

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ**

**KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A  
ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2010**

**Bc. Štěpán VIZINA**

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**  
**FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ**

Studijní obor: **KRAJINNÉ INŽENÝRSTVÍ**



**MODELOVÁNÍ MAXIMÁLNÍCH PRŮTOKŮ  
V POVODÍ RAKOVNICKÉHO POTOKA  
POMOCÍ HYDROLOGICKÉHO  
PROGRAMU HEC-HMS**

**Diplomová práce**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Pavlásek, Ph. D

Diplomant:

Bc. Štěpán VIZINA

Praha, duben 2010



Česká zemědělská univerzita v Praze

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Fakulta životního prostředí

Školní rok: 2009/2010

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro: Štěpána Vizinu

obor: Krajinné inženýrství

Název tématu: Modelování maximálních průtoků v povodí Rakovnického potoka pomocí hydrologického programu HEC-HMS

Název tématu v anglickém jazyce: Modeling of maximum discharges in Rakovnický potok watershed with hydrological program HEC-HMS

### Zásady pro vypracování:

1. zpracování rešerše na téma možnosti výpočtu maximálních průtoků na malých povodích,
2. stanovení geomorfologických charakteristik dílčích povodí Rakovnického potoka pomocí modelu Geo-HMS,
3. odvození vstupních parametrů povodí do modelu HEC-HMS z dostupných podkladů,
4. výpočet maximálních průtoků v zadaných uzavírajících profilech pvdí.



Rozsah grafických prací: bude upřesněno při zpracování práce

Rozsah průvodní zprávy: cca 40 stran

Seznam odborné literatury:

US ACE HEC, 2000: Hydrologic modeling system HEC-HMS, Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.

Kulasová, B., Šercl, P., Boháč, M., 2004: Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní. Závěrečná zpráva VaV QD1368, ČHMÚ, s. 128.

Hrádek, F., Kuřík, P., 2002. Hydrologie. Skriptum FLE, ČZU Praha, ISBN 80-213-0950-4, s. 271.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jirka Pavlásek, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: červen 2009

Termín odevzdání diplomové práce: 30. dubna 2010

Vedoucí katedry



Děkan

V Praze dne .....

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřího Pavláška, Ph.D. (další informace mi poskytli zástupci VÚV T.G.M., v.v.i. Ing. Adam Vizina, Ing. Martin Hanel), a že jsem uvedl v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

Tím bych chtěl všem zúčastněným rovněž poděkovat.

V Praze dne 30.4.2010

---

vlastnoruční podpis autora



## MODELOVÁNÍ MAXIMÁLNÍCH PRŮTOKŮ V POVODÍ RAKOVNICKÉHO POTOKA POMOCÍ HYDROLOGICKÉHO PROGRAMU HEC-HMS

### ABSTRAKT

---

Tato práce se zabývá modelováním přímého odtoku z povodí Rakovnického potoka a určením maximálního kulminačního průtoku v dílčím povodí Kolečovického potoka. Jako zástupce prostorově založeného srážko-odtokového modelu byl zvolen semi-distribovaný model v prostředí HEC-HMS. Jeho geometrická složka a hydrografické parametry jsou odvozovány analýzami digitálního výškového modelu terénu (DMT) prostřednictvím nástrojů HEC-GeoHMS využívajícím extenzi ArcHydro tools v prostředí ArcGIS od společnosti ESRI.

Jsou odvozeny průběhy teoretických povodňových vln s určitou  $N$  - letostí, zpravidla 100 - letou, popsána jejich závislost na vstupních srážkách v podobě návrhových hyetogramů a vypočítána transformace povodňové vlny navrhovanou vodní nádrží v povodí Kolečovického potoka.

#### **Klíčová slova:**

srážko-odtokový model, návrhový hyetogram, přímý odtok, kulminační průtok, povodňová vlna

## MODELING OF MAXIMUM DISCHARGES IN RAKOVNICKÝ POTOK WATERSHED WITH HYDROLOGICAL PROGRAM HEC-HMS

### ABSTRACT

---

This work deals with the modeling of direct runoff from the Rakovnický potok watershed and determining the maximum culmination flow in the subbasin of Kolečovický potok. A semi-distributed space-based rainfall-runoff model in a HEC-HMS was used. Its geometric component and hydrographic parameters are derived from analyzes of digital elevation terrain model (DEM) in ArcGIS by ESRI through tools HEC-GeoHMS using extension ArcHYDRO.

Theoretical flood wave curves are derived with a specified  $N$  – years period, usually 100 – years. Their dependence on precipitation input is described in the form of design hyetographs. Transformation of flood wave by proposed water reservoir in the catchment of Kolečovický potok is calculated, too.

#### **Key words:**

rainfall-runoff model, design hyetograph, direct runoff, flow culmination, flood wave



## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>LITERÁRNÍ REŠERŠE</b> .....	<b>11</b>
3.1	HYDROLOGICKÝ MODEL.....	11
3.1.1	<i>Zařazení modelu HEC-1 do hierarchické struktury matematických modelů</i> .....	11
3.1.2	<i>Časo-prostorová diskretizace modelu HEC-1</i> .....	12
3.2	ODTOK Z POVODÍ .....	13
3.2.1	<i>Maximální průtok</i> .....	14
3.3	POPIS POUŽITÝCH METOD SRÁŽKO-ODTOKOVÉHO MODELOVÁNÍ.....	15
3.3.1	<i>Stanovení přímého odtoku - metoda CN křivek</i> .....	15
3.3.2	<i>Transformace přímého odtoku – metoda jednotkového hydrogramu</i> ....	18
3.3.3	<i>Příčinné srážky v podobě návrhového hyetogramu</i> .....	20
3.4	ZPRACOVÁNÍ HYDROLOGICKY KOREKTNÍHO DMT .....	24
3.4.1	<i>Předzpracování DMT</i> .....	24
3.4.2	<i>Úprava základního odtokového schématu</i> .....	24
<b>4</b>	<b>VSTUPNÍ ANALÝZA ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY</b> .....	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>CHARAKTERISTIKA STUDIJNÍHO ÚZEMÍ</b> .....	<b>26</b>
5.1	FYZICKO – GEOGRAFICKÝ POPIS POVODÍ.....	26
5.2	GEOLOGICKÝ A PEDOLOGICKÝ POPIS ÚZEMÍ.....	30
5.2.1	<i>Geologické poměry</i> .....	30
5.2.2	<i>Hydrogeologické poměry</i> .....	31
5.2.3	<i>Pedologické poměry</i> .....	32
5.3	KLIMATICKÉ POMĚRY .....	34
5.3.1	<i>Atmosférické srážky</i> .....	34
5.3.2	<i>Teploty vzduchu</i> .....	38
5.4	HYDROLOGICKÉ POMĚRY .....	39
<b>6</b>	<b>METODIKA</b> .....	<b>41</b>
6.1	PŘEDZPRACOVÁNÍ DMT .....	41
6.1.1	<i>Základní předzpracování terénu</i> .....	41
6.2	ÚPRAVA ZÁKLADNÍHO ODTOKOVÉHO SCHÉMATU .....	43



6.2.1	Vymezení současného známého stavu systému vodotečí.....	43
6.2.2	Vymezení proudění přes vodní plochy .....	46
6.2.3	Definování známých rozvodnic .....	46
6.2.4	Vymezení rozdělení toků.....	48
6.2.5	Porovnání a stanovení vhodného HydroDEM.....	49
6.3	PŘÍPRAVA SCHÉMATU POVODÍ A VYTVOŘENÍ MODELU PRO HEC-HMS .....	49
6.3.1	Revize jednotlivých subpovodí .....	50
6.3.2	Výpočet charakteristik subpovodí a segmentů vodních toků.....	51
6.3.3	Odhad hydrologických parametrů .....	52
6.3.4	Příprava dat pro export do HEC-HMS.....	56
6.4	VÝPOČET MAXIMÁLNÍCH PRŮTOKŮ V HEC-HMS.....	57
6.4.1	Odhad a zadání hydrologických parametrů komponentů povodí .....	58
6.4.2	Vstup příčinných srážek do programu HEC-HMS.....	60
6.4.3	Nastavení ovládacích specifikací.....	61
6.5	TRANSFORMACE POVODŇOVÉ VLNY NAVRHOVANOU VODNÍ NÁDRŽÍ.....	61
<b>7</b>	<b>VÝSLEDKY PRÁCE.....</b>	<b>64</b>
7.1	MAXIMÁLNÍ PRŮTOKY STANOVENÝMI VODNÍMI NÁDRŽEMI .....	64
7.2	TRANSFORMACE POVODŇOVÉ VLNY NAVRHOVANOU VODNÍ NÁDRŽÍ.....	66
7.3	MAXIMÁLNÍ PRŮTOKY UZAVÍRACÍM PROFILEM CELÉHO SIMULOVANÉHO POVODÍ.....	67
<b>8</b>	<b>DISKUZE.....</b>	<b>69</b>
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>71</b>
<b>10</b>	<b>PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>73</b>
<b>11</b>	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>75</b>





# 1 Úvod

V České republice je v poslední době kladen stále větší důraz na hledání efektivních možností, jak eliminovat či omezit dopady klimatické změny. Ta je znatelná při zkoumání výsledků pozorování meteorologických veličin (zejména teploty vzduchu a srážkových úhrnů) na území České republiky v několika posledních desetiletích.

Zpracovávány jsou různé studie, které kvantifikují možné změny v hydrologickém režimu povrchových a podzemních vod pro časové horizonty vzdálené řádově desítky let, které využívají zejména klimatické scénáře, tj. výstupy klimatických modelů pro variantně změněné podmínky.

Vzestup teploty vzduchu, který se již projevil na celém území ČR, byl v procesu hydrologické bilance na většině území doprovázen mírným zvětšením srážek, které postačily dotovat zvýšený výpar, a odtok z povodí se nezměňoval. Podle dat, která jsou k dispozici na webových stránkách ČHMÚ, však na většině území Středočeského kraje zvýšení srážek nenastalo. V této oblasti dochází také ke snížení extrémních srážkových úhrnů, jak ukazuje studie (Kyselý et al., 2008). Jedná se o území, charakterizované nejmenšími dlouhodobými úhrny srážek v Čechách. Výsledky z několika vodoměrných pozorování na povodích v této oblasti pak ukazují výrazně klesající trend průtoků až do hodnot blízkých nule.

Jedním z takových povodí je i povodí Rakovnického potoka. Na nepříznivý stav hydrologické bilance, která se v povodí Rakovnického potoka projevuje nejen v odtokových poměrech, ale i nedosahováním optimálních výnosů zemědělských plodin v důsledku sucha, upozornila představitel MZe a následně i VÚV T.G.M., v.v.i. Zemědělská agentura Rakovník.

Jako reakce na uvedené skutečnosti bylo pro povodí Rakovnického potoka (jako pilotního případu) navrženo provést výzkum, který bude spočívat v analýze vývoje klimatických a hydrologických poměrů v rozsahu celého povodí, v odhadu jejich vývoje pro nejbližší desetiletí a v návrhu opatření pro zlepšení nepříznivé vodní bilance.

Pro tyto účely bylo doporučeno zpracovat hydrologický model schopný predikce maximálních odtokových odezev. Na základě výpočtů maximálních průtoků v uzavírajících profilech povodí by mělo být možné kvalifikovat užitečnost navrhovaných opatření.

Diplomová práce je tedy realizována souběžně s tímto výzkumem, s pilotním projektem QH01247 „Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulací schopnosti v povodí Rakovnického potoka“ (Kašpárek, 2010), v průběhu druhého roku jeho plnění a navazuje na dosavadní poznatky zjištěné VÚV T.G.M., v.v.i. a ČZU v Praze. Měla by vést k vytvoření hydrologického modelu plně aplikovatelného pro účely pozdějšího využití VÚV T.G.M., v.v.i.



Osobní motivací k realizaci diplomové práce týkající se stanovení maximálních průtoků v povodí Rakovnického potoka byla zejména snaha aplikovat poznatky získané při zpracování bakalářské práce na téma „Metody v inženýrské hydrologii“ (konkrétně se jednalo o metody stanovení návrhových dešťů) a touha navázat na znalosti v oboru návrhové hydrologie.

Pro účely stanovení maximálních návrhových průtoků budou převzata data a obecné charakteristiky zájmového území od VÚV T.G.M. a s pomocí programu ArcGIS 9.3 s licencí ArcInfo od společnosti ESRI s využitím extenzí HEC-geoHMS a ArcHydro 9 a programu HEC – HMS 3.4 od US Army Corps of Engineers bude provedeno modelování povodí Rakovnického potoka, stanovení maximálních návrhových průtoků a teoretických povodňových vln na základě stanovených návrhových hyetogramů.

## 2 Cíle práce

Cílem diplomové práce je kvalitativní a kvantitativní analýza maximální odtokové odezvy z povodí Rakovnického potoka vyvolané definovanou teoretickou srážkovou událostí.

Výsledkem by mělo být vytvoření hydrologického modelu schopného s pomocí programu HEC-HMS predikce maximálního průtoku v rámci povodí Rakovnického potoka. Tento model by měl po kalibraci skutečnými naměřenými hodnotami umožňovat výpočet maximálních průtoků pro pozorovaná povodí, ale i odvození teoretických povodňových vln na nepozorovaných povodích.

Časové řady těchto průtoků, resp. hydrogramy, by měly být podkladem k vyhodnocení hydrologických vlastností příslušných povodí, sestavování vodní bilance a budou sloužit jako pozorovaná výstupní veličina hydrologického modelu.

Maximální průtok je potom definován jako nejvyšší průtok za dané období, který odpovídá vrcholu (kulminaci) průtokové vlny. Zjišťování a analýza maximálních průtoků jsou důležitou součástí vyhodnocení srážko-odtokových událostí, zvláště povodní a mají zásadní význam především při navrhování staveb vodních děl, která jsou dimenzována na bezpečné převedení návrhového průtoku s určitou N - letostí. V ČR se zajišťuje ochrana před povodněmi u sídel nejčastěji na 100 - letou vodu, u přehrad až na 10 000 - letou vodu. K záplavovým územím stanoveným pro průtoky s různou dobou opakování se přihlíží také při činnostech jako územní plánování nebo pojišťování nemovitostí.

V ideálním případě by mohl mít výsledný model multifunkční využití, v první řadě je však preferována aplikace modelu k určení maximálních průtoků pro dimenzování objektů vodních nádrží, které jsou navrhovány za účelem akumulace a zmírnění povrchového odtoku z povodí Rakovnického potoka. Dále by měl model posloužit pro predikci maximálních průtoků v uzávěrových profilech dílčích subpovodí.



### 3 Literární rešerše

Literární rešerše diplomové práce je zaměřena na popis aplikovaného srážko-odtokového modelu, včetně jeho zařazení do hierarchie matematických modelů a popisu řady potřebných parametrů k získání požadovaných výstupních informací. Dále obsahuje základní teoretické podklady k modelování přímého odtoku (tzv. Direct – runoff) z povodí, kterého bylo pro stanovení všech vytčených cílů využito.

#### 3.1 *Hydrologický model*

Hydrologický model ve své obecné formě představuje matematický model hydrologického procesu. Analyzuje zejména kvantitativní vztah mezi vstupními a výstupními stavovými veličinami. Z hlediska systémové analýzy se jedná o vstupně/výstupní transformaci příčinné srážky do výsledného odtoku. (Daňhelka et al., 2003)

Pro modelování maximálních průtoků v povodí Rakovnického potoka byl vybrán srážko-odtokový model HEC-1. Ten byl vyvinut ženíjním sborem armády USA, střediskem pro hydrologický výzkum (Hydrologic Engineering Center, 1998). Program řeší v několika variantách výpočet odtokové ztráty (pro DP bude využita SCS metoda CN křivek – viz kapitola 3.3.1) a pro transformaci odtoku z povodí využívá metodu jednotkového hydrogramu (pro DP Clarkův jednotkový hydrogram – viz kapitola 3.3.2). Vstup srážek může být řešen také několika způsoby (viz kapitola 3.3.3).

Hlavní jeho předností je možnost sestavení řešeného povodí z menších celků, pro které se zadávají parametry. Tím je možné vyhovět i některým limitujícím podmínkám především prostorového charakteru, např. doporučená maximální velikost povodí, na kterém je aplikovaná metodika CN křivek – 10 km<sup>2</sup>.

V současné době je na internetu k dispozici freeware verze aplikace HEC-HMS 3.4 (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System), která zahrnuje model HEC-1, resp. je jeho novou verzí.

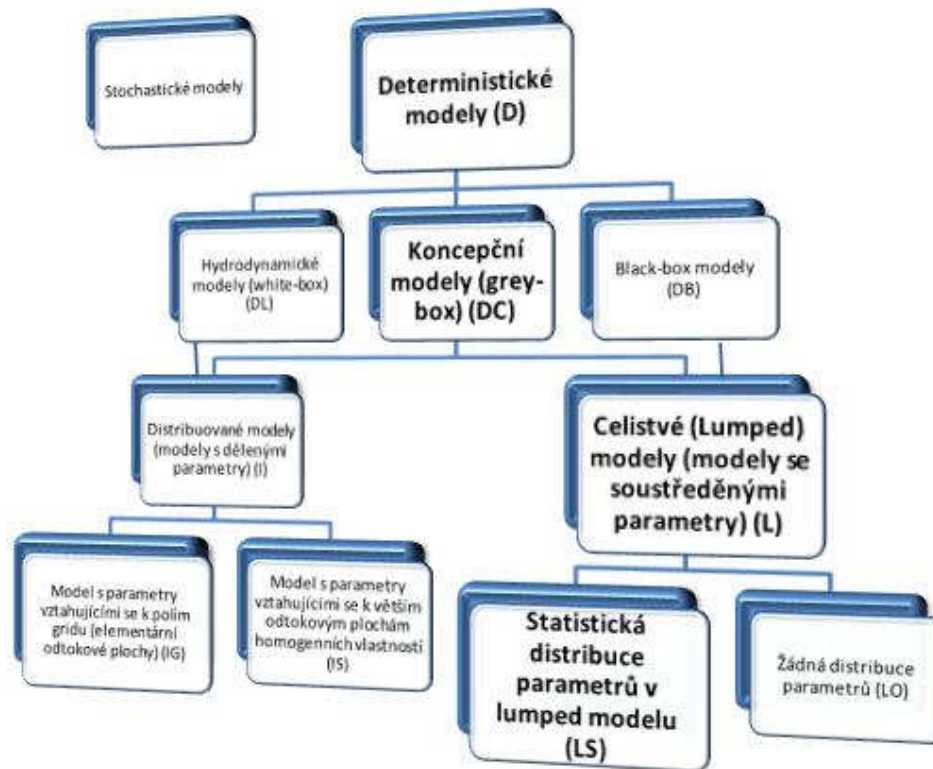
Hlavní výhodou je zejména významná podpora GIS (především nadstavbou HEC-GeoHMS) a dalších podpůrných programů (např. HEC-DSSVue).

##### 3.1.1 **Zařazení modelu HEC-1 do hierarchické struktury matematických modelů**

Z diagramu na **obrázku 1** je jasně patrné zařazení využívaného hydrologického modelu HEC-1 do struktury matematických modelů.

HEC-1 lze zařadit mezi konceptuální deterministické modely, odrážející základní zákonitosti ve zjednodušené (konceptní) formě, které obvykle připouští jistou míru empirických vztahů, nahrazujících složité vazby komplexního popisu chování hydrologického systém. Tento typ modelu bývá obecně v literatuře nazýván „gray-box“ model.

Model HEC-1 je jedním z typických představitelů modelů soustředěných parametrů, které jsou často (nikoliv nezbytně) vyjádřeny obyčejnými diferenciálními rovnicemi v rozměru 0D, doplněnými o empirické algebraické vztahy a jedinou nezávislou proměnnou tvoří čas. (Daňhelka et al., 2003)



**Obrázek 1** Zařazení hydrologického modelu HEC-1 do klasifikační hierarchie deterministických modelů (Daňhelka et al., 2003) (Becker et Serban, 1990)

### 3.1.2 Časo-prostorová diskretizace modelu HEC-1

Z hlediska časové diskretizace je model HEC-1 zařazen mezi modely epizodní, které slouží pro výpočty odtoků z jediné srážkové události (Daňhelka et al., 2003). Důležitý je odhad počátečních podmínek. Vychází se především z počátečního nasycení půdy. Ve většině výpočtů se jedná o výpočet s použitím srážky přívalové. V úvahu připadá i použití návrhového hyetogramu se stanovenou  $N$  - letostí.

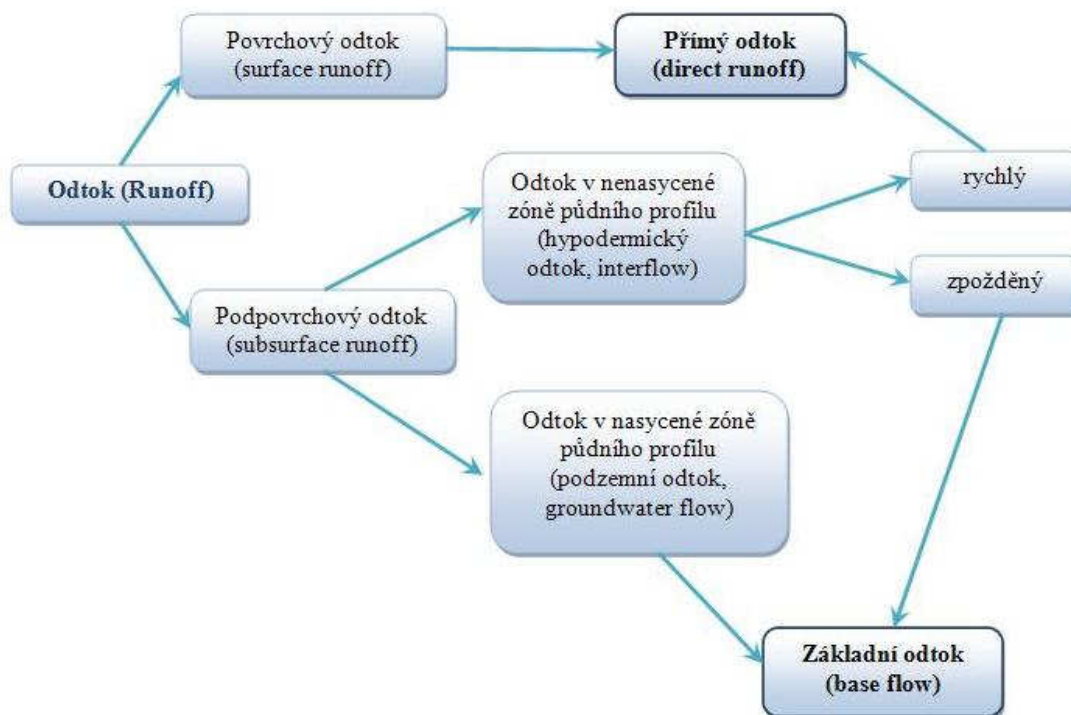
Volbu časového kroku určuje několik činitelů - např. frekvence přenosu dat, stabilita protipovodňové ochrany, erozních jevů a posouzení kvality a kvantity povrchových vod. Časový krok se v takových případech obvykle pohybuje v intervalu 1 hod až 1 den.

Z hlediska prostorové diskretizace je model HEC-1 možné zařadit na rozhraní mezi modely celistvé (Lumped modely) a modely semi-distribuované. Primárně byl model vyvíjen jako celistvý, někdy označován jako model soustředěných parametrů, využívající zjednodušeného přístupu ke geografické schematizaci povodí a předpokládá zjednodušenou prostorovou informaci homogenní z hlediska všech vlastností, charakterizovaných jediným reprezentativním bodem povodí. Výpočtová

struktura je ovšem oproti distribuovaným modelům velmi zjednodušená a podobné modely jsou snáze aplikovatelné. V současnosti však tvoří trend vývoje modelu HEC-1 posun k semi-distribuovanému modelu, jehož přístup spočívá v topografickém rozdělení povodí na menší celky na základě definovaných kritérií. Hlavním kritériem většinou je prostorová homogenita vlastností povodí a hydrologických parametrů. V poslední době je tento typ modelu stále častěji aplikován, protože představuje optimální různých deterministických modelů. Za jeho rozvojem slouží především rozmach geografických informačních systémů (GIS). Pro model HEC-1 tvoří významnou podporu semi-distribuované složky modelu nadstavba programu ArcGIS, HEC-GeoHMS.

### 3.2 Odtok z povodí

Odtok z povodí je hydrologický pojem vyjadřující objem vody, která odečte za určité časové období z povodí. Odtok je tvořen několika složkami, jejichž součet se označuje jako celkový odtok (**obrázek 2**).

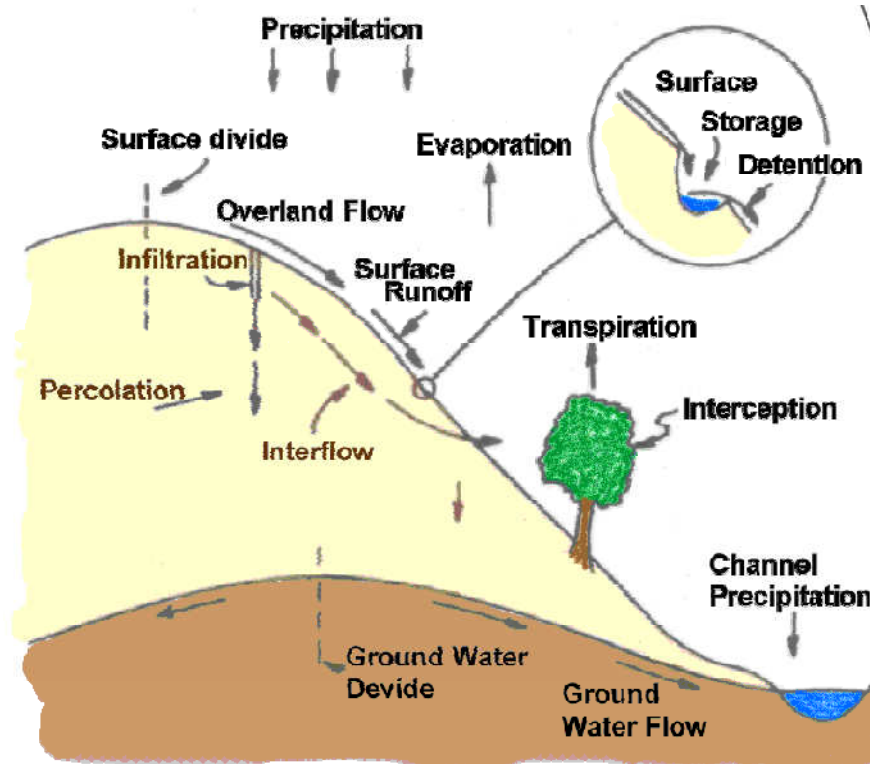


**Obrázek 2** Rozdělení odtoku na jednotlivé složky

Pro návrhovou činnost má zásadní význam především přímý odtok, aplikovatelný zejména pro řešení praktických vodohospodářských úloh. Tvoří jej veškerý povrchový odtok doplněný o rychlou část odtoku v nenasycené zóně půdního profilu (hypodermického odtoku) (Hrádek et Kuřík, 2002).

Při sestavení hydrogramu by měl být brán v úvahu i základní odtok, který je typický tím, že je zpožděný, zřetelný až po uplynutí určitého času (Johnson, 1999). Jedná se v podstatě o odtok z povodí při bezsrážkovém období, tzn. o odtok podzemních vod z povodí (Hrádek et Kuřík, 2002). Dle Šercla (2009) je základní odtok definován

jako ta část podpovrchového odtoku, která je důsledkem předchozích srážkových epizod a je funkcí předchozí nasycenosti povodí a současně je za základní odtok považován také opožděný podpovrchový odtok z příčných srážek posuzované srážkové události.



Obrázek 3 Schéma srážko-odtokového procesu (Johnson, 1999)

### 3.2.1 Maximální průtok

Hlavním požadovaným výstupem diplomové práce jsou hodnoty maximálních průtoků vymodelované v povodí Rakovnického potoka. Maximálním průtokem se pak rozumí největší (kulminační) průtok povodňové vlny v určeném období. Zpravidla půjde především o modelování 100 – letých průtoků, což jsou největší (kulminační) průtoky povodňové vlny, které jsou dosaženy nebo překročeny v dlouhodobém průměru jednou za 100 let. (Hrádek et Kuřík, 2002)

Průtoková (povodňová) vlna je fáze odtoku, vyznačující se přechodným zvětšením a následujícím poklesem průtoků, vyvolaná deští, táním sněhu nebo umělým zásahem. Znázorňuje se graficky jako hydrogram (závislost průtoků na čase) v určitém profilu toku. (Hrádek et Kuřík, 2002)

Pro účely diplomové práce bude modelován pouze maximální průtok vyvolaný návrhovou srážkou s danou  $N$  – letostí.



### 3.3 Popis použitých metod srážko-odtokového modelování

Již z výše uvedeného vyplývá, že pro většinu pracovních postupů srážko-odtokového modelování v diplomové práci bylo využito metodických postupů obsažených v software HEC-HMS a HEC-GeoHMS, zpracovaném v US Army Corps Of Engineers, který zahrnuje modelovací techniky jak pro účely stanovení velikosti přímého odtoku a základního odtoku, tak pro řešení transformační odezvy povodí na průběh příčinných srážek.

#### 3.3.1 Stanovení přímého odtoku - metoda CN křivek

Metoda čísel odtokových křivek (CN – Curve Number) byla odvozena v USA pro potřeby Služby na ochranu půdy (SCS – Soil Conservation Service) a představuje jednoduchý srážko-odtokový model s poměrně snadno zjistitelnými vstupy, který je dostatečně přesný. Váška (2007) uvádí, že model je použitelný pro stanovení objemu přímého odtoku a kulminačního průtoku způsobeného návrhovým přívalovým deštěm o zvolené pravděpodobnosti výskytu v zemědělsky využívaných povodích, či jejich částech velikosti do 10 km<sup>2</sup>.

Přímý odtok zahrnuje odtok povrchový a odtok hypodermický. Podíly tohoto typu odtoku na celkovém odtoku se stanovují pomocí tzv. čísel odtokových křivek - CN. Čím větší hodnota CN, tím je pravděpodobnější, že se jedná o povrchový odtok. Odtok vody je obecně ovlivněn množstvím srážek, infiltrací vody do půdy, vlhkostí půdy, druhem vegetačního pokryvu, nepropustnými plochami a retencí povrchu.

