ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A

ENVIROMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ

NÁVRH A POSOUZENÍ RETENČNÍCH OPATŘENÍ V POVODÍ RAKOVNICKÉHO POTOKA

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Petr Máca, Ph.D.

Diplomant: Bc. Odile Brožíčková

2011

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Brožíčková Odile

Krajinné inženýrství

Název práce

Návrh a posouzení retenčních opatření v povodí Rakovnického potoka

Anglický název

The hydrological design and evaluation of the retention measures in the basin of the Rakovnicky Creak

Cíle práce

Na povodí Rakovnického potok - s uzavírajícím profilem Rakovník - navrhněte scénáře vhodných retenčních opatření. Vámi navržené scénaře vzájemně porovnejte z hlediska objemu retence v povodí a snížení kulminačních průtoků extrémních povodňových vln.

Metodika

1. Popiště stávají stav hydrologického systému povodí Rakovnický potok.
2. Navrhněte retenční opatření v povodí.
3. Posuďte jejich vliv na retenci vody v povodí a snížení kulminačních průtoků.
4. Navržené scénáře vzájemně porovnejte.

Harmonogram zpracování

05/2010 - 12/2010 popis stávajícho stavu povodí, místní rekognoskace a tvorba hydrologického modelu povodí
01/2011 - 02/2010 návrh retenčních scénářů
03/2011 - 04/2011 porovnání vyhodnocovaných scénářů

Rozsah textové části

bude upřesněn

Klíčová slova

retenční opatření, hydrologický návrh, kulminační průtok, retence povodí

Doporučené zdroje informací

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 práce

Máca Petr, Ing., Ph.D.

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE * FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ *

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.
Vedoucí katedry

prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.
Děkan fakulty

V Praze dne 22.2.2011

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Petra Máci, Ph.D a že jsem uvedla v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.
Současně dávám svolení, k uvedení této diplomové práce na webových stránkách FŽP.

V Praze dne 29.4.2011

…….
Bc. Odile Brožíčková

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Petrovi Mácovi Ph.D., za vedení diplomové práce a za cenné připomínky a rady vztahující se k této práci. Ráda bych dále poděkovala panu Ing. Štěpánovi Vizinovi, za odborné konzultace. Poděkování patří i VÚV TGM v.v.i, za poskytnutí důležitých údajů a informací pro zpracování mé diplomové práce a dále panu Ing. Jiřímu Pavláskovi, Ph.D. za pomoci při terénních měřeních.

V Praze dne 29.4.2011 …….

Bc. Odile Brožíčková

NÁVRH A POSOUZENÍ RETENČNÍCH OPATŘENÍ V POVODÍ RAKOVNICKÉHO POTOKA

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá vlivem agrotechnických a organizačních protierozních opatření na zlepšení retenčních schopností povodí Rakovnického potoka. Vzhledem k tomu, že je oblast postižena obdobími sucha, by tato opatření mohla přispět k zadržení povodňové vody.

V rámci této práce byly vytvořeny simulace hypotetických extrémních povodňových odtoků pro čtyři scénáře, které reprezentují chování povodí v reakci na možnou změnu využití v povodí. Po porovnání výsledků simulací se dospělo k závěru, do jaké míry je reálné agrotechnickými a organizačními opatřeními zlepšit odtokové poměry v povodí Rakovnického potoka.

Klíčová slova:
odtokové poměry, protierozní opatření, povodí

THE HYDROLOGICAL DESIGN AND EVALUATION OF THE RETENTION MEASURES IN THE RAKOVNICKY POTOK BASIN

ABSTRACT

This thesis consists in defining the efect of agro-technical and operational soil conservation measures to exceed the storage capacitiy of the Rakovnický potok Basin. Whereas the basin is influenced by hydrological drouht, these measures could eventually contribute to the retention of the available water from floods.

Simulations of extreme hypothetical runoff conditions where created for four scenarios which represent the behaviour of the river basin in response to a possible change of land use in the basin. After comparing the simulation results, it is concluded, to what real extent it is possible to improve the runoff conditions of the Rakovnický potok Basin by using agro-technical and operational measures.

Key words: runoff conditions, soil conservation measures, basin

OBSAH:

