hydrogeologické poměry

Podle hydrogeologické rajonizace, kterou uvádí Olmer a další (1990) patří převážná část území povodí Rakovnického potoka do rajonu č. 5131 – Rakovnická pánev. Část území dolního toku, která již není součástí modelovaného území, spadá do rajónu č. 6230 – Krystalinikum, proterozoikum a paleozoikum v povodí Berounky. Členění na hydrogeologické raony je patrné z obrázku Obr. 12.

Krásný (1982) dělí Český masiv vzhledem k obecným podmínkám odtoku podzemních vod (v závislosti na strukturně-geologických poměrech) na 3 celky – platformní základ, permokarbon a platformní pokryv českého masivu. Rakovnická pánev je výrazně ovlivněna celkem permokarbonu.

Permokarbon je zde částečně překryt sedimenty křídly, terciárními terasami a kvartérními sprašemi. Hydrogeologicky jsou významnější spodní vrstvy s vyšším podílem písčité složky. Střídáním poloh propustných a sedimentů s polohami jílovitými se vytváří řada lokálních zvodní s napjatou hladinou. Jejich propustnost se zmenšuje směrem do hloubky s úbytkem hrubší složky. Charakter zvodní je pro časté tektonické poruchy místně odlišný, většinou převažuje puklinová propustnost nad průlinovou (Olmer, a další, 1990).

Zóna intenzivního proudění podzemní vody je zde vázána na přívrchovou zónu zvětralin a rozevřených puklin. Hlubší partie permokarbonu pak přísluší zóně zpomaleného proudění bez vlivu na tvorbu podzemního odtoku. Specifický podzemní odtok je odhadován jako nízký až zvýšený (1 až $5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$) (Krásný, 1982).

Hrazdíra (1993) uvádí pro sedimenty kladenského souvrství (v jižní části pánve, viz Obr. 23 v příloze) koeficient transmisivity v rozmezí $1,5\cdot 10^{-4} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ až $2\cdot 10^{-3} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, pro slánské souvrství v rozmezí $3,8\cdot 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ až $5,8\cdot 10^{-4} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, pro týnecké souvrství v rozmezí $2\cdot 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ až $2\cdot 10^{-4} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ a pro souvrství línské v rozmezí $6,5\cdot 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ až $3,4\cdot 10^{-4} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$.

Doplňování zásob podzemní vody je omezené vzhledem ke střídání propustných a nepropustných hornin. V místech, kde pokrývá permokarbon křída, je jeho dotace zvlášť omezená, protože souvislý izolátor na bázi spodního turonu zadržuje podzemní vodu, která po něm stéká a v podobě pramenů se odvodňuje vodotečí. Opačný efekt mají na podloží permokarbonu relikty dobře propustných terciárních štěrko-pískových teras. (Olmer, a další, 1990).

Na většině území kladensko-rakovnické pánve, v souvislosti se sníženými úhrny srážek až na 450 až 500 mm, dosahuje dlouhodobý specifický odtok podzemní vody z oblasti podle Krásného (1982) velmi nízkých hodnot - mezi $0,5$ a $1 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$.

Původní režim podzemních vod je v části území zcela narušen jak povrchovou těžbou, tak důlní činností (Olmer, a další, 1990).

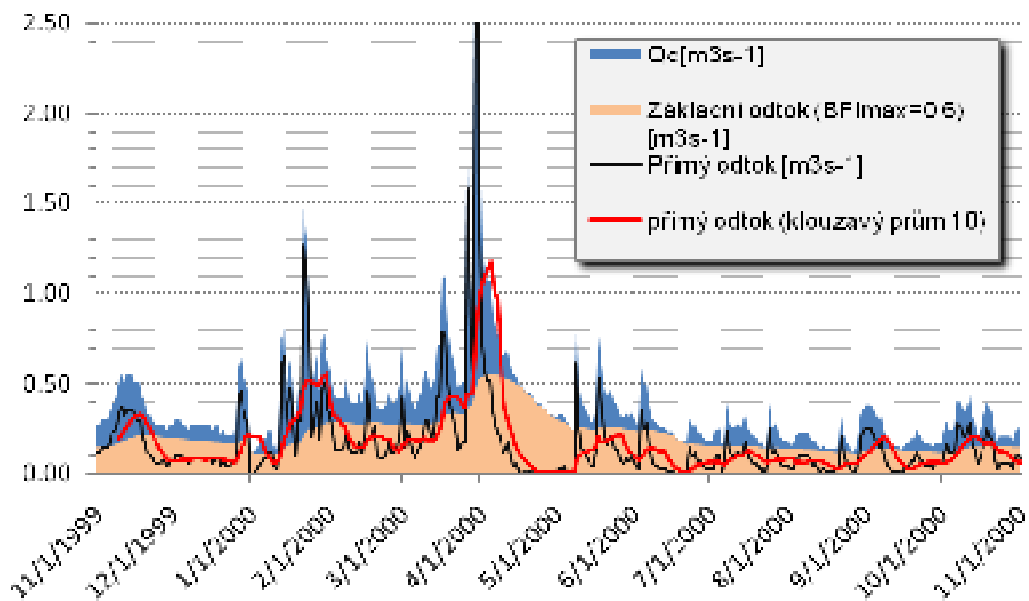
4.1.6.3 Hydrologický režim povodí

Rakovnický potok se vyznačuje nízkou vodností s hodnotou průměrného ročního průtoku $Q_r = 0,46 \text{ m}^3/\text{s}$ za posledních 20 let (limni grafická stanice Rakovník) (Kašpárek, a další, 2010). Dle rozboru průtokových dat ze stanice Rakovník za období 1995 – 2008 provedeného v rámci této diplomové práce se na celkovém odtoku nejvíce podílí základní odtok (cca 66 %).

Povodí Rakovnického potoka dále charakterizuje nízká hodnota specifického odtoku (viz Tab. 6). Hydrologické poměry dále charakterizuje graf Gr. 12 v příloze ukazující dlouhodobí průběh průtoků v Rakovnickém potoce a Čára překročení průměrných denních průtoků (období 1991 – 2008) v grafu Gr. 13 umístěném rovněž v příloze.

Obr. 13 Přímý a základní odtok v povodí Rakovnického potoka

Zdroj:



Charakteristiky dlouhodobé hydrologické bilance, m-denní a N-leté průtoky podle literatury Hydrologické poměry III (1970) jsou uvedeny v Tab. 3 až Tab. 5.

Tab. 3 Charakteristiky hydrologické bilance

Zdroj: Hydrologické poměry III (1970)

tok	profil	plocha povodí [km ²]	roční	rozdíl výšky		průtok [m ³ /s]	specifický průtok [l/s/km ²]
			výška srážek [mm]	roční výška odtoku [mm]	srážek a odtoku [mm]		
Rakovnický p.	nad Kolečovickým p.	90,79	529	83	446	0,24	2,64
Kolečovický p.	ústí	52,83	508	66	442	0,11	2,08
Rakovnický p.	pod Kolečovickým p.	143,62	521	77	444	0,35	2,44
Rakovnický p.	nad Lišanským p.	163,7	517	73	444	0,38	2,32
Lišanský p.	ústí	129,14	516	73	443	0,3	2,32
Rakovnický p.	pod Lišanským p.	292,84	517	73	444	0,68	2,32

Tab. 4 M-denní průtoky [m³.s⁻¹]

Zdroj: Hydrologické poměry III (1970)

tok	profil	překročeních v roce						
		30	90	180	270	330	355	364
Rakovnický p.	nad Kolečovickým p.	0,4	0,23	0,15	0,11	0,07	0,04	0,02
Kolečovický p.	ústí	0,19	0,1	0,07	0,05	0,03	0,02	0,01
Rakovnický p.	pod Kolečovickým p.	0,59	0,33	0,22	0,15	0,11	0,05	0,03
Rakovnický p.	nad Lišanským p.	0,64	0,36	0,24	0,17	0,12	0,06	0,03
Lišanský p.	ústí	0,51	0,28	0,19	0,13	0,09	0,04	0,03
Rakovnický p.	pod Lišanským p.	1,15	0,64	0,43	0,3	0,21	0,1	0,06

Tab. 5 N-leté průtoky [m³.s⁻¹]

Zdroj: Hydrologické poměry III (1970)

Tok	profil	doba opakování let						
		1	2	5	10	20	50	100
Rakovnický p.	nad Kolečovickým p.	10	12	16	19	23	30	41
Kolečovický p.	ústí	8	10	13	16	19	25	33
Rakovnický p.	pod Kolečovickým p.	14	17	21	26	33	41	56
Rakovnický p.	nad Lišanským p.	15	18	23	28	31	44	60
Lišanský p.	ústí	14	17	21	25	30	41	55
Rakovnický p.	pod Lišanským p.	24	29	38	47	57	77	102

Údaje v tabulkách uvedené pro profil „pod Lišanským p.“ (odvodňovaná plocha cca 393 km²) jsou přibližně srovnatelné s údaji pro vodoměrnou stanici Rakovník (plocha povodí cca 302 km²), která fungovala až od roku 1966. V současné době jsou však průtoky ve vodoměrné stanici větší zejména o poměrně významný výtok z čistírny odpadních vod (ČOV) Rakovník (Kašpárek, a další, 2010).

V Tab. 6 jsou uvedeny charakteristiky použité pro období 1931–1960 a 1931–1980 a vypočtené z aktuálně vyhodnocených pozorovaných řad pro období 1966–2008 a

1988–2008. Jsou zde patrné značné změny odtokových výšek, kdy v posledním z uvažovaných období 1988–2008 je výška odtoku jen 53 % hodnoty odvozené pro období 1931–1980 (Kašpárek, a další, 2010).

Tab. 6 Charakteristiky hydrologické bilance Rakovnického potoka ve vodoměrné stanici Rakovník v různých obdobích

Zdroj: (Kašpárek, a další, 2010)

Vyčísleno podle dat z období	průměrná roční výška srážek [mm]	průměrná roční výška odtoku [mm]	rozdílné výšky srážek a odtoku [mm]	průměrný průtok [m ³ /s]	specifický průměrný průtok [l/s/km ²]
1931–1960	517	73	444	0,68	2,32
1931–1980	526	90	436	0,867	2,87
1966–2008	512	64	448	0,611	2,02
1988–2008	497	48	449	0,46	1,52

5 METODIKA

5.1 PŘÍPRAVA VSTUPNÍCH DAT PRO MODEL SWAT

V účel simulace hydrologického režimu vyžaduje SWAT vstupní data o půdách, vegetačním pokryvu resp. využití území, data meteorologická a časové řady měřených průtoků potřebné pro kalibraci modelu. Většina použitých dat byla získána na základě spolupráce Katedry vodního hospodářství a environmentálního modelování ČZU a VUV T.G.M na společném projektu zaměřeného na možné dopady klimatické změny na vodní zdroje.

První fáze přípravy dat probíhala převážně mimo vlastní programové prostředí SWAT. Jednalo se o shromáždění všech potřebných „surových dat“, jejich utřídění, rozbor, interpolaci, editaci a formátování za využití různých nástrojů (EXCEL, MATLAB, ArcINFO apod.).

Takto předpřipravená data byla poté zpracována již prostřednictvím rozhraní ArcSWAT v rámci procesu sestavení modelu, což popisuje detailněji kapitola 5.2. Finálním krokem bylo zapsání všech potřebných vstupních dat do textových souborů předdefinovaného formátu, které tvoří přímý vstup do vlastního simulátoru SWAT.

Popis přípravy vstupních dat ve smyslu první zmíněné fáze pro model SWAT povodí Rakovnického potoka je náplní následujících několika kapitol.

5.1.1 Meteorologická data

V rámci této diplomové práce byly využity měřené maximální a minimální denní teploty, převzaté z klimatologické stanice Kněžves (viz obrázek Obr. 25 v příloze). Další klimatická data v podobě měřených dat v denním kroku nebyla použita. Toto zjednodušení bylo možné pouze při volbě jednodušší metody výpočtu potenciální evapotranspirace, kterou odvodil Hargreaves (1985).

Srážková data byla převzata ze srážko-měrných stanic na území povodí a v jeho blízkém okolí. Podrobnější popis přípravy srážkových dat uvádí následující kapitola.

5.1.1.1 Příprava srážkových dat

K dispozici byly časové řady bodových měření denních srážkových úhrnů za období od roku 1960 až do roku 2008 z šesti srážko-měrných stanic: Rakovník, Kněžves, Kounov, Oráčov, Krušovice a Nový dům (viz obrázek Obr. 25 v příloze). Vzhledem k časovému rozsahu ostatních získaných dat (teploty, vlhkosti vzduchu, kalibrační data průtoků) byla použita jen část této řady z období od roku 1996 do roku 2008, přičemž pro kalibraci to byly roky 1996 až 2001.

U dvou srážko-měrných stanic bylo třeba provést doplnění dat chybějících ve vybrané části časové řady. Měření chyběla u stanice Rakovník v období prvních šesti měsíců roku 1996 a u stanice Krušovice za období posledních tří měsíců roku 2008.

Doplnění dat bylo provedeno metodou inverzních vzdáleností (IDW – inverse distance weighting) dle vzorce daného rovnicí (5.1). Parametr byl zvolen na základě doporučení pro podmínky ČR.

$$p_o = \frac{1}{D} \cdot \sum_{i=1}^n d_i^{-r} \cdot P_i, \quad (5.1)$$

Kde $D = \sum_{i=1}^n d_i^{-r}$, p_o značí odhadovaný záznam, P_o je roční úhrn ve stanici odhadu, P_i označuje roční úhrn v i -té stanici, n je počet srážkoměrů použitých při odhadu, d_i vyjadřuje vzdálenost i -té stanice od místa odhadu a r je parametr metody IDW.

Plošná interpolace hodnot srážkových úhrnů

Přestože využití měřených srážkových dat výrazně zvyšuje schopnost modelu simulovat průběh hydrologických procesů, představuje tento vstup významný zdroj chyb, daných řadou možných příčin. Specifickým případem zavádění určité chyby je pak

provádění odhadu regionálního úhrnu srážek na základě bodových měření ve srážko-měrných stanicích, kdy například odhad celkového či průměrného úhrnu srážek na povodí za roční období vykazuje relativní chybu až 10%.

Ve standardní verzi SWAT je úhrn srážek pro jednotlivá dílčí povodí určen hodnotou úhrnu pozorovaného v nejbližší srážko-měrné stanici, přesněji řečeno na území každého dílčího povodí je distribuována hodnota úhrnu té srážkové stanice, která leží nejbliže geometrickému středu tohoto dílčího povodí. Tímto způsobem může docházet k významným odchylkám od reálného rozložení srážek na ploše povodí.

Za účelem eliminace tohoto zkreslení byla provedena plošná interpolace denních srážkových úhrnů (na základě bodových měření 6 uvedených stanic) s následným stanovením průměrného úhrnu srážek každého dílčího povodí. Tyto průměrné hodnoty pak byly přiřazeny (syntetickým) virtuálním srážko-měrným stanicím vytvořeným v bodech geometrického středu jednotlivých sub-povodí. Data těchto virtuálních stanic pak byla použita jako vstup do modelu namísto dat přímo z reálných srážko-měrných stanic.

Pro zjednodušení byla pro plošnou interpolaci použita interpolační metoda inverzních vzdáleností IDW, jejíž výpočet vychází z již uvedené rovnice (5.1).

Takto koncipovaná úprava vstupních dat představuje provedení několika prostorových výpočetních operací v určité posloupnosti opakované pro každý den období simulace. Pro zefektivnění práce byl celý tento postup prostřednictvím jazyka python převeden (přeložen) do jednoduchého programu. Zjednodušený algoritmus tohoto programu zobrazuje diagram na obrázku Obr. 33v příloze.

5.1.2 Geografická data

5.1.2.1 Vstupní model terénu povodí

Data o morfologii povodí byla použita z digitálního modelu terénu (DEM – Digital Elevation Model), poskytnutého z CÚZK. Použit byl DEM uložený ve známém formátu GRID vytvořený na základě digitálního satelitního snímku o rozlišení 10 x 10 m a rozsahu daném plochou modelované části území povodí. Údaje o snímku shrnuje Tab. 7.

Tab. 7

formát	GRID	prostorové rozlišení	10 x 10m
velikost souboru	10,66 MB	hloubka pixelu	16 Bitů
počet sloupců, řádků	2866, 1950	počet spektrálních pásem	1
hodnoty pixelu	absolutní celé číslo	min., max., prům. hodnota pixelu	307; 603; 408,1
rozsah snímku	výřez souvisle pokrývající celou plochu modelovaného území povodí		

5.1.2.2 Landcover

Podkladem pro mapu LC povodí byla databáze a polygonová vrstva Corine Land Cover (CORINE LULC) z roku 2000 vzniklá v rámci projektu CORINE (Coordination of Information on the Environment) Evropské Unie.

Prostorová data z databáze Corine Land Cover byla získána ve formátu polygonové vrstvy s připojenou atributovou tabulkou obsahující klasifikaci polygonů do různých tříd LC (sloupec „TrídaCLC“). Atributy této vrstvy však neobsahují všechna data vyžadovaná modelem. Byla tedy použita vestavěná databáze LC, která je součástí standardní instalace modulu SWAT a která prostřednictvím několika tabulek a možnosti jejich vzájemného propojení uchovává veškeré modelem požadované atributy jednotlivých tříd LC. Definice těchto tříd však vychází z klasifikace používané v databázi LC na území USA. Jedná se o databázi NLCD 2001 (The National Land Cover Database), která je produktem vládní iniciativy USA. Na základě charakteristiky (vymezení) jednotlivých tříd obou klasifikací (CLC2000 a NLCD 2001) byla ke každé třídě CLC vrstvy corine2000 přiřazena přibližně odpovídající třída klasifikace NLCD.

Výsledkem je tabulka Tab. 15, umístěná v příloze, uvádějící třídy CLC vyskytující se (definované) na území povodí Rakovnického potoka a k nim přiřazené třídy klasifikace NLCD.

Podle tabulky Tab. 4 pak byla provedena úprava resp. vytvoření nové relační tabulky („lookup table“), která v rámci rozhraní modelu zajišťuje propojení prostorových dat vstupní vrstvy s tabulkami vestavěné databáze (tabulka s názvem „crop“ a tabulku s názvem „urban“).

5.1.2.3 Příprava půdních dat

Podklady pro vytvoření vstupních půdních dat

Hlavním podkladem pro vytvoření souboru vstupních parametrů popisujících půdní poměry byla digitálně zpracovaná data hydropedologických charakteristik ve formě rastrové mapy sestavené Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půd (VÚMOP). Tato mapa (dále jen mapa MHP1) má rozlišení 1 kilometr a je zobrazena na obrázku Obr. 26. Na základě tabulky Tab. 8 byly každé elementární ploše území přiřazeny charakteristické (převažující) hodnoty infiltrace, retenční schopnosti půd a rámcovou zrnitostní charakteristiku profilu.

Tab. 8 Hydrologická charakteristika lesních půd a zemědělských půd ve vztahu k BPEJ
Zdroj: (Kulasová, a další, 2004)

HSP [*]	Skupina zem. a lesních půd	Rámcová zrnitostní charakteristika	HPJ (2. a 3. číslo kódu BPEJ v ČR)	RVK l.m ⁻²	HPJ (2. a 3. číslo kódu BPEJ v ČR)	Infiltrace mm.min ⁻¹
A	1	p, hp	04, 17, 21, 31, 37, 38, 39, 40, 55	nízká - 60	04, 05, 17, 21, 31, 32, 55	vysoká >2,5
	1.1.	dtto + skelet lesní půdy	dtto	dtto - 35	dtto	dtto

Dalšími podklady použitými pro přípravu půdních parametrů byla vrstva bonitovaných půdně-ekologických jednotek (BPEJ), kterou poskytl VÚMOP. Ta byla pro účely této práce vektorizována pomocí různých sofistikovaných metod a nástrojů přístupných v programu ArcInfo. Vzniklá mapa, dále (dále jen mapa BPEJ) je zobrazena na obrázku Obr. 27 v příloze. K přibližnému rozlišení a odhadu některých půdních charakteristik na zalesněných plochách, které nejsou zahrnuty v mapách BPEJ, byla také využita vrstva CORINE LULC.

Postup přípravy vstupních půdních dat

Většina modelem požadovaných půdních parametrů je dána zrnitostním složením neboli texturou půdy. Proto se zde základním podkladem stala mapa MHP1, která podle rámcové zrnitostní charakteristiky určuje převažující půdní druh resp. třídu půd odpovídající danému čtverečnému kilometru zájmového území. Podle půdního druhu pak bylo možné stanovit procentní zastoupení zrnitostních frakcí a z nich následně

odvodit další charakteristiky. Mapa MHP1-VÚMOP vychází z tzv. Novákovy klasifikace půdních druhů, která jako kritérium zařazení uvažuje obsah jílnatých částic o průměru 0 až 10 μm . Algoritmus modelu SWAT však vyžaduje zadání procent zrnitostních frakcí podle klasifikace FAO (FAO, 1990), která jednotlivé zrnitostní kategorie definuje poněkud odlišně – fyzikální jíl: 0 – 1 μm , prach: 2 – 50 μm a písek: 0,05 – 2 mm. Bylo tedy nutné pro každý půdní druh mapy stanovit alespoň přibližné procentní zastoupení frakcí, tak jak je definuje klasifikace FAO. To je možné provést na základě znalosti charakteristických čar zrnitosti daného půdního druhu, z jejichž průběhu, který uvádí Kutílek (1978), lze odhadnout zastoupení frakcí libovolných rozměrů. Kadlec (2007) tímto způsobem odvodil typické horní a dolní meze podílů zrnitostních frakcí (FAO) každého půdního druhu. Takto získané údaje, uvedené v tabulce Tab. 9 byly použity i pro účel této studie, byť je třeba chápat způsob jejich odvození jako poměrně hrubý a tudíž orientační odhad.