Základním vstupem metody odtokových křivek je srážkový úhrn návrhového deště zvolené doby opakování za předpokladu jeho rovnoměrného rozdělení na ploše povodí. Objem (výška) srážek je transformován na objem (výšku) odtoku pomocí čísel odtokových křivek – CN. Jejich hodnoty jsou závislé na hydrologických vlastnostech půd, vegetačním pokryvu, velikosti nepropustných ploch, intercepci a povrchové retenci. (Váška, 2007)

U srážko-odtokové události se pro daný čas předpokládá, že poměr mezi skutečnou a maximální potenciální velikostí ztrát na povodí je stejný jako poměr mezi objemem odtoku a objemem srážky redukováným o počáteční ztrátu (Hydrologic Engineering Center, 1998):

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}, \quad \dots \text{Rovnice 1}$$

kde:

$P_e$  je kumulativní efektivní srážka v čase  $t$

$P$  je kumulativní srážka v čase  $t$

$I_a$  je počáteční ztráta (*Initial Abstraction*)

$S$  je potenciální retence, která je vypočtena z CN křivky:

$$S = \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN} \quad [\text{mm}] \quad \dots \text{Rovnice 2}$$



$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad [\text{in}] \quad \dots \text{Rovnice 3}$$

Pro odhad počáteční ztráty  $I_a$  je možné použít vztah (Hydrologic Engineering Center, 1998):

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad [\text{mm}] \quad \dots \text{Rovnice 4}$$

### Čísla odtokových křivek

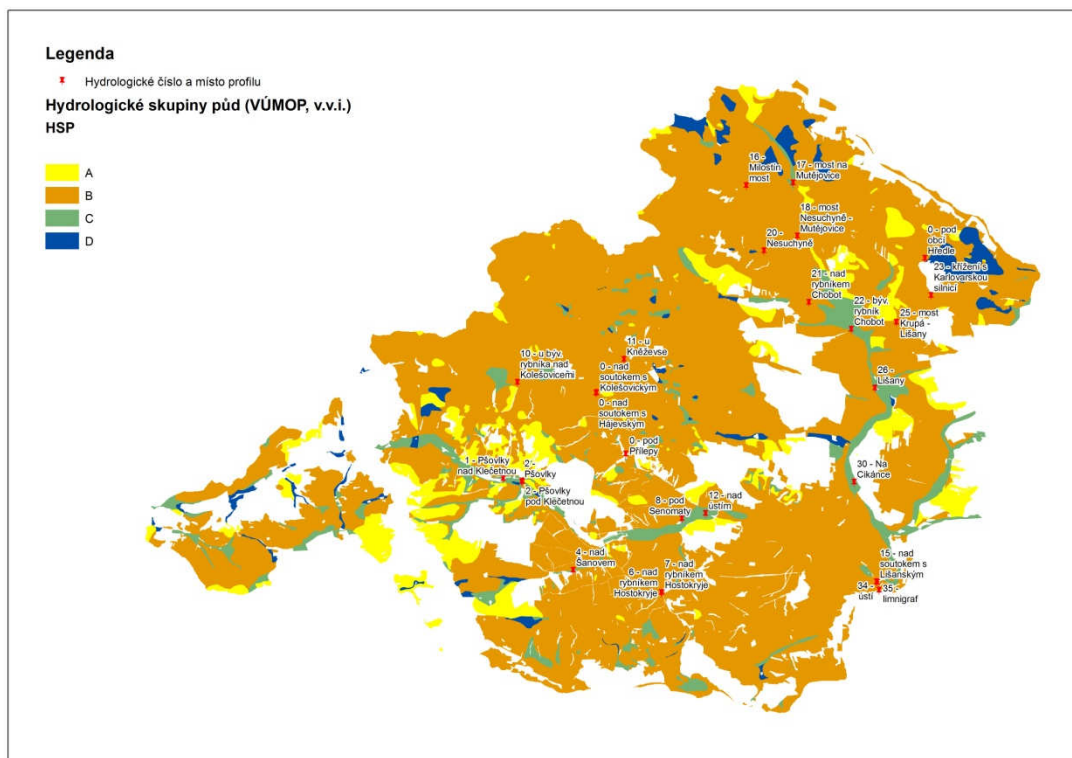
Čísla odtokových křivek (CN) jsou dle Vášky (2007) určeny podle:

- hydrologických vlastností půd rozdělených do 4 skupin - A, B, C, D, na základě minimálních rychlostí infiltrace vody do půdy bez pokryvu po dlouhodobém sycení (**tabulka 1**), hydrologické skupiny půd v povodí Rakovnického potoka jsou patrné z **obrázku 4**,
- vlhkosti půdy určované na základě 5 - denního úhrnu předcházejících srážek, resp. indexu předchozích srážek (IPS) ve 3 stupních, kdy IPS I odpovídá takovému minimálnímu obsahu vody v půdě, který ještě umožňuje uspokojivou orbu a obdělávání, při IPS III je půda přesycena vodou z předcházejících dešťů. Pro návrhové účely a tedy i v případě modelování maximálních průtoků bude uvažována IPS II (**obrázek 5**) pro střední nasycení půdy vodou,
- využití půdy, vegetačního pokryvu, způsobu obdělávání a uplatnění protierozních opatření.

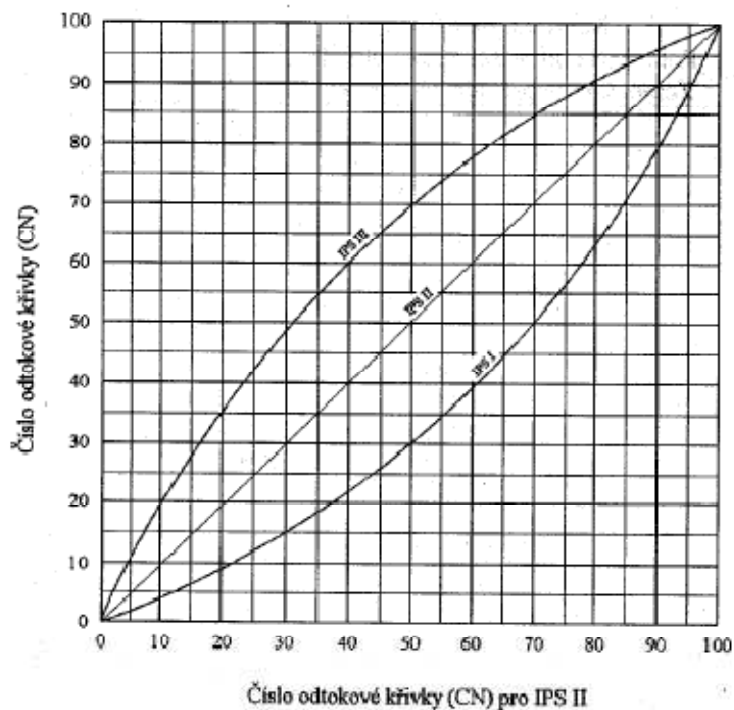
Hydrologická skupina půd	Charakteristika hydrologických vlastností půd
A	Půdy s vysokou rychlostí infiltrace ( $> 0,12 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) i při úplném nasycení, zahrnující převážně hluboké, dobře až nadměrně odvodněné písky nebo štěrky
B	Půdy se střední rychlostí infiltrace ( $0,06 - 0,12 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy středně hluboké až hluboké, středně až dobře odvodněné, hlinitopísčité až jílovitohlinité
C	Půdy s nízkou rychlostí infiltrace ( $0,02 - 0,06 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy s málo propustnou vrstvou v půdním profilu a půdy jílovitohlinité až jílovité
D	Půdy s velmi nízkou rychlostí infiltrace ( $< 0,02 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) i při úplném nasycení, zahrnující převážně jíly s vysokou bobtnavostí, půdy s trvale vysokou hladinou podzemní vody, půdy s vrstvou jílu na povrchu nebo těsně pod ním a mělké půdy nad téměř nepropustným podložím.

**Tabulka 1** Charakteristiky hydrologických skupin půd (Váška, 2007)





Obrázek 4 Hydrologické skupiny půd v povodí Rakovnického potoka dle VÚMOP, v.v.i.



Obrázek 5 Vliv obsahu vody v půdě (IPS I – suchá, IPS II – střední, IPS III – nasycená) na změnu čísla odtokové křivky (CN) (Váška, 2007)

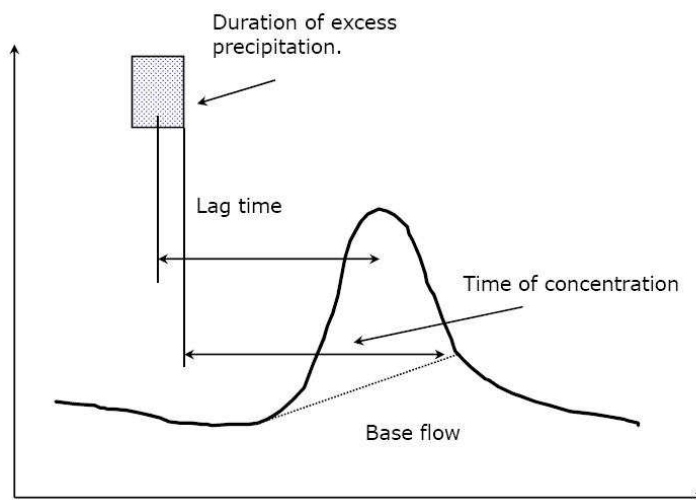
### 3.3.2 Transformace přímého odtoku – metoda jednotkového hydrogramu

Volba metody transformace přímého odtoku je klíčovou součástí metodického postupu odvození maximálního průtoků, neboť přímo určuje tvar vlny, a tím i velikost kulminačního průtoků.

Jako transformační funkci povodí je používán jednotkový hydrogram. Jednotkový hydrogram je hypotetická odezva povodí (přímý odtok) na jednotkový efektivní déšť konstantní intenzity pokrývající rovnoměrně jednotku povodí. Původní koncept navrhl Leroy Sherman v roce 1932. (Johnson, 1999)

Pro jednotkový hydrogram platí obecně několik podmínek (Jeníček, 2009):

- efektivní srážky daného trvání (viz **rovnice 1**) způsobí vždy stejně dlouhou odtokovou odezvu (tzn., že doba odtokové odezvy se nemění s intenzitou srážek),
- princip časové invariance – velikost přímého odtoku vzniklého jako reakce na příčinné srážky v daném časovém intervalu není závislá na době výskytu těchto srážek,
- princip proporcionality – přímý odtok v daném časovém intervalu je přímo úměrný odpovídajícím příčinným srážkám (princip linearity)
- princip superpozice – při vícenásobném vstupním impulzu (efektivní srážky) dojde ke skládání vln.



Obrázek 6 Princip jednotkového hydrogramu (Johnson, 1999)

Prostředí hydrologického programu HEC-HMS nabízí několik typů jednotkových hydrogramů, v rámci této práce je využíván jednotkový hydrogram dle Clarka, který disponuje těmito parametry (Fleming et Scharffenberg, 2008):

$T_c$  - doba koncentrace povodí (*Time of concentration*) [h]

$R$  - tzv. transformační faktor (*Storage Coefficient*) [h], simulující dobu zadržetí vody v povodí



Parametr  $T_c$  zde představuje dobu, po kterou trvá netransformovaný povrchový odtok, vyjádřený tzv. translačním hydrogramem, přičemž hodnota  $T_c$  je délka jeho základny. Translační hydrogram vychází ze stanovené závislosti doby dobíhání a velikosti plochy povodí podle následujících rovnic (Šercl, 2009):

$$\frac{A_t}{A} = 1,414 \cdot \left(\frac{t}{T_c}\right)^{1,5} \quad \text{pro } t \leq 0,5 T_c \quad \dots \text{Rovnice 5}$$

$$\frac{A_t}{A} = 1 - 1,414 \cdot \left(1 - \frac{t}{T_c}\right)^{1,5} \quad \text{pro } t \geq 0,5 T_c, \quad \dots \text{Rovnice 6}$$

kde:

$A_t$  je plocha povodí podílející se na odtoku v čase  $t$  [km<sup>2</sup>]  
 $A$  je celková plocha povodí [km<sup>2</sup>]

Pro odhad hodnoty  $T_c$  je v práci použit vzorec SCS (Soil Conservation Service v USA) pro odvození  $T_{LAG}$ , což je časový posun v hodinách mezi okamžikem výskytu maxima příčné srážky a okamžikem výskytu kulminačního průtoku v závěrovém profilu povodí (Fleming et Doan, 2009):

$$T_{LAG} = \frac{L^{0,8} \cdot (S+1)^{0,7}}{1900 \cdot \sqrt{Y}}, \quad \dots \text{Rovnice 7}$$

kde:

$T_{LAG}$  je doba prodlení (*Lag time*) [h]  
 $L$  je maximální délka povrchového odtoku [feet]  
 $S$  je potenciální maximální retenze půdy (vypočtená z CN křivky) - viz **rovnice 3** [in]  
 $Y$  je průměrný sklon povodí [%]

Doba koncentrace  $T_c$  se pak odhaduje jako:

$$T_c = 1,67 \cdot T_{LAG} \quad \text{[h]} \quad \dots \text{Rovnice 8}$$

Pro určení koeficientu  $R$  existuje jen minimum výpočetních vzorců, zpravidla se pro výpočet návrhové vlny na nepozorovaných povodích odhaduje velikost koeficientu  $R$  jako  $n$ -násobek doby koncentrace (Šercl, 2009):

$$R = n \cdot T_c, \quad \text{[h]} \quad \dots \text{Rovnice 9}$$

kde se hodnota  $n$  nejčastěji pohybuje v rozmezí intervalu 1,2 – 2.

Podle dostupné literatury (Jeníček, 2009) byl implementován vzorec pro výpočet  $R$  ve tvaru:

$$R = A \cdot L^B \cdot S_{1085}^C, \quad \dots \text{Rovnice 10}$$



kde:

$L$  je maximální délka povrchového odtoku v mílích

$S_{1085}$  je sklon ve ft/mi (stopy na míli) mezi 10 % a 85 % maximální délky údolnice  
 $A, B, C$  jsou parametry rovnice odvozené pro stát Illinois v USA, které pro podmínky ČR byly na základě zkušeností ze simulačních výpočtů povodňových událostí upraveny v ČHMÚ na hodnoty  $A = 80, B = 0,342, C = -0,79$  (Šercl, 2009)

### 3.3.3 Příčinné srážky v podobě návrhového hyetogramu

Tvar povodňové vlny závisí zejména na časovém průběhu srážek. Proto hraje problematika konstrukce tzv. zatěžovacího hydrogramu, tzn. v tomto případě rozložení návrhové  $N$  – leté plošné srážky o trvání např. 24 hodin do kratších, zpravidla hodinových intervalů, stěžejní roli. Zároveň však jde o obtížný metodický problém. Klíčové je zejména určení délky trvání a hodinových intenzit rozhodující (extrémní) fáze hyetogramu, která má největší vliv na velikost kulminačního průtoku.

Pro konstrukci návrhových hyetogramů jsou v současnosti experimentálně využívány především dvě metodiky (Kulasová et al., 2004):

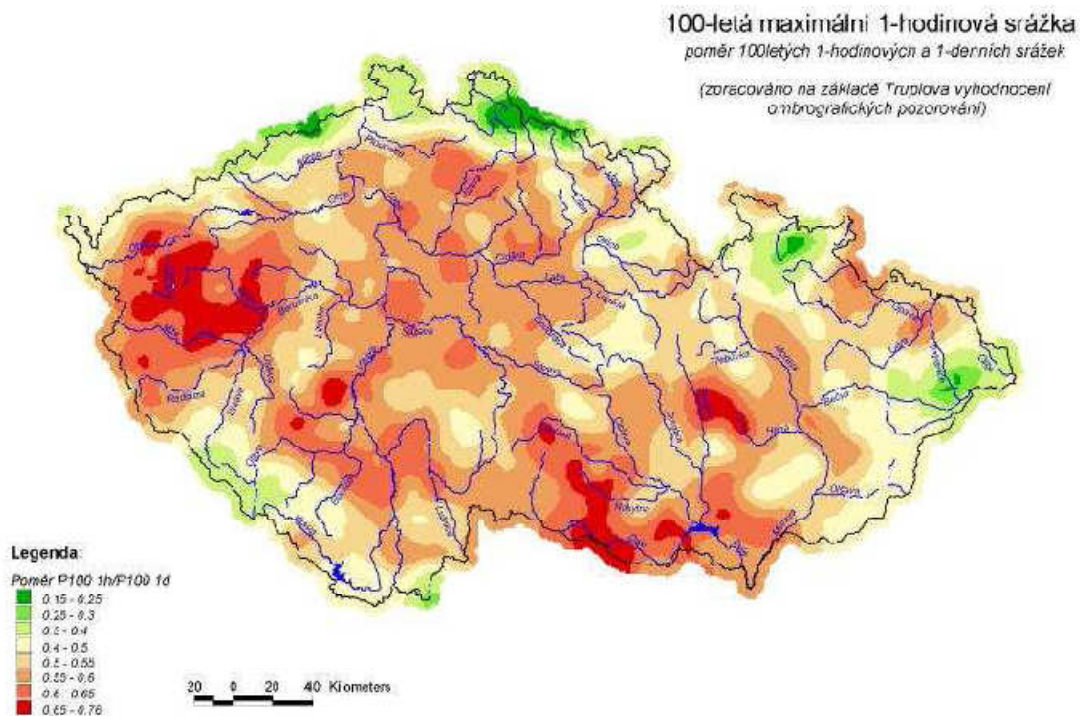
- 1) Metoda založená na 100 – letých hodinových intenzitách dle Trupla (přístup ČHMÚ – Český hydrometeorologický ústav)
- 2) Metoda založená na zpracování radarových dat a rozdělení území ČR do charakteristických oblastí (přístup ÚFA AV ČR – Ústav fyziky atmosféry Akademie věd ČR).

Pro účely stanovení maximálních průtoků v povodí Rakovnického potoka byly použity obě metody.

#### Metoda ad 1)

Toto řešení je založeno na zpracování 100 – letých hodinových srážek z ombrografických pozorování vyhodnocených Truplem (1958) a spočívá v odvození poměrů 100 – letých hodinových a 1 – denních srážek. Na základě těchto poměrů je určena maximální pořadnice hyetogramu, která má největší vliv na výsledný tvar povodňové vlny a výslednou hodnotu kulminačního průtoku. Ostatní pořadnice hyetogramu mohou být uživatelsky nadefinovány prakticky libovolně, doporučuje se například trojúhelníkové rozložení (Kulasová et al., 2004).

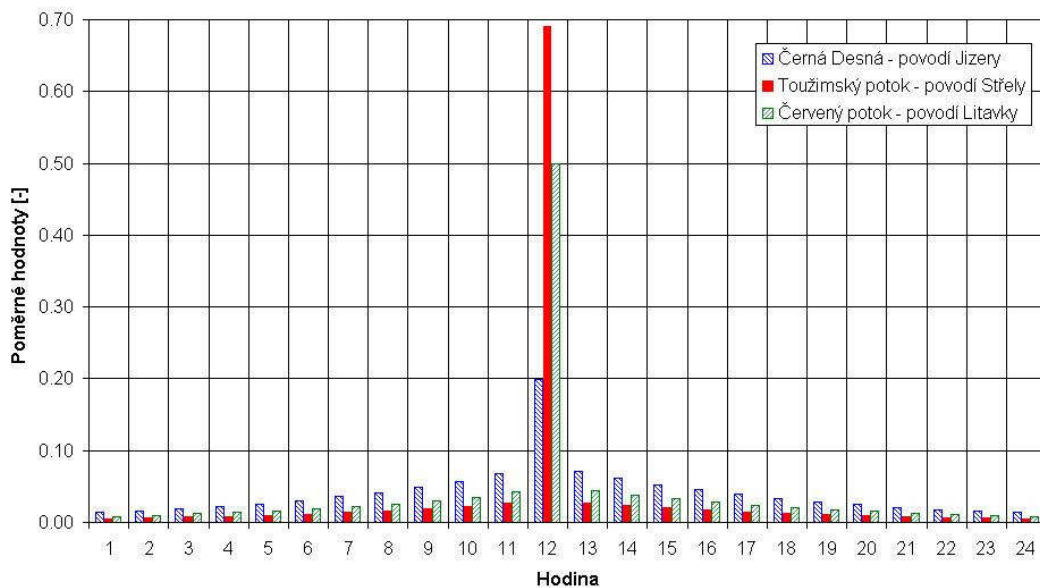
Na **obrázku 7** je vypočtená mapa poměrů 100 – leté 1 – hodinové a 24 – hodinové srážky. Tyto poměrné hodnoty ve skutečnosti vyjadřují, jaký podíl z 24 – hodinového úhrnu tvoří přívalové srážky. Nejnižších hodnot těchto koeficientů je proto dosahováno v regionech s dominantní rolí orograficky zesílených srážek, tj. v horských oblastech Jizerských hor, Krkonoš, Jeseníků, Beskyd, Šumavy a Krušných hor. Nejvyšší hodnoty jsou oproti tomu na většině území západních Čech, dále v závětrí Brd a Šumavy a na jižní Moravě.



Obrázek 7 Mapa poměrů 100 – letých jednohodinových a jednodenních srážek (Kulasová et al., 2004)

Na **obrázku 8** jsou příklady návrhových hyetogramů v proměnných hodnotách z různých klimatických podmínek v ČR.

**Příklady návrhových hyetogramů**



Obrázek 8 Příklady poměrných návrhových hyetogramů pro povodí v různých klimatických podmínkách (Kulasová et al., 2004)

## Metoda ad 2)

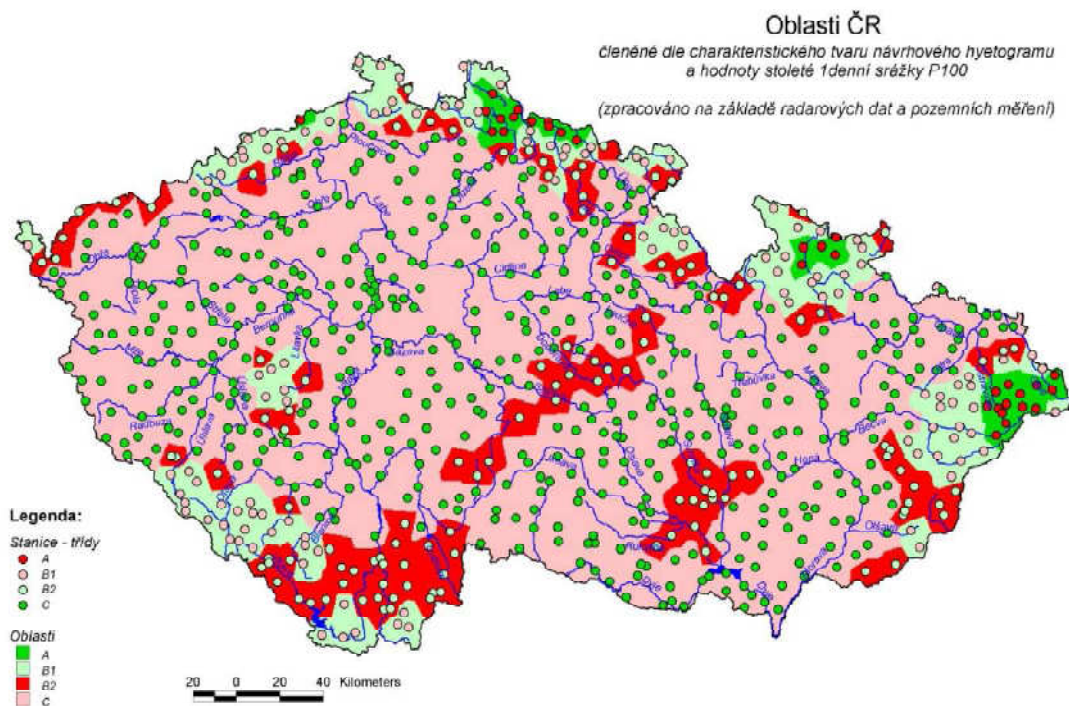
Ta spočívá v rozdělení ČR do tří (resp. čtyř) oblastí na základě hodnot denních 100 - letých srážkových úhrnů  $P_{100}$ . Základními kritérii pro toto rozdělení byla hodnota  $P_{100}$ , vazba na orografii a plošná souvislost oblastí. Byly určeny tři oblasti A, B, C, které splňují následující podmínky (Kulasová et al., 2004):

- oblast A: stanice s  $P_{100} \geq 150$  mm,
- oblast B: stanice s  $150 > P_{100} \geq 90$  mm,
- oblast C: stanice s  $P_{100} < 90$  mm.

Z oblastí B bylo ale vyloučeno 52 stanic, které byly přeřazeny do oblasti C a naopak z oblastí C byly vyloučeny a následně přeřazeny 4 stanice do oblasti B. Oblast B byla ještě rozdělena do dvou podoblastí (Kulasová et al., 2004):

- podoblast B1: stanice s  $P_{100} \geq 100$  mm,
- podoblast B2: stanice s  $P_{100} < 100$  mm.

Rozdělení ČR do oblastí je znázorněno na **obrázku 9**.

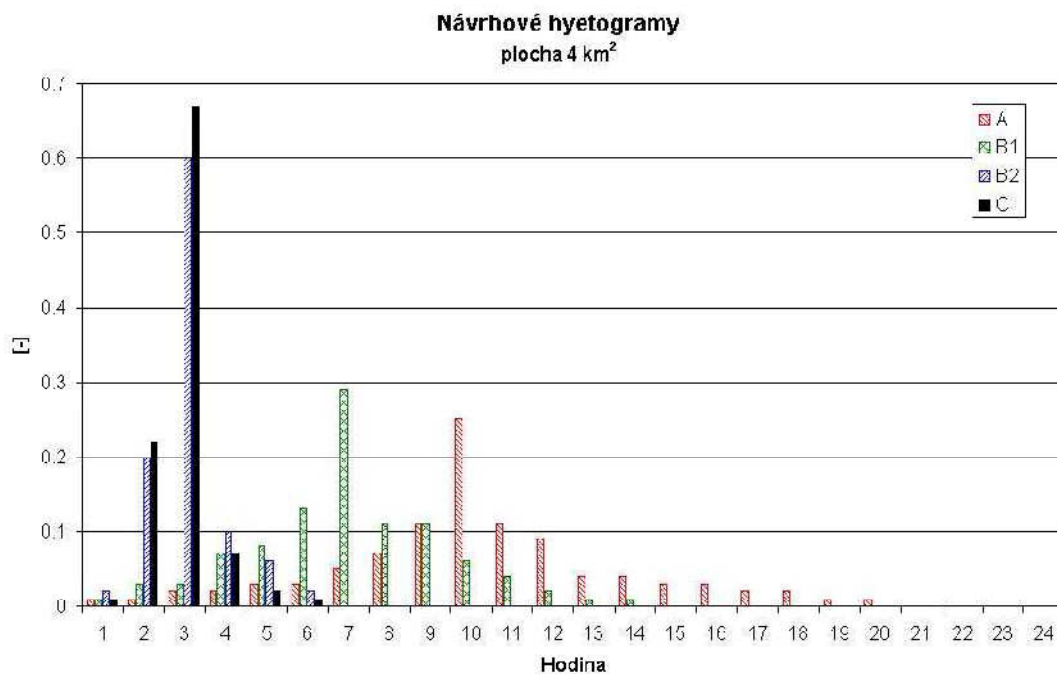


**Obrázek 9** Rozdělení území ČR do oblastí podle velikostí 100 – leté jednodenní srážky a charakteristického tvaru hyetogramu (Kulasová et al., 2004)

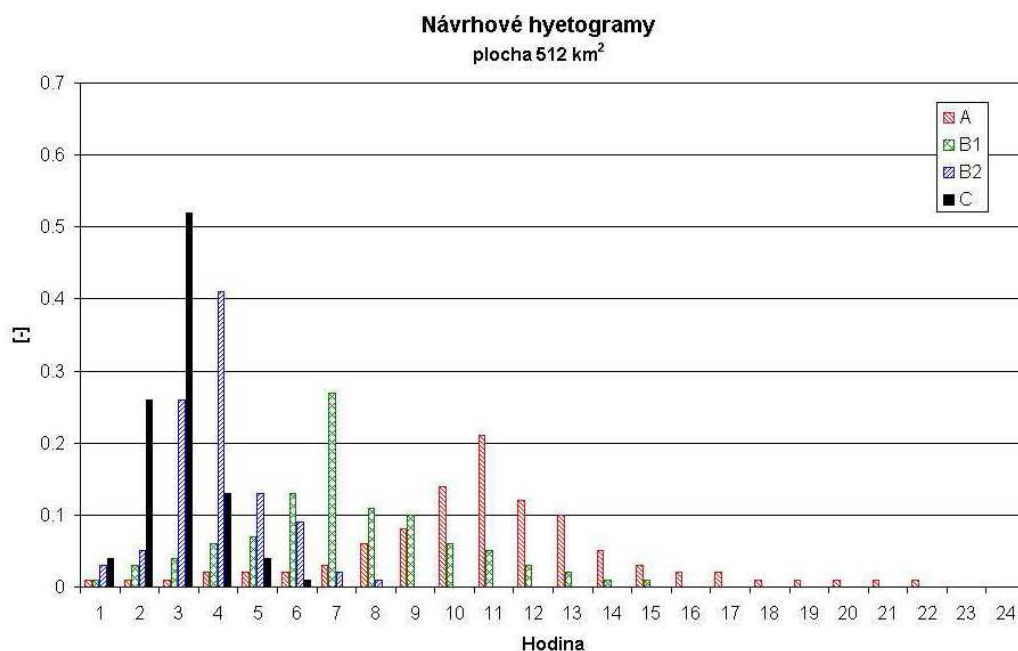
Odvození návrhových hyetogramů pro každou z uvedených oblastí probíhalo tak, že byly vybírány srážkové události s 24 - hodinovým úhrnem alespoň na úrovni 2 - leté srážky ( $P_2$ ) a na základě radarových dat byl vypočítán podíl srážky za příslušný kratší časový interval. Výpočty byly aplikovány pro plochy o velikosti 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512 a 1024 km<sup>2</sup>. Výsledkem byly součtové čáry srážek o základně 24 hodin s pořadnicemi udávajícími poměr vypadlých srážek za  $n$  hodin vůči celkové době trvání srážky (v tomto případě 24 hodin). Tyto závislosti byly statisticky zpracovány a jako výsledný návrh byl určen 95 % kvantil, tzn., že v 5 % případů byl



zaznamenán extrémnější průběh deště. Na **obrázku 10 a 11** jsou uvedeny příklady takto odvozených návrhových hyetogramů pro plochy 4 a 512 km<sup>2</sup>. Jsou zřetelné nejen rozdíly v relativní velikosti pořadnic a délkou trvání základny hyetogramu mezi jednotlivými oblastmi A, B1, B2, C, ale i pokles relativní velikosti maximálních pořadnic pro plochu 512 km<sup>2</sup> oproti ploše 4 km<sup>2</sup>.



**Obrázek 10** Návrhové hyetogramy pro oblasti A, B1, B2, C a plochu 4 km<sup>2</sup> (Kulasová et al., 2004)



**Obrázek 11** Návrhové hyetogramy pro oblasti A, B1, B2, C a plochu 512 km<sup>2</sup> (Kulasová et al., 2004)



## 3.4 Zpracování hydrologicky korektního DMT

### 3.4.1 Předzpracování DMT

Předzpracování a příprava Digitálního modelu terénu (DMT) je jedním z nejdůležitějších kroků při přípravě dat k analýze vodních zdrojů a vodního režimu v povodí pomocí nástrojů Arc Hydro tools. (Djokic, 2008)

Úloha předzpracování je dvojí:

- a) Rozvoj hydrologicky korektního DMT a jeho derivátů, především vygenerování směru proudění a jeho akumulace v povodí a následné převedení těchto preferenčních modelů do vektorových tříd geoprvků.
- b) Vývoj sériově propojených vrstev, které optimalizují výkon nástrojů ArcHydro a vztahují se k vymezení a charakteristice povodí.