1. ÚVOD 9

2. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE 10

3. LITERÁRNÍ REŠERŠE 11

3.1. Vybrané metody srážko-odtokového modelování 11

3.1.1. Metoda SCS CN 11

3.1.2. Metoda sestavování návrhových hyetogramů dle ÚFA AV ČR 15

3.1.3. Metoda Clarkových jednotkových hydrogramů 17

3.1.4. Metoda Muskingum-Cunge 20

3.2. Odhad parametrů v prostředí ArcGIS pro účely simulace 22

3.2.1. Předzpracování terénu 22

3.2.2. Určení fyzikálních a hydrologických parametrů 24

3.3. Retenční opatření v povodí 26

3.3.1. Ochranné zatravnění 28

3.3.2. Vrstevnicové obdělávání 28

3.3.3. Výsev do strniště 29

3.3.4. Průlehy 29

4. CHARAKTERISTIKA STUDIJNÍHO ÚZEMÍ 31

4.1. Fyzicko-geografický popis území 31

4.2. Pedologické poměry 34

4.3. Klimatické poměry 36

4.4. Hydrologické poměry 38

5. METODIKA 40

5.1. Metodika modelování povodňového odtoku pro současný stav 40

5.1.1. Zpracování modelu v programu ArcGIS 40

5.1.2. Modelování odtokové odezvy v programu HEC-HMS 49

5.2. Metodika modelování povodňového odtoku pro vybrané scénáře 57

6. VÝSLEDKY 62

6.1. Scénář A 62

6.2. Scénář B 65

6.3. Scénář C 68

6.4. Scénář D 71

7. DISKUZE 73

8. ZÁVĚR 77
9. SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ 78
10. SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ 82
11. PŘÍLOHY 84

SEZNAM ZKRATEK:

CN	Číslo CN křivky (Curve Number)
CORINE	Databáze informací o životním prostředí (Coordination od Information on the Environment)
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
ČZU	Česká Zemědělská Univerzita v Praze
DIBAVOD	Digitální databáze vodohospodářských dat
DTM	Digitální model terénu
FŽP	Fakulta životního Prostředí
GIS	Geografický informační systém (Geografic Information systém)
HEC- HMS	Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling Systém
HSP	Hydrologická skupina půdy
IDW	Inverse Distance Weighted
P100	Teoretická stoletá srážková událost
P20	Teoretická dvacetiletá srážková událost
SCS CN	Soil Conservation Service Curve Number
UFA AVČR	Ústav fyziky atmosféry Akademie Věd ČR
USACE	United States Army Corps of Engineers
VÚV, v.v.i	Výzkumný ústav Vodohospodářský T.G. Masaryka
WMS	Webová mapová služba (Web Map Service)
ZABAGED	Základní databáze geografických dat

1. ÚVOD

Tato práce se zabývá vlivem vybraných retenčních opatření na zlepšení odtokových poměrů v povodí Rakovnického potoka.

Řešené povodí je oblastí vykazující nepříznivou hydrologickou bilanci vzhledem k tomu, že je oblast periodicky zatížena obdobími hydrologického sucha. Kromě efektu malých vodních nádrží na nadlepšení průtoků v těchto obdobích, je zapotřebí posoudit vliv opatření zvyšujících vsakovací schopnosti půdy a zároveň chránících půdu před erozí (Kašpárek, 2010).

Vzhledem k tomu, že se jedná o převážně zemědělské území, nebo-li o oblast s vysokým zastoupením orné půdy, bude se tato práce zabývat vlivem vybraných protierozních opatření. Přesněji zde budou navrhována opatření agrotechnického a organizačního charakteru. Organizační opatření jsou základem protierozní ochrany a spočívají v delimitaci kultur, rozmísťování plodin, ochranném zatravnění a zalesňování a určení velikosti a tvaru pozemku. (Holý, 1994). Agrotechnická opatření navazují na opatření organizační a používají se ke zlepšení vsakovací schopnosti půdy a vytvoření ochrany povrchu půdy především v období největšího výskytu přívalových srážek. Jedná se zejména o vrstevnicové obdělávání, výsev do strniště nebo do ochranné plodiny, hrázkování a mulčování. (Janeček, 2008). Posouzení vlivu těchto opatření je důležité nejen kvůli tomu, že jsou přírodě blízká, ale především vzhledem k jejich aplikovatelnosti na velkou plochu povodí.

Tato práce si klade za cíl posoudit možnost agrotechnických a organizačních opatření pro zmírnění účinků povodní a pro zlepšení infiltrace vody do půdy, přičemž bude posouzeno jaké množství vody lze ovlivnit a jaké plochy povodí můžeme těmito opatřeními ovlivnit.

Postup spočívá v sestavení hydrologického modelu povodí, který by uspokojivě reprezentoval chování Rakovnického povodí a jeho následnou úpravou pro poskytnutí údajů o změnách odtokových poměrů po aplikaci agrotechnických a organizační protierozních a protipovodňových opatření.

Tato diplomová práce vznikala souběžně se zpracováním dílčího úkolu v rámci projektu QH01247 „Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny a zlepšení akumulační schopnosti v povodí Rakovnického potoka“ na kterém se podílí VÚV TGM, v.v.i a ČZU v Praze. Na dílčím úkolu, jsem spolupracovala s Bc. Václavem Hradílkem a

Ing. Štěpánem Vizinou, přičemž byl mimo jiné v rámci této spolupráce vytvořen model současného stavu, který byl použit pro návrh opatření v rámci této DP.

2. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je návrh scénářů vhodných retenčních opatření ve formě zvolených protierozních opatření na povodí Rakovnického potoka s uzávěrovým profilem v místě limnigrafu Rakovník a jejich následného vzájemného porovnání z hlediska objemu retence i snížení kulminačních průtoků extrémních povodňových vln.

Prvním výsledkem této práce by mělo být vytvoření hydrologického modelu, který bude schopný predikovat extrémní průtoky v povodí Rakovnického potoka pro současný stav povodí. Budou zde využity dva programy a to program HEC-HMS od US Army Corps of Engineers a ArcGIS 9.3 od společnosti ESRI s nástavbou ArcHydro 9 a HEC-GeoHMS .

Dalším krokem bude návrh scénářů reprezentující navržená retenční opatření na povodí Rakovnického potoka. Na základě opatření uplatněných v jednotlivých scénářích bude vytvořený hydrologický model současného stavu poupraven tak, aby byl schopný predikce extrémních průtoku pro dané scénáře. Tyto výsledky budou následně porovnány jak s výsledky pro současný stav, tak mezi sebou.

V závěru této práce by mělo být určeno do jaké míry je reálně možné aplikací retenčních opatření ve formě zvolených protierozních, a tedy i protipovodňových opatření, zvýšit retenční schopnosti území a snížit extrémní kulminační průtoky.

3. LITERÁRNÍ REŠERŠE

První část této kapitoly se zabývá popisem použitých metodik srážko-odtokového modelování, tj. popisem vybraného srážko-odtokového modelu (SCS CN metoda), popisem metody, kterou byly sestaveny návrhové hyetogramy, dále metodou transformace odtoku (Clarkův jednotkový hydrogram) a zvolenou metodou simulace postupu vlny v toku (Muskingum- Cunge). Dále je zde popsáno jakým způsobem lze získat potřebná vstupní data do těchto metod v prostředí programu ArcGIS pomocí nástavby HEC-GeoHMS a jak programem nabízené nástroje fungují.
Poslední část této kapitoly je věnována vybraným měkkým opatřením pro zmírnění extrémních hydrologických jevů v krajině. Přesněji, zabývá se především delimitací kultur a agrotechnickými opatřeními.

3.1. Vybrané metody srážko-odtokového modelování

3.1.1. Metoda SCS CN

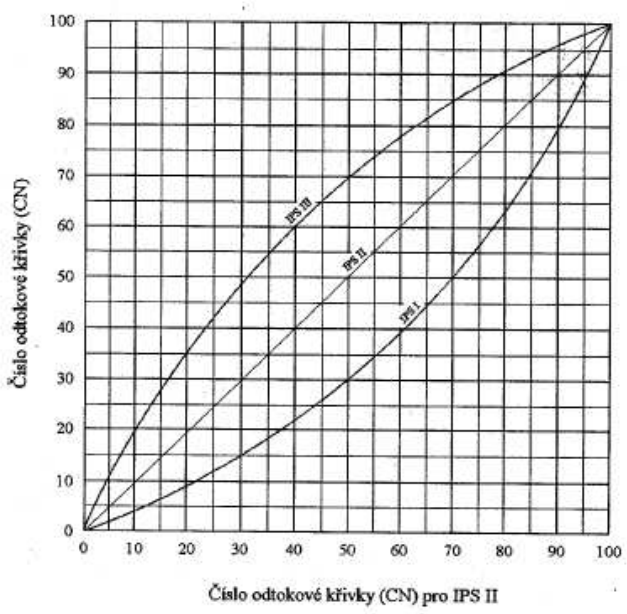
Pro účel diplomové práce byla zvolena metoda SCS CN křivek (Soil Conservation Service Curve Numer). Metoda je aplikovatelná na zemědělsky a lesnicky využívaných povodích o rozloze do 10 km² pro zjištění přímého a kulminačního průtoku (Váška, 2007), kde je pod pojmem přímý odtok rozuměn povrchový a hypodermický odtok, tj. odtok prosakující gravitační vody, který nedosáhne hladiny podzemní vody. (Hrádek et Kuřík, 2002)
Výpočet vychází z předpokladu, že poměr odtoku k úhrnu přívalové srážky je roven poměru objemu vody zadržené při odtoku k objemu vody, který může být potenciálně zadržen (Hošková, Pavlík , Uhrová , 2009) Metoda je založená na hydrologickém posouzení půdního druhu, porostního pokryvu, způsobu obhospodařování a předchozích vláhových poměrů (Kovář, 1990).

Číslo CN křivky, jak již bylo řečeno, je závislé na půdních hydrologických vlastnostech. Dle minimálních vsakovacích schopností půdy (dle hodnot nasycené hydraulické vodivosti Ks) se půdy dělí do 4 skupin- hydrologických skupin půd. (Kovář, 1990). Pro zařazení půdy do určité skupiny lze použit číslo HPJ (číslo hlavní půdní jednotky), kterou získáme ze 2. a 3. číslice kódu BPEJ (kód bonitovaných půdních jednotek).