Tab. 9

Zdroj:

zrnitost. (půdní druh)	jílnaté částice 0 - 10 μm	podíl zrnitostních frakcí			zařazení do tříd podle evropské evropské klasifikace
		0 - 2 μm CLAY	2 - 50 μm SILT	> 50 μm SAND	
P	do 10	0-10	5-20	75-95	coarse
HP	10 - 20	5-15	20-40	45-75	coarse - medium
PH	20 - 30	10-20	35-55	25-55	medium
H	30 - 45	15-25	50-75	10-30	medium - medium fine
JH	45 - 60	20-35	50-70	5-20	medium fine
J	60 - 75	25-45	45-65	5-15	fine

Údaje o procentním zastoupení jednotlivých zrnitostních frakcí, uvedené v Tab. 9 pak spolu s údaji o obsahu skeletu a organických látek tvořily soubor vstupních parametrů pro program Soil Water Characteristics (Saxton a Rawls, 2006), dále jen SOWACH, zvolený ke stanovení požadovaných fyzikálních vlastností půd (k^4 , AWC^5 , bd^6). Tento volně dostupný software využívá regresních rovnic odvozených na

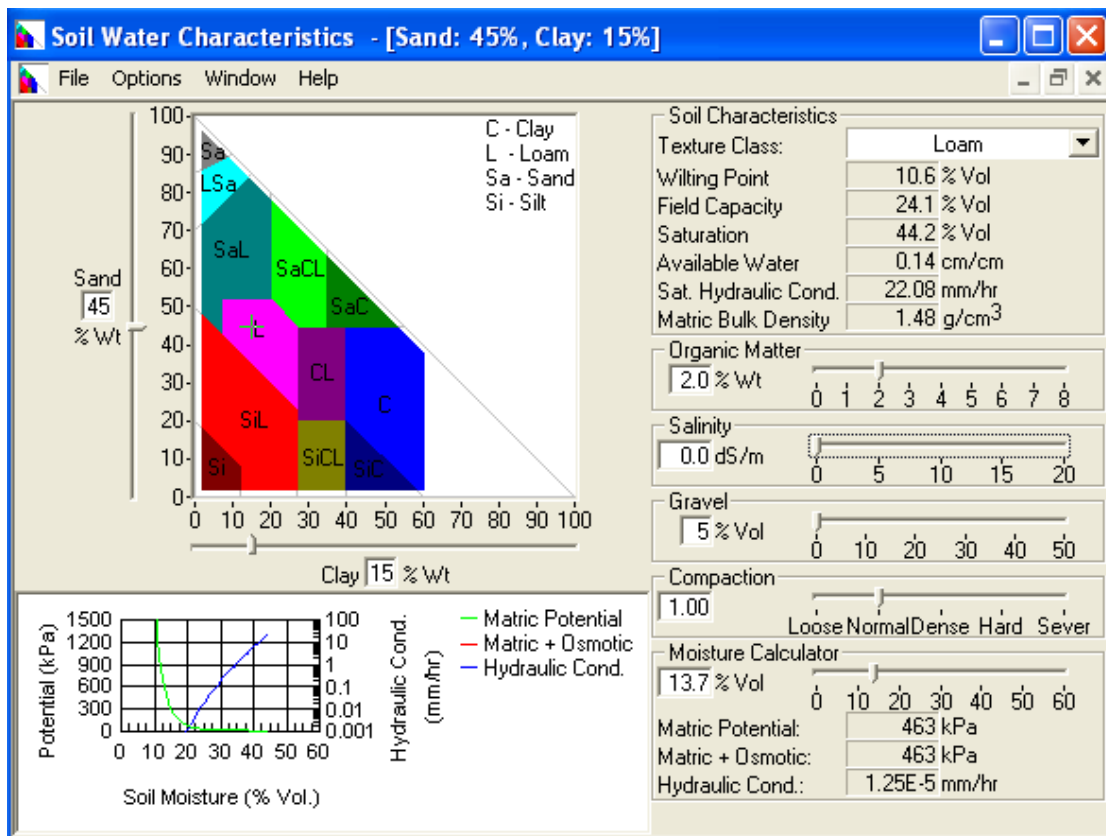
⁴ koeficient hydraulické vodivé nasycenosti

⁵ využitelná vodní kapacita

základě měření fyzikálních vlastností a textury půd z více než 2000 půdních profilů území na USA a Evropy. Obr. 14 ukazuje příklad výpočtu charakteristik v prostředí programu SOWACH pro bezskeletovitou písčito-hlinitou půdu se středním obsahem organické hmoty.

Obr. 14

Zdroj:



Obsah organických látek byl při tomto výpočtu pro celé území uvažován odhadem jako jako střední (2% hmotnosti).

Údaje o skeletovitosti půd na povodí byly odvozeny z mapy BPEJ. Zde byla nejprve provedena reklasifikace tak, že třídy zastoupené na zanedbatelně malé ploše území byly eliminovány a naopak v té části spektra skeletovitosti, kde se ukázalo plošné zastoupení vysoké, byl rozsah dané třídy rozdělen podrobněji a tím dosaženo relativně

⁶ objemová hmotnost

přesnější klasifikace. Výsledná polygonová vrstva skeletovitosti byla poté pomocí GIS nástrojů překryta vrstvou s mapou MHP1 a na základě tohoto překryvu byly zjištěny všechny plošně významně zastoupené půdní jednotky (kombinace půdních druhů a tříd skeletovitosti).

Pro každou půdní jednotku byl pak proveden výpočet parametrů v programu SOWACH. Jelikož půdní druhy i třídy skeletovitosti jsou vymezeny vždy určitým rozsahem hodnot (nikoli jedinou hodnotou), byl každý parametr stanoven průměrem hodnot vypočtených nástrojem SOWACH pro krajní hodnoty rozsahu.

Výsledkem jsou rozmezí hodnot (hodnoty) vstupních půdních parametrů modelu SWAT pro každou půdní jednotku, které uvádí tabulka Tab. 10.

Tab. 10

Zdroj:

půdní druh	Fyzikální. jíl (<0,002 mm)	Písek (> 0,05 mm)	Objemová hmotnost	Využitelná vodní kapacita	Nasyčená. hydraulická vodivost
	% hmotnosti	% hmotnosti	g cm ⁻³	mm H ₂ O / mm půdy	mm h ⁻¹
parametr SWAT	CLAY	SAND	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K
P	5.0	85.0	1.60	0.05	100
HP	15.0	60.0	1.52	0.10	50
PH	25.0	40.0	1.43	0.13	30
H	35.0	20.0	1.30	0.17	18
JH	50.0	12.5	1.27	0.17	9
J	60.0	10.0	1.32	0.16	7

Posledním parametrem půdního pokryvu, který bylo třeba pro model vyčíslit byla hloubka půd. Zde byl použit obdobný postup jako při přípravě dat o skeletovitosti. Podkladem zde byla rovněž polygonová vrstva BPEJ, která byla obdobně účelně reklasifikována. Postup je znázorněn schématem na Obr. 28 v příloze.

5.1.2.4 Ostatní geografická vstupní data

Dalšími daty prostorového charakteru, která bylo třeba pro konstrukci modelu zajistit a připravit byly vrstvy týkající se říční sítě, rozmístění monitorovacích stanic (hydrologických, klimatologických a meteorologických). Zdrojem takových dat pro účel

této diplomové práce byly polygonové a bodové vrstvy volně přístupné z různých veřejně přístupných GIS serverů.

5.2 SESTAVENÍ SWAT MODELU PO VODÍ

Po dokončení přípravy a kontroly všech potřebných dat bylo provedeno sestavení modelu. Jedná se o proces tvorby modelu probíhající již v prostředí uživatelského rozhraní SWAT a zahrnuje následující procedury: adaptace modelového rozhraní podmínkám povodí, základní nastavení projektu, konfigurace povodí, analýza a sestavení (vymez) HRU, import meteorologických časových řad a vytvoření sestavy vstupních tabulek modelu.

Podrobnějšímu popisu jednotlivých kroků těchto procedur jsou věnovány následující podkapitoly.

5.2.1 Adaptace modelového rozhraní podmínkám povodí

Vestavěná databáze modelu SWAT2005, která je součástí každé instalace, je určena především pro účel modelování na území USA. Při adaptaci modelového rozhraní podmínkám daného povodí šlo zejména o modifikaci této databáze. To bylo provedeno úpravou některých částí standardní databáze. Jednalo se o nahrazení databáze půdních jednotek (tabulka „usersoil.dbf“), úpravu databáze jednotek LULC (tabulka „crop.dbf“ a „urban.dbf“) a nahrazení tabulky s daty pro generátor počasí. Podrobnější popis přípravy těchto tabulek byl proveden již v kapitole 5.1.2.

5.2.2 Základní nastavení projektu

Pro lokalizaci databáze parametrů je v dialogu implicitně předvolena cesta ke standardní vestavěné databázi SWAT2005. Jelikož byla tato databáze výše zmíněným způsobem modifikována ve svém originálním umístění, nebylo třeba nastavení cesty nijak měnit.

SWAT pak automaticky otevřel nový ArcMap dokument a současně vygeneroval dynamickou geodatabázi s tímto dokumentem propojenou. Struktura této databáze, relace a vlastnosti jejích prvků byly automaticky předdefinovány přímo pro účel jednotlivých dílčích operací při tvorbě modelu.

5.2.3 Konfigurace povodí

Proces konfigurace povodí byl proveden v rozhraní ArcSWAT prostřednictvím čtyř na sebe postupně navazujících sekcí, bylo postupováno dle popisu uvedeného v následujících podkapitolách.

5.2.3.1 Nastavení digitálního modelu terénu (DEM)

DEM zprostředkovává pro model informace o nadmořské výšce území. Obr. 30 v příloze zobrazuje dialog sloužící pro specifikaci zdroje DEM s nastavením, jaké bylo použito pro model v této práci. Pro dosažení rychlejšího průběhu dalších výpočtů byl DEM oříznut s použitím masky ve formě rastrové či polygonové vrstvy, která svým rozsahem přibližně vymezuje plochu povodí. Provedením těchto kroků byla automaticky v databázi projektu vytvořen nový prázdný dataset s názvem „ArcHydro“.

Pro zpřesnění lokalizace hydrografické sítě, zejména v plochých místech povodí, kde by rozlišení DEM nepostačilo k patřičnému určení směru odtoku, byla využita funkce „burn in“. Při zvolení této možnosti bylo třeba zadat vstupní liniovou vrstvu říční sítě, kterou SWAT s využitím GIS nástrojů následně převedl na rastr s názvem „digiStream“ a importuje do rastrové geodatabáze projektu.

5.2.3.2 Definice stálé říční sítě

V této sekci byl pro model definován systém hlavních drah korytového odtoku. Jednalo se primárně o určení počátečních bodů hlavních drah povrchového odtoku a následné vymezení dílčích povodí a lokalizaci jednotlivých uzávěrových profilů. Extenze ArcSwat zde nabízí dvě možnosti (volba „Pre-defined streams and watershed“ nebo „DEM-based“ v dialogu na Obr. 31).

První možnost znamená přímé zadání již připravených datových souborů obsahujících polygonové vrstvy dílčích povodí a liniové vrstvy říční sítě. V rámci této práce byl použit druhý způsob určení hydrografické sítě založený na stanovení tzv. prahové zdrojové (odtokové, drenážní) plochy (volba „DEM-based“). Prahová odtoková plocha F_t [ha] může být definována jako minimální plocha povodí, odvodňovaná určitým uzávěrovým profilem, která by byla při homogenní jednotkové srážce potřebná

pro vytvoření počátku dráhy soustředěného povrchového odtoku právě v místě tohoto uzávěrového profilu.

Pro zjištění optimální hodnoty kritické odtokové plochy byla použita funkce s označením „Flow direction and accumulation“ (dále FDA). Ta pomocí sady hydrologických nástrojů extenze „Spatial Analyst“ provedla analýzu DEM a následně vyhodnocení minimální, maximální možné a optimální hodnoty F_t . Vlastní definice hydrografické sítě včetně vymezení dílčích povodí byla provedena pomocí procedury označené jako „Stream network“ (SN).

Procedury FDA a SN byly opakovaně prováděny s různým nastavením optimální hodnoty F_t . Tím bylo vytvořeno několik variant modelu hydrografické sítě povodí (viz.). Porovnání těchto variant a reálných podmínek povodí pak umožnilo získat představu o optimální hodnotě prahové odtokové plochy F_t . Autory doporučená průměrná velikost plochy dílčích povodí je 2 – 6 % modelovaného území.

Po provedení veškerých výpočetních procedur jsou vypočtené parametry uloženy do atributových tabulek příslušných tematických vrstev začleněných do databáze projektu.

5.2.3.3 Modifikace uzávěrových profilů systému dílčích povodí

K uzávěrovým profilům rozmístěným v rámci automatického generování hydrografické sítě popsaného v předchozí kapitole bylo dále třeba doplnit lokalizaci profilu na němž probíhalo měření denních průtoků, potřebné pro kalibraci. K tomu slouží podsekce s označením „Outlet and Inlet Definition“. Prostřednictvím importu předdefinované tabulky obsahující data o umístění a typu byl do geodatabáze přidán nový objekt zastupující v modelu monitorovací stanici Rakovník.

5.2.3.4 Definice uzávěrového profilu povodí

Měrný profil Rakovník byl vzhledem ke své poloze současně nastaven jako hlavní uzávěrový profil celého modelovaného povodí. To bylo provedeno v podsekcí pojmenované „Watershed Outlet(s) Selection and Definition“.

Finálním krokem při konfiguraci povodí pak bylo provedení procedury s označením „Delineate watershed“, která s využitím již vytvořených rastrů provedla

konečné vymezení ploch jednotlivých dílčích povodí a vymezení rozvodnice celého povodí. Výsledkem jsou vrstvy prostorových dat (s názvy WDOUTLET, WDREACH, WDWATERSHED a BASIN) o konfiguraci povodí následně importované do databáze projektu.

5.2.3.5 Výpočet parametrů dílčích povodí

Poslední podsekce, kterou bylo třeba řešit při konfiguraci povodí, má označení „Calculation of Subbasin Parameters“. Zahrnuje funkce, které provádí výpočet geomorfologických charakteristik dílčích povodí a říčních koryt k nim příslušejících. Dále je zde bylo možné pomocí funkce „Add or delete reservoir“ umístit bodový objekt reprezentující (lokalizující) vodní nádrž v daném povodí. Vzhledem k rozloze vodních ploch v povodí Rakovnického potoka a rozsahu aplikace modelu však nebylo této funkce využito.

5.2.4 Analýza a vymezení HRU

HRU představuje plošné jednotky dílčího povodí, které se vyznačují stejnou hydrologickou odezvou. Hydrologická odezva jednotky je determinována především sklonovými a půdními poměry, a zastoupením tříd LC. Analýza a následné vymezení HRU tedy představovalo proces nalezení optimálního rozdělení plochy každého dílčího povodí na hydrologicky homogenní jednotky. Toto členění probíhalo na základě překryvu vrstvy LULC, půdních jednotek a sklonových poměrů. Jednotlivé procedury použité při definici HRU budou detailněji popsány v následujících podkapitolách.

5.2.4.1 Zadání a reklasifikace vstupních vrstev

Proces zadávání a reklasifikace vstupních vrstev probíhal v sekci nazvané „Land Use/Soil/Slope Definition“.

Vstupní vrstvou pro klasifikaci území podle tříd LC byla polygonová vrstva CORINE 2000 popsána v kapitole 5.1.2.2, kde je nastíněn také způsob odvození relační tabulky („lookup table“), která byla v této sekci použita pro reklasifikaci vrstvy.

Jako vstupní vrstva pro klasifikaci území podle půdních jednotek byla použita polygonová vrstva půd odvozená postupem popsaným v 5.1.2.3. V této kapitole je popsán i způsob modifikace databáze půdních jednotek. Zadáním relační tabulky bylo

provedeno propojení vrstvy s atributovou tabulkou půdních jednotek v databázi. Na základě tohoto propojení pak proběhla reklasifikace polygonové vrstvy půd. Schématicky je způsob propojení zobrazen na obrázku Obr. 29 v příloze.

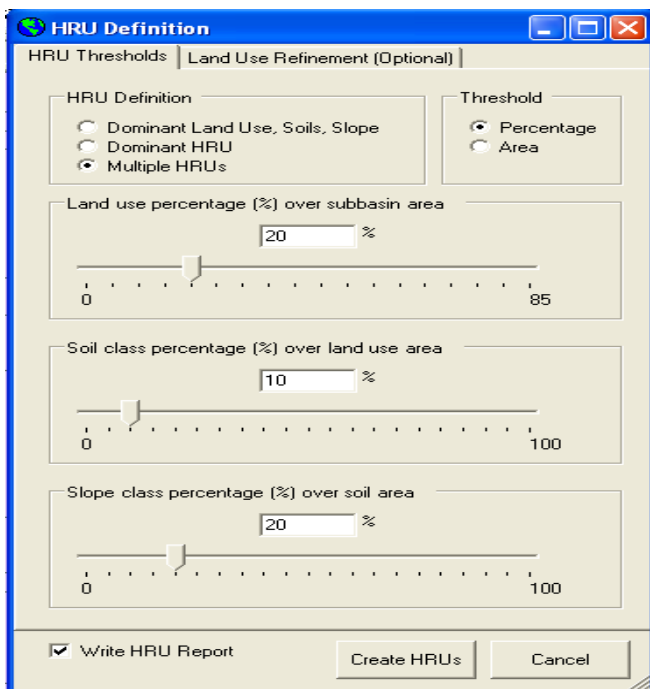
Prostředí ArcSWAT navíc umožňuje členění HRU vzhledem ke sklonovým poměrům území. Vytvoření vstupní vrstvy popisující rozložení sklonových poměrů na povodí bylo provedeno v sekci s označením „Slope“ a to na základě DEM zadaného v sekci pro konfiguraci povodí. Zde bylo třeba, s ohledem na morfologii terénu povodí, nastavit nejprve způsob klasifikace. Pro model povodí Rakovnického potoka byla využita volba „Multiple Slope“ a následně nadefinovány čtyři třídy sklonitosti terénu. Při stanovení horních limitů tříd sklonitosti byl brán v úvahu průběh histogramu sklonitosti terénu (viz Obr. 32 v příloze), přičemž nejvhodnějším východiskem se jevílo rozdělení histogramu dle metody „Natural Breaks (Jenks)“.

Po provedení reklasifikace byly všechny tři vstupní vrstvy ve specifickém rastrovém formátu importovány do databáze projektu. Pomocí extenze „Spatial Analyst“ byl proveden překryv a výpočet celkové rozlohy všech plošných jednotek vykazující stejnou kombinaci tříd těchto vrstev. Výpočet byl proveden pro každé dílčí povodí a každou kombinaci tříd.

5.2.4.2 Vymezení HRU

Na základě velikosti ploch jednotlivých kombinací bylo následně v sekci „HRU definition“ (viz Obr. 15) provedeno vymezení vlastních hydrologických jednotek. To bylo realizováno při určité míře generalizace – vyloučení kombinací tříd vyskytujících se na zanedbatelně malé části povodí. Míru generalizace bylo možné kontrolovat třemi prahovými hodnotami („HRU Thresholds“) resp. zadáním absolutních nebo relativních hodnot třech parametrů (viz Obr. 15).

Obr. 15



Každý tento parametr udává minimální celkovou rozlohu všech plošných jednotek (vykazující danou třídu) vyskytujících se v dílčím povodí. Třídy zastoupené v povodí na ploše menší než je tato minimální hodnota pak byly při tvorbě HRU eliminovány. Mezi zachované třídy byla pak, úměrně k jejich zastoupení v povodí, automaticky přerozdělena plocha eliminovaných jednotek tak, aby bylo modelováno 100 % plochy povodí.

Pro model povodí Rakovnického potoka byly použity hodnoty parametrů doporučené dokumentací pro SWAT2005. Parametr pro třídy LULC byl nastaven na 20%, parametr pro třídy půdních jednotek 10% a třídy sklonových poměrů byly limitovány hodnotou 20%.

5.2.5 Import meteorologických dat

. K definování klimatických a srážkových dat slouží v prostředí ArcSWAT sekce s označením „Weather Data Definition“.

Prvním, a také nutným, krokem pro další postup bylo zadání cesty k tabulce „userwgn“ v podsekcí „Weather Generator Data“. Data této tabulky jsou využita

v případě simulace časových řad meteorologických dat pomocí vestavěného generátoru počasí.

V rámci ostatních podsekcí byla provedena lokalizace připravených souborů obsahujících časové řady jednotlivých veličin měřené (resp. odhadnuté) v daných monitorovacích stanicích (srážkoměrných, klimatologických). Bylo třeba zvolit způsob definice časové řady (simulace, měření) a zadat cestu k lokalizační tabulce, která propojuje tabulky s měřeními daty jednotlivých monitorovacích stanic s tabulkou, která obsahuje geografická data o každé této stanici a je součástí modifikované databáze rozhraní ArcSWAT.