Hydrologicky korektní digitální model terénu (dále HydroDEM, z anglického DEM – Digital Elevation Model) je definován jako terén, jehož vygenerované směry proudění naplňují očekávání a požadavky analytiků. Tato definice je úmyslně subjektivní, protože ani jeden výklad HydroDEM by nemohl splnit očekávání všech analýz. Například terén pro analýzu horských toků bude vypadat trochu jinak, než terén určený k analýze nížinných vodnatých toků nebo pro výpočet zásob podzemní vody. Pro co nejpřesnější výsledky následujících analýz je tedy nezbytná úvaha nad využitím výsledného hydrologicky korektního digitálního modelu terénu (HydroDEM).

Schéma dendritického proudění je charakterizováno systémem vodotečí, které jsou propojeny ve směru toku v soutocích. V tomto schématu by v ideálním případě neměly být žádné bezodtoké oblasti a veškerá voda z povodí by měla být koncentrována v kmenovém toku při průtoku uzavíracím profilem.

### 3.4.2 Úprava základního odtokového schématu

Úprava přijde na řadu tehdy, když terénní předzpracování DMT není adekvátní a je potřeba jej upravit dalšími informacemi, především údaji o současném stavu prvků v povodí. Obecně jsou používány 4 speciální případy:

- 1) Vymezení současného známého stavu systému vodotečí
- 2) Vymezení proudění přes vodní plochy
- 3) Definování známých rozvodnic
- 4) Vymezení rozdělení toků

Účelem všech čtyř případů je vytvoření kvalitnější rastrové vrstvy směru proudění (*Flow Direction Grid*), který lépe reprezentuje známý systém odtoku vody z povodí v DMT. Po úpravě směru proudění musí být aktualizovány i všechny kroky následující po nástroji *Flow Direction* (viz **obrázek 23**).





## 4 Vstupní analýza řešené problematiky

V následující kapitole jsou popsána vstupní data a možné problémy s kompatibilitou při exportech dat z prostředí ArcGIS (HEC-geoHMS) do prostředí HEC-HMS a jejich zabránění.

Veškerá GIS data často vyžadují konverzi do stejného formátu a do stejného souřadnicového systému. Proto je při sběru a třídění dat důležitá analýza formátu a souřadnicového systému. Pro sestavení hydrologického modelu byla použita následující data, jejichž charakteristika a původ jsou zřejmé z **tabulky 2**.

Název datové sady	Formát	Zdroj	Souřadnicový systém	Popis
Body_profily1.shp	ESRI shapefile	VÚV T.G.M., v.v.i.	S-JTSK_Krovak_East_North	Měrné profily
Plochy_povodi.shp	ESRI shapefile	VÚV T.G.M., v.v.i.	S-JTSK_Krovak_East_North	Plochy subpovodí k profilům
Nadrze_navrh_4.shp	ESRI shapefile	VÚV T.G.M., v.v.i.	S-JTSK_Krovak_East_North	Navrhované nádrže
Vodni_toky_HU.shp	ESRI shapefile	VÚV T.G.M., v.v.i. - DIBAVOD	S-JTSK_Krovak_East_North	Hrubé úseky vodních toků
Vodni_toky_C EVT.shp	ESRI shapefile	VÚV T.G.M., v.v.i. - DIBAVOD	S-JTSK_Krovak_East_North	Vodní toky
Vodni_nadrze.shp	ESRI shapefile	VÚV T.G.M., v.v.i. - DIBAVOD	S-JTSK_Krovak_East_North	Vodní nádrže
Tpgrd_rakovnický.tif	ESRI raster dataset tiff	VÚV T.G.M., v.v.i.	S-JTSK_Krovak_East_North	DMT
CORINE_2000.shp	ESRI shapefile	VÚV T.G.M., v.v.i.	S-JTSK_Krovak_East_North	Corine - krajinný pokryv
HSP	WMS Server	VÚMOP, v.v.i.	S-JTSK_Krovak_East_North	Hydrologické skupiny půd

**Tabulka 2** Použitá vstupní data

Dostupná data jsou všechna ve formátu ESRI, který je pro práci v ArcGIS potřebný. Souřadnicový systém je rovněž shodný, ale dá se očekávat problém s kompatibilitou při exportu do HEC-HMS. Fleming et Doan (2009) uvádějí, že je hydrologický program schopný bezproblémově pracovat pouze v několika souřadnicových systémech a to: Albers-Equal Area, Universal Transverse Mercator (UTM), Transverse Mercator, Lambert a State Plane Coordinate System. Proto byl veškerým vstupním datům přiřazen pomocí ArcCatalogu následující souřadnicový systém:

Projection:	Albers Equal-Area
Spheroid:	GRS80
Datum:	North American Datum, 1983 (NAD83)
Central Meridian:	96 degrees 0 minutes 0 seconds West
Latitude of Origin:	23 degrees 0 minutes 0 seconds West
1st Standard Parallel	29 degrees 30 minutes 0 seconds West
2nd Standard Parallel	45 degrees 30 minutes 0 seconds West
False Easting:	0
False Northing	0
Units	Meters

**Tabulka 3** Standardní hydrologický souřadnicový systém



## 5 Charakteristika studijního území<sup>1</sup>

### 5.1 Fyzicko – geografický popis povodí

Rakovnický potok je levostranným přítokem Berounky, do které ústí v obci Roztoky. Plocha jeho povodí činí přibližně 344 km<sup>2</sup>. Předmětem diplomové práce a výzkumu VÚV T.G.M., v.v.i. je povodí nad vodoměrnou stanicí Rakovník, která se nachází na Rakovnickém potoku pod Rakovníkem a uzavírá povodí o ploše 302 km<sup>2</sup>. Převážná část tohoto povodí z geologického hlediska leží v rakovnické pánvi, jen horní povodí nad Oráčovem náleží k čistecko-jesenickému masívu.

Rakovnický potok pramení na Rakovnické pahorkatině asi 3 km od Jesenice v nadmořské výšce 577,72 m. Povodí nad Rakovníkem má průměrnou nadmořskou výšku 407 m n. m., uzávěrový profil je ve výšce cca 315 m n. m., největších výšek těsně nad 600 m n. m. dosahuje Plavečský vrch na západním okraji povodí. Morfologie povodí je patrná z **obrázku 12** (viz také **příloha 1**).

Základní říční síť tvoří Rakovnický potok, který směřuje od Jesenice východním směrem k Rakovníku a jeho nejvýznamnějšími (oba levostrannými) přítoky jsou Kolečovický a Lišanský potok. Povodí se tedy dá definovat jako asymetrické, tzn., že pravostranné přítoky odvodňují podstatně menší část povodí než levostranné.

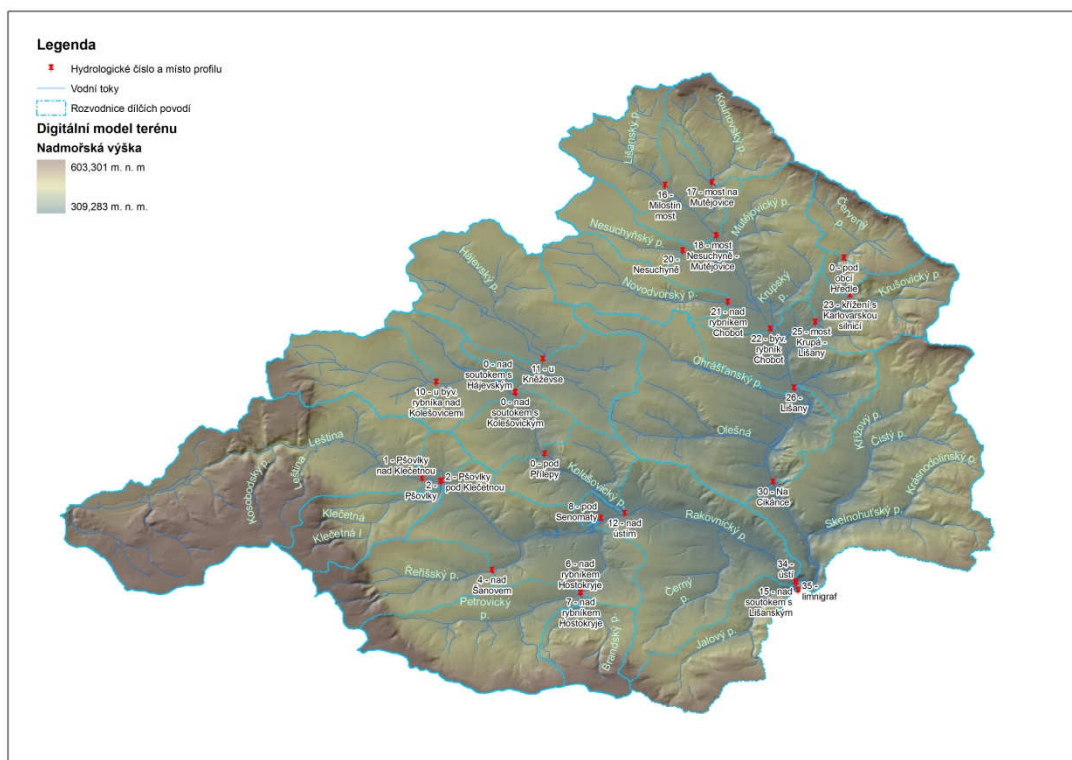
Podstatná část povodí je zemědělsky využívaná, orná půda je na 58,8 % jeho plochy, louky na 9,6 % plochy, zalesněno je 27,7 %, zbytek tvoří urbanizované, dá se říci zpevněné, plochy. Na mapě na **obrázku 12 (příloha 1)** jsou červeně vyznačeny profily, ve kterých byla prováděna jednorázově nebo soustavně hydrometrická měření a jim odpovídající rozvodnice dílčích povodí. Pro takto vymezená dílčí povodí jsou v **tabulce 4** uvedeny plochy povodí, průměrné sklony povodí a procentní zastoupení orné půdy, luk, lesa a urbanizovaných ploch podle databáze CORINE2000 (Bossard et al., 2000). Mapa využití pozemků je na **obrázku 13** (viz také **příloha 2**). Míra zalesnění je po ploše povodí značně proměnlivá. Největší lesní celek leží v oblasti při jihovýchodním okraji povodí (dílčí povodí Čistého potoka). Velmi malé zalesnění je v povodí Kolečovického potoka (8,8 %) a v horní části povodí Lišanského potoka (9,4 %). Na obou těchto povodích přesahuje podíl orné půdy 80 %, jedná se tedy o oblast velmi intenzivně zemědělsky využívanou, což je předpoklad využití metody CN křivek pro výpočet ztrát a stanovení přímého odtoku z povodí. Částečný podíl z orné půdy (cca 5 %) tvoří chmelnice.

---

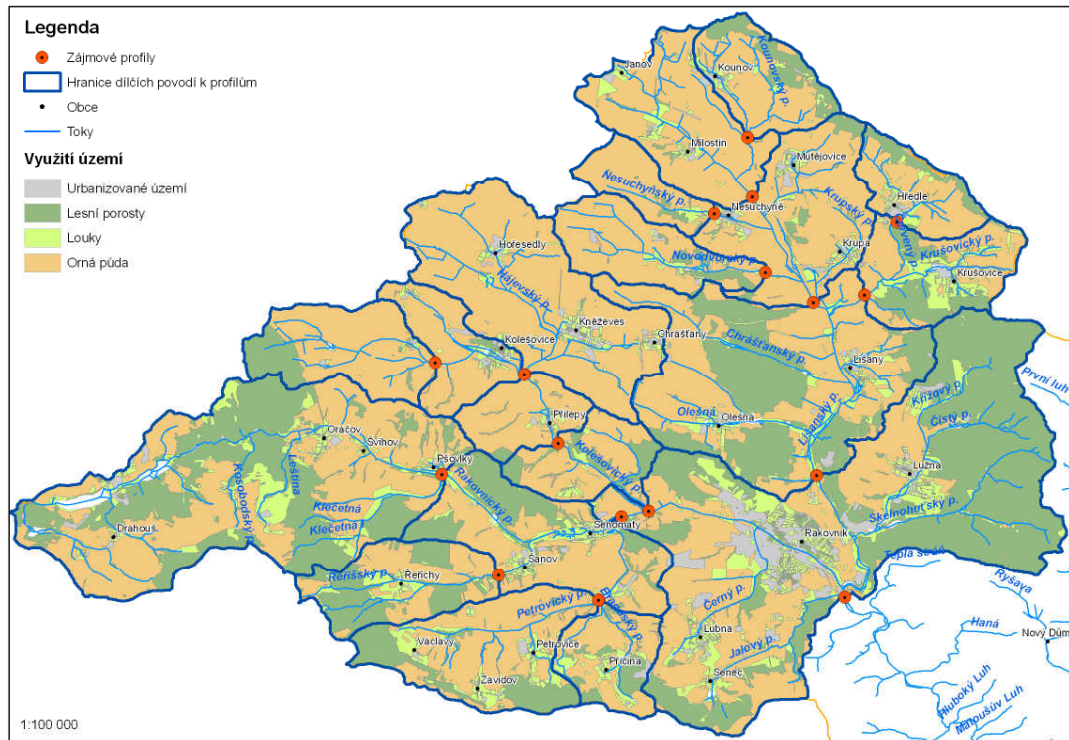
<sup>1</sup> (částečně převzato z textové části projektu QH01247 „Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulační schopnosti v povodí Rakovnického potoka“) (Kašpárek, 2010)



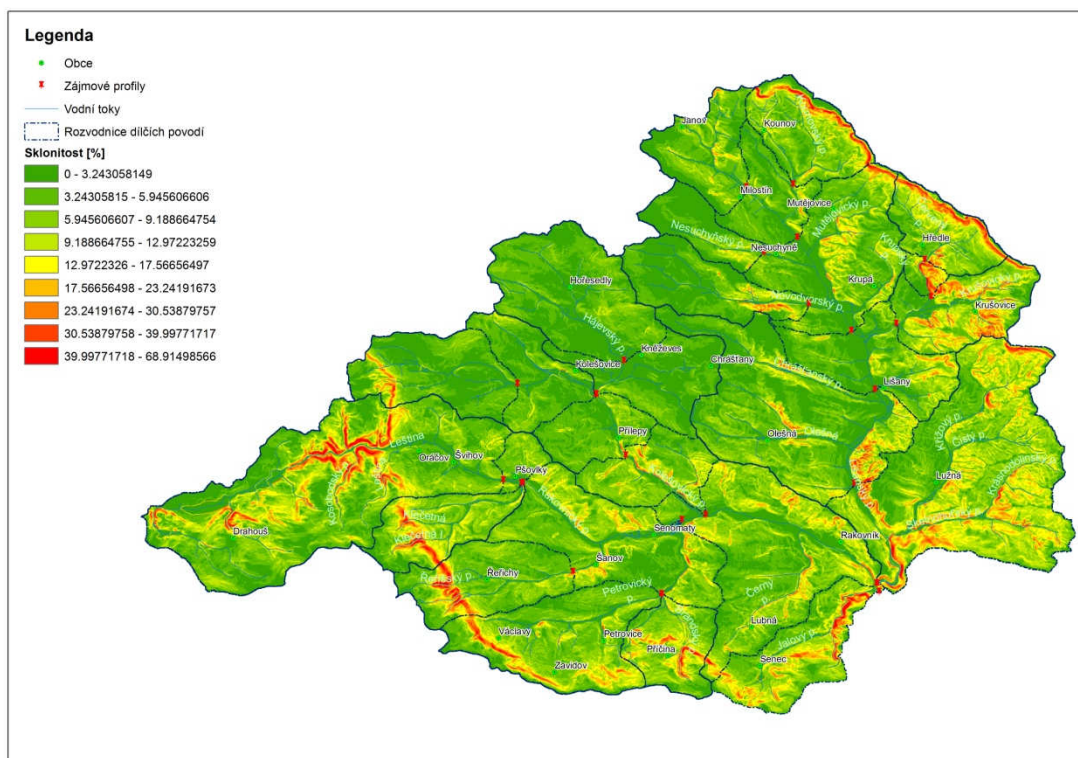
Na **obrázku 14 (příloha 3)** jsou znázorněny sklonové poměry v povodí Rakovnického potoka. Po rozboru sklonových poměrů lze konstatovat, že v severozápadní části povodí (zhruba ohraničené Lišanským a Rakovnickým potokem) jsou sklony minimální, na ostatních částech povodí jsou sklony větší. To dokumentuje i **tabulka 5** udávající průměrné sklony vybraných toků v zájmovém povodí. Např. průměrný sklon Hájevského potoka (vlévajícího se do Kolečovického potoka pod Kolečovicemi) je jen 8,3 %, zatímco sklon Kounovského potoka (vlévajícího se do Lišanského potoka nad Nesuchyní) je 19,1 %.



**Obrázek 12** Topografická mapa, říční síť a rozvodnice dílčích povodí k profilům



Obrázek 13 Mapa využití pozemků dle databáze CORINE (Kašpárek, 2010)



Obrázek 14 Mapa sklonitosti terénu



závěrový profil	tok	hydrol. číslo	plocha povodí [km <sup>2</sup> ]	sklon [%]	orná půda [%]	louky [%]	les [%]	urban. plochy [%]
Pšovlky nad Klečetnou	Rakovnický p.	1	35,3	7,97	50,1	11,4	34,5	1,9
Pšovlky	Klečetná	2	7,4	9,24	37,3	11,6	50,9	0,2
Pšovlky pod Klečetnou	Rakovnický p.	2	44,6	8,09	48,4	11,4	36,9	1,6
nad Šanovem	Řeřišský p.	4	9,6	7,63	45,9	9,8	43,9	0,3
nad rybníkem	Petrovický p.	6	14,1	7,65	59,2	12,8	26	1,9
Hostokryje								
nad rybníkem	Bradský p.	7	6,4	9,14	62,5	13,6	20,6	3,1
Hostokryje								
pod Senomaty	Rakovnický p.	8	90,2	7,77	52,1	11,7	33,4	1,8
u býv. rybníka nad	Kolešovický p.	10	10,1	4,59	78	1,4	19,6	0,5
Kolešovickými								
nad soutokem s	Kolešovický p.	0	16,8	4,34	80,4	3,5	13,8	2
Hájevským								
u Kněževse	Hájevský p.	11	14,5	3,67	93,4	3,6	0,7	2,3
nad soutokem s	Hájevský p.	0	22,7	3,61	90,3	5,1	0,8	3,7
Kolešovickým								
pod Přílepy	Kolešovický p.	0	45,1	3,91	86,2	4,4	6,4	2,8
nad ústím	Kolešovický p.	12	51,9	4,35	84	4,6	8,8	2,4
nad soutokem s	Rakovnický p.	15	163,3	6,56	61,5	10,2	23,7	4
Lišanským								
Milostín most	Lišanský p.	16	7,3	5,22	81	12,6	3,8	2,5
most na Mutějovice	Kounovský p.	17	8	9,22	63,8	7,1	27,2	1,8
most Nesuchyně -	Lišanský p.	18	21,1	6,47	78,3	7,7	11,9	2,1
Mutějovice								
Nesuchyně	Nesuchyňský p.	20	4,6	3,56	89,2	4,9	5,5	0,3
nad rybníkem Chobot	Novodvorský p.	21	8,6	4,27	83,5	5,2	9,2	1,8
býv. rybník Chobot	Lišanský p.	21	49,3	5,62	81,1	7	9,4	2,4
pod obcí Hředle	Červený p.	21	6,2	10,96	71,1	8,9	16,6	3,3
křížení s Karlovarskou	Červený p.	23	7,3	11,27	68,3	8,2	20,2	3,2
silnicí								
most Krupá - Lišany	Červený p.	25	15,8	10,98	57,7	15	24,1	3
Lišany	Lišanský p.	26	74,6	6,75	74,1	8,7	14,5	2,5
Na Cikánce	Lišanský p.	30	97,7	6,55	68,4	8,6	20,6	2,2
ústí	Lišanský p.	34	129,4	7,32	56	8,8	32,5	2,5
limnigraf	Rakovnický p.	35	302	7	58,9	9,6	27,7	3,3

Tabulka 4 Základní charakteristiky dílčích povodí (Kašpárek, 2010)



tok	H max	Hmin	délka [km]	sklon [%]
Rakovnický p.	577,4	309,3	30,2	8,9
Řeřišský p.	533,8	343,5	7,1	26,8
Petrovický p.	422	331,9	8,3	10,9
Brandský p.	512	351	3,4	47,7
Kolešovický p.	450,2	327,5	12,7	9,7
Hájevský p.	410,9	355,9	6,6	8,3
Kounovský p.	456	361,7	4,9	19,1
Lišanský p.	434,8	310,5	19,2	6,5
Nesuchyňský p.	404,8	352,7	4,7	11,1
Novodvorský p.	417,6	345,7	6,9	10,4
Červený p.	476,2	339,8	7,4	18,5

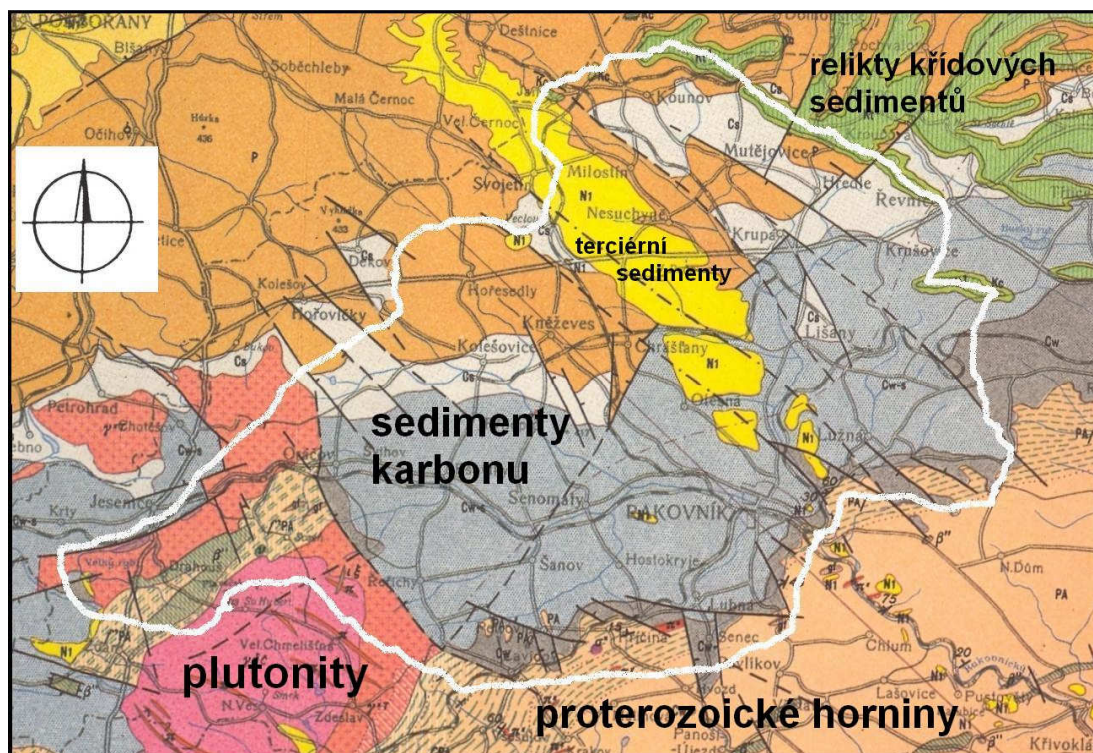
Tabulka 5 Průměrné sklony vybraných toků (Kašpárek, 2010)

## 5.2 *Geologický a pedologický popis území*

Řešené území povodí Rakovnického potoka je z geologického hlediska řazeno zejména k permokarbonské Rakovnické pánvi, detailní geologická stavba území je však poměrně pestrá.

### 5.2.1 **Geologické poměry**

Z geologického hlediska náleží zájmové území povodí Rakovnického potoka převážně k permokarbonské rakovnické pánvi, jižní část území k barrandienskému proterozoiku, do jihozápadní části povodí pak zasahují i hlubinné magmatity čistecko-jesenického masívu. Mladší horniny jsou zastoupeny denudačními relikty sedimentů křídý a terciéru, povrch je kryt sedimenty kvartéru. Geologické zastoupení předčtvrtohorních útvarů v zájmovém území dokumentuje následující mapka na **obrázku 15**. (Zoubek, 1990)



Obrázek 15 Geologická mapa předkvartérních útvarů zájmové oblasti (Kašpárek, 2010)

### 5.2.2 Hydrogeologické poměry

Z hydrogeologického hlediska patří území dle hydrogeologické rajonizace do rajónu základní vrstvy č. 5131 - Rakovnická pánev, jih a západ území pak do rajónu č. 6230 - Krystalinikum, proterozoikum a paleozoikum v povodí Berounky (Olmer, 2006).

Zájmové území tak lze obecně rozdělit z hydrogeologického hlediska na dvě části. Jižní a západní část zájmového území tvoří horniny krystalinika a proterozoika, kde hlavní roli hraje mělká zvodně v kvartérních sedimentech a v přípoверхovém pásmu rozpojení skalních hornin (Kašpárek, 2010). Směr odtoku podzemních vod tu bývá generelně shodný se sklonem terénu, drenážní bázi území tvoří lokální vodoteče (Kašpárek, 2010). V mělkém puklinovém kolektoru v horninách proterozoika se pohybuje dle Hrazdíry (1993) koeficient transmisivity v rozmezí  $6,2 \cdot 10^{-6}$  až  $9,7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . Koeficient transmisivity puklinového kolektoru plutonitů území dosahuje dle Hrazdíry (1994) až řádově vyšších hodnot mezi  $1,4 \cdot 10^{-5}$  až  $2,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

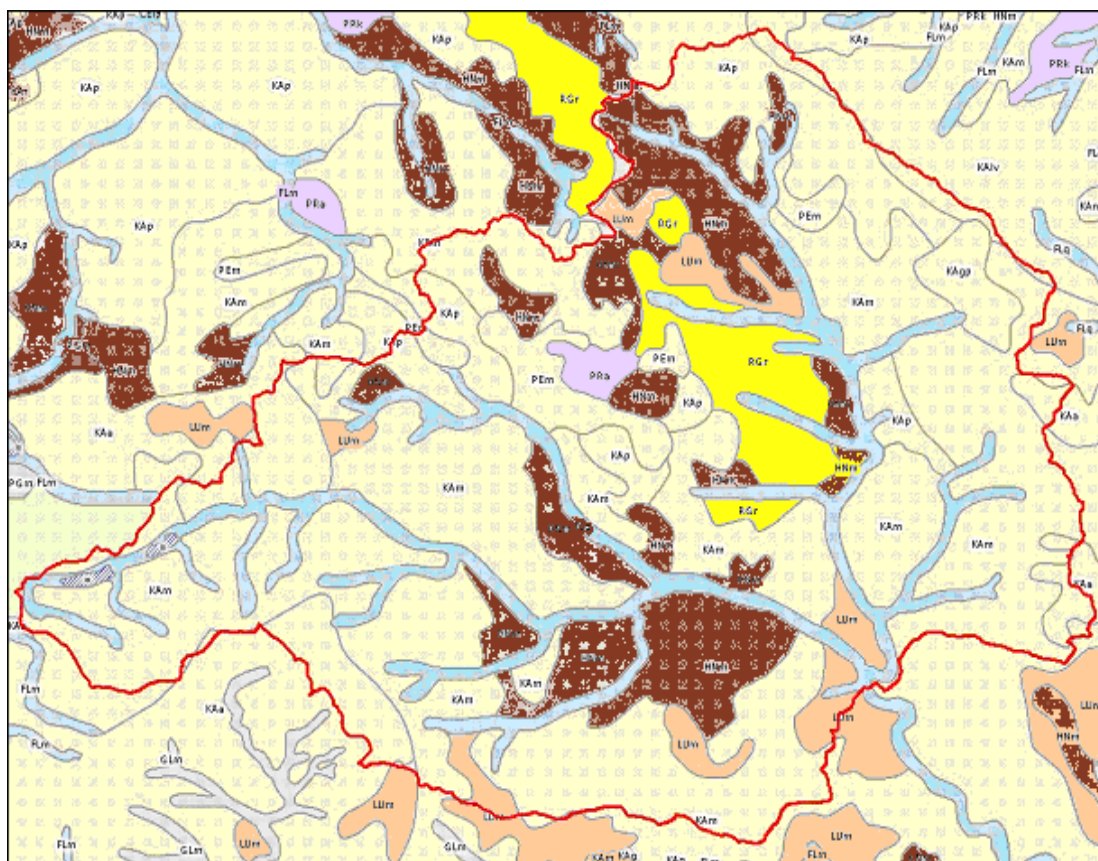
Naopak v horninách karbonu a křídý (zejména centrální část, východ a sever zájmového území) existují významné hlubší zvodně. V rámci sedimentů karbonu se střídáním poloh propustných sedimentů s jílovitými polohami izolátorů vytváří řada lokálních zvodní. Jejich propustnost se obecně snižuje směrem do hloubky a k severnímu okraji pánve, kde ubývá hrubší složky sedimentů. Charakter zvodnění je místně rozdílný, většinou převažuje puklinová propustnost nad průlinovou. Regionální oběh podzemních vod je značně omezen častými faciálními změnami. Značný vliv mají četné tektonické poruchy. Hrazdíra (1993) uvádí pro sedimenty kladenského souvrství (v jižní části pánve) koeficient transmisivity v rozmezí  $1,5 \cdot 10^{-7}$

<sup>4</sup> až  $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , pro slánské souvrství v rozmezí  $3,8 \cdot 10^{-5}$  až  $5,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ , pro týnecké souvrství v rozmezí  $2 \cdot 10^{-5}$  až  $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  a pro souvrství línské v rozmezí  $6,5 \cdot 10^{-6}$  až  $3,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

### 5.2.3 Pedologické poměry

Pedologické poměry na povodí jsou především určeny geologickým podložím, vegetačním krytem, klimatickými podmínkami, morfologií terénu a činností člověka. Převažující referenční třídou v zájmovém území jsou Kambisoly. V nižších polohách Rakovnické kotliny se vyskytují zástupci referenční třídy Luvisoly a v povodí Lišanského potoka je významně zastoupena referenční třída Regosoly. Na fluvialní náplavy v blízkosti vodních toků jsou vázány Fluvisoly. Ojedinele se v povodí vyskytují zástupci referenční třídy Leptosoly.

Obecně lze konstatovat, že v povodí Lišanského potoka je vyšší pestrost v zastoupení jednotlivých referenčních tříd než v povodí Rakovnického potoka, především v jeho horní části. Přehled zastoupení jednotlivých referenčních tříd, půdních typů a subtypů podle pedologické mapy 1:100 000 (Katedra pedologie a ochrany půdy ČZU Praha, 2008) je uveden na **obrázku 16**.