Charakteristika hydrologických vlastností	Skupina půd
Půdy s vysokou rychlostí infiltrace (>0,12 mm . min^{-1}) i při úplném nasycení, zahrnuje převážně hluboké, dobře až nadměrně odvodněné písky nebo štěrky.	**A**
Půdy se střední rychlostí infiltrace (0,06-0,12 mm . min^{-1}) i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy středně hluboké až hluboké, středně až dobře odvodněné, hlinitopísčité až jílovitohlinité.	**B**
Půdy s nízkou rychlostí infiltrace (0,02-0,06 mm . min^{-1}) i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy s málo propustnou vrstvou v původním profilu a půdy jílovitohlinité až jílovité.	**C**
Půdy s velmi nízkou rychlostí infiltrace (<0,02 mm . 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.	**D**

Tab. 1 Hydrologické skupiny půd a jejich charakteristika (Zdroj: Janeček et al., 2008)

Pro výpočet objemu odtoku pro návrhové účely se doporučují hodnoty CN odvozené pro půdy středně nasycené vodou, tedy pro půdu s průměrnou nasyceností aktivní zóny (Hrádek, Kuřík, 2002). Vlhkost půdy je určována na základě 5- ti denního úhrnu předcházejících srážek, resp. hodnotou IPS (index předchozích srážek) podle které se půdy dělí dle předchozích vláhových podmínek vzestupně do 3 skupin, kde IPS III odpovídá půdě přesycené vodou z předcházejících dešťů. (Janeček et al., 2008)



Obr. 1 Hydrologické skupiny půd a jejich charakteristika (Zdroj: Janeček et al, 2007)

Dále se uvažuje s vlivem povrchu na odtok. Hydrologické podmínky se z tohoto hlediska dělí na špatné a dobré. Na zemědělské půdě záleží především na drsnosti povrchu, ponechání posklizňových zbytků, osevním postupu a na hustotě zapojení porostu. Co se týče lesního porostu závisí hydrologické podmínky na hustotě pokryvu vegetací a mocnosti hrabanky. (Janeček et al., 2008)

Kromě hydrologických vlastností půd a podmínek povodí jsou čísla odtokových křivek určována podle využití půdy, vegetačního pokryvu, způsobu obdělávání a uplatnění opatření zvyšujících infiltraci (viz kap 3.3.). Vzhledem k tomu, že je na povodí zpravidla zastoupeno více půdních a vegetačních komplexů, je výsledná hodnota CN stanovena váženým průměrem dílčích CN k celkové ploše řešeného subpovodí. (Kovář, 1990)

Kód	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	Jednoroční plodiny	65	75	83	86
242	Pole, louky, kultury	54	72	82	87
243	Zemědělské oblasti s přirozenou vegetací	58	69	77	80
311	Listnaté lesy	30	55	70	77
312	Jehličnaté lesy	30	55	70	77
313	Smíšené lesy	30	55	70	77
321	Přirozené louky	35	60	70	77
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

Tab. 2 Hodnoty CN dle využití území a HPJ (Kulasová et.al, 2004)

Pro odhad počáteční ztráty, která představuje součet ztrát před začátkem vytváření odtoku, nebo-li intercepci, akumulaci v mikrodepresích a adsorpci nejvrchnější vrstvy půdy (Janeček et al, 2008), se použijí vzorce dle Feldman, (2000):

$$I_a = 0{,}2 \cdot S \ \ [mm] \qquad \text{Eq.1}$$

přičemž se zde počítá s potenciální retencí S (potenciální objem, který může být zadržen) vyjádřenou jako:

$$S = \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN} \ [mm] \ = \frac{1000}{CN} - 100 \ [ft] \qquad \text{Eq.2}$$

Počáteční ztráta je tedy odhadovaná na 20% celkové potenciální retence, která je daná hodnotou čísla odtokových křivek (Kovář, 1990).

Jak již bylo řečeno výpočet vychází z předpokladu, že poměr odtoku k úhrnu přívalové srážky je roven poměru objemu vody zadržené při odtoku k objemu vody, který může být potenciálně zadržen (Hošková, Pavlík, Uhrová, 2009). Toto tvrzení lze vyjádřit vzorcem (Feldman,2000):

$$\frac{P_e}{P} = \frac{R}{S} \qquad \text{Eq.3}$$

kde P_e je výška odtoku [mm], P je úhrn příčinné srážky [mm] a R je objem vody zadržené v půdě [mm].