5.2.6 Vytvoření sestavy vstupních souborů modelu

Veškerá vstupní data připravená procedurami popsány mi v předchozích kapitolách 5.2.3 až 5.2.4 a uložená v dynamické geodatabázi projektu byla poté exportována do vstupních souborů textového formátu vyžadovaného přímo algoritmem modelu. K tomu slouží modul s označením “Write input tables”, který automaticky či za interaktivní účasti uživatele zapisuje data do vstupních souborů. Tyto vstupní soubory jsou podle úrovně objektů jimi popisovaných organizované do pěti hlavních skupin - soubory typu povodí, dílčí povodí, HRU, nádrže a soubory typu bodového vstupu. Detailní popis těchto souborů je uvádí např. Neitsch a další (2002).

Prostřednictvím modulu “Edit swat input” pak bylo v rozhraní ArcSWAT možno dodatečně upravit databázi vstupních parametrů a následně převést tyto úprav do textových vstupních souborů. Tento modul bylo využito např. pro přenastavení metody výpočtu potenciální evapotranspirace (Obr. 16) nebo při manuální kalibraci modelu.

Obr. 16

Edit General Watershed Parameters

Water Balance, Surface Runoff, and Reaches | Nutrients and Water Quality | Basin-Wide Management

Water Balance

SFTMP (C)	SMTMP (C)	SMFMX (mm/C-day)	SMFMN (mm/C-day)	TIMP
1	0.5	4.5	4.5	1
SNOCOV (mm)	SNO50COV	PET Method	PET File	
1	0.5	Penman/Monteith	[Browse]	
ESCD	EPCD	Priestley-Taylor	DEP_IMP	
0.95	1	Penman/Monteith	0	
		Hargreaves		
		Read-In PET		

Surface Runoff

Rainfall-Runoff Method	ICN	CNCDEF	CN_FROZ	
"Daily Rain/CN/Daily Route"	Soil Moisture Meth	1	Inactive	
Crack Flow	SURLAG	ISED_DET	ADJ_PKR	TB_ADJ
Inactive	4	Triangular Dist.	0	0
PRF	SPCDN	SPEXP		
1	0.0001	1		

Reaches

Channel Routing	MSK_CO1	MSK_CO2	MSK_X	Channel Degredation
Variable Storage	0	3.5	0.2	Inactive
Stream Water Quality	TRNSRCH	EVRCH	Routing Pesticide	
Active	0	1		

Edit Values | Cancel Edits | Save Edits | Exit

5.3 KALIBRACE MODELU

5.3.1 Příprava dat pro kalibraci

K dispozici byla řada měřených průměrných denních průtoků z měrného profilu č. 1901 Rakovník (viz Obr. 12) za období roků 1991 až 2008. Tato řada byla získána ve verzi opravené od vlivu ČOV v Rakovníku. Pro účely jednotlivých vývojových fází modelu byla tato řada rozdělena na dva úseky - období určené pro kalibrační a validační fázi modelu (Obr. 21).

Při procesu validace fyzikálně založených či koncepčních hydrologických modelů je, kromě dobré shody simulovaných a pozorovaných hodnot průtoků v uzávěrovém profilu povodí, třeba brát v úvahu také kritéria týkající se jednotlivých vnitřních složek odtokového procesu vyvolávajících tento průtok (Beven (1989) ex Kašpárek a další, (2010)). Byla proto provedena analýza hydrogramu zvoleného kalibračního období.

V rámci této analýzy byl proveden rozbor sestupných větví hydrogramu a následná separace základního a přímého odtoku.

Pro separaci základního odtoku bylo vyzkoušeno několik nástrojů např. BFLOW filtr vyvinutý autory Lyne and Hollick (1979), filtr navížený Chapmanem a Maxwellem (1996) nebo filtr upravený Eckhardtem (2005), který je součástí programu WHAT. Z důvodu snadné aplikace byl pak použit filtr WHAT, který je komponovaný jako webový nástroj a je volně přístupný na adrese: <http://cobweb.ecn.purdue.edu/~what/>.

WHAT využívá metodu automatického digitálního filtru. Tato metoda má své původní využití v oblasti analýzy a separace signálu nízké a vysoké frekvence. Výhodou zde je jasná formulace, rychlost a absence subjektivního faktoru (Lim, a další, 2005). Detailnější popis metody poskytuje např. Eckhardt (2005), Lim a další (2005), Eckhardt (2008).

Základním předpokladem metody je lineární závislost odtoku ze systému podzemních zvodní na zásobě vody zadržované tímto systémem, což vede k hydrogramu základního odtoku, jehož sestupné větve mají exponenciální tvar daný rovnicí (5.2) (Eckhardt, 2008).

$$b_{k+1} = b_k e^{-\Delta t/\tau} \quad (5.2)$$

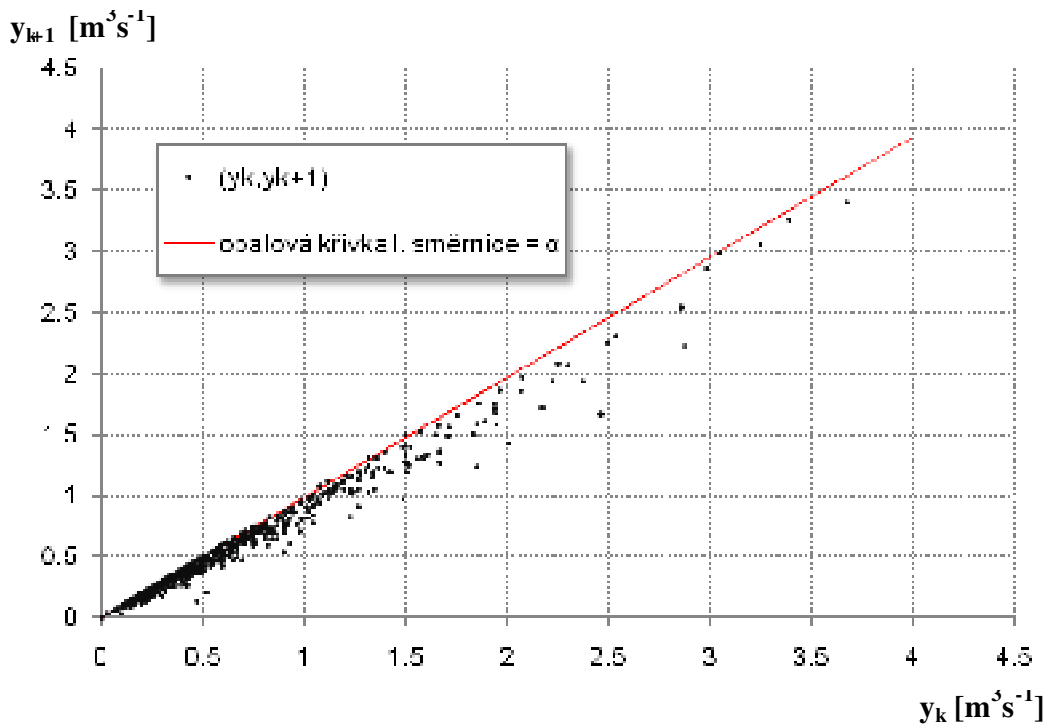
Δt vyjadřuje časový interval, k udává počet časových intervalů a τ je charakteristická časová konstanta. Výraz $e^{-\Delta t/\tau}$ je tzv. koeficient recese (α).

Základním principem digitálního filtru pro separaci složek odtoku je rozdělení frekvenčního spektra hydrografu. Ve frekvenčním spektru hydrografu daného měrného profilu odpovídá základní odtok variabilitě projevující se dlouhými vlnami nižších frekvencí a naopak epizody přímého odtoku vyvolané srážkovými událostmi jsou příčinou variability vyšších frekvencí (Eckhardt, 2005). Rovnice (5.3) pak vyjadřuje matematickou formulaci digitálního filtru, která řeší vztah mezi základním a celkovým odtokem při parametru α a parametru BFI_{max} . Parametr BFI_{max} udává maximální hodnotu indexu základního odtoku, která se může vyskytnout. Použit byl $BFI_{max}=0,6$.

$$b_k = \frac{(1-BFI_{max})\alpha b_{k-1} + (1-\alpha)BFI_{max}y_k}{1-\alpha BFI_{max}} \quad (5.3)$$

Koeficient recese byl odvozen ze sklonu hlavní křivky recese („master recession curve“), která je definována jako obalová křivka všech individuálních křivek recese hydrografu (Smakhtin, 2000). Tato obalová křivka byla sestrojena tzv. korelační metodou (viz graf). Při této metodě jsou graficky promítnuty body o souřadnicích (y_k, y_{k+1}) odpovídajících průměrným denním průtokům dvou po sobě následujících dnů, které jsou součástí období recese o minimálně 5 dnech trvání. Z Grafu jsou patrné různé rychlosti recesí mezi y_k a y_{k+1} . Body představující nejpomalejší recese formují horní hranici grafu, přičemž leží na společné pomyslné linii procházející počátkem souřadnic. Hlavní křivkou recese je chápána právě tato linie a její sklon udává koeficient recese α .

Gr. 3 Odvození koeficientu recese hydrografu - grafické znázornění rychlostí poklesu průtoku každých dvou po sobě následujících dnů všech významných období recese. $\alpha = 0,983$



5.3.2 Citlivostní analýza modelu

Velké množství parametrů modelu SWAT činí úlohu nalezení optimální kombinace hodnot parametrů značně obtížnou. Pro zefektivnění procesu optimalizace bylo třeba nejprve určit soubor parametrů, na které je model nejvíce citlivý a s tímto souborem parametrů pak provádět kalibraci. Výběr kalibračních parametrů byl proveden

na základě výsledků citlivostní analýzy provedené pomocí vestavěného modulu s označením „sensitivity analysis“.

Citlivostní analýza byla provedena pro časové řady hodnot průměrného denního průtoku ve stanici Rakovník za období let 1996 až 2001.

5.3.3 Metody hodnocení průběhu simulace modelu

Hodnocení úspěšnosti jednotlivých simulací při kalibraci bylo prováděno pomocí grafických i statistických ukazatelů.

Použitými statistickými ukazateli byly Pearsonův koeficient korelace R, procentní objemová chyba VE a koeficient účinnosti předpovědi E (Nash and Sutcliffe, 1978).

Podpůrným nástrojem pro hodnocení výsledků simulace bylo grafické vyjádření shody časových řad simulovaných a pozorovaných průtoků a grafické vyjádření velikosti residuí v závislosti na velikosti průtoku.

5.3.4 Manuální kalibrace

Manuální kalibrace byla provedena podle postupu popsaného v dokumentaci modelu SWAT a na základě sady nejcitlivějších parametrů identifikovaných během citlivostní analýzy (viz tab. ve výsledcích).

V první fázi šlo o dosažení shody měřených (aktuálních) a simulovaných hodnot průměrné roční odtokové výšky. Po dosažení uspokojivých výsledků byl další postup zaměřen na podíl výšky povrchového a podzemního odtoku a na shodu průměrných měsíčních výšek odtoku. Přitom bylo dbáno na to, aby hodnoty parametrů nepřekračovaly hranice doporučených intervalů.

Použité aktuální hodnoty dlouhodobých průměrných ročních a měsíčních odtokových výšek byly vypočteny podle vztahu (5.4) z hodnot průměrných denních průtoků za období let 1996 - 2001.

$$O_{ma,ra} = \sum_{i=1}^m \frac{Q_n \cdot \Delta t}{A} \quad (5.4)$$

Ve vzorci značí $O_{ma,ra}$ [mm] dlouhodobou průměrnou měsíční resp. roční odtokovou

výšku, kde a značí roky, za které se průměr počítá; Q_n [m^3s^{-1}] označuje průměrný denní průtok, Δt je délka časového kroku [s].

Hodnoty parametrů byly postupně měněny pro celé území nebo pro vybrané prostorové jednotky povodí buď přímo v databázi projektu nebo pomocí modulu označeného jako „manual calibration helper“. U parametrů vztahujících se k celému povodí byly změny prováděny většinou náhradou hodnoty. U parametrů lišících se pro jednotlivá dílčí povodí či HRU byly změny prováděny přičtením absolutní nebo relativní opravné hodnoty, což umožnilo zachovat původní tvar rozdělení hodnot parametrů v prostoru.

5.3.5 Automatická kalibrace

Po dosažení uspokojivých výsledků manuální kalibrace simulací hodnot ročního a měsíčního časového kroku bylo přistoupeno k užití nástroje pro automatickou kalibraci.

Pro definování vstupních údajů byl použit vestavěný modul s označením „autocalibration“. Prvním vstupem byla tabulka vstupních parametrů udávající výchozí hodnotu, povolený rozsah a metodu změny. Pro automatickou kalibraci byl zvolen stejný soubor parametrů jako u kalibrace manuální (viz tab. 1 ve výsl.). Druhý vstup tvořil datový soubor s měřenými průtoky resp. odtokovými výškami. Využito bylo stejné časové řady jako v případě citlivostní analýzy – časová řada hodnot průměrného denního průtoku ve stanici Rakovník za období let 1996 až 2001. Třetím vstupem bylo zadání kritéria pro posouzení shody měřených a simulovaných hodnot (tzv. objektivní funkce). Jako objektivní kritérium byl zvolen koeficient účinnosti předpovědi (NSE) a procentní objemová chyba (VE).

5.4 HYDROLOGICKÁ BILANCE RAKOVNICKÉHO POTOKA

Po provedení kalibrace byl model použit pro vyčíslení složek hydrologické bilance.

6 VÝSLEDKY

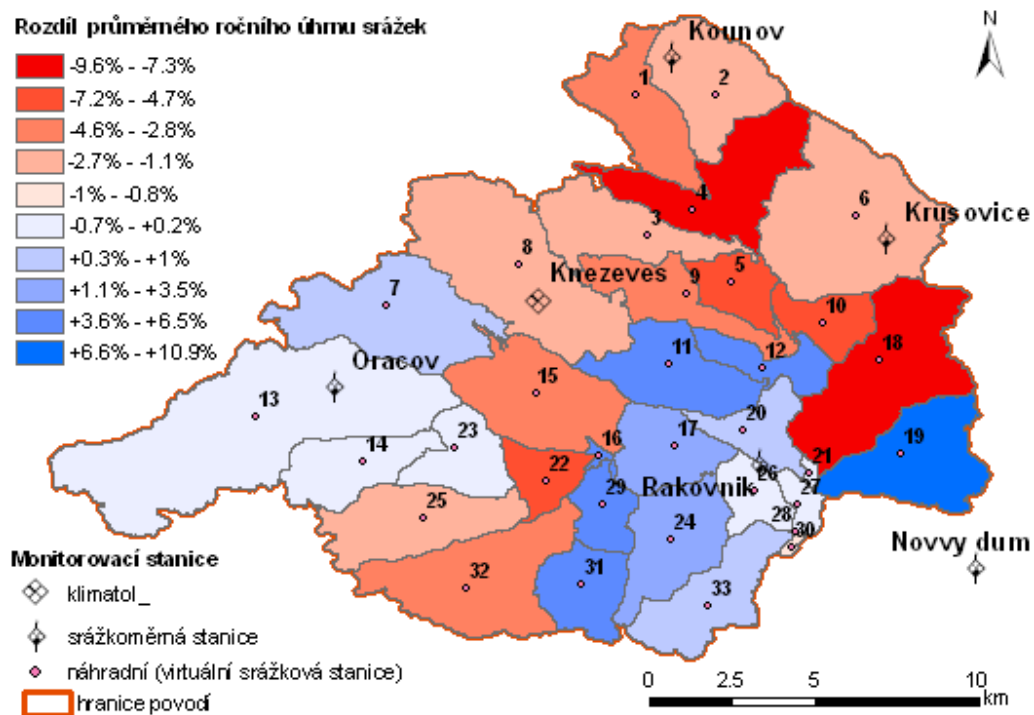
6.1 VÝSLEDKY PŘÍPRAVY VSTUPNÍCH DAT MODELU

6.1.1 Srážková data

Výstupem plošné interpolace jsou textové soubory obsahující časové řady srážkových úhrnů příslušejících jednotlivým „virtuálním“ srážko-měrným stanicím. Počet těchto stanic je shodný s počtem dílčích povodí IV. řádu.

Procentní rozdíl průměrného ročního úhrnu srážek na dílčích povodích při použití náhradních (virtuálních) srážkoměrných stanic je patrný na obrázku Obr. 17. Absolutní rozdíl obou přístupů zobrazuje graf Gr. 15 umístěný v příloze.

Obr. 17 Procentní rozdíl průměrného ročního úhrnu srážek na dílčích povodích při použití náhradních (virtuálních) srážkoměrných stanic



6.1.2 Vstupní vrstva LULC

Výsledkem je tabulka Tab. 15, umístěná v příloze, uvádějící třídy CLC vyskytující se na území povodí Rakovnického potoka a k nim přiřazené třídy klasifikace NLCD.

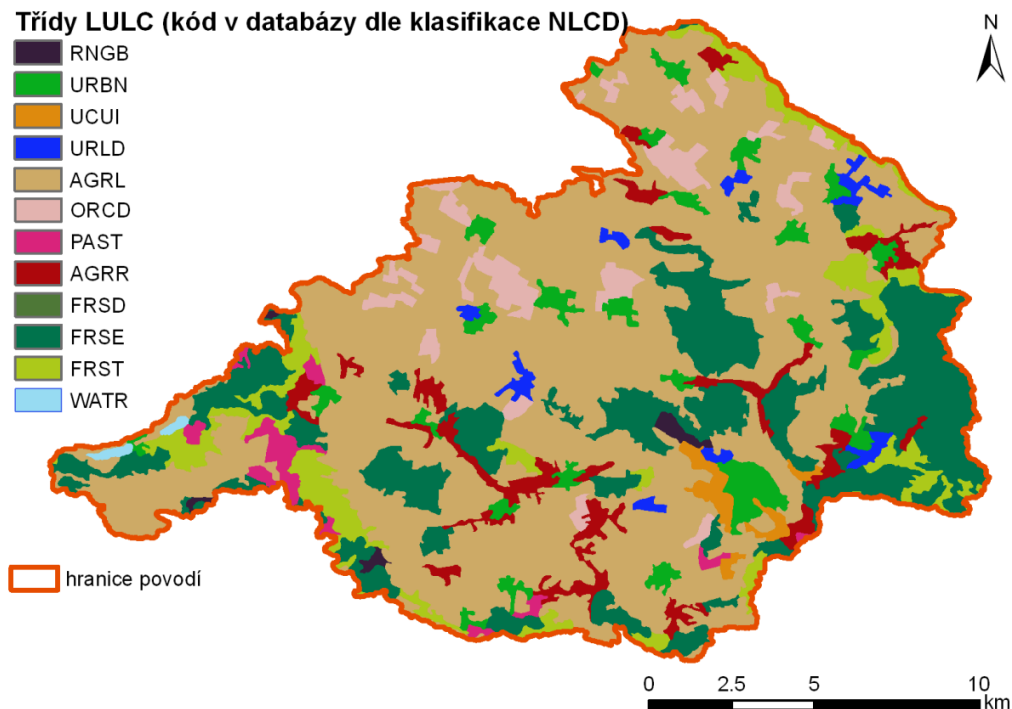
Na základě této tabulky bylo na území povodí vyčleněno celkem 12 různých tříd LULC. Plošné procentní zastoupení a čtyřmístný kód těchto tříd uvádí tabulka Tab. 11.

Tab. 11 Plošné procentní zastoupení jednotlivých tříd LULC vymezených dle databáze použité v modelu SWAT

kód v databázi NLCD	podíl z plochy povodí	specifikace	specifikace
URBN	4.51%	Městská nesouvislá zástavba	Residential
UCUI	1.00%	Průmyslové nebo obchodní zóny	Industrial or commercial units
URLD	1.31%	Zařízení pro sport a rekreaci	Residential-Low Density
AGRL	56.80%	Orná půda mimo zavlažovaných ploch	Agricultural Land- Generic
AGRR	4.63%	Převážně zemědělská území s příměsí přirozené vegetace	Agricultural Land-Row Crops
URLD	1.31%	Komplexní systémy kultur a parcel	Residential-Low Density
ORCD	4.15%	Ovocné sady a keře	Orchard
PAST	1.45%	Louky	Pasture
FRSD	0.00%	Listnaté lesy	Forest-Deciduous
FRSE	18.85%	Jehličnaté lesy	Forest-Evergreen
FRST	6.63%	Smíšené lesy	Forest-Mixed
RNGB	0.45%	Předhodová stadia lesa a křoviny	Range-Brush
WATR	0.21%	Vodní plochy	WATER

Rozložení jednotlivých krajinných jednotek zájmového území dle takto klasifikované vrstvy pak zobrazuje mapa na obrázku Obr. 18.