**Obrázek 16** Pedologické poměry v povodí Rakovnického potoka (Katedra pedologie a ochrany půdy ČZU Praha, 2008)



Kambisoly:		KAm – Kambizem modální, KAp – Kambizem pelická, KAa – Kambizem dystrická, KA <sub>gp</sub> – Kambizem oglejená pelická, KAlv – Kambizem luvická vyluhovaná, PEm – Pelozem modální
Luisoly:		HNm – Hnědozem modální
		LUm – Luvizem modální
Regosoly:		RGr – Regozem arenická
Fluvisoly:		FLg – Fluvizem glejová

Obrázek 17 Legenda k obrázku 16

Referenční třída **Kambisoly** je prezentována především půdním typem Kambizem, který převažuje ve vyšších polohách povodí, a v malé míře jsou v okolí Kolečovic a Mutějovic zastoupeny půdním typem Pelozem.

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 (dále jen HSP) (Váška, 2007). Půdní typ Pelozem se podle vyhlášky MZe 327/1998 Sb. (1998), kterou se stanoví charakteristika bonitovaých půdně ekologických jednotek a postup pro jejich vedení a aktualizaci, řadí do hlavní půdní jednotky 20, která je dle Vášky (2007) zařazena do skupiny D HSP, což značí velmi málo propustné půdy s rychlostí infiltrace menší než 0,02 mm/min.

Luisoly, které se obecně vytvářejí v teplejších klimatických podmínkách na neuzpevněných sedimentech, jsou v povodí zastoupeny především půdním typem Hnědozem a Luvizem, kdy výrazně více je plošně zastoupena Hnědozem.

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 (Váška, 2007).

V pravobřežní části povodí Lišanského potoka se významně vyskytují Regosoly, které vznikají z neuzpevněných sedimentů, zejména písků a stěrko-písků. V zájmové lokalitě jsou to především písčité stěrky terciérních sedimentů. Jediným půdním typem je Regozem a na povodí je zastoupen půdním subtypem Regozem arenická.

Půdy arenického subtypu lze podle Vyhlášky MZe (1998) řadit do hlavní půdní jednotky č. 21, které lze z pohledu HSP zařadit do skupiny A, což jsou půdy s vysokou rychlostí infiltrace, vyšší než 0,12 mm/min (Váška, 2007).

V údolních nivách v blízkosti vodních toků je po celém povodí výrazný výskyt půdního typu Fluvizem patřící do referenční třídy Fluvisoly.



Podle Vyhlášky MZe (1998) lze tyto půdy řadit do hlavní půdní jednotky (HPJ) 58 nebo v polohách s těžším substrátem do jednotky 74. Půdy řazené do HPJ 58 jsou zařazeny dle Vášky (2007) do HSP B-C, což znamená půdy se střední až nízkou rychlostí infiltrace v rozsahu od 0,02 do 0,12 mm.min<sup>-1</sup>. Půdy z HPJ 74 nelze přesně zařadit do HSP z důvodu dlouhodobého převlhčení a rozmanitosti zrnitostního složení. U těchto půd lze s ohledem na jejich vlastnosti předpokládat nízké hodnoty infiltračních rychlostí (od 0,02 do 0,06 mm.min<sup>-1</sup>).

Referenční třída Leptosoly je prezentována půdním typem Pararendzina s jediným půdním subtypem Pararendzina arenická.

Pararendzinu arenickou lze řadit do HPJ 21, kam patří půdy arenického subtypu. Této HPJ je přiřazena skupina A HSP, která zahrnuje půdy s vysokou rychlostí infiltrace, vyšší než 0,12 mm/min (Váška, 2007). Tento půdní subtyp se však může lokálně vyskytovat i na středních substrátech, kde rychlost infiltrace vlivem vlastností podloží klesá a může vykazovat charakteristiky HSP B.

Hydrologické skupiny půd HSP jsou na povodí Rakovnického potoka rozmístěny dle **obrázku 4**.

### 5.3 *Klimatické poměry*

Pro popis klimatických poměrů jsou z hlediska hydrologie nejpodstatnější údaje o atmosférických srážkách a teplotách vzduchu. V této kapitole jsou uvedeny zejména základní poznatky, získané z monografie Podnebí ČSSR (Hydrometeorologický ústav, 1961), která je založena na zhodnocení pozorovaných řad z období 1901–1950, pro srážky byla použita i mapa ze staršího zpracování dat z období 1876–1925 (Dratva, 1943).

Vzhledem k tomu, že v současné době je i na posuzovaném povodí patrné významné zvyšování teplot vzduchu, je ve VÚV Praha, v.v.i. zkoumání trendů teplot vzduchu i změnám srážkového režimu v období 1961–2008 věnována zvýšená pozornost a zabývá se jí samostatná část práce (Kašpárek, 2010). Volba tohoto období souvisí s tím, že pro ně jsou v databázích ČHMÚ k dispozici řady denních veličin.

#### 5.3.1 **Atmosférické srážky**

Dlouhodobé průměrné úhrny srážek ve stanicích na povodí Rakovnického potoka nad Rakovníkem z období 1875–1925, 1901–1950 a 1961–2008 jsou uvedeny v **tabulce 6**, rozmístění stanic je na **obrázku 18**.

V dolní části **tabulky 6** jsou průměry pro povodí, přepočtené podle gradientu lineárního regresního vztahu mezi nadmořskou výškou stanice a průměrným ročním úhrnem, který je zobrazen na **obrázku 19**. Průměrná nadmořská výška povodí byla použita shodně jako při zpracování katastru vodnosti ČHMÚ 407 m n. m. (Kašpárek, 2010)

Rozdíly dlouhodobých průměrných výšek srážek pro posuzovaná období jsou velmi malé, pokles mezi obdobími 1901–1950 a 1961–2008 je jen 1,3 %. Z hlediska

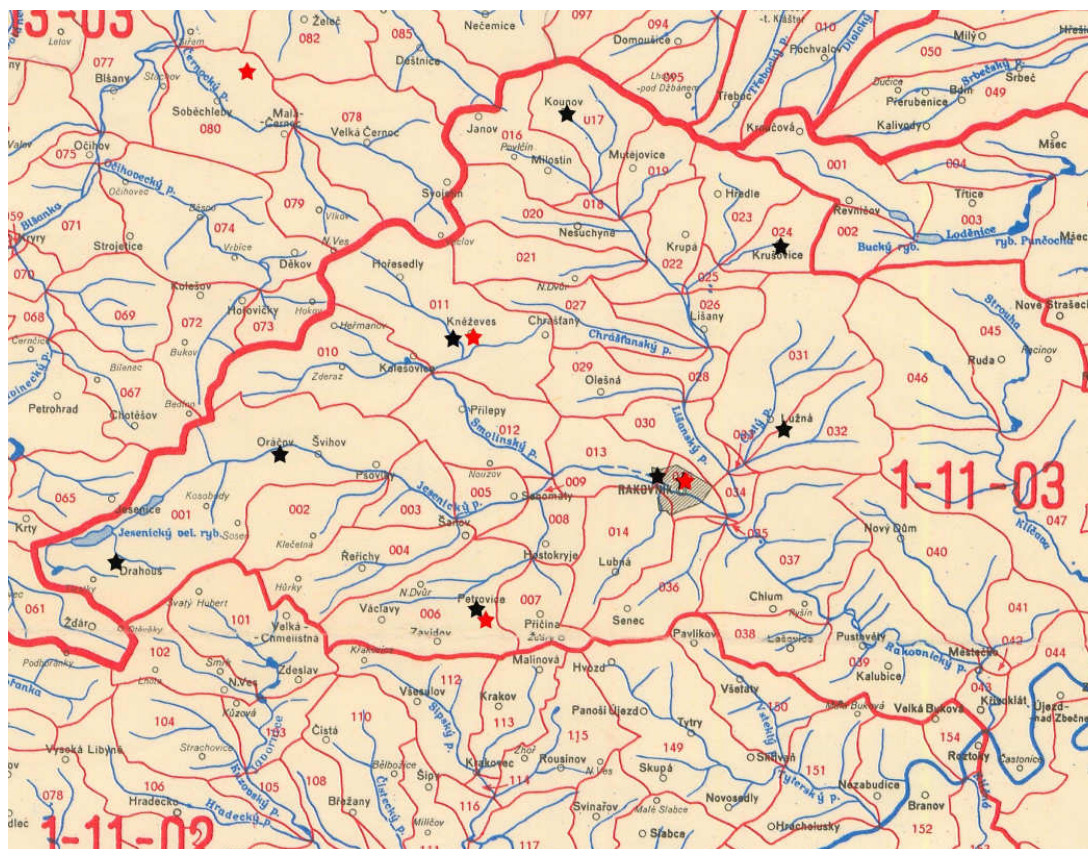


dlouhodobých ročních výšek srážek na povodí Rakovnického potoka zřejmě nedošlo k žádným významným změnám. Výjimkou je pokles srážek ve stanici Kounov mezi obdobími 1901–1950 a 1961–2008 o 47 mm tj. o 8,3 %.

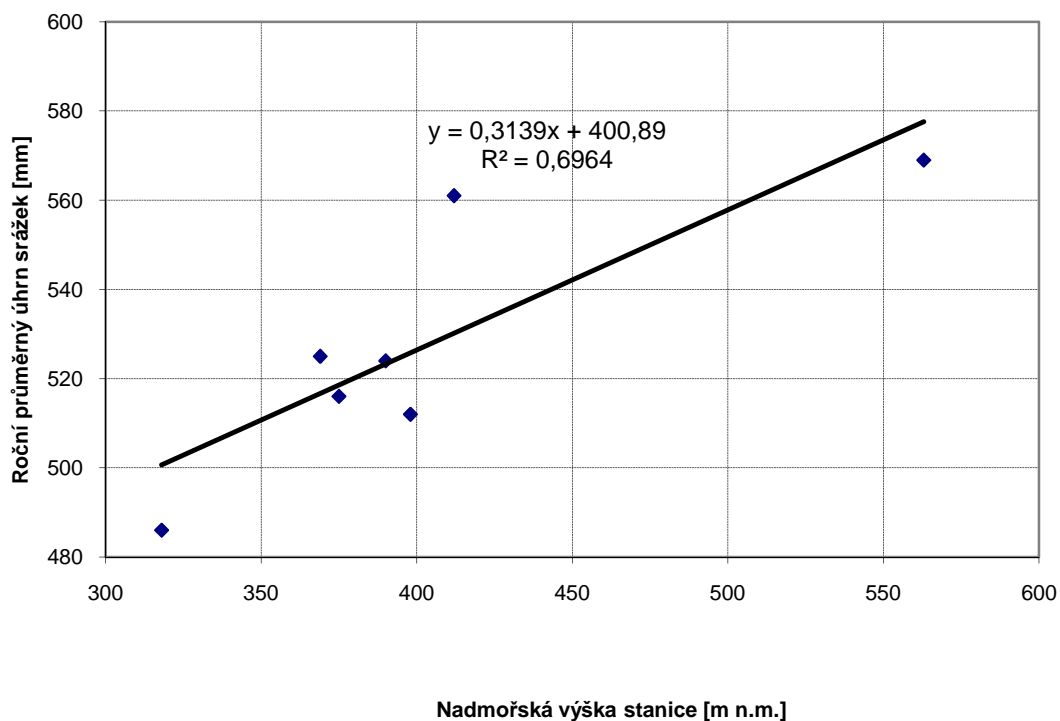
Stanice	nadmořská výška [m n.m.]	průměrný roční úhrn srážek [mm]		
		1876–1925	1901–1950	1961–2008
Kounov	412		561	514
Krušovice	390	513	524	534
Drahouš	563	594	569	
Petrovice	398	508	512	
Oráčov	375		516	508
Lužná	369	527	525	
Rakovník	318	491	486	491
<b>průměr pro období</b>				
1875–1925	408	527	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

**Tabulka 6** Dlouhodobé průměrné úhrny srážek ve stanicích na povodí Rakovnického potoka nad Rakovníkem (Kašpárek, 2010)

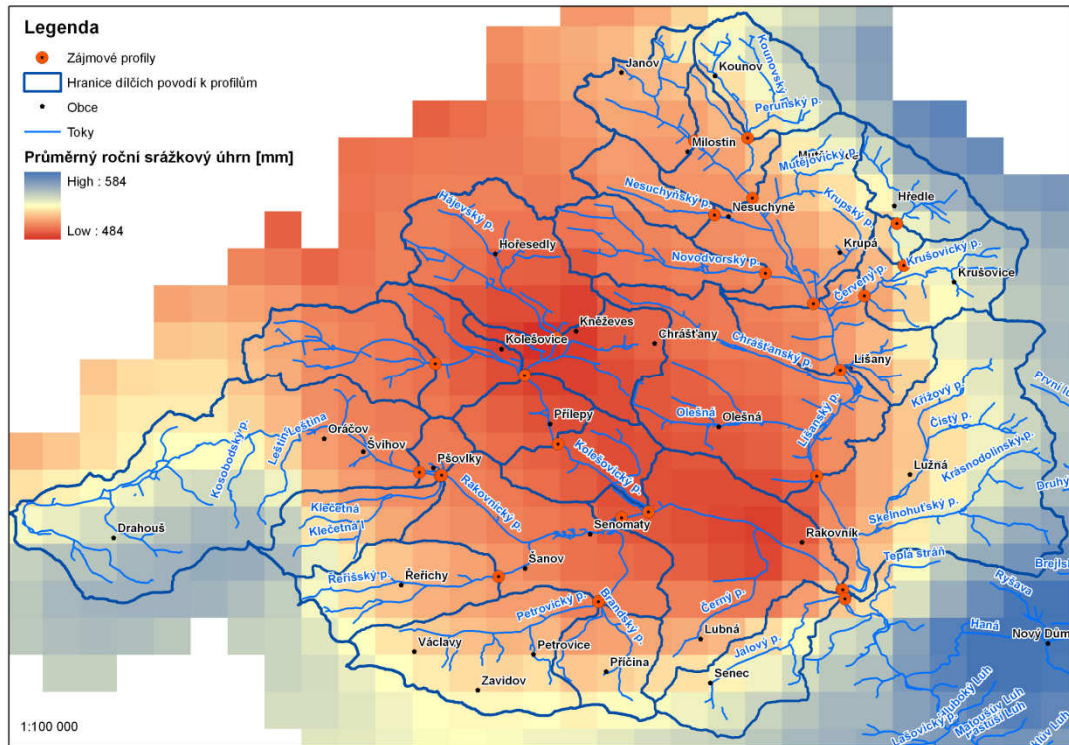
Podle grafu na **obrázku 19** lze usuzovat, že i na povodí Rakovnického potoka není plošná proměnlivost dlouhodobých úhrnů srážek zanedbatelná. Pro její popis bylo ve VÚV T.G.M, v.v.i. použito nejnovější zpracování v gridové síti GIS, jejíž autorem je ČHMÚ. To vychází z dat z období 1960–2005, které bylo zvoleno jako základní pro nově zpracováváný katastr vodnosti. Závislost srážkového úhrnu na nadmořské výšce je patrná i z mapy plošného rozložení srážek (**obrázek 20** i **obrázek 21**). Rozmezí ročních úhrnů srážek je 484–584 mm. Roční srážkové úhrny vyčíslené pro jednotlivá subpovodí jsou vyznačeny na **obrázku 21**. Srážkové úhrny jsou nejnižší pro subpovodí nacházející se v severo-západní části povodí, zejména na subpovodích Kolečovického potoka, na kterých jsou (kromě horní části Kolečovického potoka) úhrny srážek nižší než 500 mm. Naopak, v jižní části povodí dosahují srážky na jednotlivá subpovodí úhrnů nad 510 mm. Subpovodí s nejvyššími úhrny srážek se nacházejí při severo-východním okraji povodí (subpovodí Kounovského a Krušovického potoka) s ročními úhrny nad 530 mm.



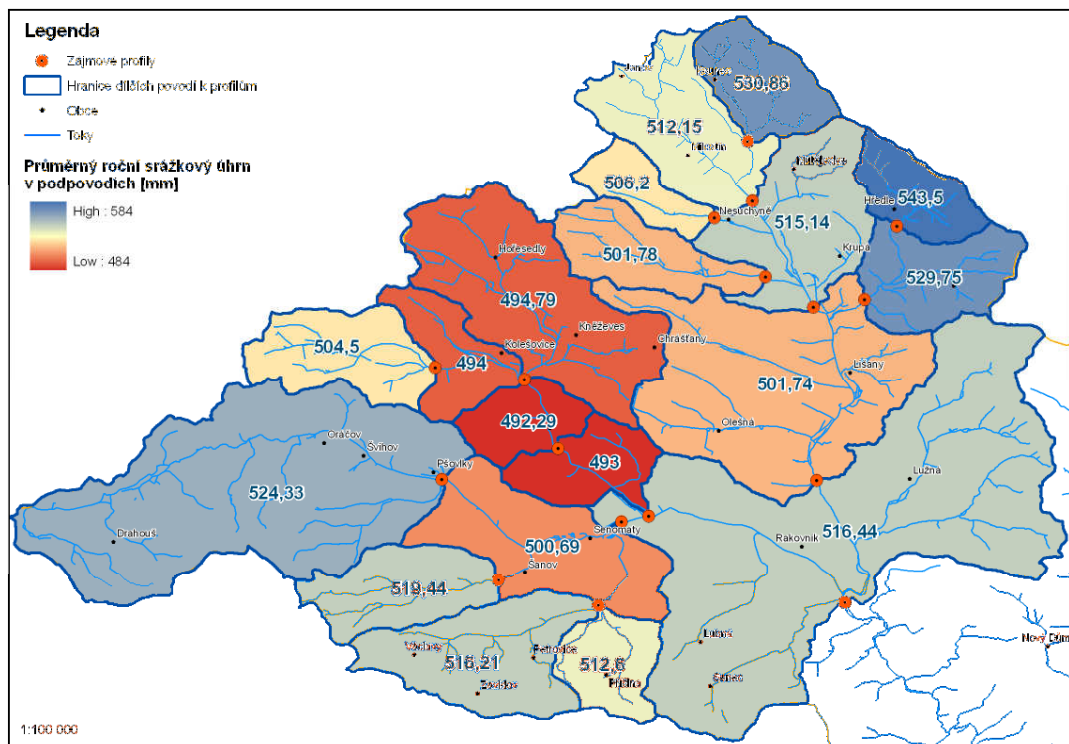
Obrázek 18 Srážkoměrné stanice (černá hvězdička) a klimatické stanice (červená hvězdička) (Kašpárek, 2010)



Obrázek 19 Vztah mezi nadmořskou výškou srážkoměrné stanice a dlouhodobým průměrným úhrnem srážek (Kašpárek, 2010)



Obrázek 20 Plošné rozložení průměrných ročních úhrnů srážek za období 1960-2005 (Kašpárek, 2010)



Obrázek 21 Průměrné roční úhrny srážek pro jednotlivá subpovodí (Kašpárek, 2010)

### 5.3.2 Teploty vzduchu

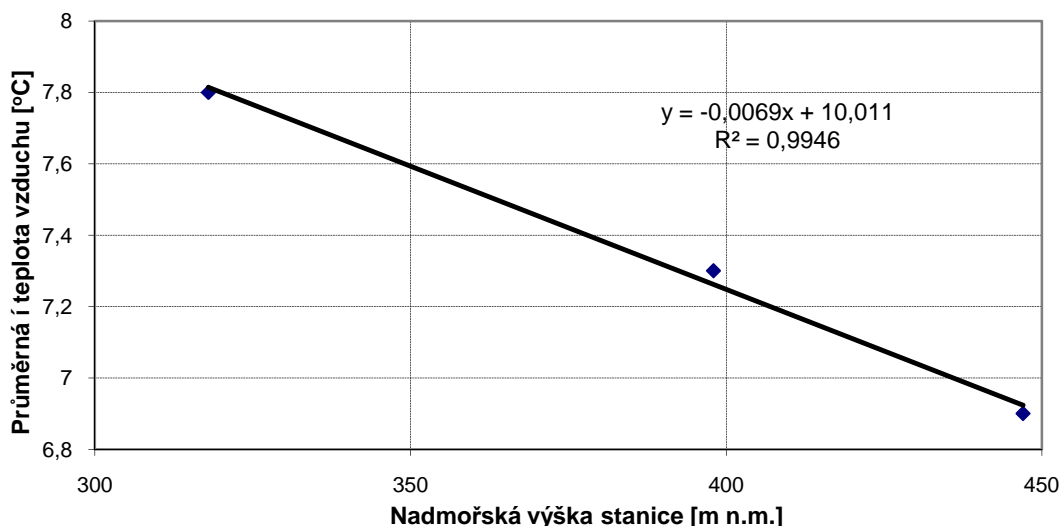
Sít klimatických stanic je mnohem řidší, než síť stanic srážkoměrných. Pro období 1901–1950 jsou k dispozici z povodí Rakovnického potoka údaje pro klimatické stanice Petrovice a Rakovník. V současné době na tomto povodí pozoruje (od roku 1995 stanice Kněževes). Pro zpracování vztahu mezi nadmořskou výškou a teplotou byly použity i údaje ze stanice Lány, která leží mimo posuzované povodí (Kašpárek, 2010).

Průměrné teploty z období 1901–1950 obsahuje **tabulka 7**, vztah mezi nadmořskou výškou a průměrnou roční teplotou vzduchu je na **obrázku 22**. Pro průměrnou nadmořskou výšku povodí by podle tohoto vztahu byla průměrná dlouhodobá teplota na povodí Rakovnického potoka nad Rakovníkem cca 7,2 °C. (Kašpárek, 2010)

Průměrná teplota z pozorování klimatické stanice Kněževes z období 1995-2008 je 8,5 °C, podle vztahu na **obrázku 22** by pro nadmořskou výšku stanice (podle ČHMÚ 358 m n.m.) byla v období 1901–1950 cca 7,5 °C. Na povodí Rakovnického potoka jsou tedy v současnosti teploty podstatně vyšší, než v první polovině dvacátého století. (Kašpárek, 2010)

Stanice	nadmořská výška [m n.m.]	průměrná teplota [°C]
Petrovice	398	7,3
Rakovník	318	7,8
Lány	447	6,9

**Tabulka 7** Dlouhodobé průměrné teploty v klimatických stanicích na povodí Rakovnického potoka nad Rakovníkem a ve stanici Lány za období 1901–1950 (Kašpárek, 2010)



**Obrázek 22** Vztah mezi nadmořskou výškou stanice a průměrnou teplotou vzduchu v období 1901-1950 (Kašpárek, 2010)



## 5.4 Hydrologické poměry

V databázi ČHMÚ je z povodí Rakovnického potoka k dispozici řada průměrných denních průtoků od roku 1970. Po průzkumu archivních dat ČHMÚ bylo VÚV T.G.M., v.v.i. zjištěno, že zatímco v Rakovníku pozorovaly v období před rokem 1970 dvě vodoměrné stanice, probíhalo i další pozorování na horním toku v Jesenici. Na přelomu 18. a 19. století byly vodní stavy pozorovány ve stanici Křivoklát. Výsledkem činnosti VÚV T.G.M., v.v.i. a vyčíslení průtoků ve stanici Rakovník v období 1966–1969 jsou data, jejichž rozsah je uveden v **tabulce 8**. Rozmístění vodoměrných stanic je znázorněno například na **obrázku 12**.

Stanice	Plocha povodí [km <sup>2</sup> ]	Období pozorování vodních stavů	Vyhodnoceny průtoky
Jesenice	cca 4	IV.1965–IV.1970	ano
Rakovník - lávka	cca 163	IV.1965–III.1970	ano
Rakovník - soutok, Rakovník č.1901	302,3	III.1965–2009	ano, od roku 1966
Křivoklát	cca 368	1989–1929	ne

**Tabulka 8** Přehled vodočetných pozorování v povodí Rakovnického potoka (Kašpárek, 2010)

Při odvozování hydrologických charakteristik pro základní dílo československé hydrologie – Hydrologické poměry III (Hydrometeorologický ústav, 1970) nebyla žádná průtoková řada z povodí Rakovnického potoka k dispozici. V roce 1985, kdy bylo dokončeno další systematické zpracování hydrologických charakteristik pro období 1931–1980, byla využita jen poměrně krátká pozorovaná řada průtoků Rakovnického potoka v Rakovníku s počátkem v roce 1970.

Charakteristiky dlouhodobé hydrologické bilance, m-denní a N-leté průtoky podle publikace Hydrologické poměry III (Hydrometeorologický ústav, 1970) jsou uvedeny v **tabulkách 9–11**.

Tok	profil	plocha povodí [km <sup>2</sup> ]	roční výška srážek [mm]	roční výška odtoku [mm]	rozdíl výšky srážek a odtoku [mm]	průtok [m <sup>3</sup> /s]	specifický průtok [l/s/km <sup>2</sup> ]
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

**Tabulka 9** Charakteristiky hydrologické bilance podle Hydrologických poměrů III (Hydrometeorologický ústav, 1970)



Tok	Profil	překročení dnů 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

Tabulka 10 M - denní průtoky podle Hydrologických poměrů III (Hydrometeorologický ústav, 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

Tabulka 11 N - leté průtoky podle Hydrologických poměrů III (Hydrometeorologický ústav, 1970)

V tabulkách nejsou uvedena data pro vodoměrnou stanici Rakovník (plocha povodí cca 302 km<sup>2</sup>), ta se však jen velmi málo odlišují od profilu Rakovnický potok pod Lišanským potokem (plocha povodí cca 293 km<sup>2</sup>). To však platí jen pro neovlivněné průtoky, v současné době jsou průtoky ve vodoměrné stanici větší nejen o příspěvek z mezipovodí, ale také o poměrně významný výtok z čistírny odpadních vod (ČOV) Rakovník. (Kašpárek, 2010)

V tabulce 12 jsou uvedeny průměrné roční výšky srážek, průměrné roční výšky odtoku a další charakteristiky použité pro období 1931–1960 a 1931–1980 a vypočtené z aktuálně vyhodnocených pozorovaných řad pro období 1966–2008 a 1988–2008. Změny ve srážkách nejsou příliš velké, změny odtokových výšek jsou však značné. V posledním z uvažovaných období 1988–2008 je výška odtoku jen 53 % hodnoty odvozené pro období 1931–1980. (Kašpárek, 2010)

Vyčísleno podle dat z období	průměrná roční výška srážek [mm]	průměrná roční výška odtoku [mm]	rozdíl výšky srážek a odtoku [mm]	průměrný průtok [m <sup>3</sup> /s]	specifický průměrný průtok [l/s/km <sup>2</sup> ]
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

Tabulka 12 Charakteristiky hydrologické bilance Rakovnického potoka ve vodoměrné stanici Rakovník v různých obdobích (Kašpárek, 2010)





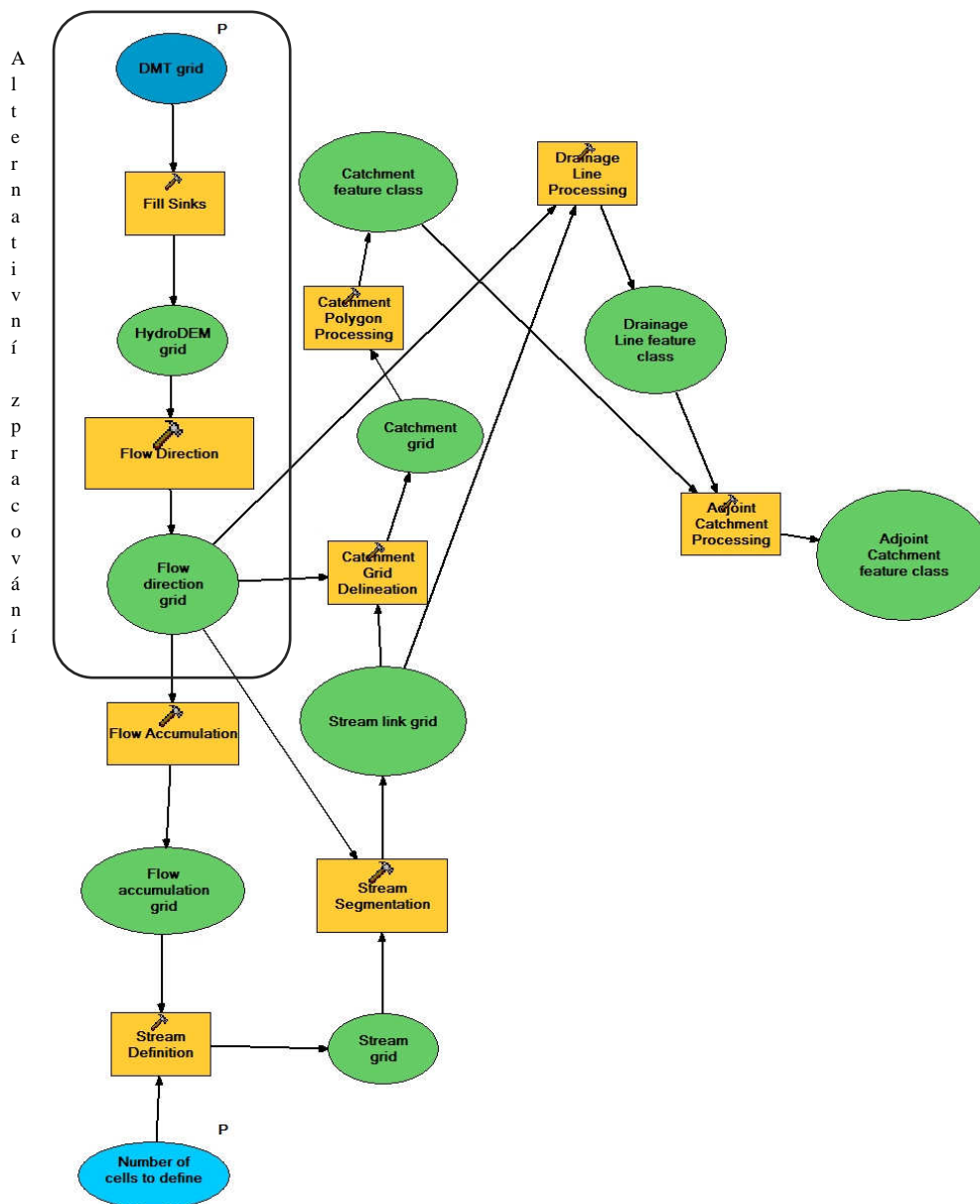
## 6 Metodika

### 6.1 *Předzpracování DMT*

Při stanovení rastru HydroDEM byl zvolen následující postup. Nejprve bylo provedeno základní předzpracování bez vstupu již známých dat a tento výsledek byl porovnán s daty reprezentujícími současný stav. Vzhledem k tomu, že výsledek nebyl dle očekávání, bylo vyzkoušeno zpracování pomocí dalších procesů, které umožňují přizpůsobit výsledný HydroDEM aktuálnímu známému stavu, aby výsledný model co nejvíce odpovídal realitě.