Vezmeme-li v úvahu, že $R = P - P_e$ a že k povrchovému odtoku dochází po určité počáteční ztrátě, která se odečte od srážky, získáme takto základní vzorec pro stanovení výšky přímého odtoku při použití metody CN křivek, který je vyjádřen vztahem (Feldman, 2000):

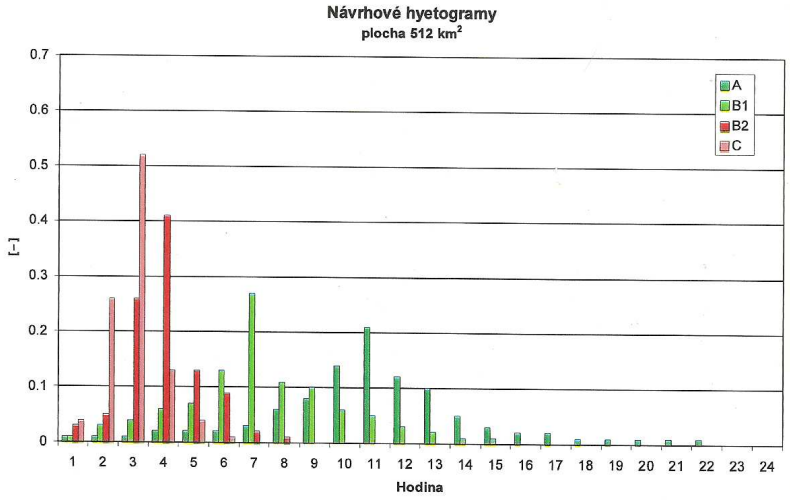
$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \ [mm] \qquad \text{Eq.4}$$

Metoda CN křivek transformuje objem srážek na objem, který vytváří odtok a na ztráty na základě čísla CN křivky.

3.1.2. Metoda sestavování návrhových hyetogramů dle ÚFA AV ČR

Pro účely stanovení maximálních průtoků je nutné znát nejen maximální jednodenní srážkové úhrny s požadovanou dobou opakování, ale také jejich časové rozložení pomocí tzv. návrhového hyetogramu. Návrhový hyetogram řeší časové rozložení celkového úhrnu návrhové *N*-leté maximální srážky tím, že úhrn rozdělí do kratších intervalů (Kulasová et al., 2004).

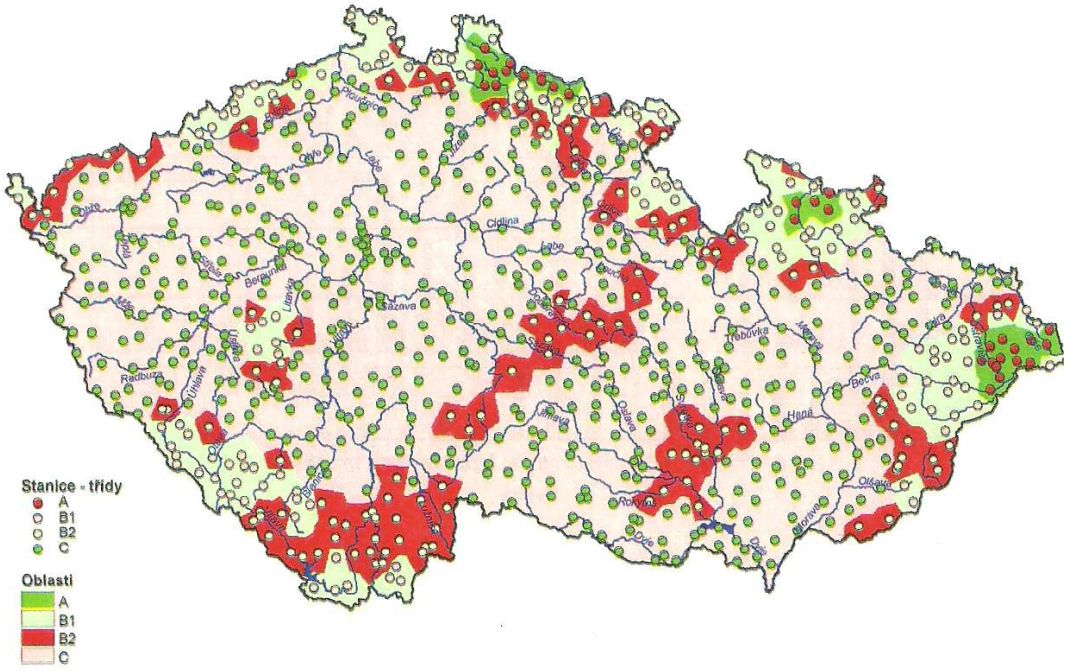
V této práci byla použita metoda vyvinutá Ústavem fyziky atmosféry AV ČR, rozdělující naše území do 4 oblastí na základě radarových dat (obr.4). Ústavem byly zpracovány návrhové hyetogramy pro různé velikosti ploch - 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512 , 1024 km2 (Šercl, 2009). Na obrázku 2 je zobrazen hyetogram pro plochu 512 km2.