Obr. 18 Vstupní vrstva LULC klasifikovaná dle databáze použité v modelu SWAT



6.1.3 Půdní jednotky

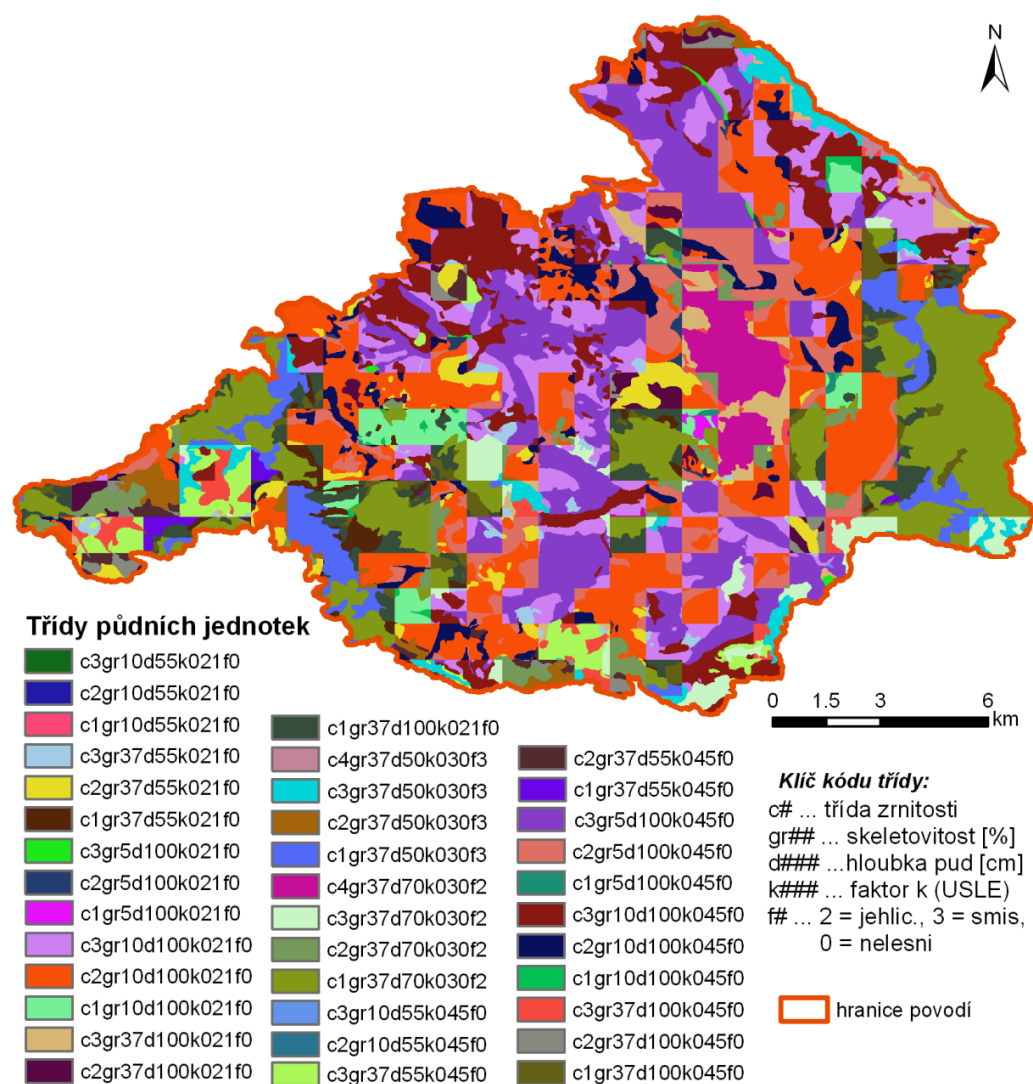
Finálním krokem procesu přípravy půdních dat je úprava tabulky „usersoil“ v databázi SWAT vložení záznamů o půdních jednotkách vyčleněných pro zájmové území. Upravená tabulka „usersoil“ je součástí přílohy (Tab. 16).

Touto reklasifikací bylo na území vyčleněno celkem 38 půdních jednotek. Plošné zastoupení a názvy těchto tříd uvádí tabulka Tab. 12. Rozložení jednotlivých půdních jednotek na území povodí vyjadřuje obrázek Obr. 19.

Tab. 12 Plošné procentní zastoupení jednotlivých půdních jednotek vymezených v rámci zájmového území dle vstupní vrstvy připravené popsáním způsobem

půdní jednotka (kód viz klíč u obrázku)	podíl plochy povodí [%]	půdní jednotka (kód viz klíč u obrázku)	podíl plochy povodí [%]
c2gr10d100k021f0	15.93	c3gr37d100k045f0	1.36
c3gr5d100k045f0	12.50	c2gr37d100k021f0	1.20
c1gr37d70k030f2	11.48	c2gr37d50k030f3	1.18
c3gr10d100k045f0	8.60	c1gr37d55k021f0	1.02
c3gr10d100k021f0	8.43	c3gr37d55k021f0	0.80
c2gr5d100k045f0	5.58	c2gr37d100k045f0	0.79
c1gr37d100k021f0	3.57	c2gr37d55k045f0	0.62
c1gr37d50k030f3	3.45	c1gr37d55k045f0	0.37
c2gr10d100k045f0	3.44	c4gr37d50k030f3	0.28
c4gr37d70k030f2	2.69	c1gr10d100k045f0	0.22
c2gr37d70k030f2	2.37	c2gr5d100k021f0	0.21
c3gr37d70k030f2	2.27	c1gr5d100k045f0	0.15
c2gr37d55k021f0	2.24	c3gr5d100k021f0	0.13
c3gr37d55k045f0	1.99	c1gr5d100k021f0	0.11
c3gr37d50k030f3	1.94	c3gr10d55k021f0	0.01
c1gr10d100k021f0	1.83	c3gr10d55k045f0	0.01
c3gr37d100k021f0	1.77	c2gr10d55k045f0	0.01
c1gr37d100k045f0	1.46	c2gr10d55k021f0	0.01

Obr. 19 Vstupní vrstva půdních jednotek – označení tříd je dáno kódem vyjadřujícím některé vlastnosti půdních jednotek (hloubka, skeletovitost, zrnitost)

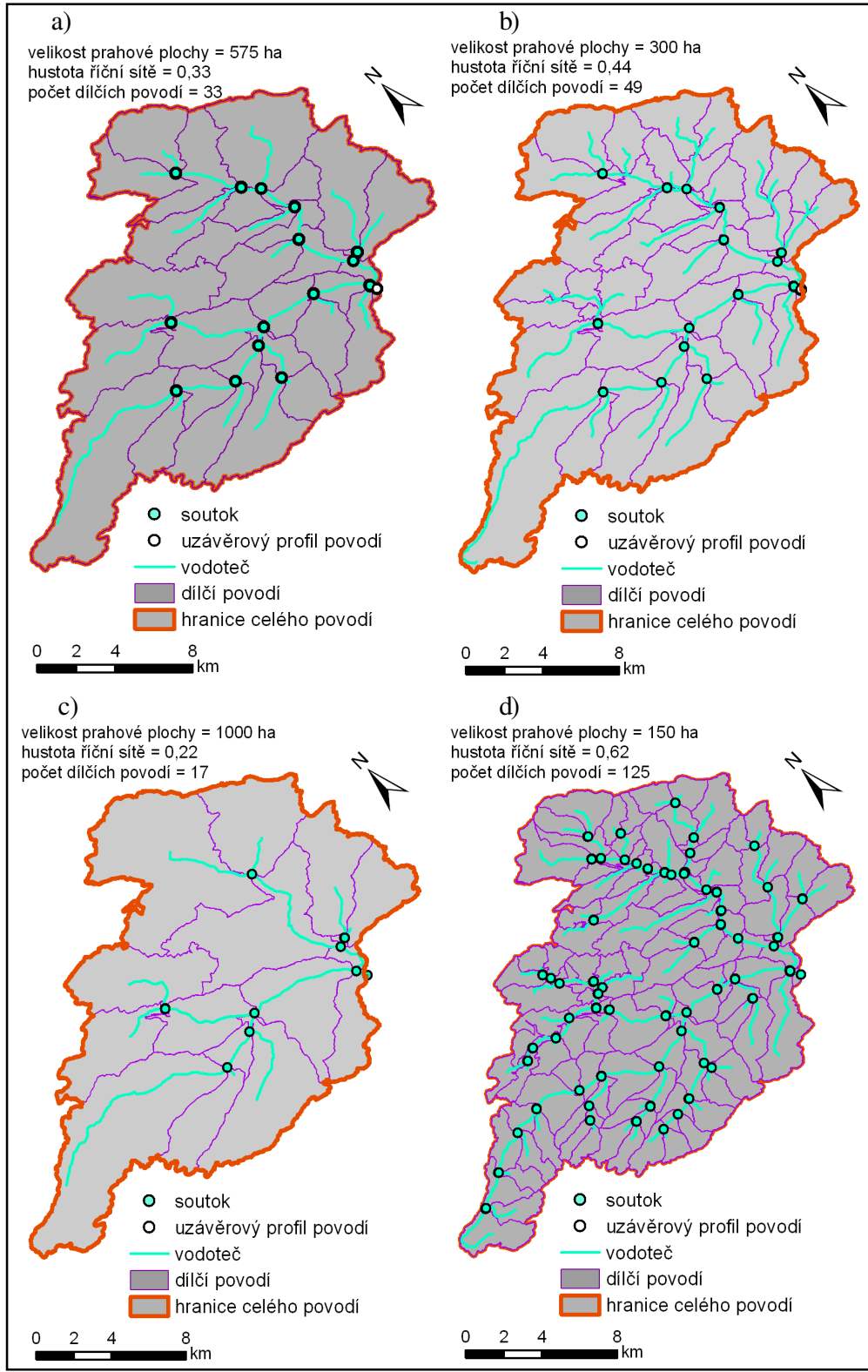


6.2 SESTAVA MODELU

6.2.1 Konfigurace povodí

Bylo vytvořeno několik variant modelu hydrografické sítě povodí (viz. Obr. 20 a,b,c,d). Jednotlivé varianty se v závislosti na použité hodnotě F_l liší hustotou říční sítě resp. průměrnou velikostí a počtem dílčích povodí.

Obr. 20 Varianty modelu hydrografické sítě povodí s různým nastavením hodnoty F_t



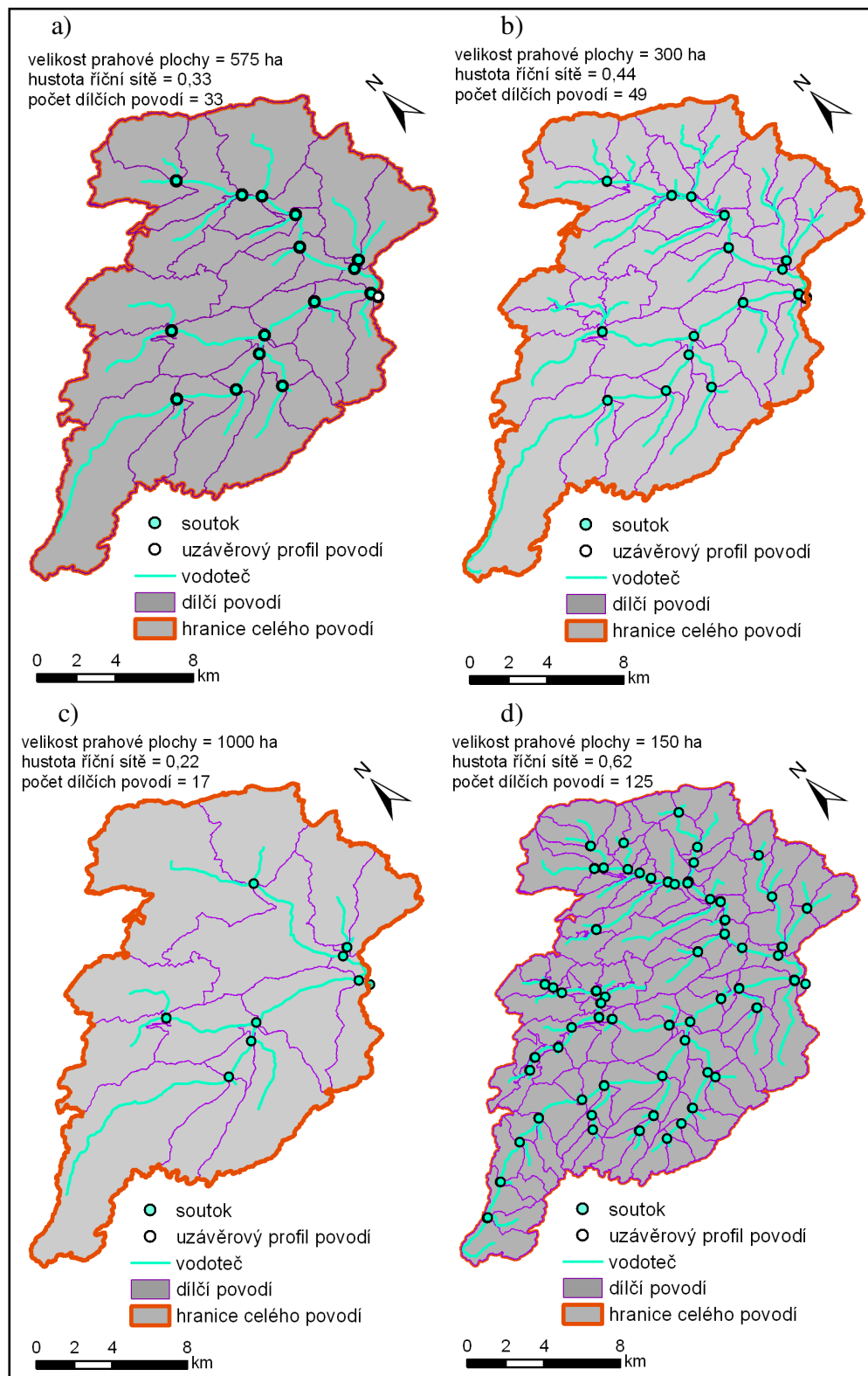
Pro účel této studie byla použita jako optimální velikost prahové plochy hodnota 575 ha. Při tomto nastavení rozdělil SWAT plochu povodí na celkem 33 dílčích povodí (viz. Obr. 20a) o průměrné velikosti 8,7 km² což činí přibližně 3% celkové plochy. Redukce hustoty říční sítě je při tomto nastavení stále přijatelná a počet dílčích povodí v modelu přibližně odpovídá počtu dílčích povodí IV řádu Rakovnického potoka.

6.2.2 HRU

Vytvoření vstupní vrstvy popisující rozložení sklonových poměrů na povodí bylo provedeno v sekci s označením „Slope“ a to na základě DEM zadaného v sekci pro konfiguraci povodí. Zde bylo třeba, s ohledem na morfologii terénu povodí, nastavit nejprve způsob klasifikace. Pro model povodí Rakovnického potoka byla využita volba „Multiple Slope“ a následně nadefinovány čtyři třídy sklonitosti terénu. Při stanovení homích limitů tříd sklonitosti byl brán v úvahu průběh histogramu sklonitosti terénu (viz Obr. 32 v příloze), přičemž nejvhodnějším východiskem se jevílo rozdělení histogramu dle metody „Natural Breaks (Jenks)“.

Výsledkem těchto procedur byla volitelně i nová vrstva všech HRU (viz obr...) s údaji o plošném zastoupení uloženými v atributové tabulce a souhrn výsledků v podobě textového souboru (viz obr....). – ještě před abstrakcí

Výsledkem je systém HRU o 259 hydrologických jednotkách, který znázorňuje obr.hru1.shp. ArcSWAT souběžně vyhotoví souhrnnou zprávu o průběhu analýzy HRU. Ta je uložena ve formě textového souboru předdefinované struktury zobrazeného na obr...



6.3 KALIBRACE A CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

Výsledkem těchto procedur byla volitelně i nová vrstva všech HRU (viz obr...) s údaji o plošném zastoupení uloženými v atributové tabulce a souhrn výsledků v podobě textového souboru

6.3.1 Citlivostní analýza

Po dosažení uspokojivých výsledků manuální kalibrace simulací hodnot ročního a měsíčního časového kroku bylo přistoupeno k užití nástroje pro automatickou kalibraci.

Pro definování vstupních údajů byl použit vestavěný modul s označením „autocalibration“. Prvním vstupem byla tabulka vstupních parametrů udávající výchozí hodnotu, povolený rozsah a metodu změny. Pro automatickou kalibraci byl zvolen stejný soubor parametrů jako u kalibrace manuální (viz tab. 1 ve výsl.). Druhý vstup tvořil datový soubor s měřenými průtoky resp. odtokovými výškami. Využito bylo stejné časové řady jako v případě citlivostní analýzy – časová řada hodnot průměrného denního průtoku ve stanici Rakovník za období let 1996 až 2001.

Tab. 13

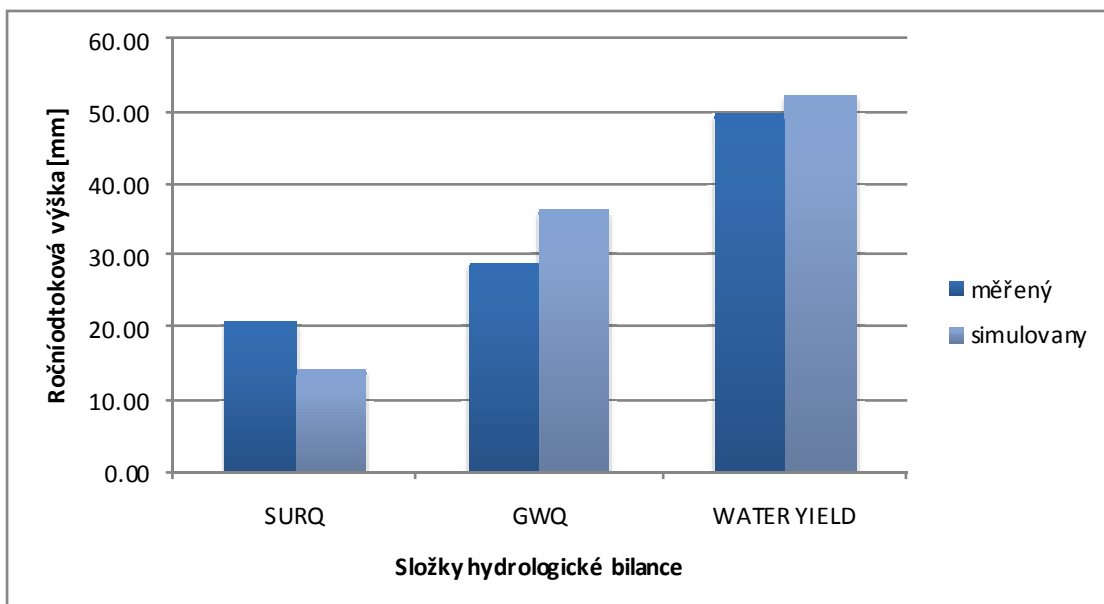
nazev parametru	značka	jednotka	dolní mez	horní mez	citlivost	počáteční odhad	uroveň
prahová hodnota pro výskyt průsaku do koryta z mělké zvodně	Gwqmn	[mm]	0	5000	1	60	BSN
Číslo odtokové křivky	Cn2	-	35	98	2	95%	HRU
Efektivní hydraul. vodivost v korytě	Ch_K2	[mm/h]	0	150	3	75	BSN
index základního odtoku	Alpha_Bf	[dny]	0	1	4	0.001	BSN
Maximální intercepce	Canmx	[mm]	0	10	5	nechano	HRU
prahová hodnota pro výskyt transportu vody z mělké zvodně do nenasycené zóny nebo do hluboké zvodně	Revapmn	[mm]	0	500	6	0.01	BSN
Mocnost půdního profilu	Sol_Z	[mm]	0	3000	7	vstup. Vrstva půd	HRU
maximální index zápoje vegetace	Blai	-	0	1	8	nechano	HRU
Kompenzační faktor evaporace půdy	Esco	-	0.01	1	9	0.2	BSN
Využitelná vodní kapacita	Sol_Awc	[mm H2O/m]	0	1	10	vstup. Vrstva půd	HRU
faktor vlivu teploty na	Timp	-	0.01	1	11	1	BSN

sněhovou pokrývkou							
Manningův koef. Drsnosti	Ch_N2	-	0	1	12	0.04	SUB
Koeficient evaporace z mělké zvodně	Gw_Reva p	-	0.02	0.2	13	0.15	HRU
Koeficient perkolace	Gw_Dda y	[dny]	0	50	14	50	HRU
Spoždění přímého odtoku	Surlag	[dny]	0	10	15	0.5	BSN
Faktor dotace zóny prokořenění zhlubších vrstev půdy	Epc0	-	0	1	16	0	HRU
Mín. teplota pro výskyt tání sněhové pokrývky	Smt mp	[°C]	0	5	17	0.5	BSN
Nasyčená hydraulická vodivost	Sol_K	[mm/h]	0	100	19	vstup. Vrstva půd	HRU

6.3.2 Manuální kalibrace

Bylo vytvořeno několik variant modelu hydrografické sítě povodí (viz. Obr. 20 a,b,c,d). Jednotlivé varianty se v závislosti na použité hodnotě F_t liší hustotou říční sítě resp. průměrnou velikostí a počtem dílčích povodí.