#### 6.1.1 **Základní předzpracování terénu**

Základní předzpracování terénu zahrnuje pouze zpracování DMT bez použití dalších informací. Dráhy povrchového odtoku jsou tedy určeny výhradně z charakteristik DMT. Na **obrázku 23** je znázorněn postup výpočtu pomocí aplikace Model Builder, která je dostupná z programu ArcGIS, aplikace ArcMap. Vývoj modelu usnadňuje následné zpracování, jelikož dojde k odstranění zbytečného opakování manuálních úkolů. Model stačí po jeho realizaci pouze spustit a upravovat parametry, dokud není výsledek adekvátní. Model Builder byl použit i u dalších analýz.



**Obrázek 23** Model základního předzpracování terénu pomocí aplikace Model Builder v programu ArcGIS

Definování směru toku (vytvoření rastrové vrstvy *Flow Direction GRID*) je poměrně jednoduchý proces. Prvním krokem je vyplnění terénních propadů s využitím nástroje *Fill Sinks*, který je součástí nástrojů extenze ArcHydro („Terrain Preprocessing -> DEM Manipulation“). Touto funkcí je zajištěno, že jsou všechny propady v původním terénu plné, a že všechna voda z povodí směřuje do systému vodotečí. Funkce generuje tzv. *filled DEM*, který může být v této fázi nazván HydroDEM.

Po identifikaci a vyplnění terénních propadů může být stanoven směr proudění pomocí funkce *Flow Direction*, která se nachází v ArcHydro menu pod záložkou „Terrain Preprocessing“. Tato funkce generuje grid, který pro každou buňku (pixel) definuje nejstrmější sestupný směr založený na osmi sousedních buňkách (tzv. metoda D8) (Djokic, 2008). Grid směru proudění by měl nabývat pouze 8 hodnot (1,



2, 4, 8, 16, 32, 64 a 128) (ESRI, 2009). Pokud tomu tak není, je to známkou toho, že nebyly všechny propady vyplněny úspěšně.

Výše popsaný postup až po určení rastrové vrstvy *Flow Direction* je na **obrázku 23** určen jako tzv. Alternativní zpracování, tzn., že v této části bude docházet v dalších krocích ke změnám, které budou definovány dále v textu. Definování základního schématu odtoku vody z území bude ve všech krocích stejný, proto bude kopírováno.

Stanovení základního systému odvodnění území může být započato, jakmile byly vyplněny propady terénu a stanoven směr proudění. Zbytek kroků terénního předzpracování následuje v tomto pořadí:

- 1) *Flow Accumulation* – vytváří gridovou vrstvu, kde je pro každou buňku, ve které se akumuluje voda, spočítáno množství výše ležících buněk, kterými akumulovaná voda v průběhu odtoku proteče.
- 2) *Stream Definition* – definuje buňky, které budou považovány jako vodoteče. Buňkami vodotečí jsou stanoveny ty, ve kterých je akumulována voda z uživatelsky stanovené plochy. Standardně se udává mezní hodnota, která je rovna 1% maximální hodnoty gridu *Flow Accumulation*. Ideální je tuto mezní hodnotu definovat v rozmezí 0,5% – 1% maximální hodnoty *Flow Accumulation* (ESRI, 2009). Pro určení buněk vodotečí v případě povodí Rakovnického potoka byla po experimentálním vyhodnocení použita hodnota 0,5 %.
- 3) *Stream Segmentation* – provede přiřazení unikátních čísel jednotlivým segmentům toků mezi soutoky.
- 4) *Catchment Grid Delineation* – identifikuje rozvodnice pro každý segment toku ve formátu rastru.
- 5) *Catchment Polygon Processing* – převede rastrové rozvodnice do vektorové třídy geoprvků.
- 6) *Drainage Line Processing* – převede segmenty vodotečí do vektorové třídy geoprvků.
- 7) *Adjoint Catchment Processing* – určuje kumulaci vody přitékající ze sousedních subpovodí. Postupuje směrem proti proudu. Výsledkem je vektorová třída geoprvků.

Všechny tyto kroky jsou vykonány nástroji stejného názvu dostupnými v toolboxu Arc Hydro tools v menu „Terrain Preprocessing“.

## 6.2 Úprava základního odtokového schématu

### 6.2.1 Vymezení současného známého stavu systému vodotečí

Pokud je systém proudění vody krajinou známý (jsou k analýze k dispozici data reprezentující vodoteče) a není shodný se vzorově vytvořeným systémem vodotečí vygenerovaným z DMT, může být do DMT zakomponován aktuální stav proudění vody vodními toky. Metodika je známá jako tzv. „vypálení“ toků.



Ve většině případů se tahle technika používá především v nížinatém reliéfu, kde metoda D8 generuje nepřírozené výsledky. Pro povodí Rakovnického povodí byla tato metoda experimentálně použita s tím, že výsledek v případě nedokonalých výsledků nebude pro export do HEC-HMS využit.

V nástrojích ArcHydro tools je funkce uvedena pod názvem „DEM Reconditioning“ a je přístupná z menu „Terrain Preprocessing -> DEM Manipulation“.

Před spuštěním nástroje a „vypálením“ do DMT by mělo dojít k pročištění vstupní vrstvy vodních toků. Tento pročištěný soubor údajů by měl:

- a) mít pouze hlavní koryta, tzn., že by mělo dojít k odstranění copánků
- b) být dendritický
- c) být rozšířen v případě nutnosti o údaje přesahující hranici vymezeného území.

V případě aplikace v povodí Rakovnického potoka byla jako zdrojová vrstva vodních toků použita vrstva hrubých úseků vodních toků z databáze DIBAVOD, což je Digitální Báze Vodohospodářských Dat vytvořená primárně z odpovídajících vrstev ZABAGED. Tato datová vrstva je poskytována zdarma ve formátu ESRI a splňuje všechna kritéria.

Proces zpřesnění DMT vodními toky je v ArcHydro tools implementací tzv. „AGREE“ metody, která byla vyvinuta Univerzitou Texas v Austinu v roce 1997 (Hellweger, 1997). Tento proces je korigován změnou tří vstupních parametrů. Získání přijatelných výsledků může vyžadovat několik iterací. V povodí Rakovnického potoka byly použity tyto parametry:

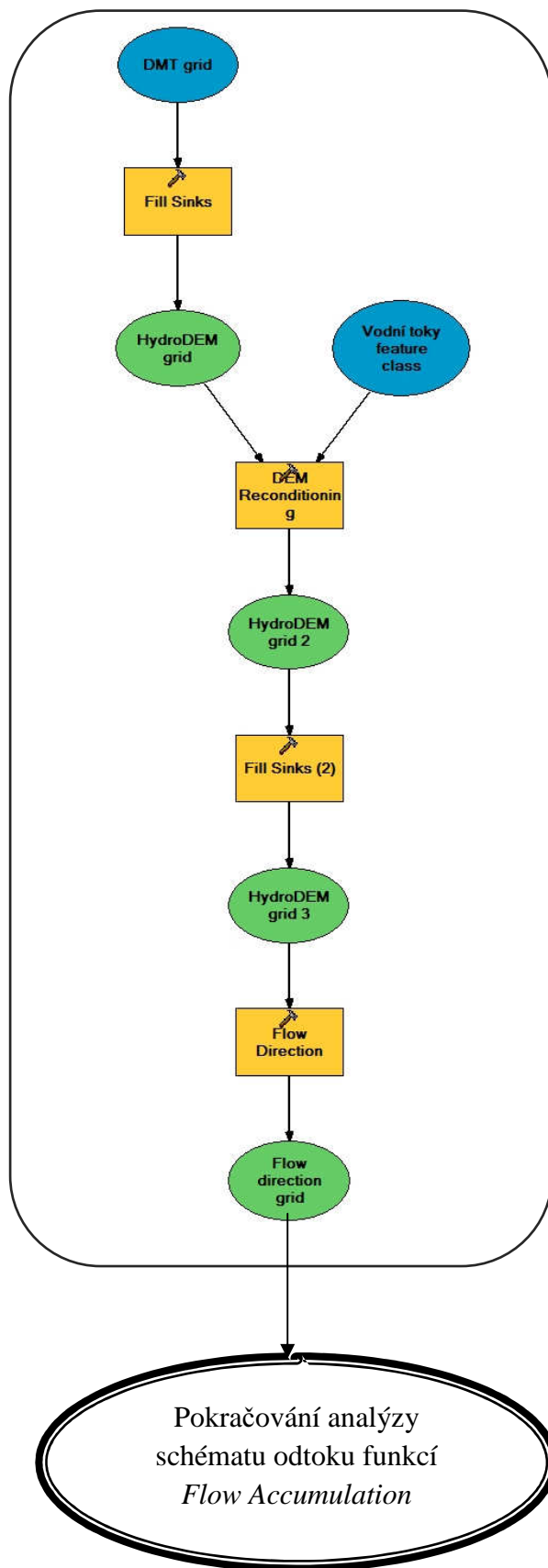
<i>Stream buffer (no of cells).....</i>	1
<i>Smooth drop/raise (DEM Z-unit)...</i>	10
<i>Sharp drop/raise (DEM Z-unit)...</i>	100

Po dokončení průběhu výpočtu funkce je opět nutné zkontrolovat vznik případných depresí terénu, které je nutné eliminovat.

Proces je popsán na diagramu z aplikace Model Builder (**obrázek 24**).



Alternativní zpracování



Obrázek 24 Model vymezení současného známého systému vodotečí do hydrologicky korektního DMT



## 6.2.2 Vymezení proudění přes vodní plochy

Pokud jsou v systému prezentovány vodní nádrže, mohou to být buď uzavřené pánve (v jezeře se koncentruje veškerý odtok v povodí), nebo průtočné nádrže a jezera. Jakmile je vodní plocha vyprazdňována vodotečí, je samozřejmě předpokládáno, že veškerá voda z jezera bude odtékat právě vodním tokem. Takové chování však není zaručeno předzpracovaným DMT. Především u velkých vodních ploch, kde může metoda D8 generovat více různých paralelních drah povrchového odtoku. Pro tyto účely byl použit nástroj *Adjust Flow Direction in Lakes* dostupný z menu „Terrain Preprocessing“.

Před spuštěním nástroje musí být k dispozici vrstva známých vodotečí a vodních ploch. Funkcí jsou zpracovány pouze ty, které nádrží či jezerem protékají. Pro modelování platí předpoklad, že vodní tok má pouze jeden vstup do vodní nádrže a zároveň pouze jeden výstup z ní. V případě, že tento předpoklad neplatí, může nástroj generovat neočekávané výsledky.

Tato funkce slouží ke změně již existující gridové vrstvy směru proudění, na rozdíl od nástroje z předcházející kapitoly, který mění DMT. Vstupem do funkce je tedy rastr směru proudění (Flow Direction Grid) buď po absolvování procedury z kapitoly 6.2.1, nebo vygenerovaný funkcí *Flow Direction*.

Průběh aplikace procesu na povodí Rakovnického potoka je opět znázorněn na diagramu (obrázek 25).

## 6.2.3 Definování známých rozvodnic

V dnešní době jsou většinou hranice rozvodnic pro daná povodí známá. Může se stát, že DMT nereflexuje očekávaný průběh rozvodnic pro zájmové povodí. Předzpracovávání terénu však umožňuje upřesnění hranic povodí v modelu jakýmsi pomyslným vybudováním zdí v DMT. Je to koncepčně stejný proces, jaký je použit při tzv. „vypálení“ toků (viz kapitola 6.2.1), s tím rozdílem, že v prvním případě jde spíš o stlačení do terénu, kdežto nyní se jedná o vyvýšení, „oplocení“.

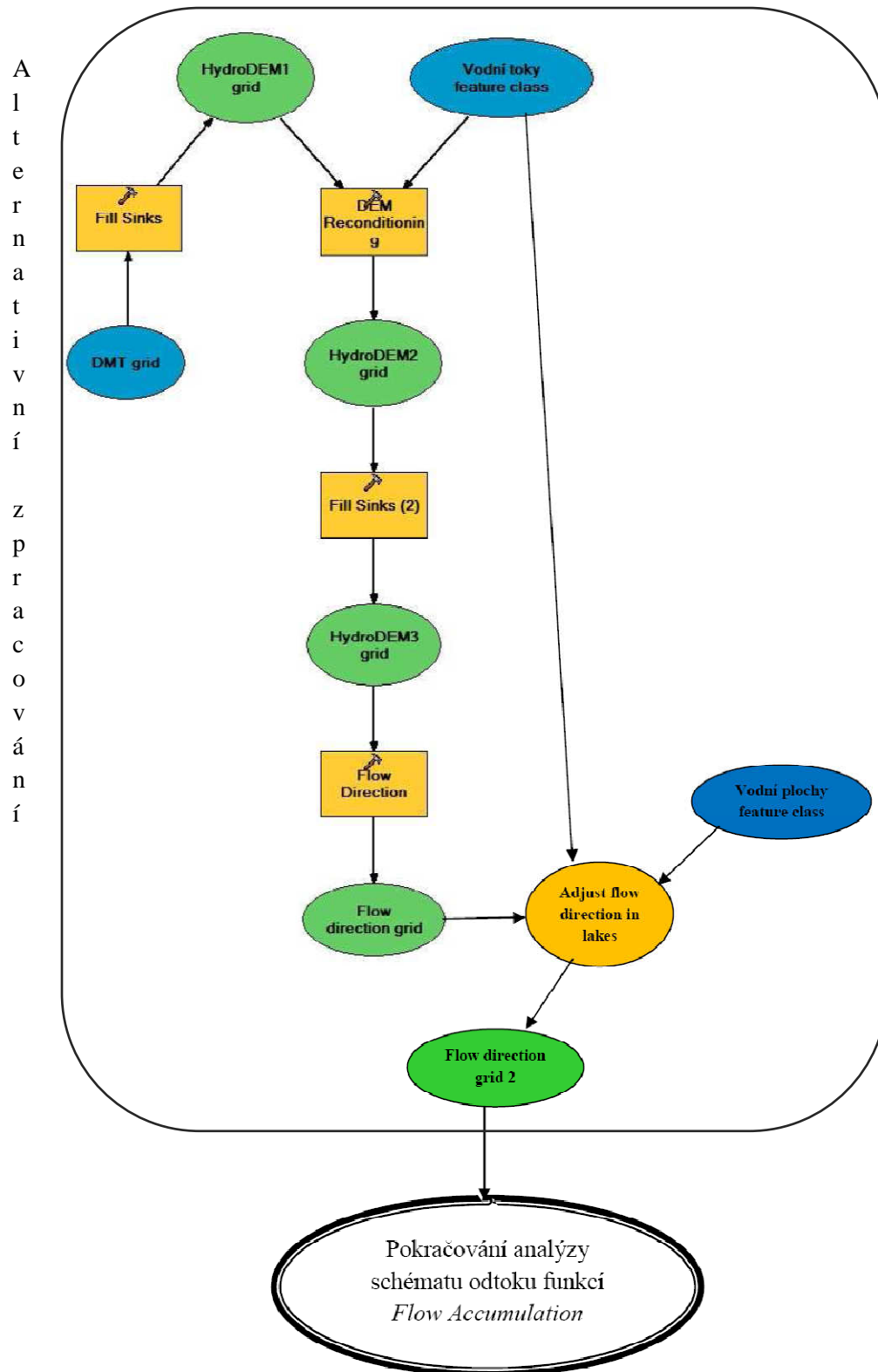
Ke zpracování diplomové práce byla poskytnuta mj. i vrstva rozvodnic pro jednotlivé měřicí stanice ve formátu ESRI. Tato metoda umožňuje dodržení hranic při zpracování hydrologicky korektního modelu povodí Rakovnického potoka. Nástroj umožňuje vymezení dvou příkladů tzv. „zdí“:

- a) vnější – definují hranice hlavního rozvodí, jakýkoliv terén mimo tuto hranici nepřispěje k odtoku v povodí
- b) vnitřní – poskytují vnitřní rozdělení hlavního rozvodí na dílčí subpovodí. Vybudování vnitřních stěn může přispět k plynulosti a výstupu z povodí prostřednictvím vodního toku protékajícího uzávěrovým profilem.

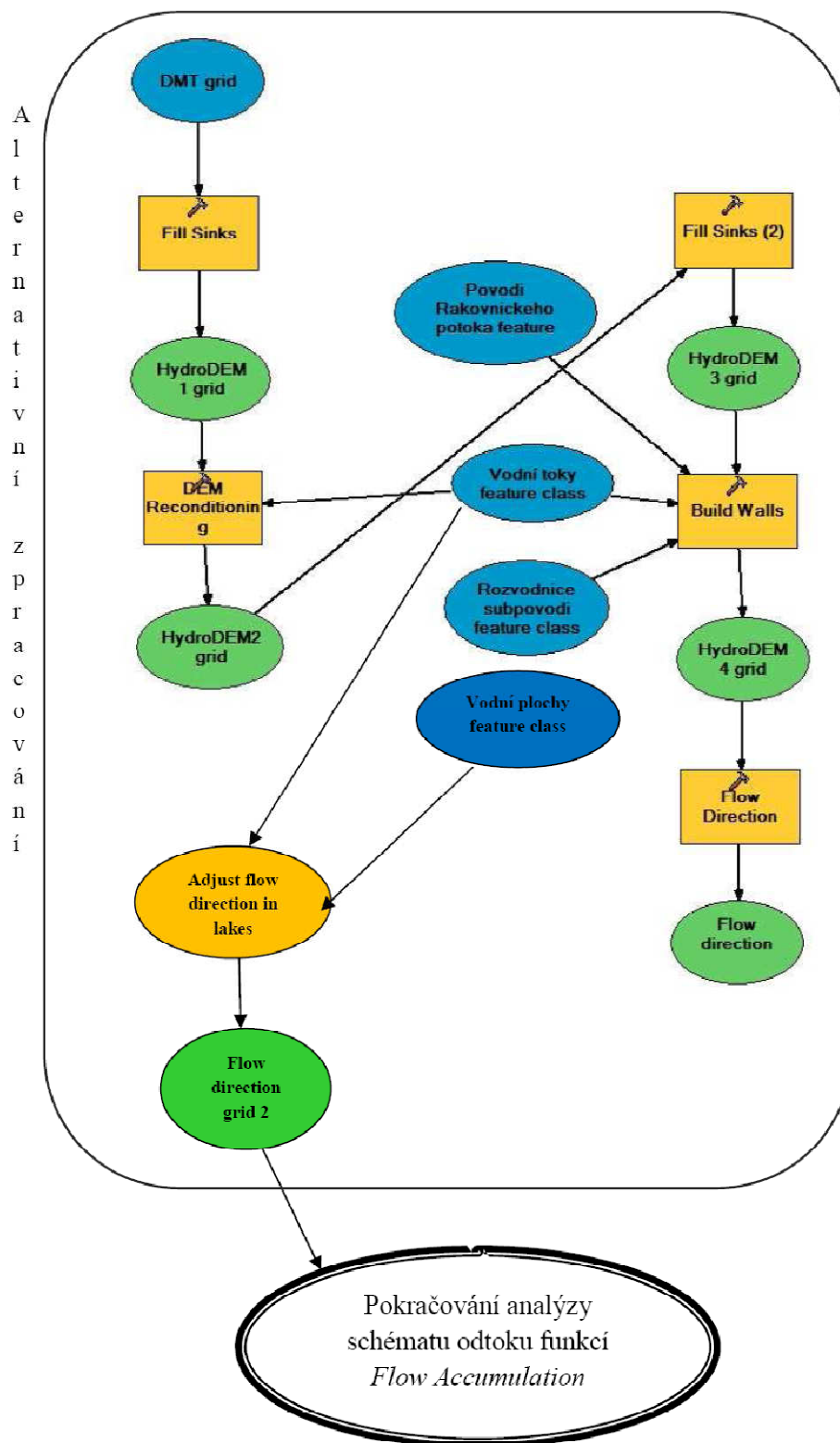
K tomu, aby se mohla voda dostat z ohraničených oblastí, musí být specifikována místa odtoku, na kterých budou tyto „zdi“ přerušeny. V povodí Rakovnického potoka jsou těmito místy považovány střety sítě vodotečí s rozvodnicemi.

V nástrojích ArcHydro je tento proces možno spustit pod názvem *Build Walls* z menu „Terrain Preprocessing -> DEM Manipulation“.

Aplikace tohoto postupu na modelu povodí Rakovnického potoka je popsána na diagramu na **obrázku 26**.



**Obrázek 25** Model vymezení proudění přes vodní plochy



Obrázek 26 Model obsahující mj. definování známých rozvodnic v DMT

#### 6.2.4 Vymezení rozdělení toků

Pro zájmové území nebylo vymezení rozdělení toků provedeno.





### 6.2.5 Porovnání a stanovení vhodného HydroDEM

Jednotlivé popsané postupy vedly k vygenerování různých variant HydroDEM. Pro následné zpracování je nutné posouzení výsledků jednotlivých variant a výběr, případně zkombinování modelů, pro následující procedury.

Pro modelování maximálních průtoků byl vybrán původní výsledek popsaný v kapitole 6.1.1. Ten sice nebere v potaz data vyjadřující skutečný průběh vodních toků a ani rozvodnice nejsou v stoprocentním souladu s dodanými daty, nicméně pro účely modelování v hydrologickém programu HEC-HMS generuje dostačující výsledky, které se navíc dají postupem popsaným v následující kapitole upravit a přiblížit tak současnému stavu.

Ostatní metody byly sice přesnější na vstupní data, nicméně výsledky předzpracování nebyly dobré. Vznikaly bezodtoká subpovodí, systém vodotečí na sebe nebyl dendriticky napojen, metoda D8 generovala také nepřirozené výsledky, což je pro další výpočty nežádoucí. Navíc při definování rozvodnic není umožněna změna a rozdělení dílčích subpovodí, což je v rozporu s použitou metodikou.

### 6.3 Příprava schématu povodí a vytvoření modelu pro HEC-HMS

Po zpracování hydrologicky korektního digitálního modelu terénu (HydroDEM), ze kterého vycházejí analýzy povodí, následuje proces přípravy schematického znázornění povodí známého z prostředí programu HEC-HMS. Softwarové rozšíření programu ArcGIS, tzv. HEC-geoHMS, umožňuje mimo sestavení HydroDEM také přípravu dat a výpočet některých parametrů importovatelných přímo do hydrologického programu HEC-HMS, kde budou probíhat výpočty a rekonstrukce jednotlivých srážko-odtokových událostí.

Prvním krokem je samozřejmě založení nového projektu. Menu „HMSProject Setup“ dostupné z hlavního panelu extenze HEC-geoHMS je zodpovědné za získávání dat, které budou použity k vypracování nezbytných informací pro vytvoření HEC-HMS projektu.

Oblast projektu je definována specifikací kontrolní bodu, který v našem případě reprezentuje uzávěrový profil dílčího subpovodí, případně i celého povodí. Zpravidla jde o objekt měřicí stanice. Tento kontrolní bod vystupuje pod názvem *ProjectPoint* a po jeho specifikaci dojde k vygenerování rozvodnice povodí, jehož uzávěrovým profilem je právě kontrolní bod. Tím je projektu přiřazena i řešená oblast povodí. Po odsouhlasení vygenerované oblasti dojde k extrakci potřebných dat získaných při základním předzpracování HydroDEM. Tímto způsobem je možno založit i více projektů, které využijí prostředků získaných při zpracování HydroDEM.

Pro povodí Rakovnického potoka byly popsaným způsobem založeny 2 projekty. Jeden pro oblast celého povodí Rakovnického potoka a druhý pro povodí Kolečovického potoka jako reprezentativní oblasti pro stanovení kulminačních průtoků.

### 6.3.1 Revize jednotlivých subpovodí

Každý založený projekt je nutný podrobit revizi, úpravě a doplnění údajů pro jednotlivá subpovodí. Každé definované subpovodí s určeným úsekem vodního toku by mělo obsahovat body, pro které jsou potřebná měřená data či jiné informace, např. místa s měřenými průtoky, místa povodňových rizik apod. Dále použité nástroje umožní uživateli interaktivně spojit nebo rozdělit jednotlivá subpovodí, ale i vymezit subpovodí pro uživatelsky specifikovaná místa v povodí, tzv. místa zájmu.

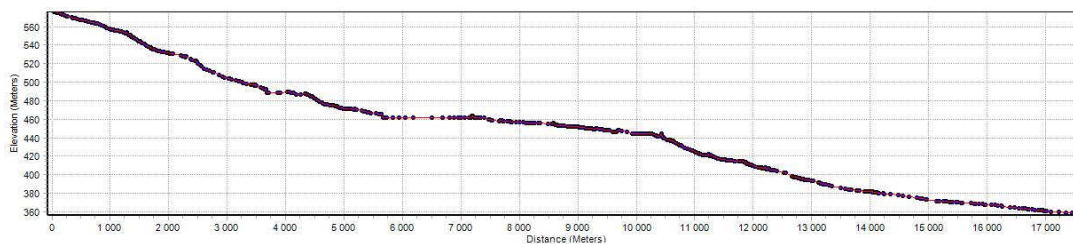
V povodí Rakovnického potoka se při sestavování modelů postupovalo následovně. Vygenerovaná subpovodí z hydrologicky korektního digitálního modelu terénu zůstala zachována, ale byla rozdělena na další subpovodí dle požadavků na umístění výstupních profilů, pro které je potřeba výpočet maximálních průtoků.

Primárním cílem diplomové práce je stanovení maximálních návrhových průtoků v objektech navrhovaných vodních nádrží, proto je nutné vymezit rozvodí náležící zájmovým profilům. K těmto účelům slouží v nadstavbě HEC-geoHMS nástroj *Basin Subdivision*. Každé subpovodí může být rozděleno na dvě části pomocí umístění zájmového bodu tlačítkem **Subbasin Divide**. To může být provedeno buď na existujícím, nebo i neexistujícím vodním toku. Pro účely diplomové práce je však předmětné pouze vymezení na existujících vodních tocích.

Použitím tlačítka **Subbasin Divide** dojde k přidání uzávěrového profilu do bodové třídy geoprvků *ProjectPoints*. Potvrzením dojde k vymezení rozvodnice pro právě přidávaný uzávěrový profil. V rámci projektu Rakovnického potoka byly přidány body reprezentující hráze navrhovaných nádrží. Díky tomu došlo k vymezení dílčích subpovodí pro jednotlivé navrhované vodní nádrže. V projektu Kolečovického potoka byly přidány body i vodních nádrží pro případné posouzení transformace povodňové vlny nádrží.

Pro každé nově vymezené subpovodí dojde také k další segmentaci vodních toků. Pro export do programu HEC-HMS je nutné, aby každým subpovodím protékal právě jeden vodní tok. Toho je docíleno použitím nástroje *RiverMerge*.

Pro každý segment vodního toku je možné zobrazit jeho profil. Pro ukázkou je na **obrázku 27** zobrazen vygenerovaný podélný profil Rakovnického potoka od jeho počátku až po uzávěrový profil celého povodí, kterým je limnigraf v Rakovnicku.



**Obrázek 27** Podélný profil Rakovnického potoka vygenerovaný funkcí *River Profile*



### 6.3.2 Výpočet charakteristik subpovodí a segmentů vodních toků

Jednou z hlavních výhod využití nadstavby HEC-geoHMS je bezpochyby možnost aplikace při výpočtech několika topografických charakteristik toků a subpovodí, které mohou být použity pro odhad hydrologických parametrů. Před odhadem hydrologických parametrů by samozřejmě měly být tyto vypočtené údaje verifikovány porovnáním s dostupnými informacemi o fyzikálních vlastnostech toků a povodí. Vypočtené charakteristiky jsou uloženy v atributových tabulkách, které lze exportovat pro použití v jiných programech.

Nástroje použité pro výpočet charakteristik jsou dostupné z menu „Basin Characteristics“ obsaženém na panelu nástrojů „HEC-GeoHMS Project View“.

První charakteristikou je délka segmentů vodních toků. Výpočet spustí nástroj *River Length*, který přidá do atributové tabulky vrstvy vodních toků sloupec s názvem „RivLen“ a doplní jej spočtenými hodnotami.

Následuje výpočet sklonu každého segmentu vodního toku. Nástroj *River Slope* analyzuje nadmořskou výšku počátečního a koncového bodu segmentu toku a dopočítá sklon. Tyto charakteristiky jsou přidány do atributové tabulky vodních toků a hodnoty jsou doplněny do atributových sloupců „ElevUP“, „ElevDS“ a „Slp“.

Po výpočtu sklonů segmentů vodních toků je nutné spočítat také sklonitost jednotlivých subpovodí. Funkce *Basin Slope* počítá průměrnou hodnotu sklonu pro každé subpovodí. Tato průměrná hodnota je determinována zprůměrováním hodnot rastrové vrstvy sklonitosti (**obrázek 14**) pro každé subpovodí. Rastr sklonitosti byl vytvořen použitím nadstavby Spatial Analyst, nástrojem *Slope*. Výsledná hodnota je doplněna do vytvořeného atributové sloupce vrstvy povodí pod jménem „BasinSlope“.

Další nutnou součástí výpočtů parametrů pro modelování v hydrologickém programu HEC-HMS jsou charakteristiky údolnic. Údolnice je v podstatě nejdelší dráha povrchového odtoku z každého subpovodí. Pomocí nástroje *Longest Flow Path* je vygenerována vektorová liniová třída geoprvků, která v atributové tabulce obsahuje několik spočtených fyzikálních charakteristik. Jsou jimi délka údolnice, nadmořská výška počátku údolnice, nadmořská výška konce údolnice a sklon mezi těmito okrajovými body.

Následující nástroj, *Basin Centroid*, identifikuje těžiště každého subpovodí. Těžiště může být odhadnuto čtyřmi způsoby. Tři metody lokalizují těžiště na základě různých algoritmů, proto každá z metod vytváří jiný výsledek. Čtvrtá metoda umožňuje přesun již vytvořeného těžiště na libovolnou pozici. Pro povodí Rakovnického potoka byla použita metoda „Longest Flow Path Method“. Ta určuje pozici těžiště přesně na středu údolnice. Byla použita tahle metoda, protože ostatní nevyhodnocovaly použitelné výsledky. „Center of Gravity Method“ vytvářela těžiště mimo hranice subpovodí, což je pro následující použití nepřijatelné a „50% Area Method“ není pro modelování maximálních průtoků tak přesná.

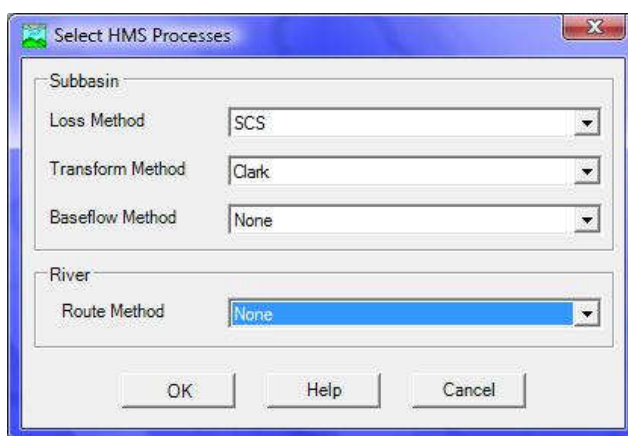
Po stanovení pozic jednotlivých těžit je potřeba spočítat jejich nadmořské výšky. Tuto proceduru zajistí nástroj *Centroid Elevation*, který spočítá hodnoty nadmořských výšek z DMT. Ty jsou opět uloženy do atributové tabulky vrstvy těžišť.