Obr. 2 Návrhový hydrogram dle UFA pro povodí o ploše 512 km² (Zdroj: Kulasová et al, 2004)

Jednotlivé oblasti je možno dle hodnoty výšek stoletých srážek popsat následovně (Kovář, 2009, Kulasová et al, 2004):

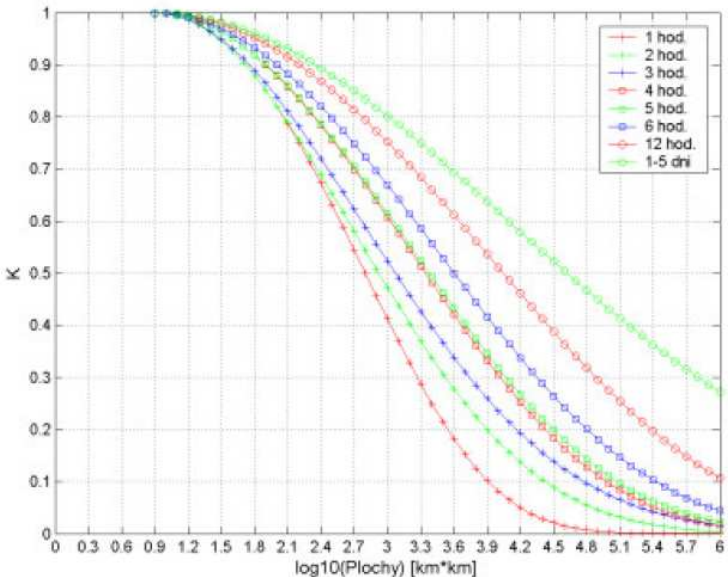
- Oblast A- $P_{100} \geq 150mm$, dominantní vliv na hodnotu P100 mají orograficky zesílené srážky,
- Oblast B1- $100mm > P_{100} < 150mm$, převažující vliv na hodnotu P100 mají orograficky zesílené srážky
- Oblast B2- $90mm > P_{100} < 100mm$ převažující vliv na hodnotu P100 mají konvektivní srážky
- Oblast C- $P_{100} \leq 90mm$, dominantní vliv na hodnotu P100 mají konvektivní srážky



Obr. 3 Rozdělení ČR do 4 oblastí na základě radarových dat (Zdroj: Kulasová et al, 2004)

Dle Šercl (2009) a Kulasová et al. (2004) je možné použít návrhové hyetogramy pouze pro simulační výpočty teoretických povodňových vln povodní letního typu.

Intenzita srážky a celkový úhrn s velikostí zasažené plochy klesá, proto je pro zjištění srážky dopadající na plochu povodí zapotřebí hyetogram upravit koeficientem poklesu srážky (Šercl, 2009). Tyto hodnoty byly odvozeny pro území ČR (Řezáčová et al.,2006):



Obr. 4 Pokles srážky daného trvání s velikostí zasažené plochy (Zdroj: Kulasová et al, 2004)

3.1.3. Metoda Clarkových jednotkových hydrogramů

Pro modelování přímého odtoku nabízí program HEC-HMS několik metod pro transformaci odtoku. Pro účely této práce byla vybrána metoda Clarkových jednotkových hydrogramů. Důvodem proč byla tato metoda zvolena, byl fakt, že narozdíl od ostatních metod nabízí extenze programu ArcGis Hec-GeoHms nástroje pro výpočet některých jejích vstupních parametrů.

Metoda jednotkových hydrogramů vychází z předpokladu, že na různých povodí vyvolají deště stejné doby trvání a intenzity hydrogramy, které jsou si svým tvarem podobné. Předpokládají se prakticky neměnné fyzicko-geografické charakteristiky povodí a předpokládá se stejné časové a plošné rozložení deště a stejný stav předchozí nasycenosti povodí. (Hrádek et Kuřík, 2002)

Clarkova metoda bere v úvahu při odvozování hydrogramu pro povodí dvě kritické fáze v procesu transformace přímého odtoku. Jedná se o převedení odtoku od místa vzniku do místa uzávěrového profilu (translaci) a o snížení jeho objemu pomocí retenční schopnosti povodí (atenuaci neboli tlumení) (Noorbakhsh et al, 2005). Translace je zde řešena metodou izochron a atenuace metodou lineárních nádrží (Máca, 2010).

Cílem této metody je vytvořit hydrogram přizpůsobený pro každé subpovodí pomocí svých charakteristik, kterými jsou doba koncentrace (time of concentration) a doba zdržení (storage coefficient)(Máca, 2010).

Pod pojmem doba koncentrace se rozumí čas, který je potřebný pro odtok vody z hydraulicky nejvzdálenějšího bodu v povodí do uzávěrového profilu povodí.Tc lze vypočítat pomocí doby doběhu TLag. Doba doběhu je část doby koncentrace, tedy je to doba mezi výskytem maxima srážkové události a kulminací v uzávěrovém profilu. Jinak řečeno je to vzdálenost mezi těžištěm hyetogramu a dobou výskytu kulminace. (Chow, 1964)

Dobu doběhu lze vypočítat dle rovnice (Feldman, 2000):

$$T_{lag} = \frac{L^{0,8} \cdot (S+1)^{0,7}}{1900 \cdot Y^{0,5}} \left[h\right] \qquad \text{Eq.5}$$

kde L je délka nejdelší dráhy pozemního odtoku [ft], Y je průměrná sklonitost povodí [%] a S je již zmíněná potenciální retence.