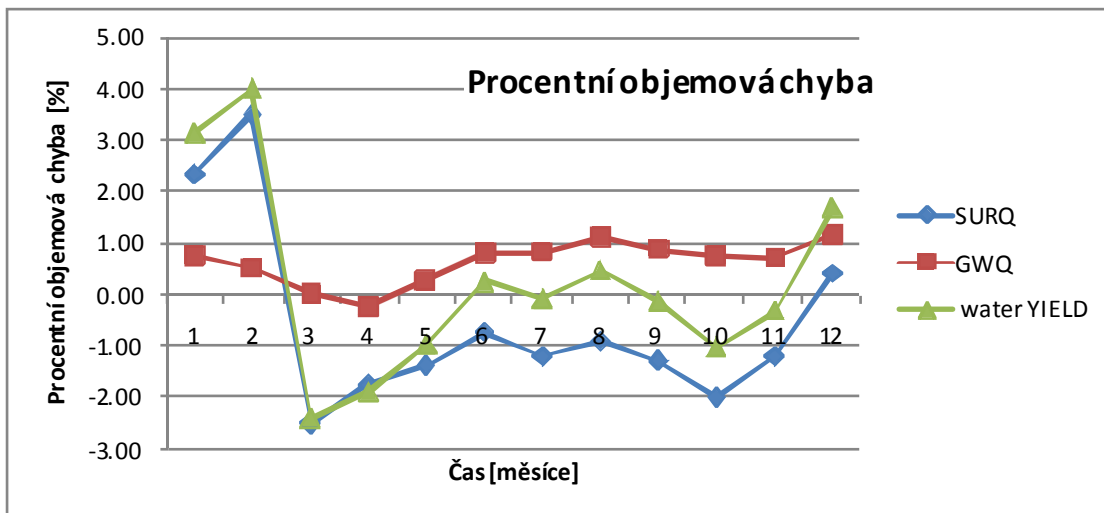
Gr. 4



Pro definování vstupních údajů byl použit vestavěný modul s označením „autocalibration“. Prvním vstupem byla tabulka vstupních parametrů udávající výchozí hodnotu, povolený rozsah a metodu změny. Pro automatickou kalibraci byl zvolen stejný soubor parametrů jako u kalibrace manuální (viz tab 1 ve výsl). Druhý vstup tvořil datový soubor s měřenými průtoky resp. odtokovými výškami. Využito bylo stejné časové řady

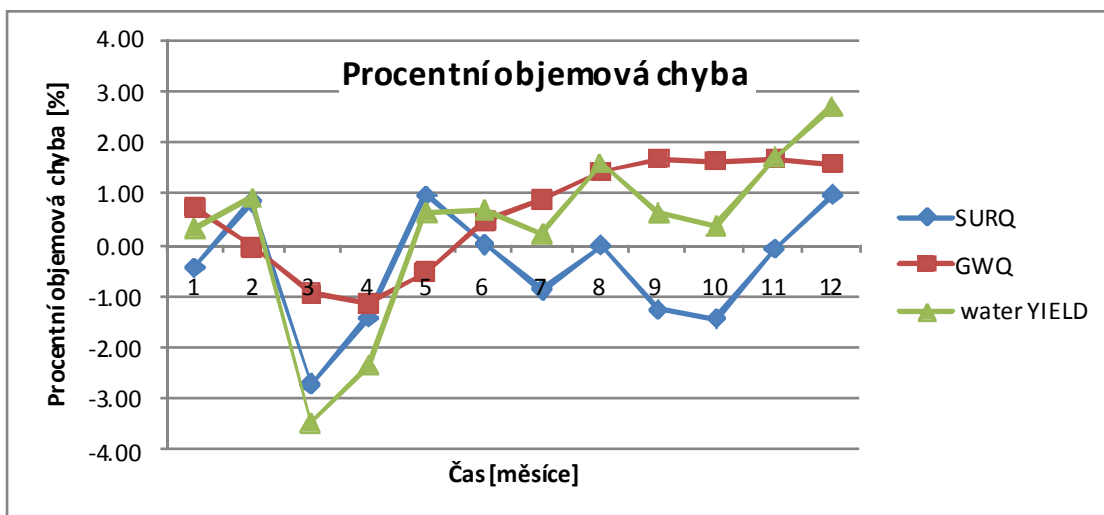
jako v případě citlivostní analýzy – časová řada hodnot průměrného denního průtoku ve stanici Rakovník za období let 1996 až 2001.

Gr. 5

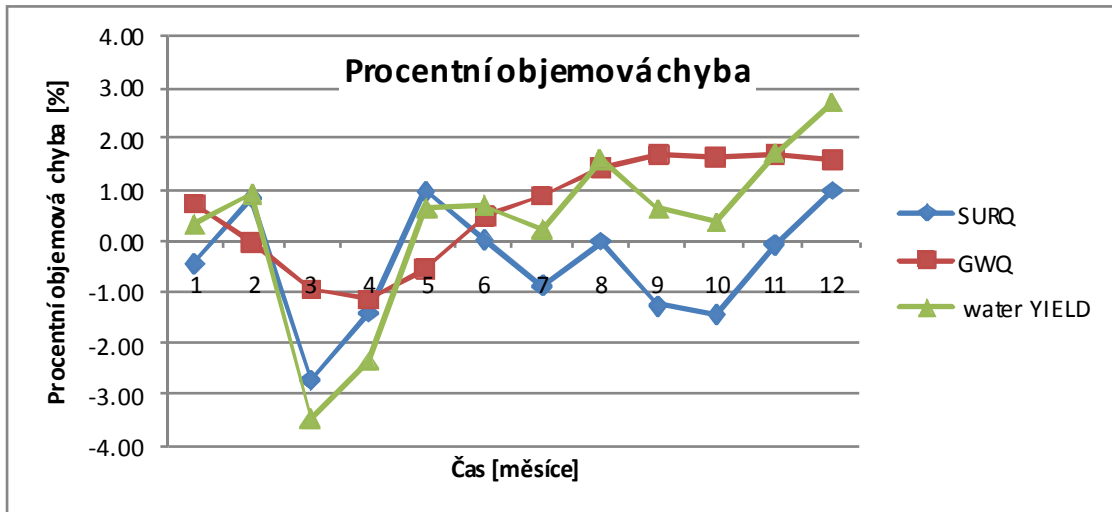


Pro automatickou kalibraci byl zvolen stejný soubor parametrů jako u kalibrace manuální (viz tabulka výsl.). Druhý vstup tvořil datový soubor s měřenými průtoky resp. odtokovými výškami. Využito bylo stejné časové řady jako v případě citlivostní analýzy.

Gr. 6

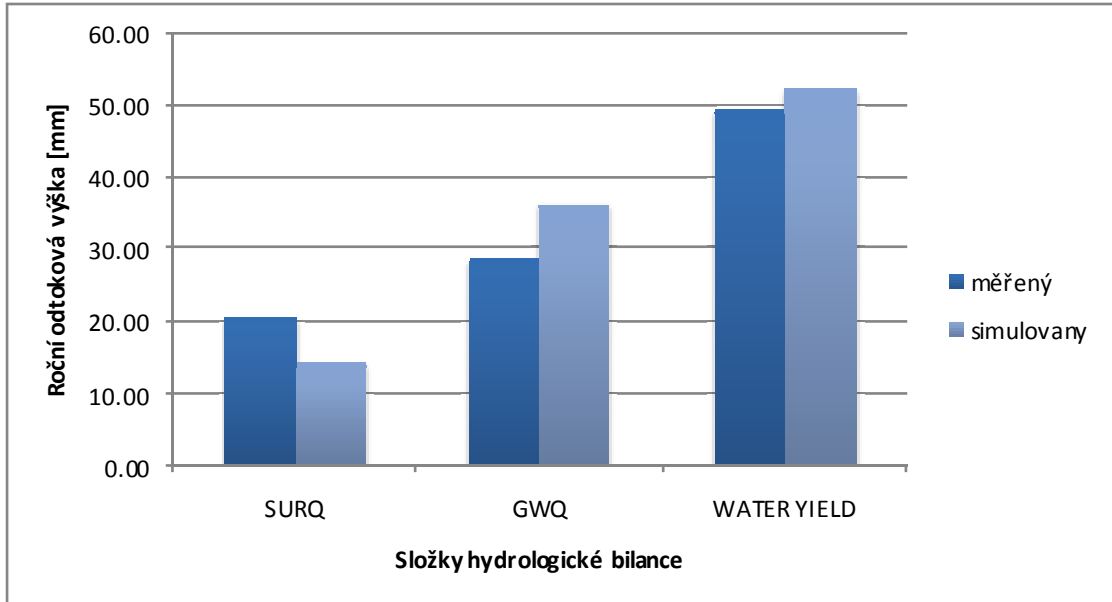


Gr. 7



Hodnoty parametrů byly postupně měněny pro celé území nebo pro vybrané prostorové jednotky povodí buď přímo v databázi projektu nebo pomocí modulu označeného jako „manual calibration helper“. U parametrů vztahujících se k celému povodí byly změny prováděny většinou náhradou hodnoty.

Gr. 8



6.3.3 Optimální rozsah hodnot parametrů

Vytvoření vstupní vrstvy popisující rozložení sklonových poměrů na povodí bylo provedeno v sekci s označením „Slope“ a to na základě DEM zadaného v sekci pro

konfiguraci povodí. Zde bylo třeba, s ohledem na morfologii terénu povodí, nastavit nejprve způsob klasifikace.

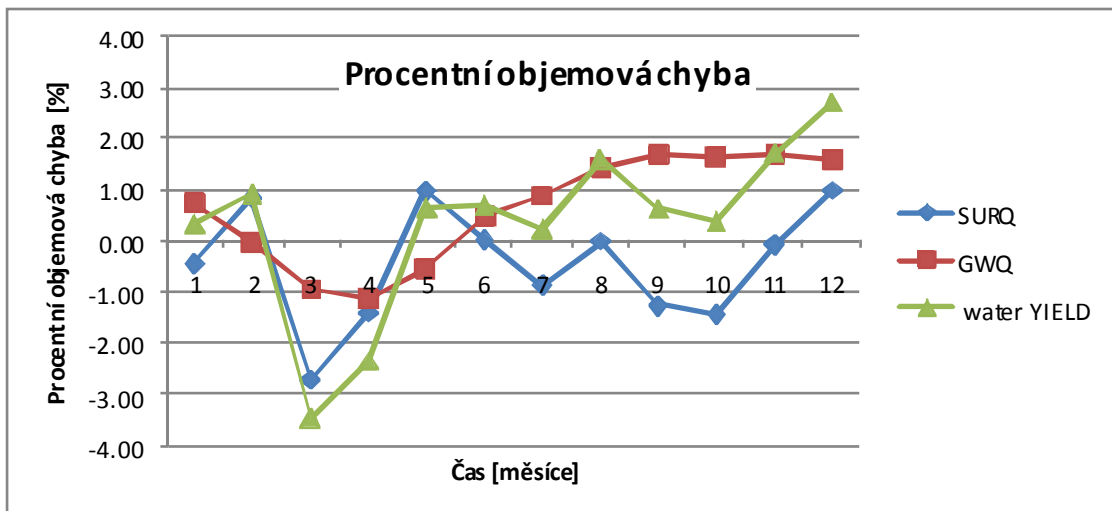
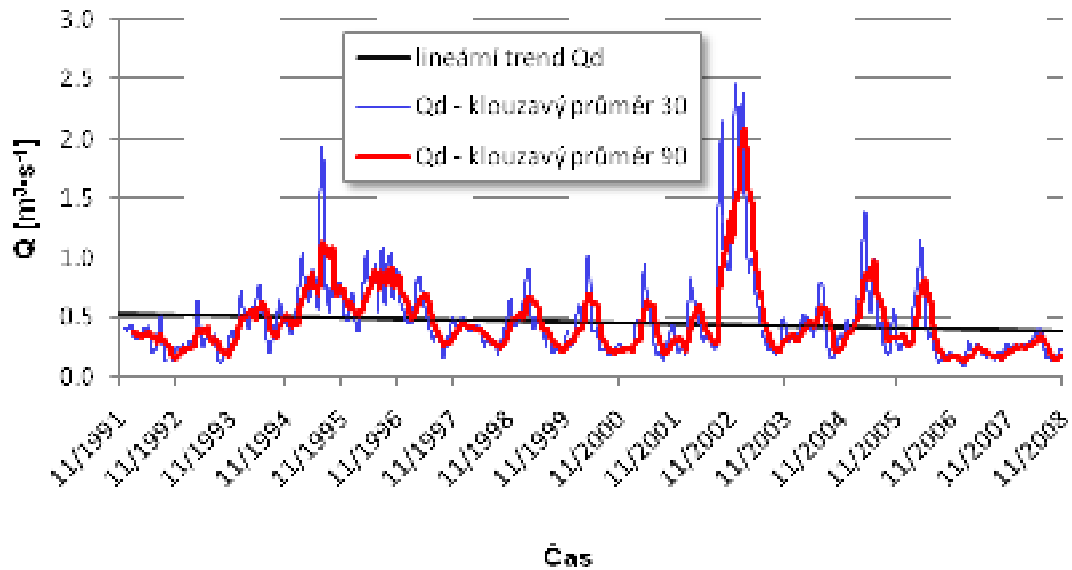
Tab. 14

nazev parametru	značka	jednotky	dolní mez	horní mez	citlivost	počáteční odhad	uroveň
prahová hodnota pro výskyt průsaku do koryta z mělké zvodně	Gwqmn	[mm]	0	5000	1	60	BSN
Číslo odtokové křivky	Cn2	-	35	98	2	95%	HRU
Efektivní hydraul. Vodivost v korytě	Ch_K2	[mm/h]	0	150	3	75	BSN
index základního odtoku	Alpha_Bf	[dny]	0	1	4	0.001	BSN
Maximální intercepce	Canmx	[mm]	0	10	5	nechano	HRU
prahová hodnota pro výskyt transportu vody z mělké zvodně do nenasyčené zóny nebo do hluboké zvodně	Revapmn	[mm]	0	500	6	0.01	BSN
Mocnost půdního profilu	Sol_Z	[mm]	0	3000	7	vstup. Vrstva půd	HRU
maximální index zápoje vegetace	Blai	-	0	1	8	nechano	HRU
Kompenzační faktor evaporace půdy	Esco	-	0.01	1	9	0.2	BSN
Využitelná vodní kapacita	Sol_Awc	[mm H2O/m]	0	1	10	vstup. Vrstva půd	HRU
faktor vlivu teploty na sněhovou pokrývku	Timp	-	0.01	1	11	1	BSN
Maningův koef. Drsnosti	Ch_N2	-	0	1	12	0.04	SUB
Koeficient evaporace z mělké zvodně	Gw_Reva	-	0.02	0.2	13	0.15	HRU
Koeficient perkolace	Gw_Dela	[dny]	0	50	14	50	HRU
Spoždění přímého odtoku	Surlag	[dny]	0	10	15	0.5	BSN
Faktor dotace zóny prokořenění z hlubších vrstev půdy	Epc0	-	0	1	16	0	HRU
Min. teplota pro výskyt tání sněhové pokrývky	Smtmp	[°C]	0	5	17	0.5	BSN
Nasyčená hydraulická vodivost	Sol_K	[mm/h]	0	100	19	vstup. Vrstva půd	HRU

6.3.4 Automatická kalibrace

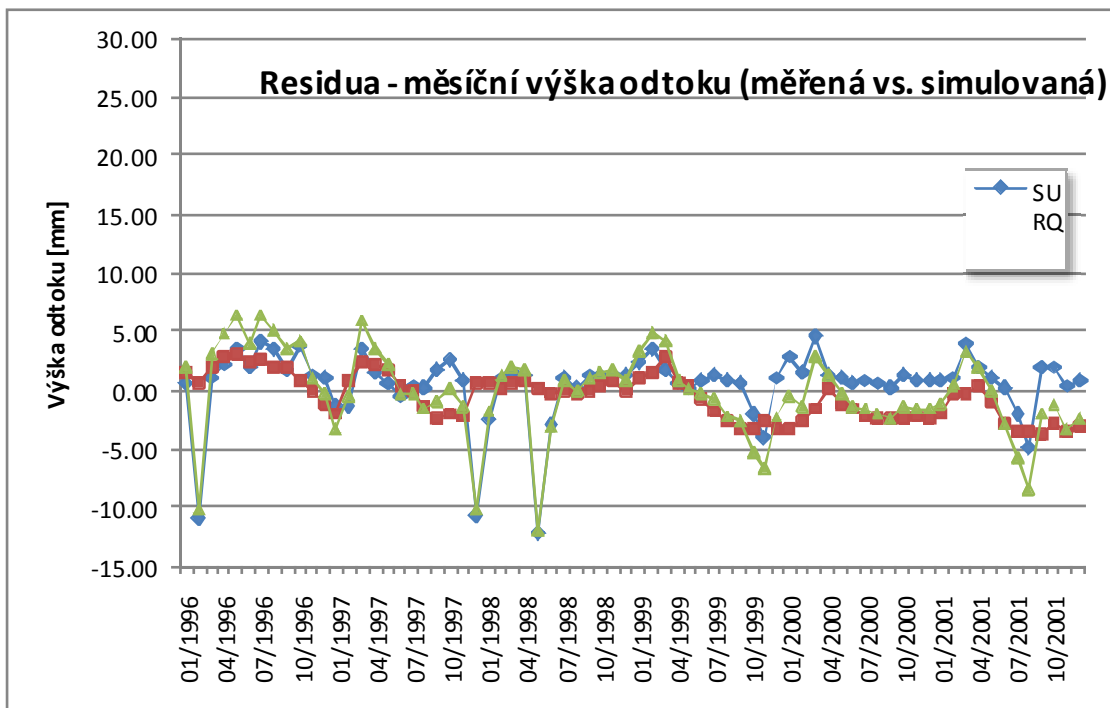
Bylo vytvořeno několik variant modelu hydrografické sítě povodí (viz. Obr. 20 a,b,c,d). Jednotlivé varianty se v závislosti na použité hodnotě F_t liší hustotou říční sítě resp. průměrnou velikostí a počtem dílčích povodí.

Gr. 9



U parametrů vztahujících se k celému povodí byly změny prováděny většinou náhradou hodnoty. U parametrů lišících se pro jednotlivá dílčí povodí či HRU byly změny prováděny přičtením absolutní nebo relativní opravné hodnoty, což umožnilo zachovat původní tvar rozdělení hodnot parametrů v prostoru.

Gr. 10



U parametrů vztahujících se k celému povodí byly změny prováděny většinou náhradou hodnoty. U parametrů lišících se pro jednotlivá dílčí povodí či HRU byly změny prováděny přičtením absolutní nebo relativní opravné hodnoty, což umožnilo zachovat původní tvar rozdělení hodnot parametrů v prostoru.

6.4 BILANCE PŮVODÍ RAKOVNICKÉHO PŮTOKA

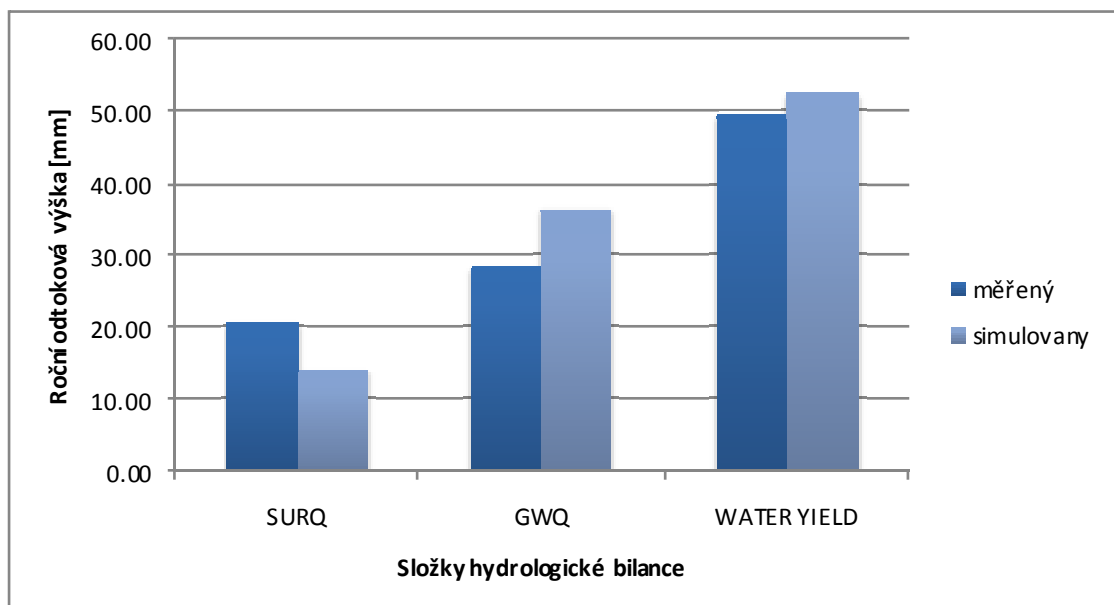
Použité aktuální hodnoty dlouhodobých průměrných ročních a měsíčních odtokových výšek byly vypočteny podle vztahu (5.4) z hodnot průměrných denních průtoků za období let 1996 - 2001.

$$\text{---} \quad (6.1)$$

Ve vzorci značí $\bar{Q}_{m, \text{roční}}$ [mm] dlouhodobou průměrnou měsíční resp. roční odtokovou výšku, kde a značí roky, za které se průměr počítá; \bar{Q}_{d} [m³s⁻¹] označuje průměrný denní průtok, Δt je délka časového kroku [s].

Hodnoty parametrů byly postupně měněny pro celé území nebo pro vybrané prostorové jednotky povodí buď přímo v databázi projektu nebo pomocí modulu označeného jako „manual calibration helper“. U parametrů vztahujících se k celému povodí byly změny prováděny většinou náhradou hodnoty. U parametrů lišících se pro jednotlivá dílčí povodí či HRU byly změny prováděny přičtením absolutní nebo relativní opravné hodnoty, což umožnilo zachovat původní tvar rozdělení hodnot parametrů v prostoru.