Posledním krokem je výpočet nejdelší dráhy povrchového odtoku z těžiště každého subpovodí do uzávěrového profilu. To umožní nástroj *Centroidal Flow Path*.

### 6.3.3 Odhad hydrologických parametrů

Poté, co byly stanoveny fyzikální vlastnosti segmentů vodních toků a subpovodí, nabízí uživatelům extenze HEC-GeoHMS pro ArcGIS možnost odhadu několika hydrologických parametrů použitého modelu. Parametry lze odhadnout buď jako průměrné hodnoty pro jednotlivá subpovodí nebo pomocí rastrových vrstev hodnotících půdy či vycházejících z databáze land use. K dispozici jsou další možnosti výpočtu (odhad doby koncentrace,...), které využívají data terénu, uživatelsky zjištěné údaje a data srážková. Pro účely diplomové práce je využito zejména odhad hodnoty CN křivek pro jednotlivá subpovodí, i když možností HEC-GeoHMS je v tomto případě využito spíše okrajově (viz dále **Výpočet rastrové vrstvy CN křivek**). Veškeré vypočtené parametry pomocí GIS datových zdrojů by měly být považovány pouze za původní hodnoty, pro které je potřeba kalibrace a validace v prostředí HEC-HMS. Tyto procesy ovšem využívají měřená data, a proto je možné je vypustit na nezmapovaných lokalitách, kde nejsou měřená data k dispozici. Veškeré nástroje jsou dostupné z menu „Hydrologic Parameters“

V první řadě lze pro danou studii definovat modelovací metody, používané v HEC-HMS. Tato informace je zahrnuta do atributových tabulek vodních toků a subpovodí a je do HEC-HMS následně vyexportována. Výběr procesů umožňuje nástroj *Select HMS Processes*. Pro modelování maximálních průtoků na povodí Rakovnického potoka byly použity následující modelovací metody vyplývající z literární rešerše:



Obrázek 28 Výběr modelovacích metod pro stanovení maximálních průtoků na povodí Rakovnického potoka

Jedním z parametrů, který je potřeba před exportováním zajistit je jméno každého z úseků vodních toků. Jelikož tyto jména musí být unikátní, tzn., že se nesmí duplikovat pro žádný segment toku, je v prostředí HEC-GeoHMS k dispozici nástroj



*River Auto Name*, který automaticky přiřadí každému segmentu vygenerované jméno a to v pořadí podél směru toku. Jméno začíná vždy písmenem R. Například počáteční segment toku dostane jméno R500 a následující navazující segmenty R490, R480, atd. Tento automaticky předdefinovaný název je samozřejmě možno editovat a tak lze přiřadit lépe popisující údaj.

Úplně stejně se chová i následující nástroj, *Basin Auto Name*, který přiřazuje unikátní jména jednotlivým subpovodím, s tím rozdílem, že názvy začínají vždy písmenem W.

Další využitý nástroj, *Subbasin Parameter from Raster*, zajišťuje odhad parametrů z předpřipravených rastrových vrstev. V následujícím odstavci je popsána metodika výpočtu rastrové vrstvy znázorňující čísla CN křivek na povodí Rakovnického potoka.

### **Výpočet rastrové vrstvy CN křivek**

Z literární rešerše vyplývá, že hodnota CN křivky může být určena ze vztahu hydrologické skupiny půd (HSP) a krajinného pokryvu.

Hydrologické skupiny půd byly získány pomocí zpřístupnění WMS serveru, který poskytl VÚMOP, v.v.i. (Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy). Zpřístupněné údaje byly dostupné pouze v rastrové podobě s použitím připojení k internetu. Nebyly tedy použitelné k dalším analýzám. Muselo tedy dojít k vektorizaci a k vytvoření vektorové polygonové třídy geoprveků, kde byl do atributového sloupce „HSP“ vyplněn údaj o příslušné hydrologické skupině půd (A, B, C, D). Na místě lesního pokryvu však v podkladové rastrové vrstvě nebyly HSP určeny. Pro jejich stanovení přicházela v úvahu metoda určení na podkladě údajů o humusu a lesních půdách. Ta se ovšem zdála pro uvedené účely náročná na vstupní data a bylo nutné od ní ustoupit. Došlo tedy k odhadu hydrologické skupiny půd v lesních porostech. Ten byl proveden s přihlédnutím na většinovou náležitost území k HSP s označením B a plochy s neurčenou HSP byly přiřazeny právě do skupiny B.

Údaje o krajinném pokryvu byly použity z databáze CORINE2000 (Bossard et al., 2000), kde je typ krajinného pokryvu zakódován v třímístném kódu vyplněném v atributovém sloupci „TAG“.

Pro výpočet CN křivek bylo nutné provést překryv těchto vrstev. K tomu byla využita funkce *Intersect*. Pro každý polygon byl vypočten kód, který sloužil k identifikaci hodnoty čísla CN křivky. Tento kód byl vypočten na základě zadání skriptu v jazyce VBA:

[TAG] & [HSP]

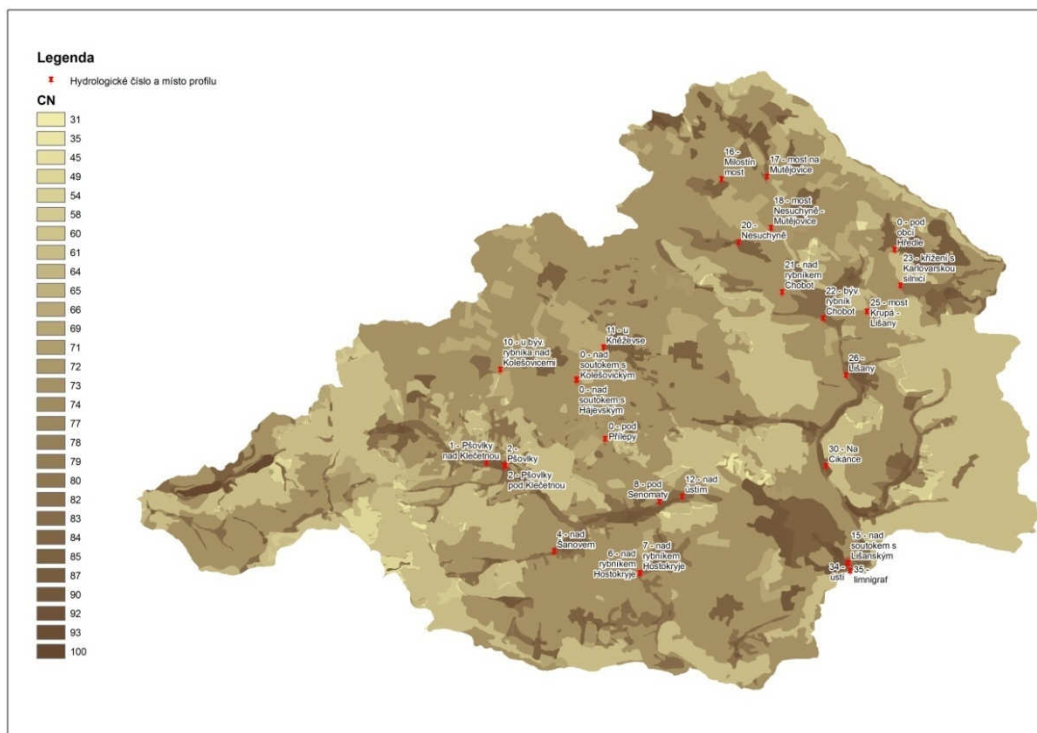
Pomocí výsledného čtyřmístného kódu byla připojena (funkce *JOIN*) tabulka s čísly CN křivek. Použity byly následující hodnoty (Kulasová et al., 2004):



ID	Kategorie využívání území	A	B	C	D
111	Souvislá městská zástavba	81	88	91	93
112	Nesouvislá městská zástavba	77	85	90	92
121	Průmyslové a obchodní areály	85	90	93	94
122	Cestní, železniční síť a přilehlé areály	85	90	93	94
123	Přístavy	85	90	93	94
124	Letiště	85	90	93	94
131	Těžba nerostných surovin	85	90	93	94
132	Skládky	85	90	93	94
133	Výstavba	85	90	93	94
141	Městská zeleň	44	65	77	82
142	Areály sportu	44	65	77	82
211	Orná půda	64	73	83	87
221	Vinice	54	70	79	84
222	Ovocné stromy	45	66	77	83
231	Louky a pastviny	49	69	79	84
241	Jednorocní plodiny	65	75	83	86
242	Pole, louky, kultury	54	72	82	87
243	Zemědělské areály	71	82	87	90
311	Listnaté lesy	35	61	74	80
312	Jehličnaté lesy	35	61	74	80
313	Smíšené lesy	35	61	74	80
321	Přirozené louky	35	60	73	79
322	Vřesoviště a slatiny	99	99	99	99
324	Leso-křoviny	31	58	72	78
331	Pláže, duny a písky	77	86	91	94
332	Skály	77	86	91	94
333	Řídká vegetace	63	77	84	89
334	Spáleniště	77	86	91	94
335	Ledovce a věčný sníh	99	99	99	99
411	Močály a rašeliniště	99	99	99	99
412	Rašeliniště	99	99	99	99
511	Vodní toky	100	100	100	100
512	Vodní plochy	100	100	100	100

**Tabulka 13** Hodnoty CN pro jednotlivé kategorie využívání území a hydrologické skupiny půd (Kulasová et al., 2004)

Na základě pomocného kódu byl vytvořen nástrojem *Feature To Raster* grid CN. Výsledný rastr hodnot je zobrazen na **obrázku 29** (viz také **příloha 4**).



Obrázek 29 Vytvořený grid hodnot čísel CN

Z výsledného gridu došlo výše popsáním nástrojem *Subbasin Parameter To Raster* k výpočtu průměrné hodnoty čísla CN pro každé dílčí subpovodí. Tato hodnota je uložena v atributovém sloupci vrstvy povodí a při exportu do hydrologického programu HEC-HMS je každému komponentu dílčích subpovodí přiřazena již bez manuálního zadání.

Podobným způsobem je stanoven i další potřebný parametr – procentuální podíl nepropustných ploch v dílčích subpovodích. K tomu byl vytvořen tématický grid hodnot procentuálního zastoupení zpevněných ploch vycházející z databáze CORINE2000 (Bossard et al., 2000).

Ten je založen na zjednodušujícím předpokladu, že kategorie 112 – Městská nesouvislá zástavba a kategorie 121 – Průmyslové nebo obchodní zóny tvoří 100 % zastavění a zbylé kategorie 0 % zastoupení zpevněných ploch. Dle atributů databáze CORINE2000 byl tedy vytvořen rastr, který nabýval pouze hodnot 100 a 0.

Zbylé parametry, které nebudou do programu HEC-HMS exportovány přímo, ale slouží k dalším odhadům potřebných parametrů pro analýzu přímého odtoku z povodí, byly také vypočteny v prostředí ArcGIS.

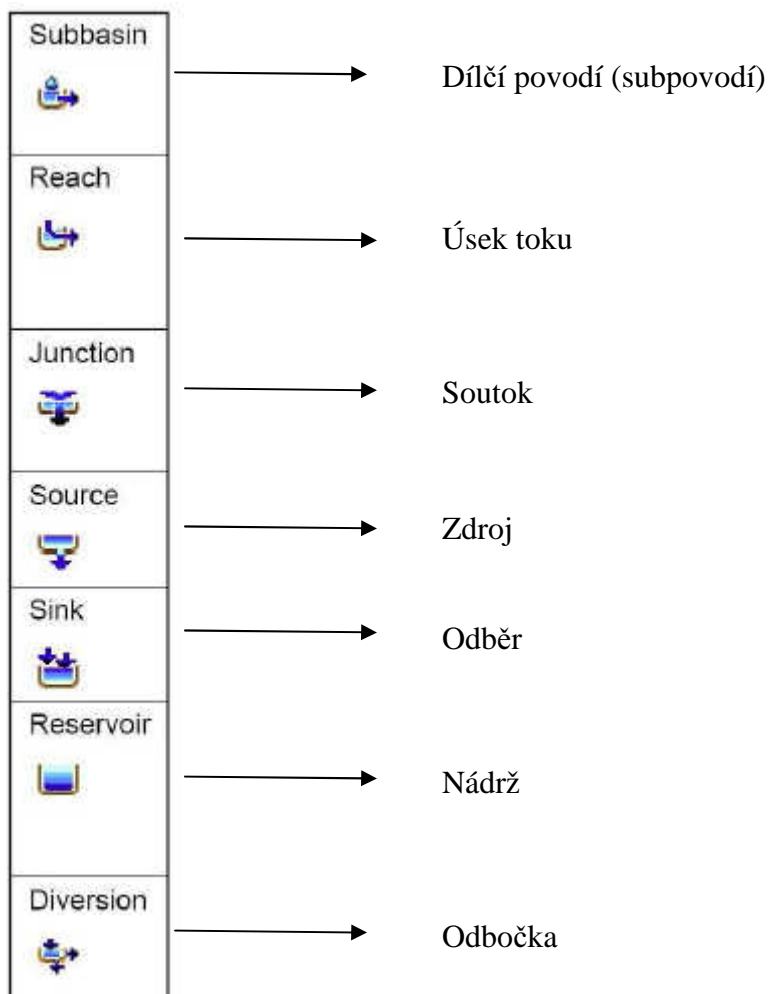
Před samotným dotvořením modelu exportovatelného do HEC-HMS došlo k odhadu parametru  $T_c$  – doby koncentrace. Byl k tomu využit nástroj, který využívá tzv. *CN Lag Method* podle **rovnice 7**. Pro úspěšný průběh výpočtu musí být doplněny v atributové tabulce vrstvy povodí hodnoty v atributových sloupcích „BasinCN“ a „BasinSlope“. Musí tedy být odhadnuty průměrné hodnoty čísel CN křivek pro jednotlivá subpovodí a jejich průměrná sklonitost. Tyto parametry vstupují do výpočtu dle **rovnice 7**.

### 6.3.4 Příprava dat pro export do HEC-HMS

HEC-GeoHMS umožňuje mj. přípravu několika hydrologických vstupů do programu HEC-HMS, jako jsou mapy pozadí, model povodí, meteorologický model, atd. Před samotným exportem je tedy nutné provést několik operací, které umožní bezproblémové využití připravených dat k hydrologickému modelování v programu HEC-HMS.

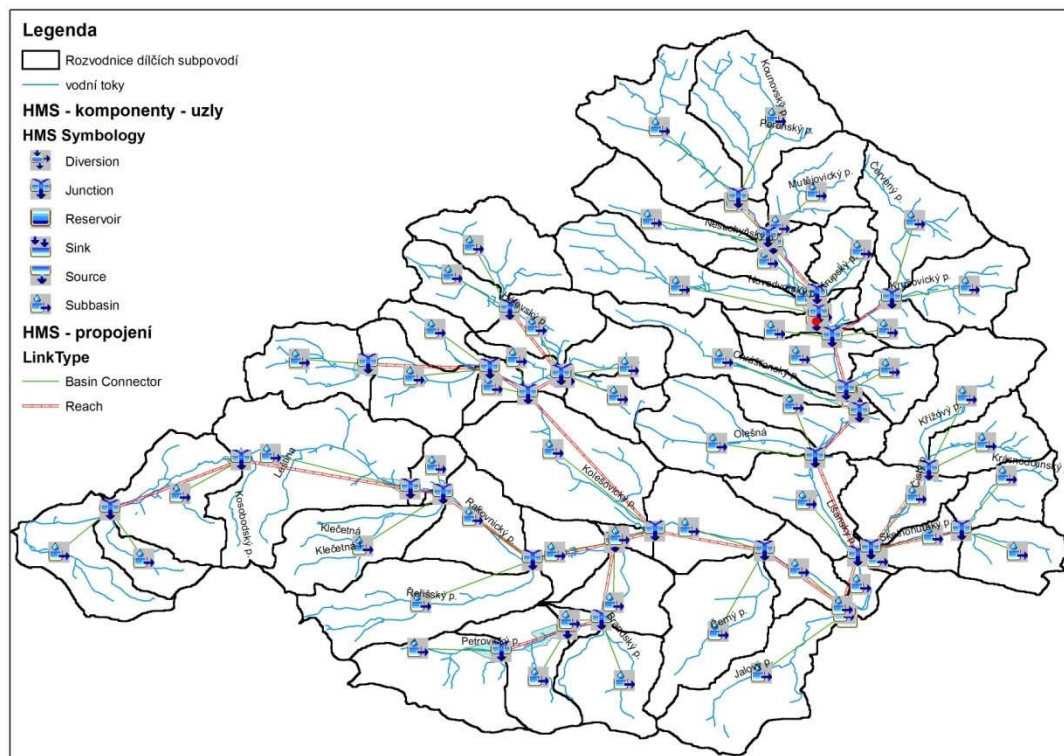
Prvním krokem je převod získaných fyzikálních charakteristik vodních toků a subpovodí do uživatelsky přijatelného systému jednotek. Uživatel má možnost převést jednotky buď do anglického, nebo do mezinárodního systému jednotek – SI. Pro modelování v ČR je samozřejmě logická volba jednotek SI.

Jednou z nejpodstatnějších úloh přípravy dat je vytvoření schematického znázornění povodí, využívaného v HEC-HMS. Nástroj *HEC-HMS Basin Schematic* slouží k vytvoření zjednodušené hydrologické sítě, která obsahuje jednotlivé komponenty modelu a jejich propojení. Vytváří liniovou vektorovou vrstvu, která reprezentuje propojení a bodovou vektorovou vrstvu HMS uzlů, která reprezentuje umístění jednotlivých subpovodí (resp. jejich centroidů) a soutoků v systému. Využívá symbologie komponentů známé z programu HEC-HMS (**obrázek 30**).



Obrázek 30 Komponenty modelu a jejich symbologie





**Obrázek 31** Výsledný model celého povodí Rakovnického potoka

Na **obrázku 31** (viz také **příloha 5**) je zobrazen kompletní model povodí Rakovnického potoka před exportem do HEC-HMS. Než k exportu dojde, je nutné přiřazení zeměpisných souřadnic jednotlivým uzlům a propojením komponentů. To provede funkce *Add Coordinates*.

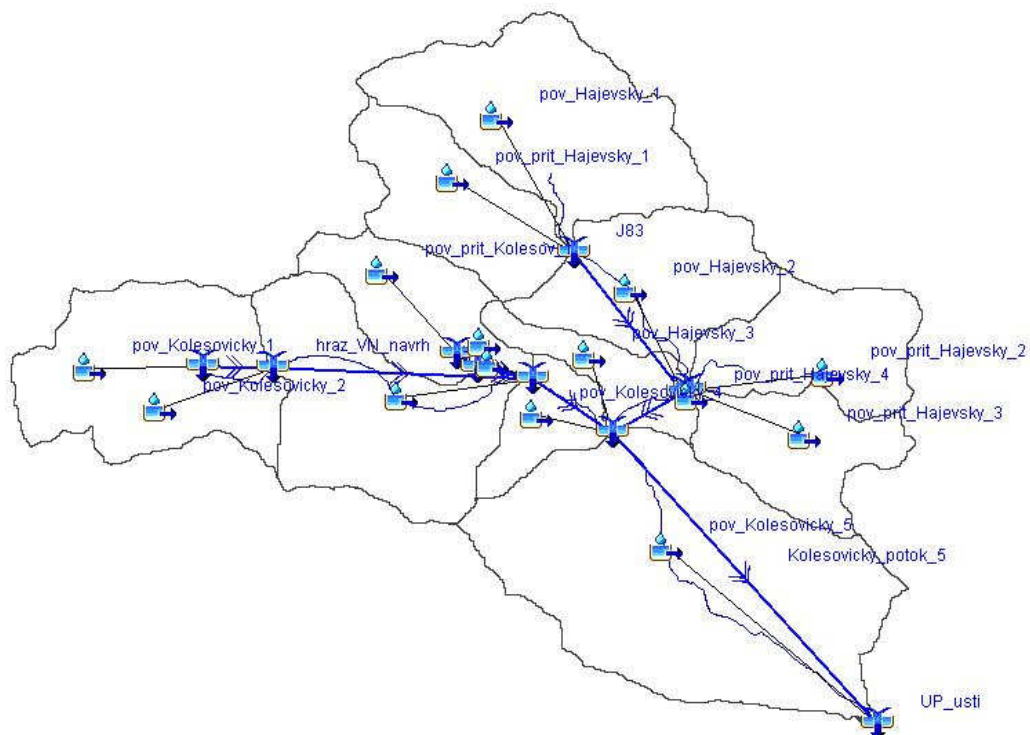
Posléze už je možné přistoupit k samotnému exportu dat do struktury podporované programem HEC-HMS. Nástroj *Prepare Data for Model Export* připraví data modelu povodí do potřebné struktury. Jakmile jsou data uložena v potřebné struktuře, stačí vytvořit tzv. „Basin file“, tedy soubor s příponou \*.basin, který je možno kdykoliv importovat do jakéhokoliv projektu HEC-HMS. Tento soubor je vytvořen nástrojem *Basin File*.

Prostředí HEC-GeoHMS nabízí ještě přípravu map do pozadí, kterou většinou tvoří shapefile povodí a vodních toků. Funkce *Background Map* vyexportuje vybraná data do struktury dat projektu HEC-HMS.

#### 6.4 Výpočet maximálních průtoků v HEC-HMS

Pro výpočet maximálních průtoků byl pro ukázkové řešení vytvořen model povodí Kolečovického potoka (**obrázek 32**), pro který byly vypočteny všechny parametry potřebné ke stanovení kulminačních průtoků a provedeny simulace.

Povodí Kolečovického potoka bylo vybráno z toho důvodu, že je na něm navržena vodní nádrž, na které bude prozkoumána transformace povodňové vlny a vliv na kulminační průtok.



Obrázek 32 Model povodí Kolesovického potoka v prostředí HEC-HMS

#### 6.4.1 Odhad a zadání hydrologických parametrů komponentů povodí

Již z kapitoly 6.3.3 vyplývá, že některé parametry byly odhadnuty již před exportem do programu HEC-HMS a ty jsou v modelu povodí již zadány. K výpočtu je potřeba odhad zbylých parametrů, jejichž stanovení popíše následující odstavce.

Při stanovení přímého odtoku dle metody CN křivek je potřeba dopočítat jediný zbylý parametr a to počáteční ztrátu (*Initial Abstraction*) podle **rovnice 4**. Přehled hodnot potřebných parametrů metody SCS CN pro jednotlivá dílčí povodí ukazuje **tabulka 14**.

Pro metodu transformace přímého odtoku Clarkovým jednotkovým hydrogramem zbývá odhadnout také jeden parametr, tzv. transformační faktor (*Storage coefficient*) simulující dobu zadržení vody v povodí. Ten je odhadnut dle **rovnice 10**. Pro výpočet je potřeba odvodit ještě několik parametrů v prostředí ArcGIS. Jde o maximální délku povrchového odtoku v mílech –  $L$  a sklon ve ft/mi (stopy na míli) mezi 10 % a 85 % maximální délky údolnice -  $S_{1085}$ . K tomu slouží funkce extenze *ArcHydro*. Jde o nástroj *Flow Path Parameters from 2D Line*. Jejím použitím dojde k automatickému doplnění zmíněných charakteristik do atributové tabulky vrstvy reprezentující dráhu nejdelšího povrchového odtoku. Hodnoty parametrů transformace Clarkovým jednotkovým hydrogramem jsou uvedeny v **tabulce 15**.



Název dílčího povodí	Počáteční ztráta (Initial Abstraction) [mm]	Číslo CN křivky	Procentuální podíl nepropustných ploch
Hájevský potok - 1. část	18,95	72,83	7,26
Hájevský potok - 2. část	20,07	71,68	5,34
Hájevský potok - 3. část	20,09	71,66	3,77
Kolešovický potok - 1. část	23,99	67,92	0,00
Kolešovický potok - 2. část	21,15	70,6	0,00
Kolešovický potok - 3. část	19,81	71,94	0,40
Kolešovický potok - 4. část	16,52	75,46	29,81
Kolešovický potok - 5. část	21,11	70,64	0,00
Přítok Hájevského potoka 1	19,84	71,91	0,36
Přítok Hájevského potoka 2	16,46	75,53	29,51
Přítok Hájevského potoka 3	17,80	74,05	0,54
Přítok Hájevského potoka 4	18,79	73	0,00
Přítok Kolešovického potoka 1	20,54	71,21	0,00
Přítok Kolešovického potoka 2	19,37	72,4	0,00
Přítok Kolešovického potoka 3	21,35	70,41	51,45

**Tabulka 14** Hodnoty odhadnutých hydrologických parametrů použitých pro modelování přímého odtoku metodou CN křivek

Název dílčího povodí	Doba koncentrace (Time of Concentration) [h]	Transformační faktor (Storage Coefficient) [h]
Hájevský potok - 1. část	2,97	4,06
Hájevský potok - 2. část	2,50	5,07
Hájevský potok - 3. část	2,82	3,87
Kolešovický potok - 1. část	2,25	1,64
Kolešovický potok - 2. část	2,10	1,81
Kolešovický potok - 3. část	2,63	5,92
Kolešovický potok - 4. část	1,93	2,37
Kolešovický potok - 5. část	3,85	6,44
Přítok Hájevského potoka 1	2,75	3,97
Přítok Hájevského potoka 2	3,10	6,40
Přítok Hájevského potoka 3	2,43	6,56
Přítok Hájevského potoka 4	0,40	0,91
Přítok Kolešovického potoka 1	2,22	2,46
Přítok Kolešovického potoka 2	0,90	1,26
Přítok Kolešovického potoka 3	0,88	1,47

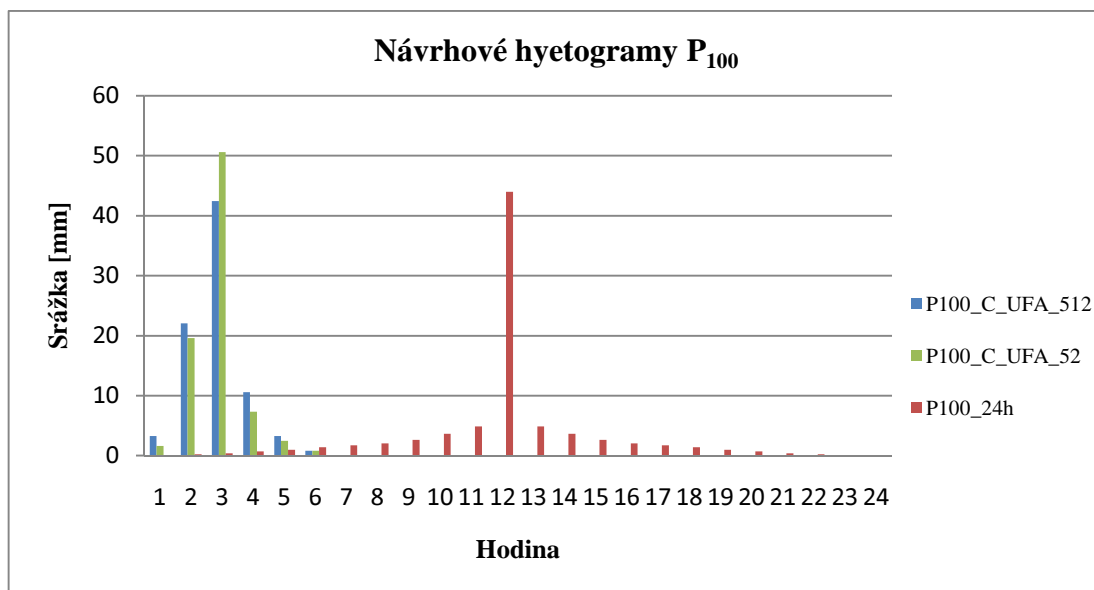
**Tabulka 15** Hodnoty odhadnutých hydrologických parametrů použitých pro transformaci přímého odtoku Clarkovým jednotkovým hydrogramem

#### 6.4.2 Vstup příčných srážek do programu HEC-HMS

Příčné srážky jsou v případě modelování maximálních průtoků zadávány jako návrhové hyetogramy o dané  $N$  – letosti. Obecný postup pro zadání vstupních srážek do HEC-HMS je následující. Nejprve je nutné pomocí „Time Series Data Manageru“ vytvořit srážkový vstup. Jde o měřená srážková data ze srážkoměrné stanice, případně u modelování teoretických návrhových hydrogramů o odvozený návrhový hyetogram.

V případě modelování v povodí Kolečovického potoka bylo pro porovnání využito více návrhových hyetogramů podle různých metodik. Z hlediska typu návrhového hyetogramu patří povodí Kolečovického potoka do oblasti C (viz kap. 3.3.3), čemuž odpovídá hyetogram na **obrázku 33** označený P100\_C\_UFA\_512. Ten byl sestaven pro povodí o velikosti 512 km<sup>2</sup>. Vzhledem k tomu, že povodí Kolečovického potoka má rozlohu přibližně 52 km<sup>2</sup>, byl z porovnání maximálních pořadnic hyetogramů pro povodí o velikosti 4 a 512 km<sup>2</sup> sestaven přibližný návrhový hyetogram pro povodí o velikosti 52 km<sup>2</sup>. Ten je na **obrázku 33** označen P100\_C\_UFA\_52. Oba hyetogramy vychází z metodiky zpracování dle dle ÚFA AV ČR s tím, že odlišnost spočívá v určení maximální pořadnice. Pro odvození posledního hyetogramu bylo použito jednoduché trojúhelníkové rozložení v rámci časové základny 24 hodin dle metodiky ČHMÚ (viz kap. 3.3.3) typické pro dané klimatické podmínky, tzn. pro území, kde převažují povodňové události způsobené především letními přívalovými dešti a ne orograficky zesílenými srážkami. Na **obrázku 33** je označen P100\_24hod.

Ve všech případech se jedná o návrhové hyetogramy znázorňující rozložení maximálního jednodenního srážkového úhrnu o 100 – leté době opakování na kratší, zpravidla hodinové úseky. Maximální jednodenní srážkový úhrn byl odečten z tabulek Šamaj – Valoviče – Brázdila pro srážkoměrnou stanici Rakovník.



**Obrázek 33** Návrhové hyetogramy 100 – leté jednodenní srážky pro povodí Kolečovického potoka k profilu ústí do Rakovnického potoka



Aby model s vytvořenými srážkovými údaji počítal, je potřeba vytvořit meteorologický model v prostředí HEC-HMS. Ten slouží k přiřazení definovaných srážkových dat jednotlivým subpovodím a komponentům modelu povodí. Průvodce vytvořením nového meteorologického modelu existuje pod názvem „Meteorologic Model Manager“.

Pro modelování na Kolečovickém potoce byl sestaven pro každý vstupní hyetogram vlastní meteorologický model, který přiřazuje hodnoty srážek v jednotlivých časových pořadnicích zadaných v „Time Series Data“ každému vybranému subpovodí.