Doba koncentrace se nechá dopočítat dle rovnice (Feldman, 2000):

$$Tc = 1{,}67 \cdot T_{lag} \ [h] \qquad \text{Eq.6}$$

Doba zdržení představuje dobu zdržení vody v povodí a je druhým potřebným vstupem do výpočtu transformace odtoku. Dle Šercla, 2009 lze pro účely simulace povodňových událostí na území ČR vypočítat faktor pomocí rovnice:

$$R = A \cdot L^{B} \cdot S_{1085}^{C} \qquad \text{Eq.7}$$

kde:

L *je* maximální délka povrchového odtoku (mi)

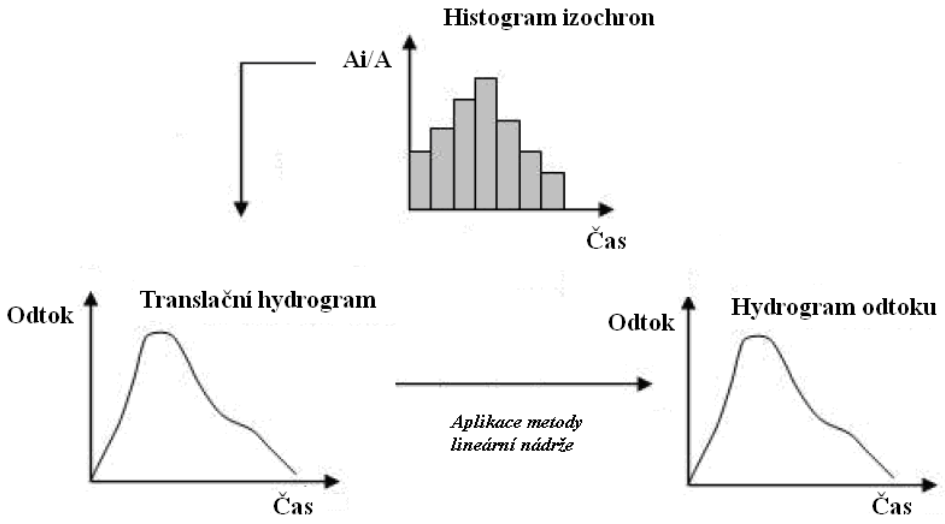
S_{1085} je sklon ve mezi 10 % a 85 % maximální délky údolnice (ft/mi)

A, B, C jsou parametry, které dle ČHMÚ pro ČR odpovídají hodnotám:

A = 80, B = 0,342, C = -0,79

Jak již bylo řečeno, Clarkův model jednotkového hydrogramu spojuje model izochron a lineární nádrž. Prvním krokem je získání časoprostorového histogramu izochron. Jedná se o histogram vyjadřující rozdělení povodí podle dob dotoku. Povodí je nejdříve rozděleno na izochrony, nebo-li na oblasti se stejnou dobou dotoku, pro které platí, že součet včech časových intervalů se rovná době koncetrace povodí a že jsou intervaly stejně velké. (Máca, 2010)

Prostorový parametr se poté získá přiřazením plochy každému časovému intervalu, kterou v daném časovém rozmezí odvodňuje. (Yilmaz M., Usul N., 2011)



Obr. 5 Princip metody Clarkova jednotkového hydrogramu. (Zdroj: Yilmaz et Usul.,2011)

Aplikací hyetogramu na povodí se vytvoří translační hydrogram, vyjadřující závislost odtoku na čase. V této fázi je vyřešen problém translace. Tento hydrogram slouží jako vstup do lineární nádrže, kde dojde ke snížení objemu odtoku na základě retenčních schopností povodí. (Yilmaz et Usul, 2011)

Výpočet snížení objemu odtoku vychází z rovnice kontinuity, která platí pro všechny hydrologické systémy (Dingman, 2002):

$$I_t - O_t = \frac{dS}{dt} \qquad \text{Eq.8}$$

Kde dS/dt vyjadřuje změnu retence za čas t, I_t přítok do nádrže v čase t a O_t je odtok v z nádrže v čase t.

Retenci v nádrži v čase t lze vyjádřit rovnicí (Feldman, 2000)

$$S_t = R \cdot O_t \qquad \text{Eq.8}$$

kde R je doba zdržení

Sloučením těchto rovnic a využitím metody konečných diferencí získáme finální rovnici: (Feldman, 2000)

$$O_t = C_A \cdot I_t + C_B \cdot O_{t-1} \qquad \text{Eq.9}$$

kde C_A a C_B jsou koeficienty “routingu“.