Gr. 11



7 DISKUSE

Tato metoda představuje zjednodušení, protože jako vstupní data vyžaduje pouze minimální a maximální teploty vzduchu pro daný časový krok. Byla však odvozena pro území poměrně odlišných podmínek a proto by, pro další aplikaci modelu, bylo vhodné použít jinou metodu např. „Penman-Monteith

Tento postup představuje značné zjednodušení definice řady modelových parametrů vázaných na data LC. Předpokládá podobné vlastnosti (především hydrologicky významné) jednotlivých krajinných jednotek vzájemně přiřazených tříd obou klasifikačních systémů a dále menší význam právě některých parametrů daných třídou LC z hlediska zaměření této práce. V případě pokročilejší úrovně aplikace modelu by však bylo třeba přesnějšího odvození těchto parametrů s využitím dat o charakteru jednotlivých krajinných jednotek dané modelované lokality.

Měrný profil Rakovník byl vzhledem ke své poloze současně nastaven jako hlavní uzávěrový profil celého modelovaného povodí. To bylo provedeno v podsekcí pojmenované „Watershed Outlet(s) Selection and Definition“. Tato koncepce představuje značné ulehčení postupu při kalibraci a menší požadavky na monitoring avšak pro přesnější kalibraci modelu by bylo vhodnější provádět kalibraci ve více uzávěrových profilech vhodného umístění.

8 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byla aplikace a testování možnosti využití modelu SWAT v podmínkách povodí Rakovnického potoka (Česká republika) pro stanovení prvků hydrologické bilance. Toto povodí patří mezi oblasti, kde se na hydrologické bilanci výrazně projevuje negativní vliv klimatických změn pozorovaných na území ČR během posledních desetiletí. Území povodí tvoří pahorkatiny, rozloha povodí je 368,1 km² a průměrný průtok v ústí toku je 0,86 m³·s⁻¹.

Nejprve byl proveden rozbor podmínek území a příprava geografických a meteorologických vstupních dat s využitím nástrojů GIS. Sestavený model byl po té kalibrován s využitím měřených průtoků v limniografické stanici Rakovník za období let 1996 až 2001.

Kalibrace modelu nepřinesla příliš uspokojivé výsledky, pro které se následná další aplikace modelu, bez provedení patřičných změn souboru vstupních dat, jeví pro účel hodnocení hydrologického režimu povodí Rakovnického potoka jako problematická.

9 SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

9.1 CITOVANÁ LITERATURA

Arnold, J. G., a další. 1998. Large Area Hydrologic Modeling And Assessment Part I: Model Development. *Journal Of The American Water Resource Asociation (JAWRA)*. 1998, 34, stránky 73 - 89.

Arnold, J., Williams, J. a Maidment, D. 1995. Cortinuous-Time Water and Sediment-Routing Model for Large Basins. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1995, 121, stránky 171 - 184.

Balatka, B. 1987. *Hory a nížiny : Zeměpisný lexikon ČSR*. Praha: Praha : Academia, 1987. str. 584.

Bauwens, W. 2007. *Surface Hydrology Lecture Notes*. místo neznámé : Katholieke Universiteit Leuven - Vrije Universiteit Brussel, 2007. str. 151.

Bekiaris, I. G., PANAGOPOULOS, I. N. a Mimikou, M. A. 2005. Application Of The SWAT(Soil And Water Assessment Tool) Model In The Ronnea Catchement Of Sweden. *Global NEST Journal*. 2005, 7, stránky 252-257.

Beven, K. 1989. Changing ideas in hydrology — The case of physically-based models. *Journal of Hydrology*. 1989, 105, stránky 157 - 172.

Brimicombe, A. 2003. *GIS, Environmental Modelling and Engineering*. 1. vyd. London : Taylor & Francis, 2003. str. 308.

Chow, V. T. a Maidment, D. R. 1988. *Applied hydrology*. 1988.

Duan, Q., Sorooshian, S. a Gupta, V. K. 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*. 1994, 158, stránky 265-284.

Eckhardt, K. 2008. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. *Journal of Hydrology*. 2008, 352, stránky 168– 173.

—. **2005.** How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*. 2005, 19, stránky 507 - 515.

Gassman, P. W., a další. 2007. *The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions*. Ames, Iowa 50011-1070 : Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University., 2007.

Green, C. H. a van Griensven, A. 2007. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005. *Environmental Modelling & Software*. edice, 2007, Sv. svazek, vyd, stránky 422 - 434.

Holwoet, K., a další. 2005. Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2005, 30, stránky 518-526.

Horvát, O. 2009. *Parameterization of hydrologic processes in rainfall-runoff modelling*. 1. vyd. Brno : Novpress, 2009. str. 149.

Hrádek, F. a Kuřík, P. 2004. *Hydrologie*. 1. vyd. Praha : ČZU Praha, Fakulta lesnická a environmentální, 2004. str. 280.

Hrazdára, P. 1993. Hydrogeologická mapa ČR - Měřítko 1:50 000. Praha : Český geologický ústav Praha, 1993. stránky list 12 - 14.

Janeček, M. 2005. *Ochrana zemědělských půd před erozí*. 2. vyd. Praha : ISV nakladatelství, 2005.

Jeníček, M. 2007a. Klasifikace hydrologických modelů (studijní materiál pro předmět "Modelování hydrologických procesů I). 2007a.

—. **2007b.** Modelování srážko-odtokových procesů v měnící se krajině. [Online] 2007b. <http://floodserv.natur.cuni.cz/jeni.cz/jenicek/>.

Juříčková, L. a Šeděnková, M. 2008. *Odhad plošných srážek pro povodí řeky Olše*. Ostrava : Institut geoinformatiky, Hornicko-geologická fakulta, VŠB-TU Ostrava, 2008. str. 7.

Kašpárek, J., a další. 2010. *Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulární schopnosti v povodí Rakovnického potoka (Pilotní projekt) - Periodická zpráva za rok 2009*. místo neznámé : VTEI VÚV T.G.Masaryka, v.v.i., 2010.

KPOP. 2009. Pedologická mapa 1:100000. [Online] 2009. <http://geoportal.cenia.cz>.

Krásný, J. 1982. *Odtok podzemní vody na území Československa*. 1. vydání. Praha : Praha : Český hydrometeorologický ústav, 1982, 1982. str. 50.

Kulasová, B., Šerd, P. a Boháč, M. 2004. *Závěrečná zpráva projektu: Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní*. Praha : ČHMU, 2004.

Kulhavý, Z a Kovář, P. 2000. *Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí*. 1. vyd. Praha : Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy Praha, 2000. str. 123.

Lim, K. J., a další. 2005. Automated Web Gis Based Hydrograph Analysis Tool, WHAT. *Journal Of The American Water Resources Association*. 2005, 41, stránky 1407–1416.

Mays, L. W. 2001. *Water resources engineering*. místo neznámé : New York : Wiley, 2001. str. 761.

NEITSCH, S. L., a další. 2004. *Soil And Water Assessment Tool Input/Output File Documentation (version 2005)*. Texas : Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2004.

Neitsch, S. L., a další. 2005. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, version 2005*. Texas : Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2005. str. 494.

NEITSCH, S. L., a další. 2002. *Soil And Water Assessment Tool User's Manual (version 2000)*. Texas : Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2002.

Olivera, F., a další. 2006. ArcGIS-SWAT: A Geodata Model and GIS Interface For SWAT. *Journal Of The American Water Resource Association*. Duben 2006, stránky 295 - 309.

Oliviera, F., a další. 2006. ArcGIS-SWAT: A Geodata Model And Gis Interface For SWAT. *Journal Of American Water Resources Association*. 2006, 42, stránky 295–309.

Olmer, M., Kessl, J. a kol. 1990. *Hydrogeologické rajóny*. 1. vyd. Praha : Výzkumný ústav vodohospodářský, 1990. str. 154.

Rouhani, H., a další. 2007. Optimization Of The Flow Components Prediction Of The Semi-distributed SWAT Hydrological Model. *Hydrological Processes*. 2007, 21, stránky 2998 - 3008.

Sklenička, P. 2003. *Základy krajinného plánování*. 2. vyd. Praha: Naděžda Skleničková, 2003. str. 321.

Smakhčin, V. U. 2000. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*. 2000, 240, stránky 147 - 186.

Srinivasan, R., a další. 2006. *European SWAT summer School 2006*. Delft, Nizozemí : UNESCO-IHE.

Srinivasan, R., a další. 1998. Large Area Hydrologic Modeling And Assessment Part II: Model Application. *Journal Of The American Water Resource Asociation (JAWRA)*. 1998, 34, stránky 91 - 101.

Sui, D. Z. a Maggio, R. C. 1999. Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects. *Computers, Environment and Urban Systems*. 1999, 23, stránky 33-51.

Tolasz, R., a další. 2007. *Atlas podnebí Česka : 1961-2000 = Climate atlas of Czechia*. 1. vyd. místo neznámé: Český hydrometeorologický ústav Praha; Univerzita Palackého v Olomouci, 2007. str. 255.

Tomášek, M. 2000. *Půdy České republiky*. 2., dopl. vyd. Praha: Český geologický ústav, 2000. str. 67.

Tripathi, M. P., Panda, R. K. a Raghuvanshi, N. S. 2003. Identification and Prioritisation of Critical Sub-watersheds for Soil Conservation Management using the SWAT Model. *Biosystems Engineering*. 2003, 85, stránky 365 - 379.

van Griensven, A. a Bauwens, W. 2001. Integral modelling of catchments. *Water Science Technology*. 2001, 43, stránky 321-328.

van Griensven, A., Francos, A. a Bauwens, W. 2002. Sensitivity analysis and auto-calibration of an integral. *Water Science and Technology*. 2002, 45, stránky 325–332.

Vlček, V. 1984. *Vodní toky a nádrže*. Zeměpisný lexikon ČSR . Praha : Academia, 1984. str. 315.

White, E. D., a další. 2009. Improving daily water yield estimates in the Little River watershed: SWAT adjustments. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2009, 52, stránky 69 - 79.

White, K. L. a Chaubey, I. 2005. SENSITIVITY ANALYSIS, CALIBRATION, AND VALIDATIONS FOR. *JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION (JAWRA)*. 2005, stránky 1077-1089.

Zachar, D. 1970. *Erózia pôdy*. Bratislava : SAV, 1970. str. 196.

10 SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

11 SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

OBR 1 SCHÉMA REPREZENTUJÍCÍ OBECNÉ CHOVÁNÍ HYDROLOGICKÉHO CYKLU	11
OBR 2 VIZ KOVÁŘ KULHAVÝ.....	15
OBR 3 SCHEMATIZACE POSTUPNÉHO VZNIKU AVÝVOJE MODELU SWAT, ADAPTACE MODELU SWAT.....	19
OBR 4 SCHÉMA SYSTÉMU POTENCIÁLNÍCH DRAH PROUDĚNÍ VODY V MODELU SWAT.....	22
OBR 5.....	27
OBR 6.....	36
OBR 7 GEOGRAFICKÁ POLOGA A GEOMORFOLOGICKÉ ČLENĚNÍ ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ.....	39
OBR 8 GEOLOGICKÉ POMĚRY ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ - ČLENĚNÍ ÚZEMÍ Z HLEDISKA HORNINOVÉHO SLOŽENÍ A PŘÍSLUŠNOSTI K DANÝM VÝVOJOVÝM OBDOBÍM	41
OBR 9.....	45
OBR 10.....	47
OBR 11 ČLENĚNÍ PLOCHY POVODÍ Z HLEDISKA POVRCHOVÉHO POKRYVU A VYUŽITÍ ÚZEMÍ.....	48
OBR 12.....	50
OBR 13 PŘÍMÝ A ZÁKLADNÉ ODTOK V POVODÍ RAKOVNICKÉHO POTOKA.....	52
OBR 14.....	60
OBR 15.....	67
OBR 16.....	69
OBR 17 PROCENTNÍ ROZDÍL PRŮMĚRNÉHO ROČNÍHO ÚHRNU SRÁŽEK NA DÍLČÍCH POVODÍCH PŘI POUŽITÍ NÁHRADNÍCH (VIRTUÁLNÍCH) SRÁŽKOMĚRNÝCH STANIC.....	74
OBR 18 VSTUPNÍ VRSTVA LULC KLASIFIKOVANÁ DLE DATABÁZE POUŽITÉ V MODELU SWAT	75
OBR 19 VSTUPNÍ VRSTVA PŮDNÍCH JEDNOTEK – OZNAČENÍ TŘÍD JE DÁNO KÓDEM VYJADŘUJÍCÍM NĚKTERÉ VLASTNOSTI PŮDNÍCH JEDNOTEK (HLOUBKA, SKELETOVITOST, ZRNITOST).....	77
OBR 20 VARIANTY MODELU HYDROGRAFICKÉ SÍTĚ POVODÍ S RŮZNÝM NASTAVENÍM HODNOTY F_T	78
OBR 21.....	106
OBR 22 ČLENĚNÍ ÚZEMÍ Z HLEDISKA REGIONÁLNÍ GEOGRAFIE A NADMOŘSKÉ VÝŠKY MOŽNÁ DO PŘÍL	111
OBR 23 ROZLOŽENÍ JEDNOTLIVÝCH SOUVRSTVÍ PERMOKARBONSKÉ PÁNVE NA ÚZEMÍ POVODÍ RAKOVNICKÉHO POTOKA.....	112
OBR 24.....	113
OBR 25.....	114
OBR 26.....	114
OBR 27.....	115
OBR 28.....	116
OBR 29.....	117
OBR 30.....	118

OBR. 31.....	118
OBR. 32.....	119
OBR. 33.....	120
TAB. 1 PŘEHLED PŮDNÍCH VELIČIN, KTERÉ MODEL SWAT.....	30
TAB. 2 SDFSDF.....	43
TAB. 3 CHARAKTERISTIKY HYDROLOGICKÉ BILANCE	53
TAB. 4 M-DENNÍ PRŮTOKY [$M^3 \cdot s^{-1}$].....	53
TAB. 5 N-LETÉ PRŮTOKY [$M^3 \cdot s^{-1}$].....	53
TAB. 6 CHARAKTERISTIKY HYDROLOGICKÉ BILANCE RAKOVNICKÉHO POTOKA VE VODOMĚRNÉ STANICI RAKOVNÍK V RŮZNÝCH OBDOBÍCH	54
TAB. 757	
TAB. 8 HYDROLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA LESNÍCH PŮD A ZEMĚDĚLSKÝCH PŮD VE VZTAHU K BPEJ.....	58
TAB. 959	
TAB. 10.....	61
TAB. 11 PLOŠNÉ PROCENTNÍ ZASTOUPENÍ JEDNOTLIVÝCH TŘÍD LULC VYMEZENÝCH DLE DATABÁZE POUŽITÉ V MODELU SWAT	75
TAB. 12 PLOŠNÉ PROCENTNÍ ZASTOUPENÍ JEDNOTLIVÝCH PŮDNÍCH JEDNOTEK VYMEZENÝCH V RÁMCI ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ DLE VSTUPNÍ Vrstvy PŘIPRAVENÉ POPSANÝM ZPŮSOBEM	76
TAB. 13.....	81
TAB. 14.....	85
TAB. 15.....	100
TAB. 16 TABULKA „USERSOIL“.....	101

12 PŘÍLOHY

PŘEHLED PŘÍLOH

PŘÍLOHA - TABULKY

PŘÍLOHA – GRAFY

PŘÍLOHA – OBRÁZKY

PŘÍLOHA A – TABULKY

Tab. 15

třída	název třídy	podtřída	název podtřídy	hodnota vrstvy CORINE LULC	kód v databázi NLCD	specifikace
1.1	Obytné plochy (Urban fabric)	112	Městská nesouvislá zástavba (Discontinuous urban fabric)	112	URBN	Residential
1.2	Třída Průmyslové a obchodní zóny, komunikační síť (Industrial, commercial and transport units)	121	Průmyslové nebo obchodní zóny (Industrial or commercial units)	121	UCUI	Industrial or commercial units
1.4	Plochy umělé, nezemědělské zeleně (Artificial non-agricultural vegetated areas)	142	Zařízení pro sport a rekreaci (Sport and leisure facilities)	142	URLD	Residential-Low Density
2.1	Třída 2.1 Omá půda (Arable land)	211	Orná půda mimo zavlažovaných ploch (Non-irrigated arable land)	211	AGRL	Agricultural Land- Generic
2.4	Různorodé zemědělské plochy (Heterogeneous agricultural areas)	243	Převážně zemědělská území s příměsí přirozené vegetace (Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation)	243	AGRR	Agricultural Land- Row Crops
		242	Komplexní systémy kultur a parcel (Complex cultivation patterns)	242	URLD	Residential-Low Density
2.2	Stálé kultury (Permanent crops)	222	Ovocné sady a keře (Fruit trees and berry plantations)	222	ORCD	Orchard
2.3	Pastviny (Pastures)	231	Louky (Pastures)	231	PAST	Pasture
3.1	Lesy (Forests)	311	Listnaté lesy (Broad-leaved forest)	311	FRSD	Forest-Deciduous
		312	Jehličnaté lesy (Coniferous forest)	312	FRSE	Forest-Evergreen
		313	Smíšené lesy (Mixed forest)	313	FRST	Forest-Mixed
3.2	Plochy s dřevinnou a travnatou vegetací (Shrubs and/or herbaceous vegetation associations)	324	Přechodová stadia lesa a dřeviny (Transitional woodland shrub)	32	RNGB	Range-Bush
		321	Přírodní pastviny (Natural grassland)			
5.1	Pevninské vody (Inland waters)	512	Vodní plochy (Waterbodies)	512	WATR	WATER

Tab. 16 tabulka „Useroil“

OBJE CTID	SNAM	NLAY ERS	HYD GRP	SOL_ ZMX	ANION _EXCL	SOL_ CRK	SOL_ _Z1	SOL_ BD1	SOL_ AWC1	SOL_ _K1	SOL_ CBN1	CL AY 1	SIL T1	SA ND 1	RO CK1	SOL_ ALB1	USL E_K1
1	c1gr5d100 k021f0	1	A	1500	0.5	0.5	100	1.49	0.08	57.7 3	2	7.5	20	70	5	0.01	0.21
2	c1gr5d100 k045f0	1	A	1500	0.5	0.5	100	1.49	0.08	57.7 3	2	7.5	20	70	5	0.01	0.45
3	c1gr10d55 k021f0	1	A	1500	0.5	0.5	55	1.49	0.08	53.2 3	2	7.5	20	70	10	0.01	0.21
4	c1gr10d55 k045f0	1	A	1500	0.5	0.5	55	1.49	0.08	53.2 3	2	7.5	20	70	10	0.01	0.45
5	c1gr10d10 0k021f0	1	A	1500	0.5	0.5	100	1.49	0.08	53.2 3	2	7.5	20	70	10	0.01	0.21
6	c1gr10d10 0k045f0	1	A	1500	0.5	0.5	100	1.49	0.08	53.2 3	2	7.5	20	70	10	0.01	0.45
7	c1gr37d50 k030f3	1	A	500	0.5	0.5	50	1.49	0.05	32.6 1	2	7.5	20	70	37	0.01	0.3
8	c1gr37d55 k021f0	1	A	1500	0.5	0.5	55	1.49	0.05	32.6 1	2	7.5	20	70	37	0.01	0.21
9	c1gr37d55 k045f0	1	A	1500	0.5	0.5	55	1.49	0.05	32.6 1	2	7.5	20	70	37	0.01	0.45
10	c1gr37d70 k030f2	1	A	500	0.5	0.5	70	1.49	0.05	32.6 1	2	7.5	20	70	37	0.01	0.3
11	c1gr37d10 0k021f0	1	A	1500	0.5	0.5	100	1.49	0.05	32.6 1	2	7.5	20	70	37	0.01	0.21
12	c1gr37d10 0k045f0	1	A	1500	0.5	0.5	100	1.49	0.05	32.6 1	2	7.5	20	70	37	0.01	0.45
13	c2gr5d100 k021f0	1	B	1500	0.5	0.5	100	1.47	0.14	18.6 8	2	15	45	40	5	0.01	0.21