#### 6.4.3 Nastavení ovládacích specifikací

Posledním nutným krokem před spuštěním výpočtů je nastavení podmínek průběhu výpočtu. Slouží k tomu komponent modelu pojmenovaný „Control Specifications“. V podstatě slouží k zadání časového intervalu výpočtu. Pro správný výpočet je důležité, aby se časový interval výpočtu shodoval s intervalem zadaných srážkových dat.

Po zadání všech potřebných parametrů lze provádět výpočty pomocí vytvoření simulačních procesů tzv. „Simulation Run“.

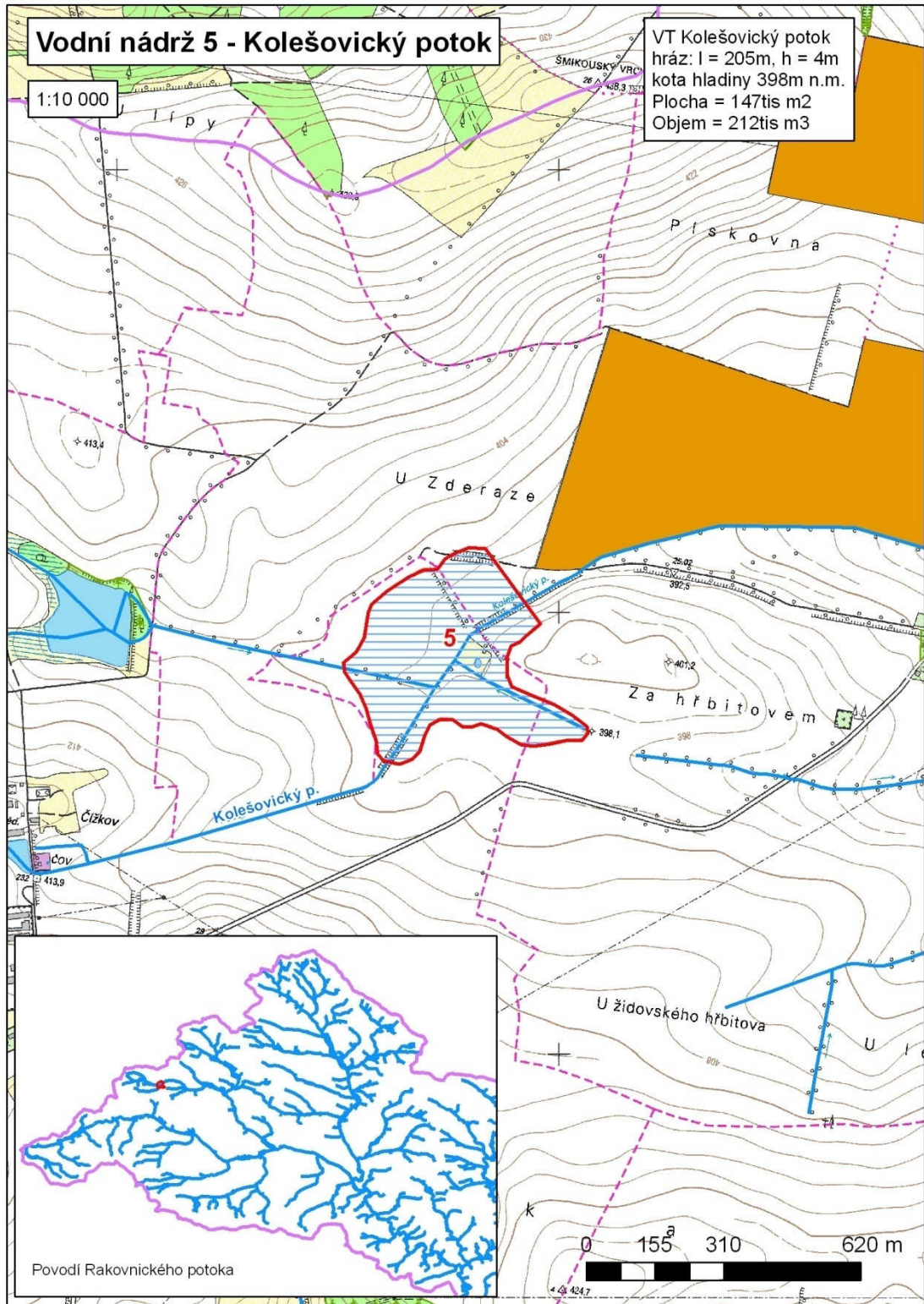
#### 6.5 Transformace povodňové vlny navrhovanou vodní nádrží

Model HEC-1, který je aplikován v HEC-HMS umožňuje při zadání parametrů nádrže (čára zatopených ploch a objemů) a hydrotechnických parametrů výpustních objektů a bezpečnostních přelivů spočítat transformaci povodňové vlny (PV) v nádrži. To dovoluje posoudit vliv existující nádrže na průběh PV.

Čára zatopených ploch a objemů byla odvozena v prostředí ArcGIS s využitím nadstavby 3D Analyst. Nástroj *3D Volume* umožňuje na podkladě DMT výpočet objemů pod stanovenou nadmořskou výškou hladiny.

Na povodí Kolečovického potoka byla experimentálně spočítána transformace PV navrhovanou vodní nádrží s označením Vodní nádrž 5, která je umístěná pod vodní nádrží Čížkov (viz **obrázek 34**). Na **obrázku 35** je zobrazena čára zatopených ploch a objemů.

Pro simulaci byl použit bezpečnostní přeliv o délce 12 m v kotě 398 m. n. m.



Obrázek 34 Navrhovaná vodní nádrž na Kolečovickém potoce



**Obrázek 35** Čára zatopených ploch a objemů odvozená pro navrhovanou vodní nádrž



## 7 Výsledky práce

Na základě parametrů modelu z **tabulky 14** a **15** byly v modelu HEC-HMS provedeny simulační výpočty průběhu teoretických povodňových vln.

### 7.1 Maximální průtoky stanovenými vodními nádržemi

Jedním z hlavních cílů práce byl výpočet maximálních průtoků na hrázích vodních nádrží, které mohou sloužit k návrhovým účelům pro objekty vodních děl.

V simulovaném povodí Kolečovického potoka jsou vypočteny návrhové kulminační průtoky pro 3 stávající vodní nádrže, jimiž jsou VN Čížkov, Keblanský rybník a Zámecký rybník, které jsou vyvolány různými příčinnými srážkami definovanými návrhovými hyetogramy 100 – leté jednodenní srážky. Samostatným případem je výpočet kulminačního průtoky navrhovanou vodní nádrží, pro kterou je také odvozena transformace povodňové vlny.

Transformaci povodňové vlny stávajícími nádržemi nebylo možné spočítat vzhledem k nedostatku vstupních údajů.

Kulminační průtok je nejprve spočítán pouze jako odezva z povodí bez ohledu na transformaci nádrží a druhá varianta již kalkuluje s transformací povodňové vlny navrhovanou vodní nádrží.

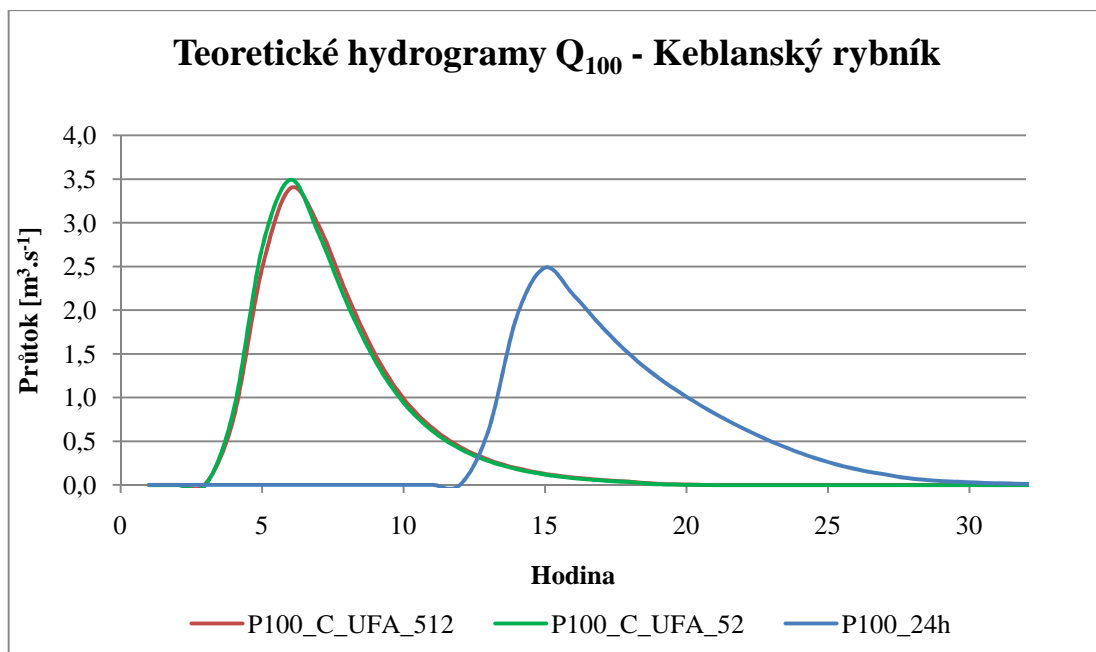
Vzhledem k poloze posuzovaných nádrží vůči poloze nádrží navrhované však transformace PV neovlivní hodnoty maximálních kulminačních průtoků jednotlivými nádržemi.

**Tabulka 16** udává simulované hodnoty maximálních průtoků na hrázích stávajících posuzovaných vodních nádrží v závislosti na vstupní příčné srážce a **obrázky 36 až 38** ukazují průběhy teoretických povodňových vln.

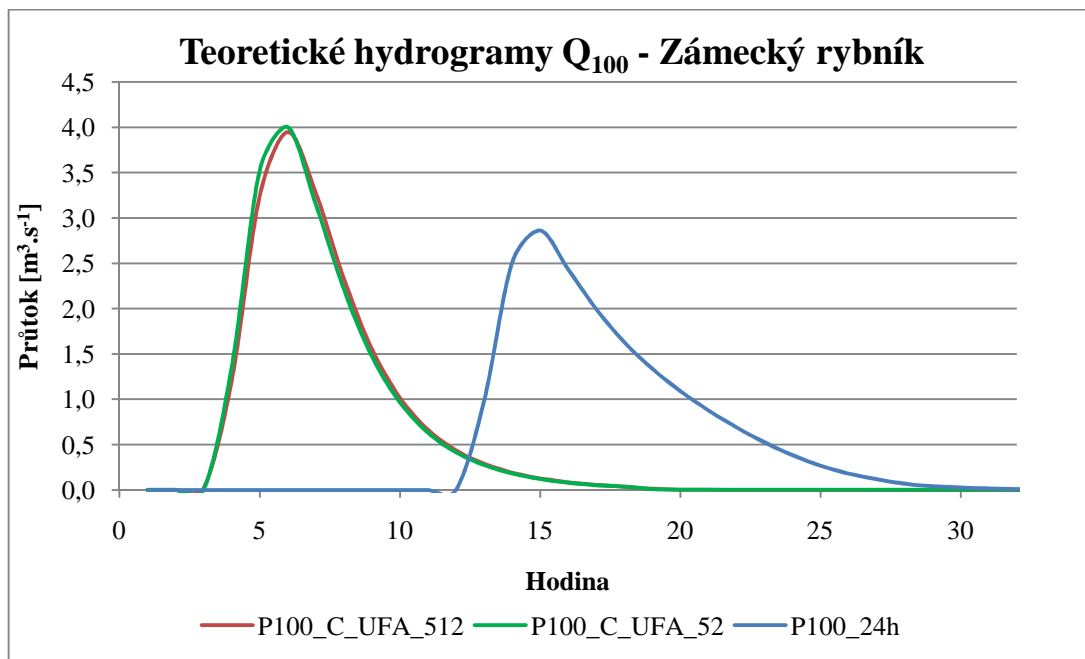
Vodní nádrž	Plocha povodí [km <sup>2</sup> ]	Název vstupního hyetogramu	Výška odtoku [mm]	Kulminační průtok Q <sub>100</sub> [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
Čížkov	2,75	P100_C_UFA_512	19,13	3,8
		P100_C_UFA_52	19,13	3,8
		P100_24h	18,66	2,6
Keblanský rybník	2,5	P100_C_UFA_512	23,27	3,4
		P100_C_UFA_52	23,27	3,5
		P100_24h	22,74	2,5
Zámecký rybník	2,84	P100_C_UFA_512	23,45	3,9
		P100_C_UFA_52	23,45	4,0
		P100_24h	22,93	2,9

**Tabulka 16** Hodnoty maximálních 100 – letých jednodenních průtoků na hrázích stávajících vodních nádrží v povodí Kolečovického potoka

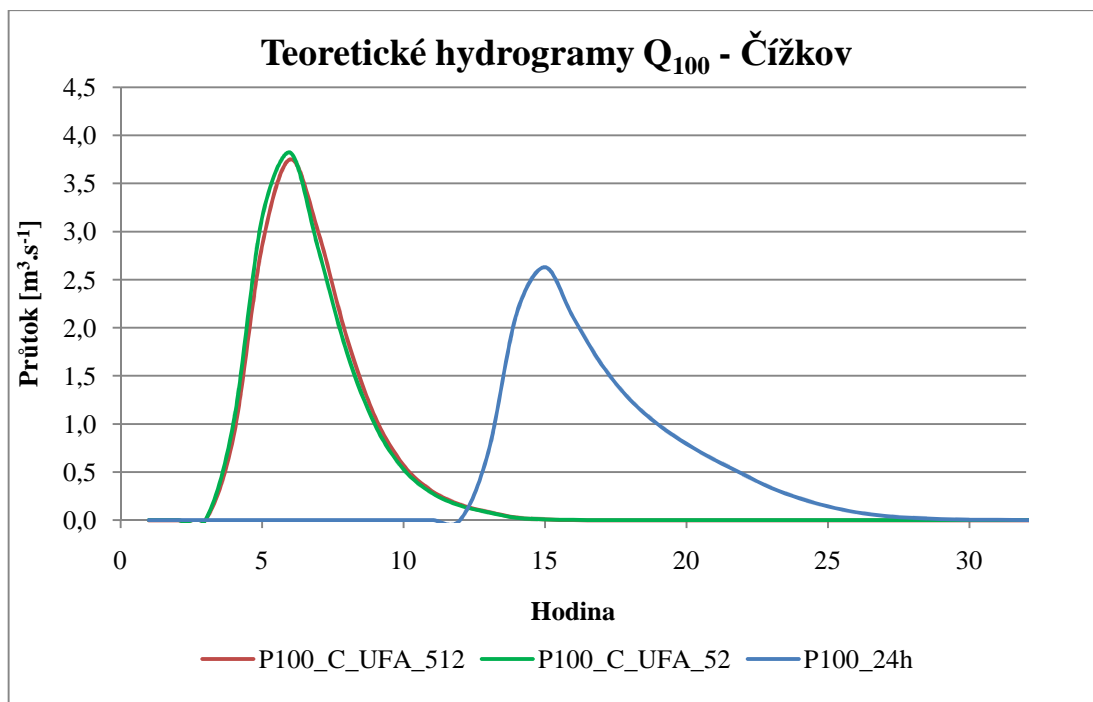




**Obrázek 36** Teoretické návrhové hydrogramy s dobou opakování 100 let pro hráz Keblanského rybníka na podkladě různých hyetogramů 100 – leté jednodenní srážky



**Obrázek 37** Teoretické návrhové hydrogramy s dobou opakování 100 let pro hráz Zámeckého rybníka na podkladě různých hyetogramů 100 – leté jednodenní srážky



**Obrázek 38** Teoretické návrhové hydrogramy s dobou opakování 100 let pro hráz vodní nádrže Čížkov na podkladě různých hyetogramů 100 – leté jednodenní srážky

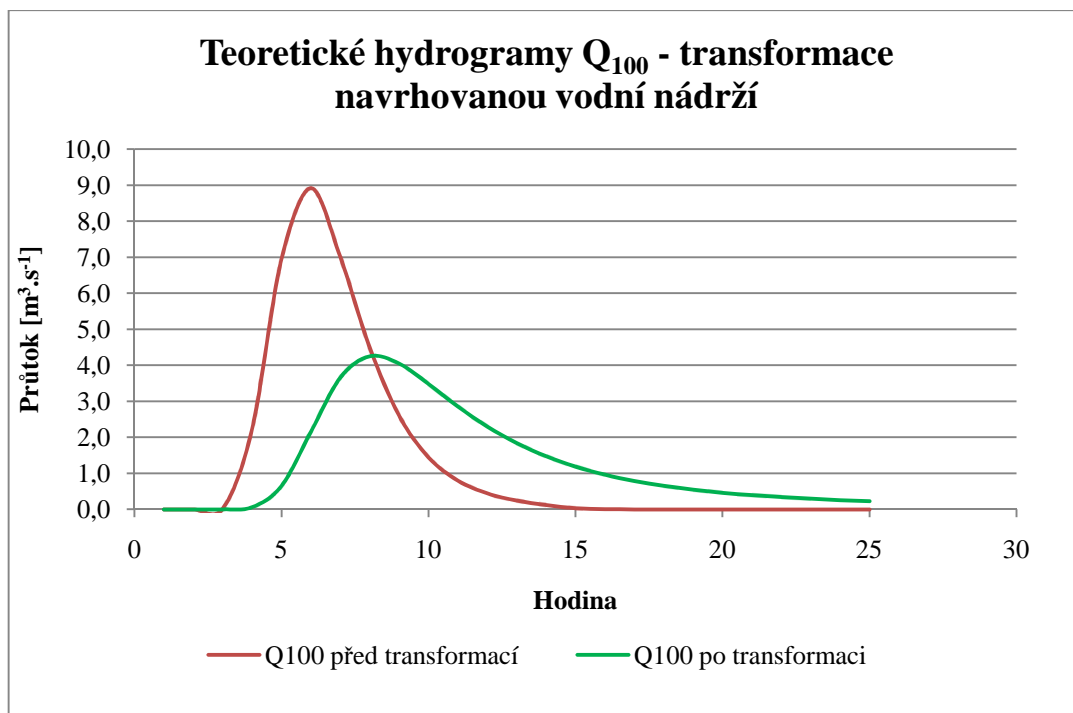
## 7.2 Transformace povodňové vlny navrhovanou vodní nádrží

Další užitečnou funkcí výsledného srážko-odtokového modelu je možnost výpočtu transformace povodňové vlny, tedy snížení kulminačního průtoků a zadržení odtoku z povodí, navrhovanými vodními nádržemi, kterých je na povodí Rakovnického potoka navrženo celkem 6.

Na simulovaném povodí Kolečovického potoka se nachází navržená vodní nádrž s pracovním označením č. 5 (viz **obrázek 34**). **Tabulka 17** udává hodnoty maximálních průtoků vyvolané hyetogramem 100 – leté jednodenní srážky určeným dle metodiky ÚFA AV ČR pro povodí o velikosti 512  $\text{km}^2$  před a po simulované transformaci. Na **obrázku 39** jsou porovnány obě teoretické povodňové vlny.

Vodní nádrž	Plocha povodí [km <sup>2</sup> ]	Název vstupního hyetogramu	Transformace povodňové vlny	Výška odtoku [mm]	Kulminační průtok $Q_{100}$ [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
Navrhovaná vodní nádrž č. 5	6,07	P100_C_UFA_512	ne	20,96	8,9
			ano	19,44	4,2

**Tabulka 17** Hodnoty maximálních 100 – letých jednodenních průtoků na hrázi navrhované vodní nádrže v povodí Kolečovického potoka před a po simulaci transformace povodňové vlny



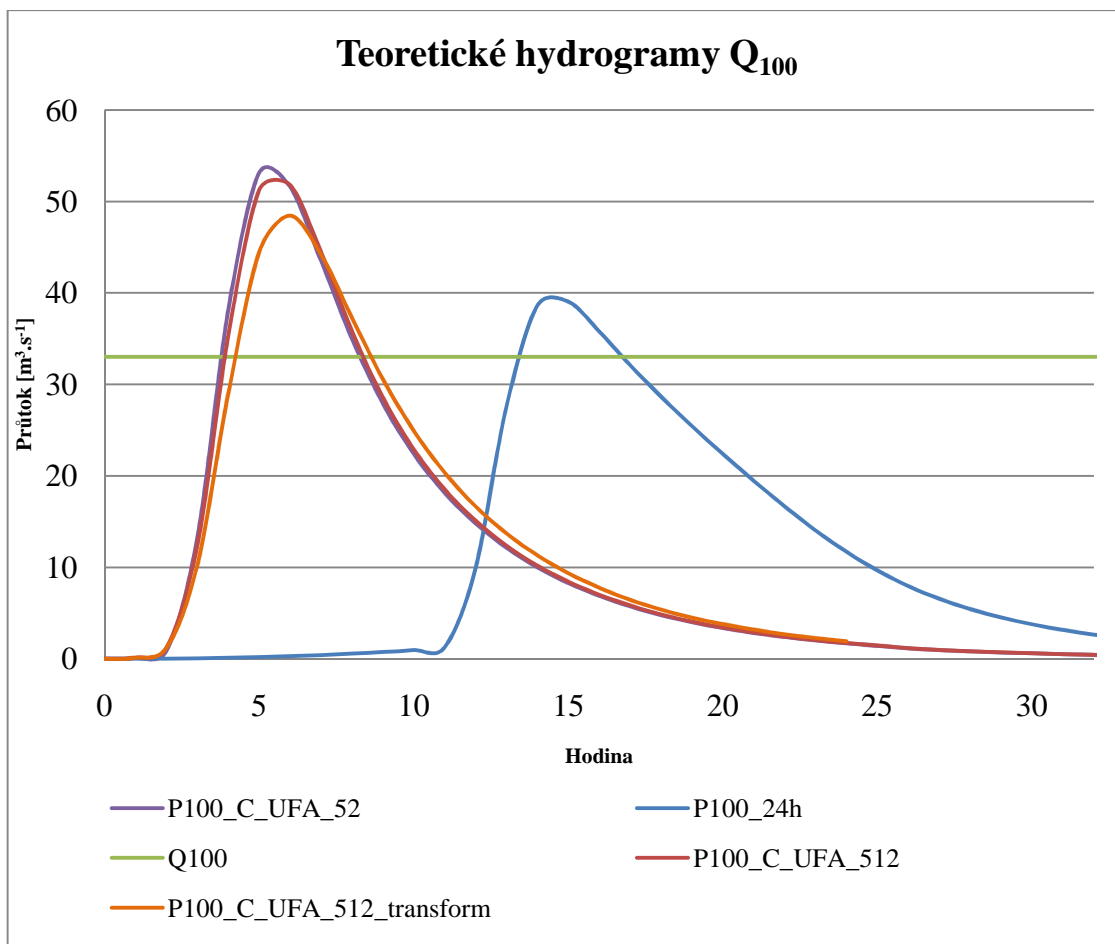
**Obrázek 39** Teoretické návrhové hydrogramy s dobou opakování 100 let pro hráz navrhované vodní nádrže na podkladě hyetogramu 100 – leté jednodenní srážky před a po transformaci povodňové vlny

### 7.3 Maximální průtoky uzavíracím profilem celého simulovaného povodí

Maximální průtoky je možné simulovat také v jednotlivých uzavíracích profilech dílčích subpovodí. Na ukázkou jsou v **tabulce 18** uvedeny hodnoty maximálních průtoků a výšek odtoku pro uzavírací profil povodí Kolečovického potoka, který je umístěn na ústí do Rakovnického potoka. Opět jsou uvažovány různé hyetogramy 100 – leté jednodenní srážky. Pro porovnání jsou uvedeny také hodnoty spočítané po aplikaci transformace PV navrhovanou nádrží. Na **obrázku 40** jsou všechny teoretické návrhové hydrogramy porovnány také s hodnotou 100 – letého jednodenního maximálního průtoky udávaného pro ústí Kolečovického potoka v publikaci Hydrologické poměry III (Hydrometeorologický ústav, 1970).

Povodí	Plocha povodí [ $\text{km}^2$ ]	Název vstupního hyetogramu	Výška odtoku [mm]	Kulminační průtok $Q_{100}$ [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
Povodí Kolečovického potoka po ústí do Rakovnického potoka	52,45	P100_C_UFA_512	26,8	51,8
		P100_C_UFA_52	26,8	53,1
		P100_24h	26,23	39,1
		po transformaci	26,02	48,5
		Q100		33

**Tabulka 18** Hodnoty maximálních 100 – letých jednodenních průtoků v uzavíracím profilu povodí Kolečovického potoka – ústí do Rakovnického potoka

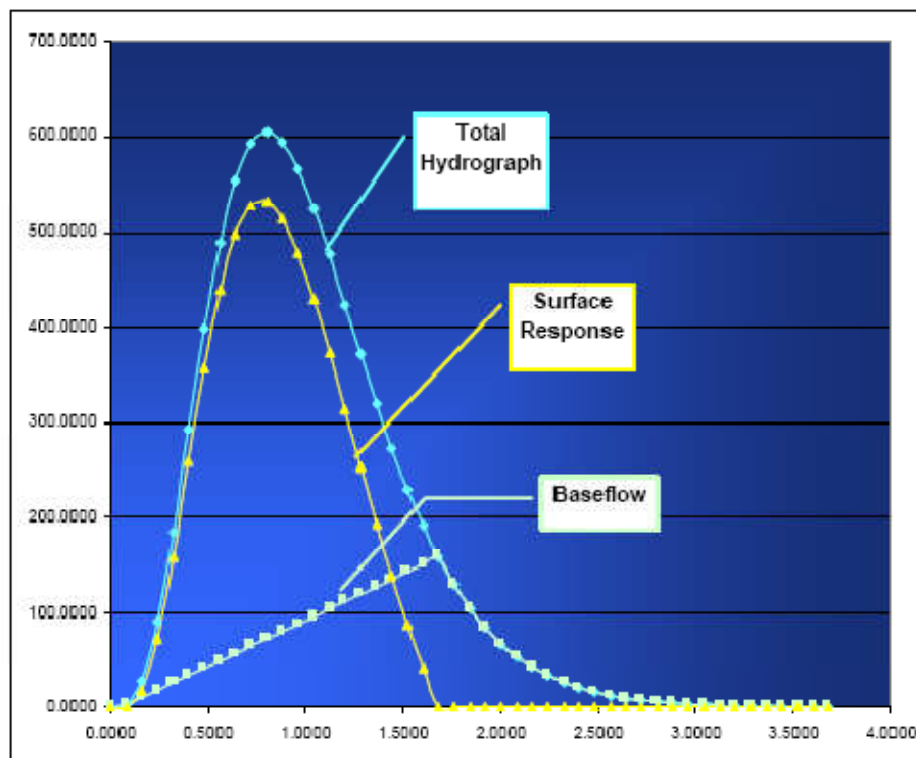


**Obrázek 40** Teoretické návrhové hydrogramy s dobou opakování 100 let pro povodí Kolečovického potoka k profilu ústí do Rakovnického potoka na podkladě různých hyetogramů 100 – leté jednodenní srážky včetně porovnání s transformovanou povodňovou vlnou navrhovanou nádrží a návrhovým průtokem  $Q_{100}$  dle Hydrologických poměrů III (Hydrometeorologický ústav, 1970)

## 8 Diskuze

Vzhledem k nedostatku vstupních údajů bylo nuceno přistoupit ke zjednodušení modelu a k zanedbání základního odtoku, proto je pro modelování maximálních průtoků z povodí Rakovnického potoka použit zejména výpočet odtoku přímého.

**Obrázek 41** ukazuje separaci základního odtoku a porovnání hodnot kulminačních průtoků při zanedbání základního odtoku a celkového přímého odtoku.



**Obrázek 41** Separace hydrogramu na jednotlivé složky (Johnson, 1999)

Vypuštěním základního odtoku mohlo dojít k podhodnocení kulminačního průtoků. Z výsledků v kapitole 7 však vyplývá, že kulminační průtok vypočtený z teoretických hydrogramů je i při zanedbání základního odtoku v porovnání s maximálním jednodenním průtokem s dobou opakování 100 let získaným statistickým přístupem na základě přímého pozorování a vyhodnocení ročních maximálních průtoků mírně nadhodnocen. Zároveň je z výsledků patrné, že odvozené hydrogramy pro povodí o velikosti 512 a 52 km<sup>2</sup> dávají rovnocenné výsledky simulací kulminačních průtoků.

Návrhové hydrogramy tedy pravděpodobně neodpovídají svým významem podmínkám pro výskyt povodně s dobou opakování kulminačního průtoků 100 let na zkoumaném povodí Kolečovického potoka.

Pokusné simulační výpočty ukazují, že 100 – letý průtok při ústí Kolečovického potoka do Rakovnického potoka by teoreticky mohly vyvolat i srážky s nižším celkovým úhrnem, než odpovídá 100 – letému jednodennímu úhrnu.



Příčinou může být přílišné zjednodušení modelu a zanedbání transformace povodňové vlny stávajícími vodními nádržemi. Jednou z dalších možných příčin ovšem může také být nepřesné určení  $Q_{100}$  v publikaci Hydrologické poměry III (Hydrometeorologický ústav, 1970) z důvodu nedostatečně dlouhých pozorovacích řad.

V průběhu řešení diplomové práce a modelování maximálních průtoků vyplynulo několik poznatků, které se shodují s poznatky hydrologických studií zabývajících se odvozením hydrologických podkladů.

Obecně lze konstatovat, že 100 – letý kulminační průtok může být dosažen buď déletrvajícím intenzivním regionálním deštěm (s dobou opakování 1 – denního úhrnu srážek zhruba 100 let) nebo přívalovými srážkami kratšího trvání, kde doba opakování jednodenního úhrnu může být kratší než 100 let s tím, že je nutno vždy brát v úvahu počáteční podmínky nasycení.

Z toho vyplývá, že pro odvození teoretické povodňové vlny s kulminačním průtokem o době opakování 100 let bude zřejmě vhodné použít buď méně strmé rozložení 100 – letého jednodenního úhrnu do časového úseku 24 hodin, v případě Kolečovického potoka, kdy je použit hyetogram zahrnující vliv konvekčních srážek, bude nutné aplikovat určitou redukci celkového srážkového úhrnu.



## 9 Závěr

Hlavní cíl diplomové práce bylo osvojení si metody modelování maximálních průtoků v různých povodích a aplikace metod srážko-odtokového modelování v povodí Rakovnického potoka.

Z metodického hlediska je hlavním přínosem práce s hydrologickým modelem HEC-HMS, konkrétně testování modelovacích metod a stanovení některých parametrů včetně geografických charakteristik s pomocí extenze HEC-GeoHMS v prostředí ArcGIS.

Například využití metody CN křivek pro výpočet objemu odtoku ukázalo na řadu problémů s její aplikací a potvrdily se i omezené možnosti využití této metody, nicméně se metoda ukázala jako jediná použitelná pro svoji relativní nenáročnost na vstupní data. Bylo však nutno aplikovat řadu zjednodušujících předpokladů, které do jisté míry ovlivnily výsledky modelování.