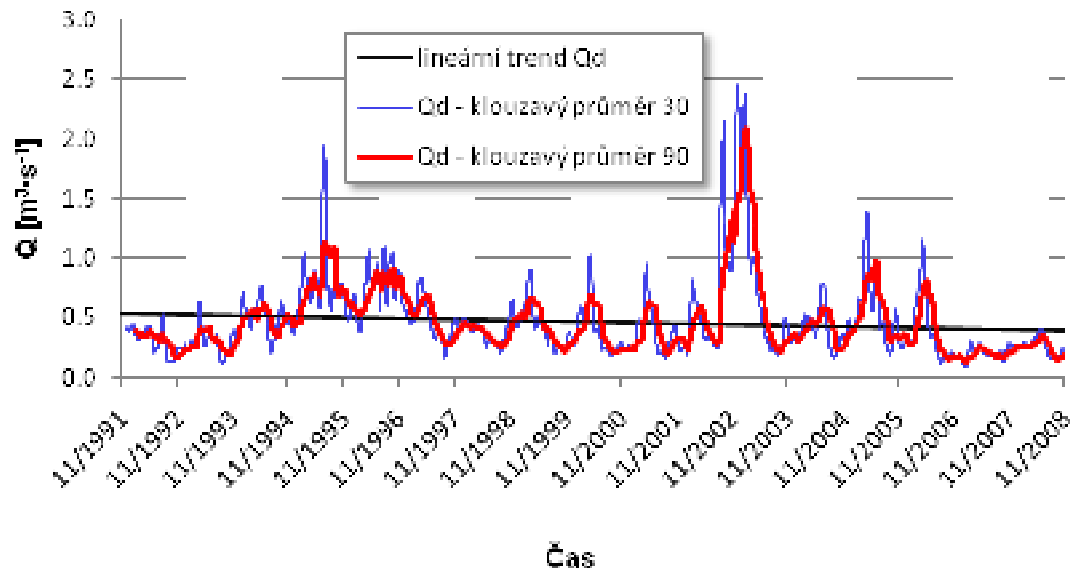
14	c2gr5d100 k045f0	1	B	1500	0.5	0.5	100	1.47	0.14	18.6 8	2	15	45	40	5	0.01	0.45
15	c2gr10d55 k021f0	1	B	1500	0.5	0.5	55	1.47	0.13	17.3 2	2	15	45	40	10	0.01	0.21
16	c2gr10d55 k045f0	1	B	1500	0.5	0.5	55	1.47	0.13	17.3 2	2	15	45	40	10	0.01	0.45
17	c2gr10d10 0k021f0	1	B	1500	0.5	0.5	100	1.47	0.13	17.3 2	2	15	45	40	10	0.01	0.21
18	c2gr10d10 0k045f0	1	B	1500	0.5	0.5	100	1.47	0.13	17.3 2	2	15	45	40	10	0.01	0.45
19	c2gr37d50 k030f3	1	B	500	0.5	0.5	50	1.47	0.09	10.7 2	2	15	45	40	37	0.01	0.3
20	c2gr37d55 k021f0	1	B	1500	0.5	0.5	55	1.47	0.09	10.7 2	2	15	45	40	37	0.01	0.21
21	c2gr37d55 k045f0	1	B	1500	0.5	0.5	55	1.47	0.09	10.7 2	2	15	45	40	37	0.01	0.45
22	c2gr37d70 k030f2	1	B	500	0.5	0.5	70	1.47	0.09	10.7 2	2	15	45	40	37	0.01	0.3
23	c2gr37d10 0k021f0	1	B	1500	0.5	0.5	100	1.47	0.09	10.7 2	2	15	45	40	37	0.01	0.21
24	c2gr37d10 0k045f0	1	B	1500	0.5	0.5	100	1.47	0.09	10.7 2	2	15	45	40	37	0.01	0.45
25	c3gr5d100 k021f0	1	B	1500	0.5	0.5	100	1.41	0.17	9.36	2	20	65	20	5	0.01	0.21
26	c3gr5d100 k045f0	1	B	1500	0.5	0.5	100	1.41	0.17	9.36	2	20	65	20	5	0.01	0.45
27	c3gr10d55 k021f0	1	B	1500	0.5	0.5	55	1.41	0.16	8.68	2	20	65	20	10	0.01	0.21
28	c3gr10d55 k045f0	1	B	1500	0.5	0.5	55	1.41	0.16	8.68	2	20	65	20	10	0.01	0.45
29	c3gr10d10 0k021f0	1	B	1500	0.5	0.5	100	1.41	0.16	8.68	2	20	65	20	10	0.01	0.21

30	c3gr10d10 0k045f0	1	B	1500	0.5	0.5	100	1.41	0.16	8.68	2	20	65	20	10	0.01	0.45
31	c3gr37d50 k030f3	1	B	500	0.5	0.5	50	1.41	0.11	5.37	2	20	65	20	37	0.01	0.3
32	c3gr37d55 k021f0	1	B	1500	0.5	0.5	55	1.41	0.11	5.37	2	20	65	20	37	0.01	0.21
33	c3gr37d55 k045f0	1	B	1500	0.5	0.5	55	1.41	0.11	5.37	2	20	65	20	37	0.01	0.45
34	c3gr37d70 k030f2	1	B	500	0.5	0.5	70	1.41	0.11	5.37	2	20	65	20	37	0.01	0.3
35	c3gr37d10 0k021f0	1	B	1500	0.5	0.5	100	1.41	0.11	5.37	2	20	65	20	37	0.01	0.21
36	c3gr37d10 0k045f0	1	B	1500	0.5	0.5	100	1.41	0.11	5.37	2	20	65	20	37	0.01	0.45
37	c4gr37d50 k030f3	1	C	500	0.5	0.5	50	1.36	0.11	3.02	2	30	60	12. 5	37	0.01	0.3
38	c4gr37d70 k030f2	1	C	500	0.5	0.5	70	1.36	0.11	3.02	2	30	60	12. 5	37	0.01	0.3
OBJE CTID	SNAM	NLAY ERS	HYD GRP	SOL_ ZMX	ANION _EXCL	SOL_ CRK	SOL_ Z1	SOL_ BD1	SOL_ AWC1	SOL_ K1	SOL_ CBN1	CL AY 1	SIL T1	SA ND 1	RO CK1	SOL_ ALB1	USL E_K1

PŘÍLOHA B – GRAFY

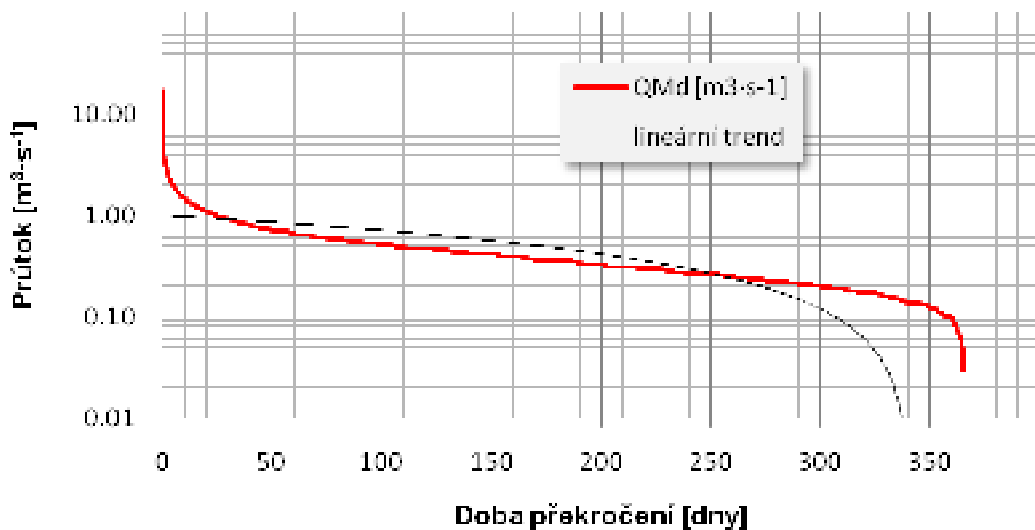
Gr. 12 Dlouhodobý průběh hydrografu povodí Rakovnického potoka

Zdroj:



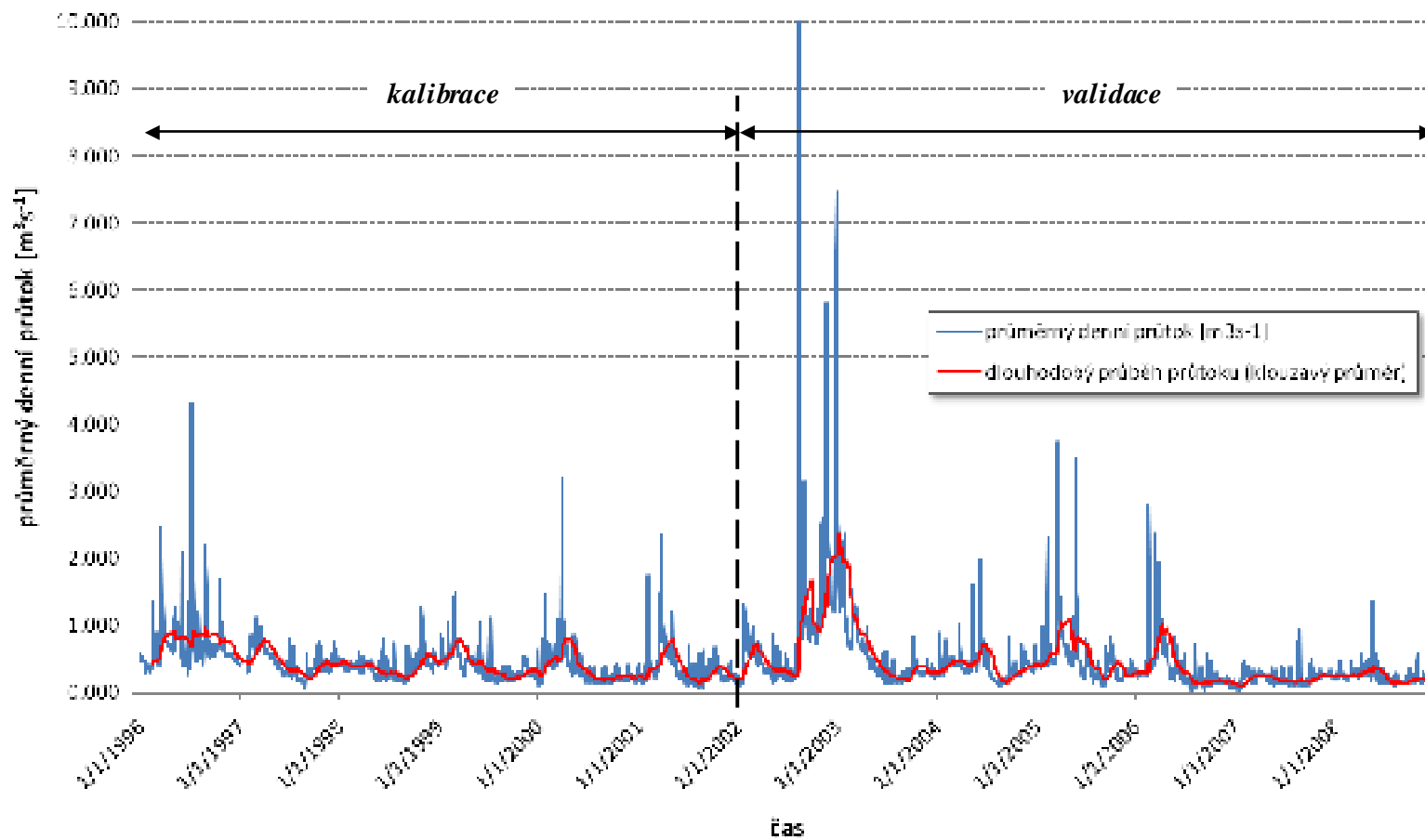
Gr. 13 Čára překročení průměrných denních průtoků (období 1991 – 2008)

Zdroj:



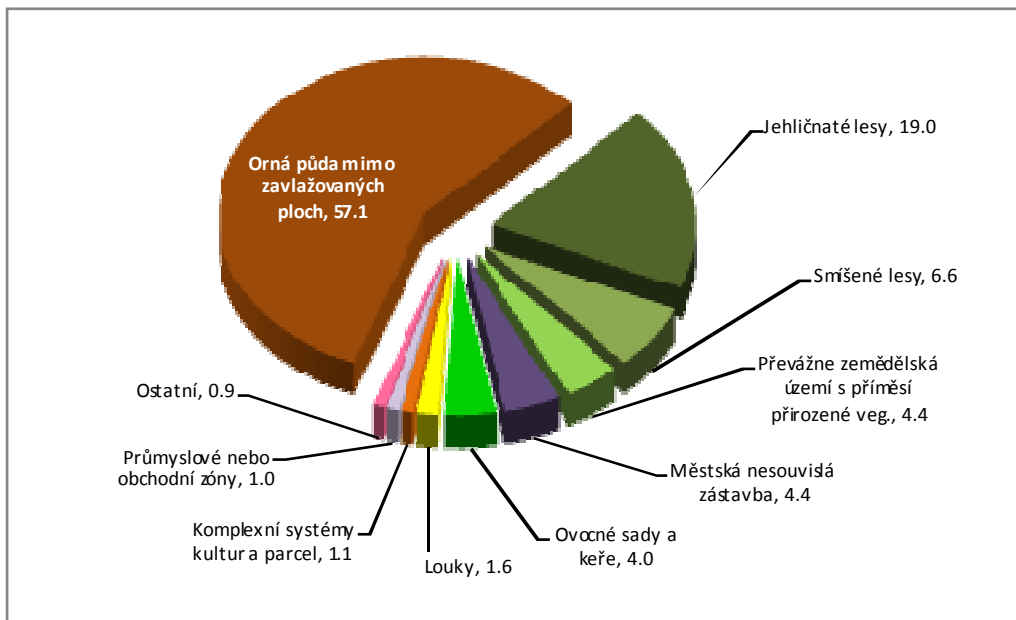
Obr. 21

Zdroj:

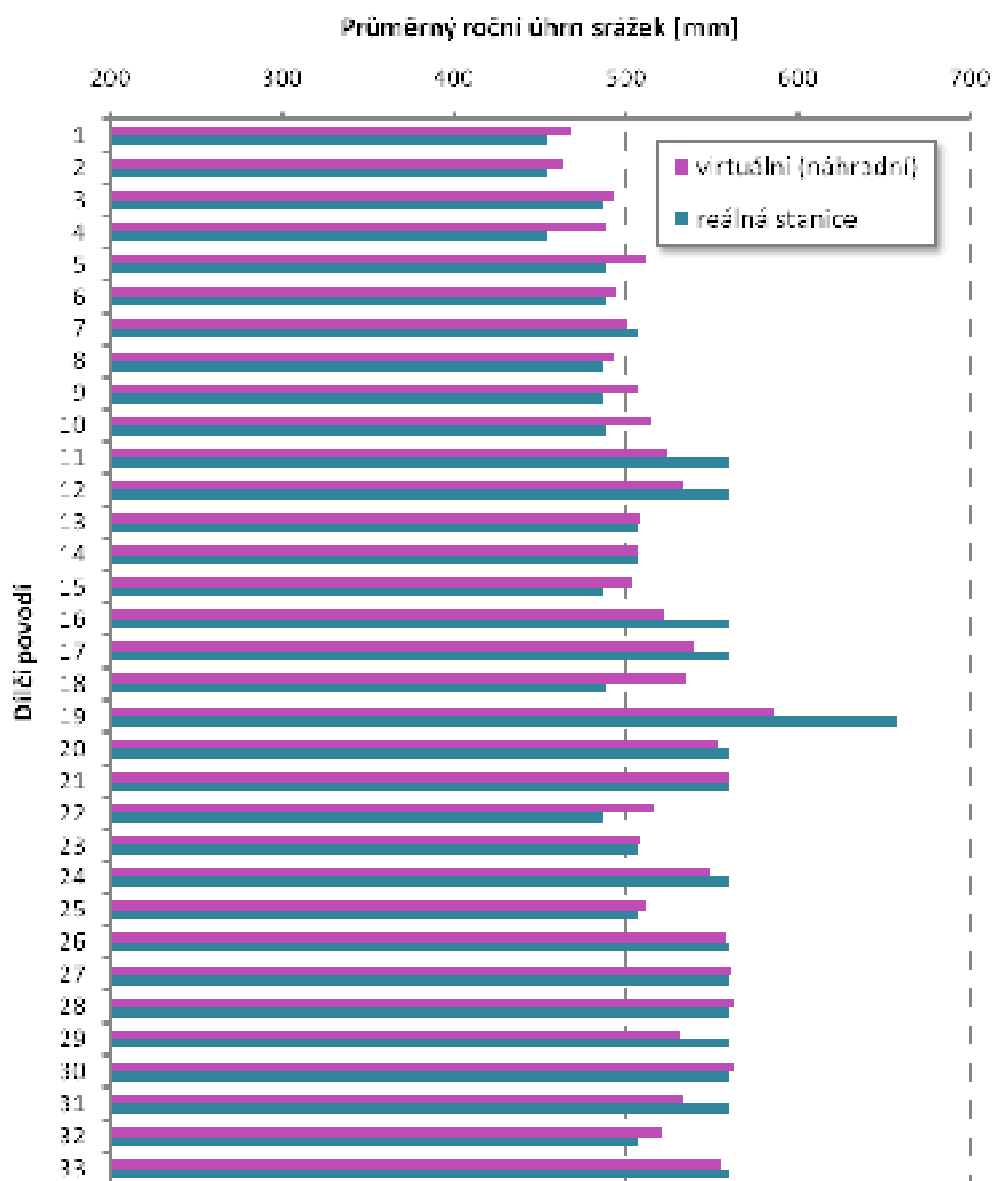


Gr. 14 Procentní zastoupení jednotlivých tříd CLC 2000 v zájmovém území

Zdroj:

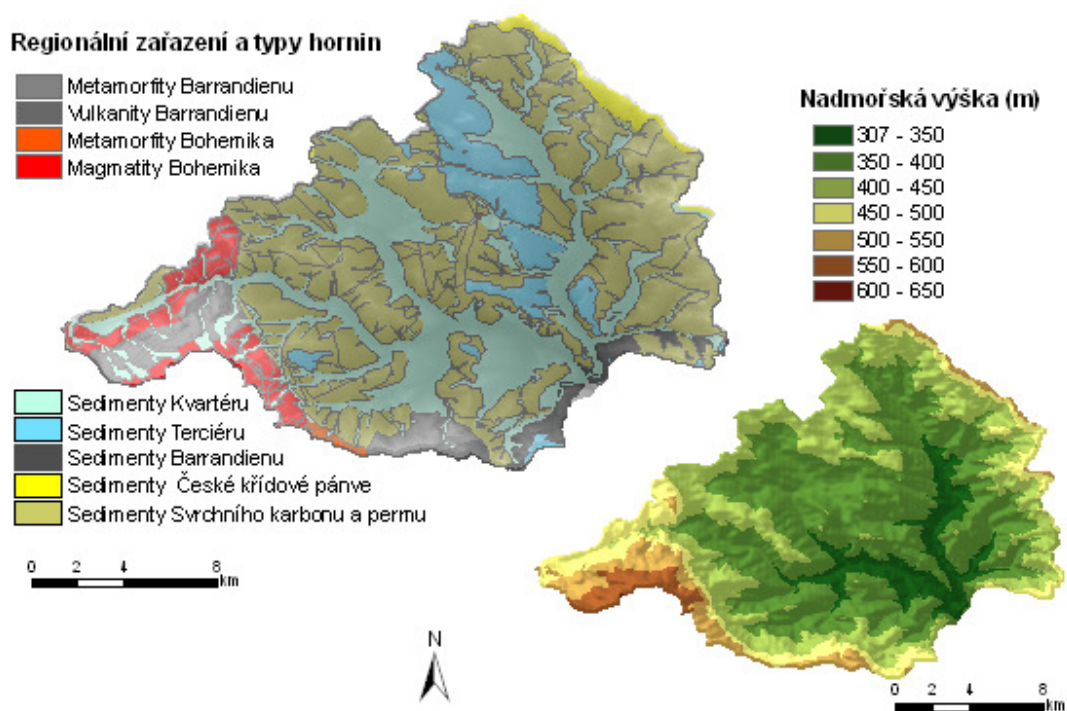


Gr. 15 Absolutní rozdíl průměrného ročního úhrnu srážek na dílčích povodích při použití náhradních (virtuálních) srážkoměrných stanic



PŘÍLOHA C – OBRÁZKY

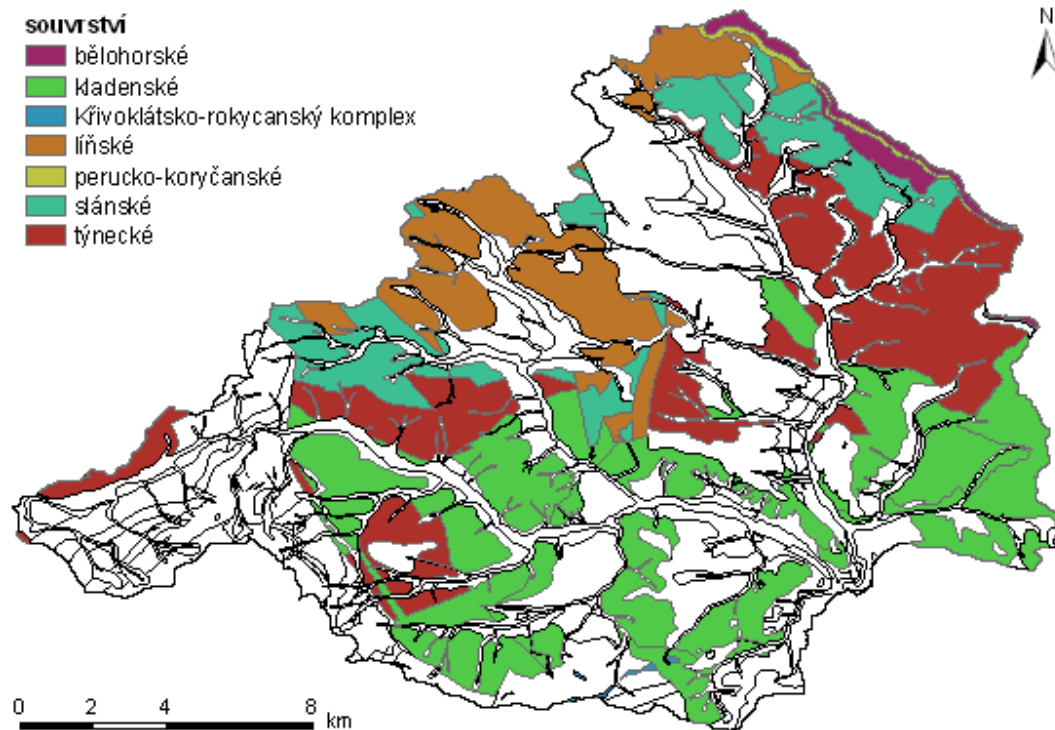
Obr. 22 Členění území z hlediska regionální geografie a nadmořské výšky MOŽNÁ DO PŘÍL



Zdroj: ČGÚ, VUV T.G.M.

Obr. 23 Rozložení jednotlivých souvrstí permokarbonské pánve na území povodí Rakovnického potoka

zdroj:



Obr. 24
(Tomášek, 2000)



Ap – červenošedá jílovitohlinitá zemina
hrudkovité struktury, ulehlá

Bv – naředle červená jílovitohlinitá zemina
hrubě polyedrické struktury, tuhá

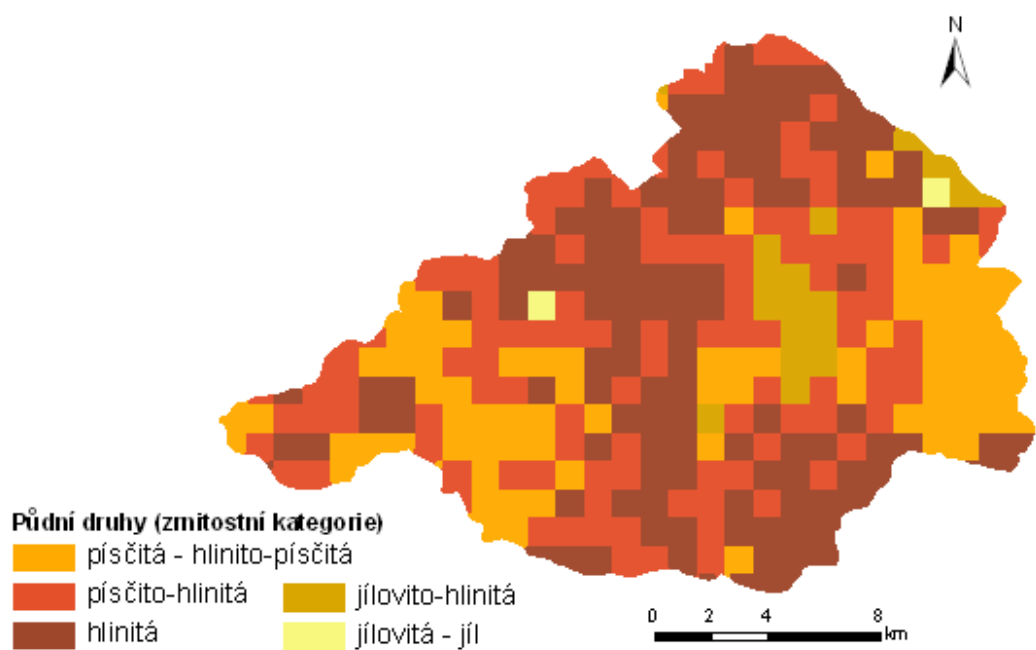
B/C – naředle červená (světlejší než předešlá)
jílovitohlinitá zemina s náznaky
prizmatické struktury, tuhá; ojedinělý
zvětralý úlomek horniny

C – měkký rozpad tence odlučné horniny

Obr. 25
Zdroj:

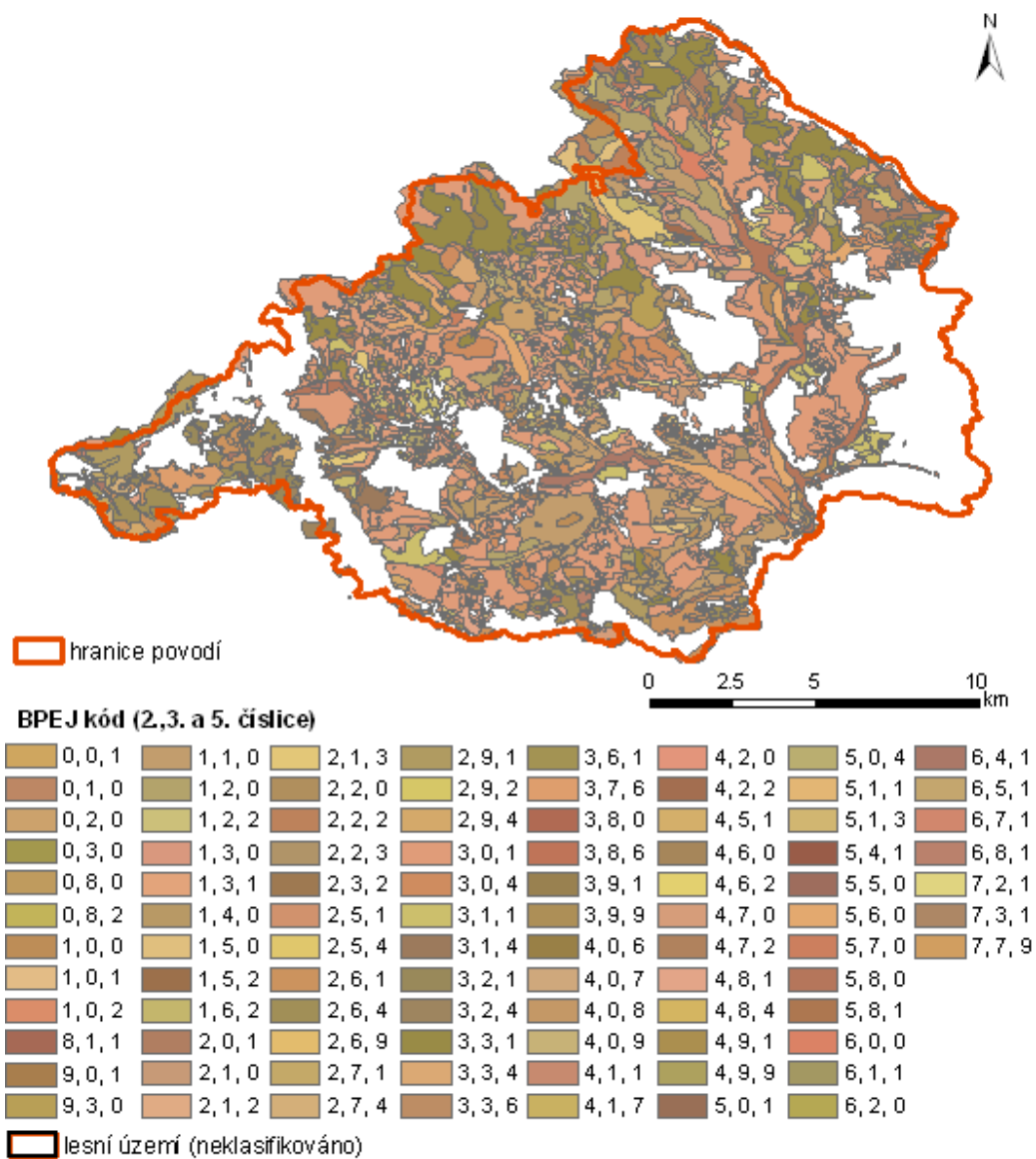


Obr. 26
Zdroj: VUV T.G.M.

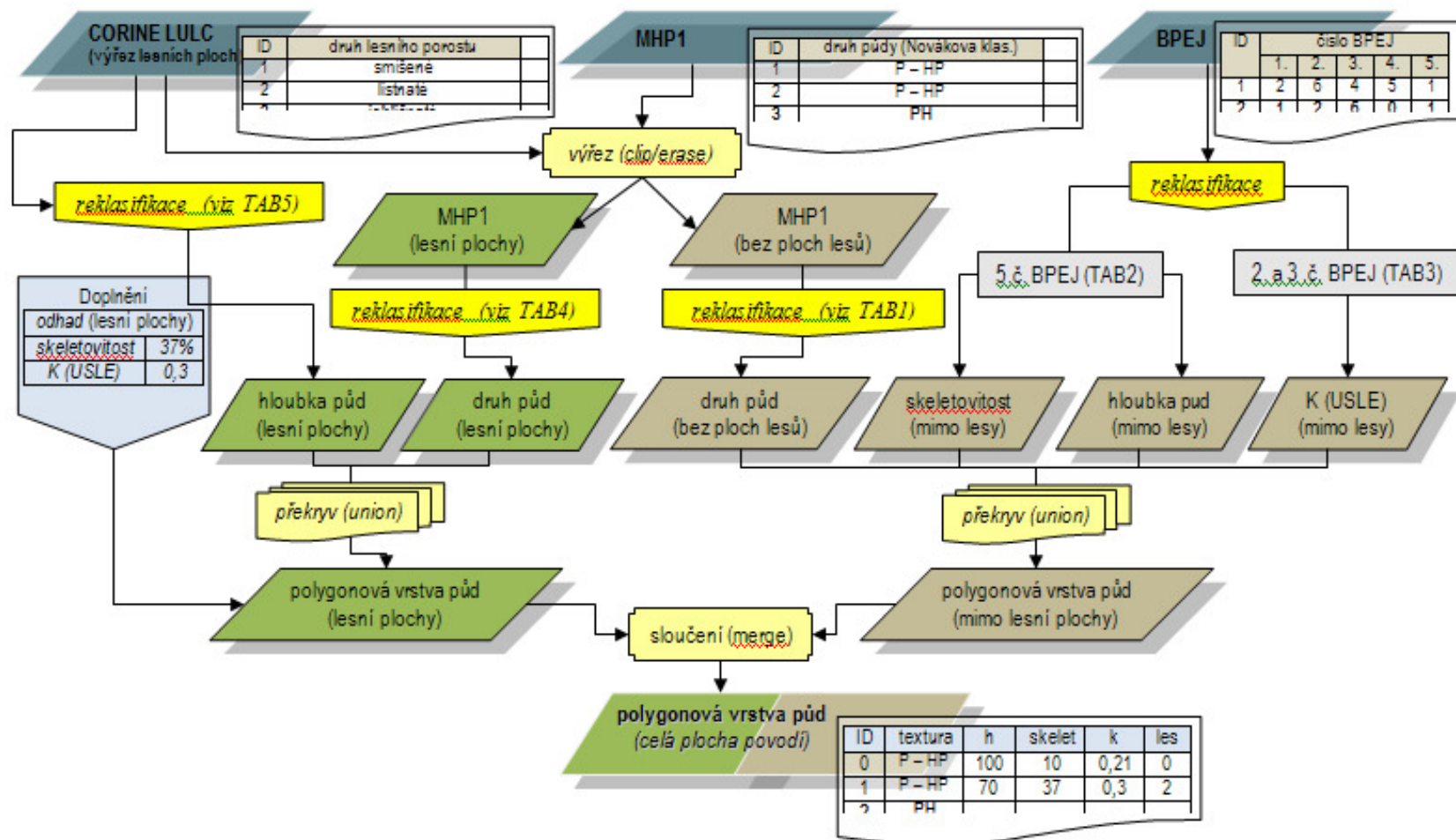


Zdroj: VUV T.G.M.

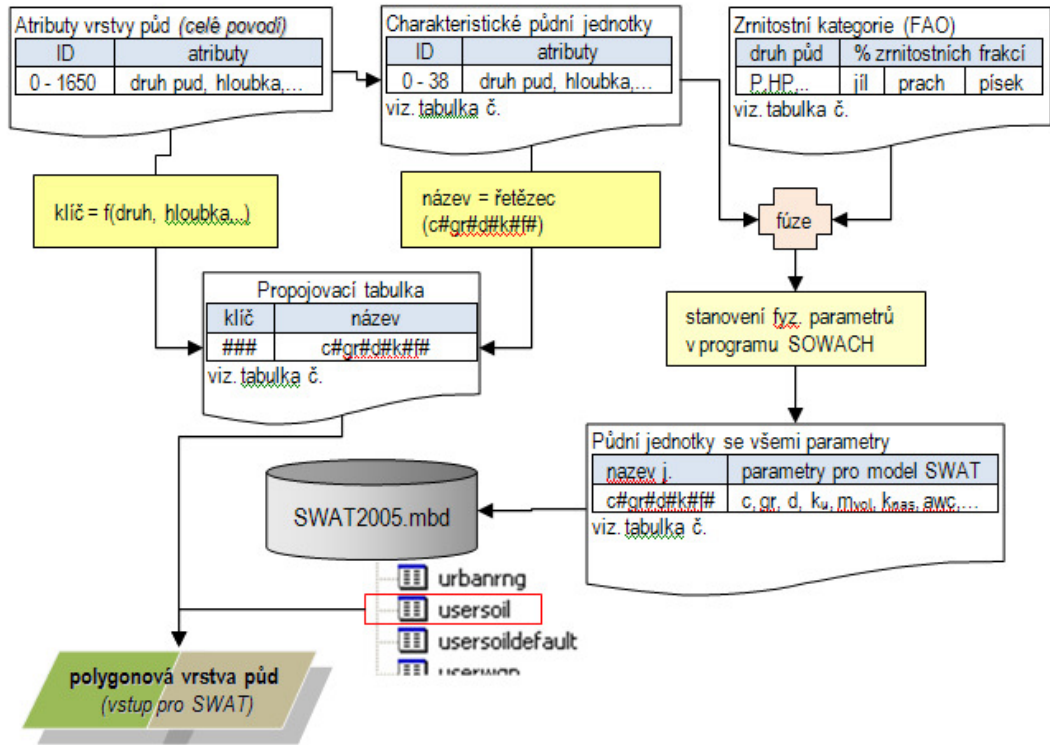
Obr. 27
Zdroj:



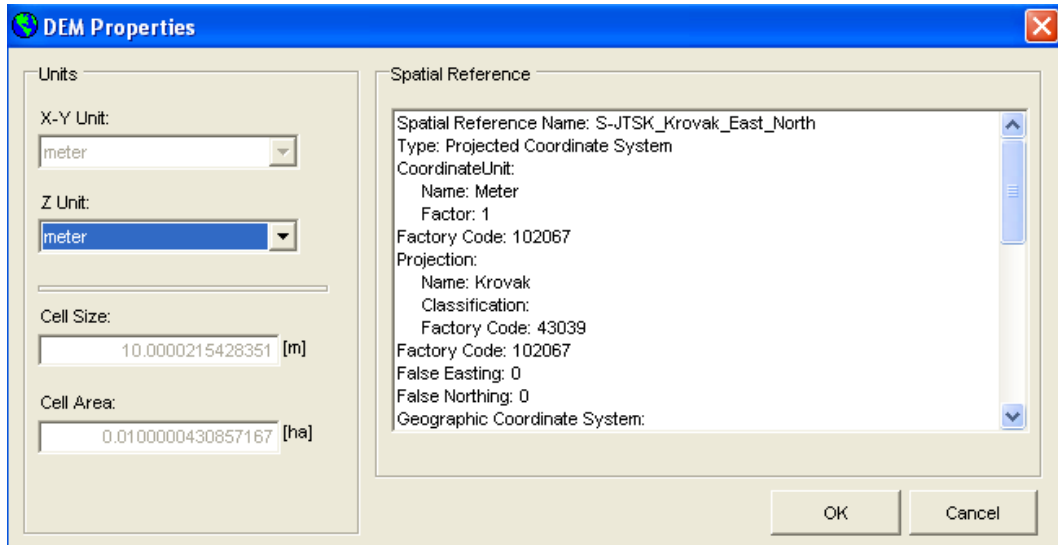
Obr. 28



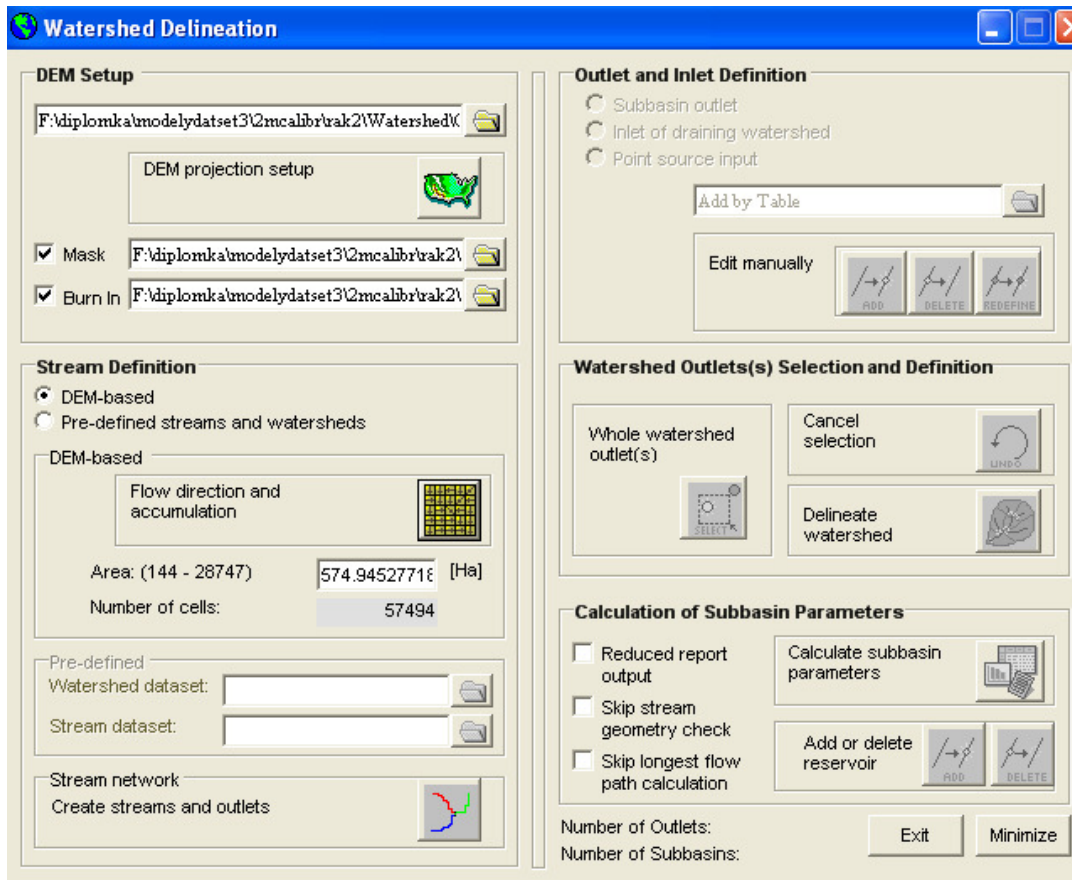
Obr. 29



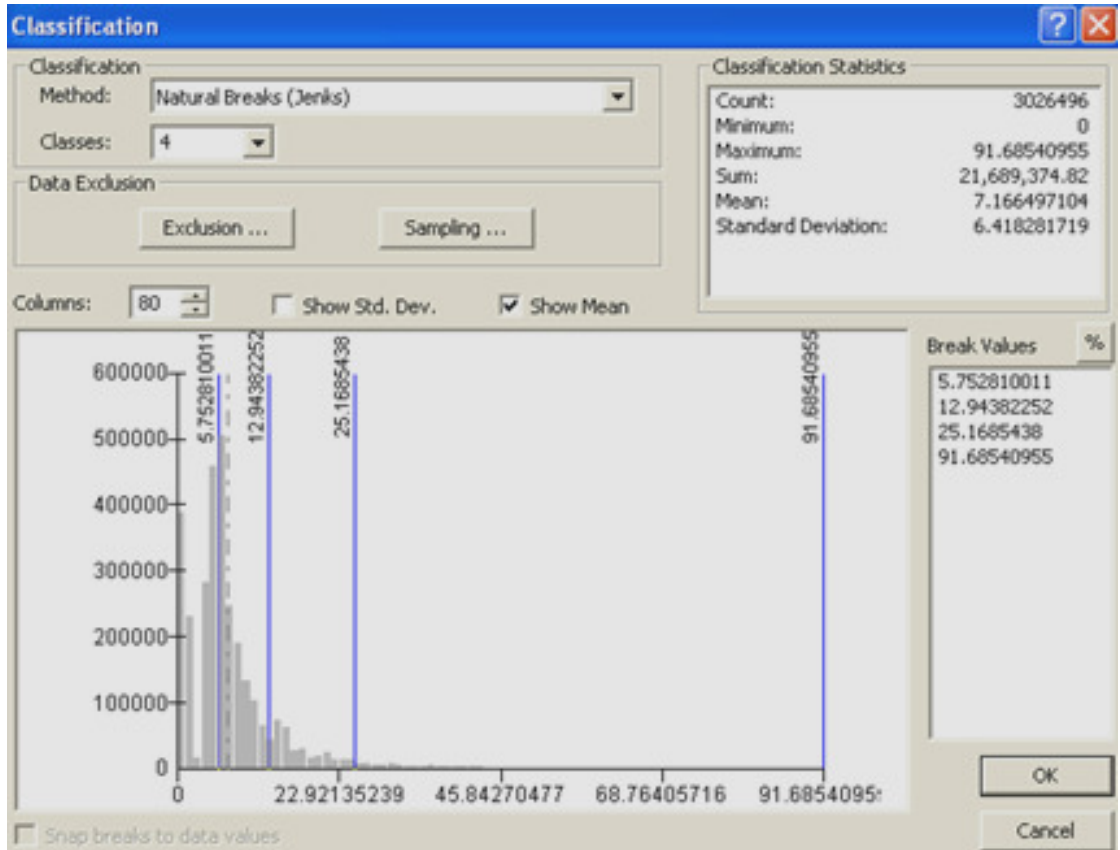
Obr. 30



Obr. 31



Obr. 32



Obr. 33