Největšími problémy se projevilo stanovení vhodných vstupních příčinných srážkových údajů, jejichž definování pomocí návrhových hyetogramů se vyznačuje svoji metodickou náročností a nedostatečným testováním. Srážkový vstup tvoří nejdůležitější součást celého modelování a konečné výsledky jsou na něm velmi závislé. Proto je jedním z největších nedostatků právě správné určení vstupní návrhové srážky.

V práci šlo mj. také o potvrzení současného trendu ve využití distribuovaného nebo semi-distribuovaného přístupu k modelování hydrologických procesů v kombinaci s rozvíjejícími se metodami GIS. V práci se ukázaly například rozsáhlé možnosti mapové algebry při práci s rastrovými podklady a neméně významná je také možnost využití detailních analýz terénu především při vytvoření hydrologicky korektního modelu povodí.

Při posouzení splnění vytyčených cílů a kvality výsledků je hodnocení práce považováno za velmi úspěšné. Byl vytvořen plně funkční model celého povodí Rakovnického potoka, i když jeho využitelnost jako celku je omezená z důvodu velikosti výsledných dat a náročnosti při exportování do programu HEC-HMS. Nicméně je možné rozdělení na dílčí celky, které již je plně kompatibilní a je ozkoušen bezproblémový průběh na modelovém povodí Kolečovického potoka, pro které jsou vypočteny rovněž veškeré požadované výstupní údaje.

Otázkou zůstává následné využití modelu. Ten plní veškeré požadavky pro využití nejen pro návrhové účely. Po kalibraci a verifikaci nad skutečným měřenými daty může sloužit také ke zpřesnění odvozených parametrů. Jeho využití je reálné i pro účely výzkumného projektu QH01247 „Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulární schopnosti v povodí Rakovnického potoka“, kdy může sloužit jako posouzení funkčnosti navrhovaných změn.

Pro mě se stala realizace diplomové práce velmi dobrým praktickým uplatněním vědomostí získaných při psaní bakalářské práce a jejich prohloubení. Pomohla mi



k získání všeobecného přehledu v oboru návrhové hydrologie a konkrétní aplikaci srážko-odtokových modelů a k rozvoji dovedností v GIS, jehož využití bych se chtěl věnovat i v budoucnosti.





## 10 Přehled literatury a použitých zdrojů

**BECKER A. et SERBAN P., 1990:** Hydrological models for water - resources system design and operation. *Operational Hydrology Report No. 34*. WMO, Geneva.

**BOSSARD M., FERANEC J. et OTAHEL J., 2000:** *CORINE land cover technical guide - Addendum 2000*. European Environmental Agency, Copenhagen.

**DAŇHELKA J., KREJČÍ J., ŠÁLEK M., ŠERCL P. et ZEZULÁK J., 2003:** *Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR*. ČZU v Praze, Praha.

**DJOKIC D., 2008:** *Comprehensive Terrain Preprocessing Using Hydro Tools*. ESRI, New York.

**DRATVA A., 1943:** *Mapa normálních ročních isohyet 1876-1925*. Státní ústav hydrologický a hydrotechnický v Praze, Praha.

**ESRI, 2009:** *Arc Hydro Tools - Tutorial*. Environmental Systems Research Institute, New York.

**FLEMING M. J. et DOAN J. H., 2009:** *HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension Version 4.2 - User's Manual*. US ACE HEC, Davis, CA.

**FLEMING M. J. et SCHARFFENBERG W. A., 2008:** *Hydrologic Modeling System HEC-HMS - User's Manual*. U.S. Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center - HEC, Davis, CA.

**HELLWEGER F., 1997:** AGREE - DEM Surface Reconditioning System. *Ferdi Hellweger - Page*. The University of Texas at Austin, 1. říjen 1997, online: <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/GISHYDRO/ferdi/research/agree/agree.html>, cit. 10. 3. 2010.

**HRÁDEK F. et KUŘÍK P., 2002:** *Hydrologie*. ČZU v Praze, Praha.

**HRAZDÍRA P., 1993:** *Hydrogeologická mapa ČR. List 12-14 Rakovník. Měřítko 1:50000*. Český geologický ústav Praha, Praha.

**HRAZDÍRA P., 1994:** *Hydrogeologická mapa ČR. List 12-13 Jesenice. Měřítko 1:50000*. Český geologický ústav Praha, Praha.

**HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 1998:** *HEC-1 Flood Hydrograph Package User's Manual*. Davis, CA : US Army Corps of Engineers , 1998.

**HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV, 1961:** *Podnebí ČSSR*. HMÚ, Praha.

**HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV, 1970:** *Hydrologické poměry ČSSR - díl III*. HMÚ, Praha.

**JENÍČEK M., 2009:** *Modelování průběhu extrémních povodní v kontextu krajinných změn a integrované protipovodňové ochrany - Disertační práce*. Univerzita Karlova v Praze, Praha.



**JOHNSON D., 1999:** *Unit Hydrograph Theory*. 2. leden 1999, online: [http://www.comet.ucar.edu/class/hydromet/07\\_Jan19\\_1999/html/unit\\_hydro\\_theory/index.htm](http://www.comet.ucar.edu/class/hydromet/07_Jan19_1999/html/unit_hydro_theory/index.htm), cit. 2. 4. 2010.

**KAŠPÁREK L., 2010:** *Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulární schopnosti v povodí Rakovnického potoka (pilotní projekt)*. VÚV T.G.M., v.v.i., Praha.

**KATEDRA PEDOLOGIE A OCHRANY PŮDY ČZU PRAHA, 2008:** Pedologická mapa 1:100000. *Portál veřejné správy České republiky*. 14. říjen 2008, online: <http://geoportal.cenia.cz>, cit. 10. 2. 2010.

**KULASOVÁ B., ŠERCL P. et BOHÁČ M., 2004:** *Projekt QD1368 - Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní*. Český hydrometeorologický ústav, Praha.

**KYSELÝ J., KAKOS V. et HALÁSKOVÁ O., 2008:** Dlouhodobé změny četnosti povodní na Vltavě v Praze a na Labi v Děčíně ve vztahu k atmosférické cirkulaci a významným srážkám. *Meteorologické zprávy*. Český hydrometeorologický ústav, Praha.

**OLMER M., 2006:** *Hydrogeologická rajonizace České republiky*. Česká geologická služba Praha, Praha.

**ŠERCL P., 2009:** Vliv fyzicko-geografických faktorů na charakteristiky teoretických návrhových povodňových vln. *Sborník prací ČHMÚ - svazek 54*. Český hydrometeorologický ústav, Praha.

**TRUPL J., 1958:** *Intensita krátkodobých dešťů v povodích Labe, Odry a Moravy*. VÚV Praha, Praha.

**VÁŠKA J. [ed.], 2007:** *Ochrana zemědělské půdy před erozí – Metodika*. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., Praha.

**Vyhláška MZe 327/1998**, kterou se stanoví charakteristika bonitovaných půdně ekologických jednotek a postup pro jejich aktualizaci. In *Sbírka zákonů České republiky*. Částka 108, ze dne 31.12.1998.

**ZOUBEK V., 1990:** *Geologická mapa ČR. Mapa předčtvrtohorních útvarů. Měřítko 1:200000. List Teplice - Annaberg-Buchholz*. Ústřední ústav geologický, Praha.

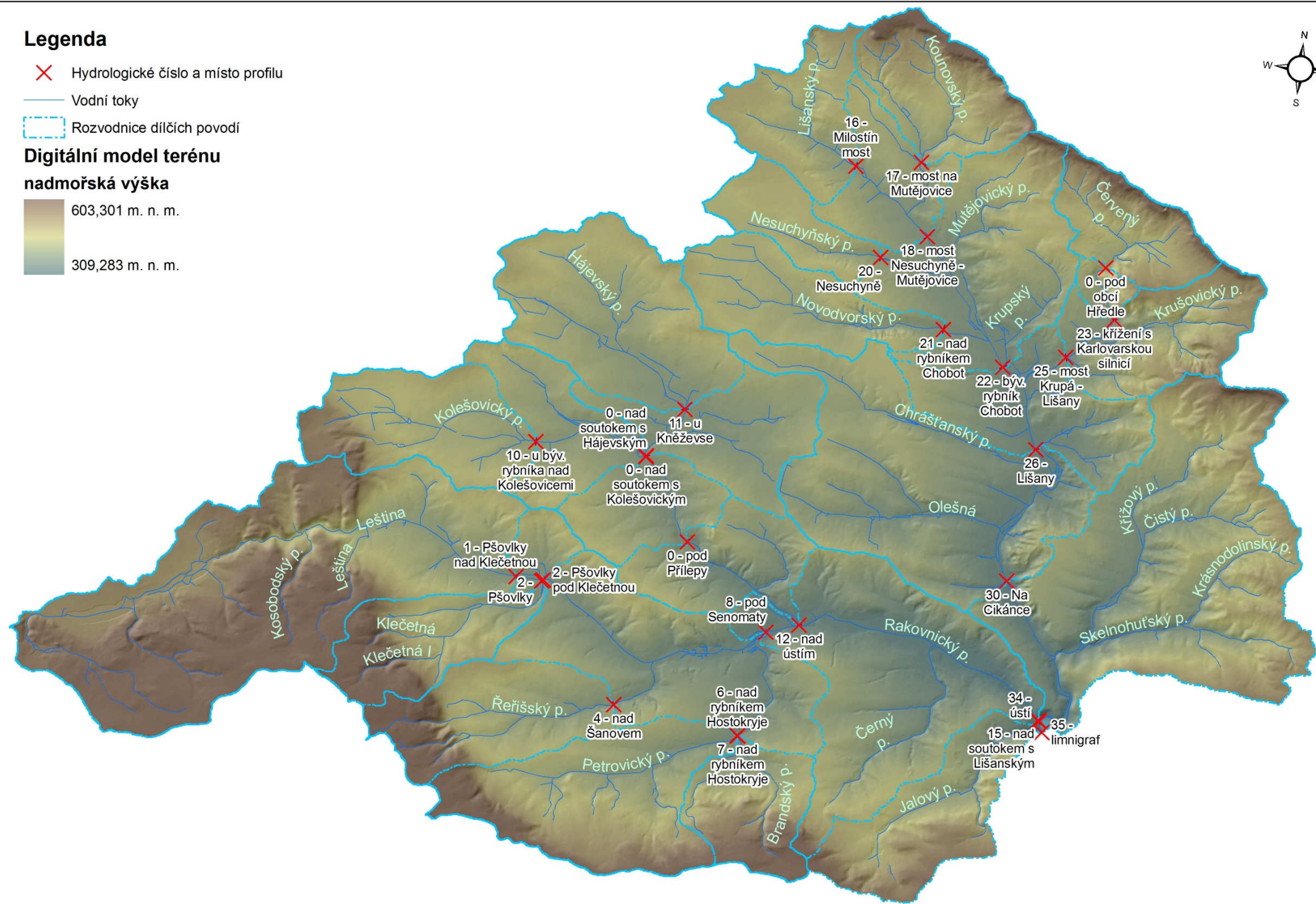
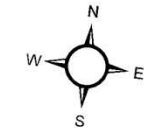


## **11 Přílohy**

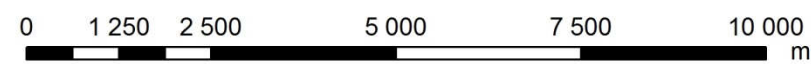
### Legenda

- ✕ Hydrologické číslo a místo profilu
- Vodní toky
- Rozvodnice dílčích povodí

### Digitální model terénu nadmořská výška



1:80 000



Výpracoval:

**VIZINA Štěpán**



**ČZU – Praha**

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

Předmět:

**DIPLOMOVÁ PRÁCE - Modelování maximálních průtoků v povodí Rakovnického potoka pomocí hydrologického programu HEC-HMS**

ročník/obor:

**2. ročník KRAJ**

Příloha č.:

**1**

Název přílohy

**Topografická mapa**

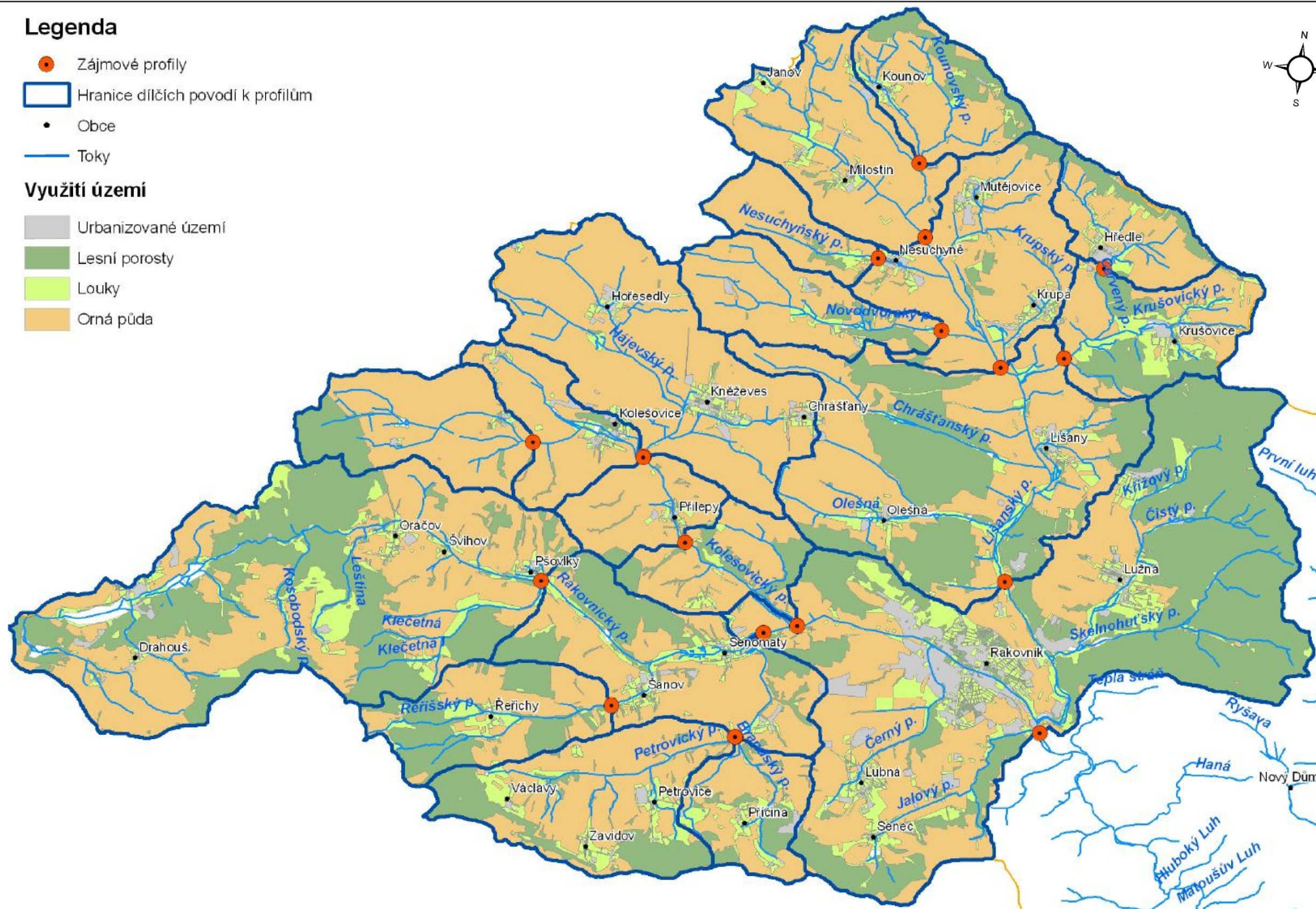
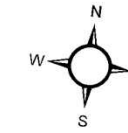
Školní rok:

2009/2010

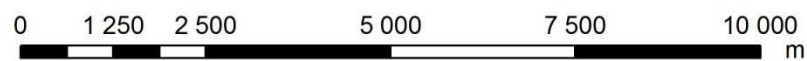
Měřítko:

1:80000

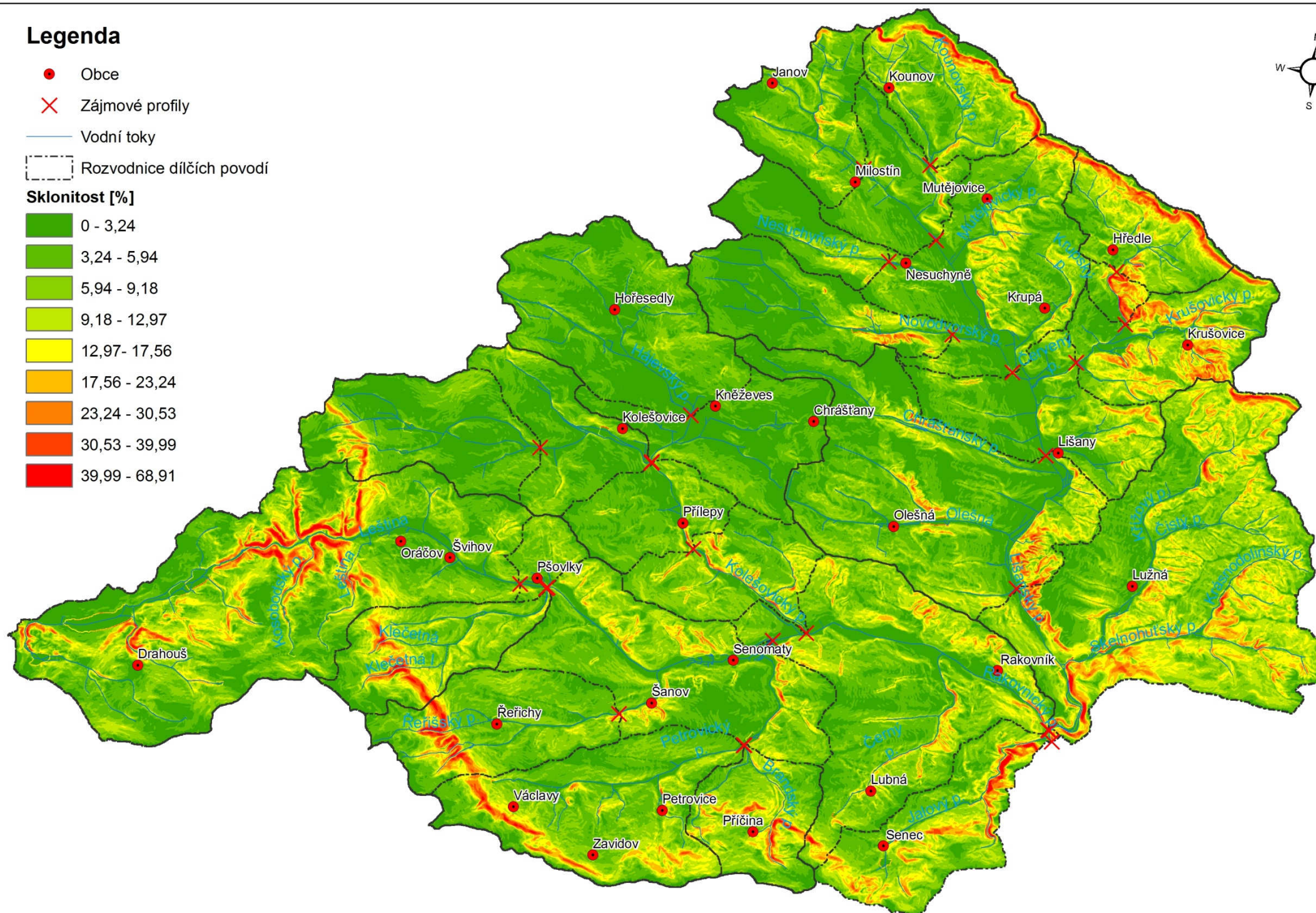
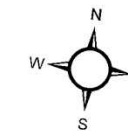
- Legenda**
- Zájmové profily
  - Hranice dílčích povodí k profilům
  - Obce
  - Toky
- Využití území**
- Urbanizované území
  - Lesní porosty
  - Louky
  - Orná půda



1:80 000



Vypracoval: <b>VIZINA Štěpán</b>		<b>ČZU – Praha</b> FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ	
Předmět: <b>DIPLOMOVÁ PRÁCE - Modelování maximálních průtoků v povodí Rakovníkého potoka pomocí hydrologického programu HEC-HMS</b>		ročník/obor: 2. ročník <b>KRAJ</b>	Příloha č.: 2
Název přílohy <b>Mapa využití pozemků dle databáze CORINE (Kašpárek, 2010)</b>		Školní rok: 2009/2010	Měřítko: 1:80000



1:80 000

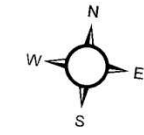
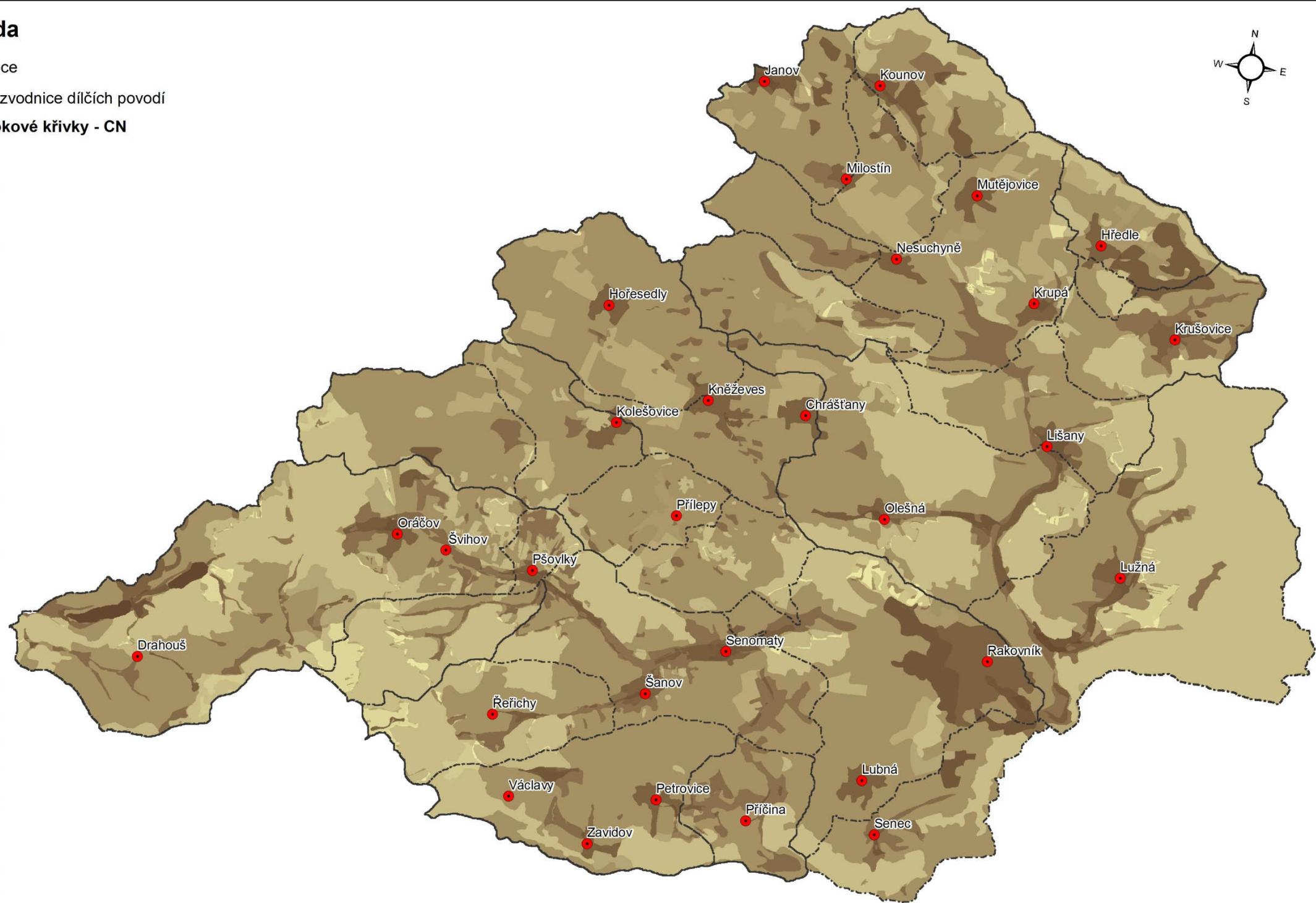
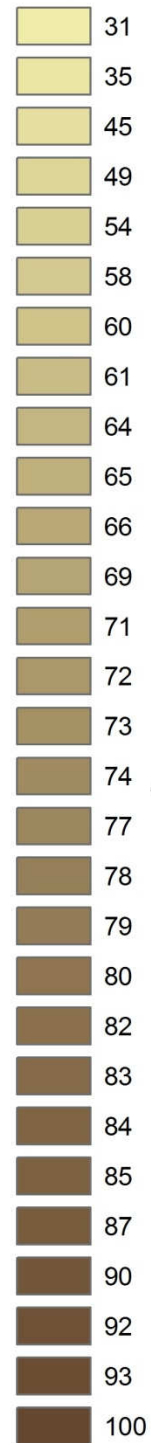


Vypracoval: <b>VIZINA Štěpán</b>		<b>ČZU – Praha</b> FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ	
Předmět: <b>DIPLOMOVÁ PRÁCE - Modelování maximálních průtoků v povodí Rakovnického potoka pomocí hydrologického programu HEC-HMS</b>		ročník/obor: 2. ročník <b>KRAJ</b>	Příloha č.: <b>3</b>
Název přílohy <b>Mapa sklonitosti terénu</b>		Školní rok: 2009/2010	Měřítko: 1:80000

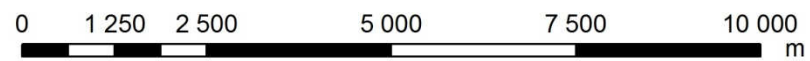
### Legenda

- Obce
- ⋯ Rozvodnice dílčích povodí

#### číslo odtokové křivky - CN



1:80 000



Vypracoval:

**VIZINA Štěpán**



**ČZU – Praha**

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

Předmět:

**DIPLOMOVÁ PRÁCE** - Modelování maximálních průtoků v povodí Rakovníkého potoka pomocí hydrologického programu HEC-HMS

ročník/obor:

2. ročník  
**KRAJ**

Příloha č.:

**4**

Název přílohy

**GRID čísel odtokových křivek - CN**


Školní rok:

2009/2010

Měřítko:

1:80000

## Legenda

 Rozvodí dílčích subpovodí

 Vodní toky


## HMS komponenty - uzly

 Diversion

 Junction

 Reservoir

 Sink

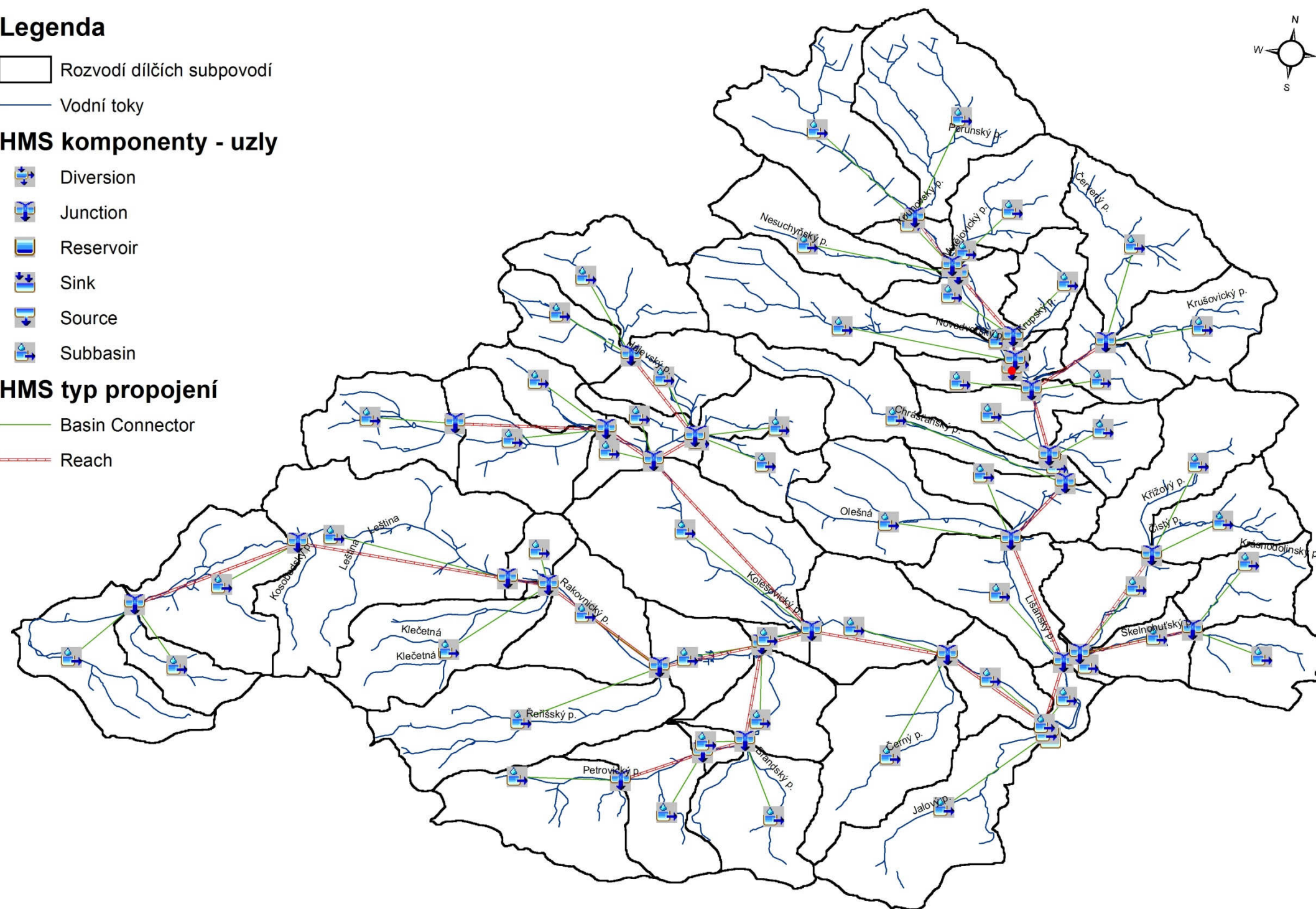
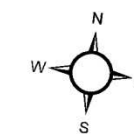
 Source

 Subbasin

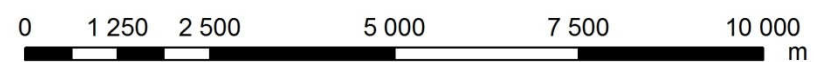
## HMS typ propojení

 Basin Connector

 Reach



1:80 000



Vypracoval:

**VIZINA Štěpán**

Předmět:

**DIPLOMOVÁ PRÁCE - Modelování maximálních průtoků v povodí Rakovníckého potoka pomocí hydrologického programu HEC-HMS**

Název přílohy

**Hydrologický model celého povodí Rakovníckého potoka**



**ČZU - Praha**

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

ročník/obor:

2. ročník **KRAJ**

Příloha č.:

**5**

Školní rok:

2009/2010

Měřítko:

1:80000