Koeficienty se vypočítají dle následujících rovnic (Feldman, 2000)

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0{,}5\Delta t} \qquad \text{Eq.10}$$

$$C_B = 1 - \frac{\Delta t}{R + 0{,}5\Delta t} \qquad \text{Eq.11}$$

$$C_B = 1 - C_A \qquad \text{Eq.12}$$

3.1.4. Metoda Muskingum-Cunge

Pro simulaci povodňové události je zapotřebí klást důraz na transformaci při postupu vlny v korytě. Tato problematika je sice částečně řešena metodou Clarkového jednotkového hydrografu, ale pro lepší výsledky simulace je vhodné použít navíc metodu určenou pro tento účel. Hec- Hms proto nabízí opět několik metod. Pro účely této práce byla vybrána metoda Muskingum- Cunge.

Tato metoda umožňuje v rámci dílčích subpovodí na základě známé geometrii koryta vypočítat objem zadržené vody v říčním úseku. V programu Hec- HMS vyžaduje metoda zadání reprezentativního příčného profilu pro každý úsek, délky úseku, sklonu úseku a Manningova součinitele drsnosti pro koryto i pro inundaci. Program umožňuje zadat různé součinitele drsnosti pro pravý a levý břeh. (Jeníček, 2009)

Tato metoda, založená na rovnici kontinuity a momentové rovnici dle Jeníčka (2009) nejlépe popisuje proudění vody v korytě. Pro metodu jsou důležité 2 parametry a to parametr K (h), který určuje dobu, za kterou v daném povodí proteče voda korytem (tzv. postupová doba) a parametr X reprezentující váhu vyjadřující vliv klínové retence v rámci daného úseku a to jak v korytě tak v inundaci.

Metoda Muskingum-Cunge je rozšířením metody Muskingum. Tuto rovnici upravil Cunge tím, že z parametrů K a X udělal časově proměnlivé parametry, jejichž hodnoty jsou funkcí srážkové události (Brunner et Gorbrechr,1991)

Základní rovnice má tvar : (Reshma et al, 2010, Todini, 2007)

$$Q_{i+1}^{j+1} = C_1.Q_i^{j+1} + C_2.Q_i^{j} + C_3.Q_{i+1}^{j} \qquad \text{Eq.13}$$

Tuto rovnici lze lépe pochopit pokud se uvažuje graf na které jsou zaneseny na horizontální ose hodnoty vzdálenosti (i=1,2,3,..) a na vertikální čas (j=1,2,3,..). Interval časového kroku je pro každý interval stejný, stejně tak jako interval vzdáleností.

Pro koeficienty C_1, C_2, C_3 platí následující rovnice (Reshma et al, 2010, Todini, 2007):

$$C_1 = \frac{-2KX + \Delta t}{2k(1-\varepsilon) + \Delta t} \quad \text{Eq.14}$$

$$C_2 = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t} \quad \text{Eq.15}$$

$$C_3 = \frac{2KX + \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t} \quad \text{Eq.16}$$

Pro parametr X a K platí (Reshma et al, 2010, Todini, 2007):

$$K = \frac{\Delta X}{Ck} \quad \text{Eq.17}$$

$$X = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{Q}{B \cdot Ck \cdot S_0 . \Delta x}\right) \quad \text{Eq.18}$$

$$C_k = \left(S_0^{1/2}\right) \cdot \left(\frac{5}{3}\right) \cdot y^{2/3} \quad \text{Eq.19}$$

$$y = \left(\frac{n \cdot Q}{S_0^{1/2} \cdot B}\right)^{3/2} \quad \text{Eq.20}$$

kde n je Manningův koeficient drsnosti a S_0 je sklon toku, Δx je délka dílčího úseku a Ck bývá označován jako celerita.

Hec-HMS tedy propočítá koeficienty uvedené v rovnici X pro každý časoprostorový úsek, vzhledem k tomu, že koeficienty K a X se mění v závislosti na čase a prostoru (Reshma et al, 2010).

3.2. Odhad parametrů v prostředí ArcGIS pro účely simulace

Pro to, aby se daly získat vstupní parametry do výše uvedených metod, je nejdříve zapotřebí vytvořit hydrologicky korektní digitální model terénu (HydroDEM- hydrological digital elevation model). Jedná se o model terénu, který uspokojivě reprezentuje odtok v rámci povodí.(Fleming et Doan, 2009). K jeho zpracování může být použita nástavba programu ArcGIS, HEC- geoHMS, která je propojená s další nástavbou programu ArcGIS ArcHydro. Nástavby slouží k vypočítání charakteristik povodí a vytvoření modelu terénu se správným odtokovým schématem na základě charakteristik DTM (digitálního modelu terénu, též odznačován jako DEM) a umožňují takto vzniklý model dále upravit pomocí údajů o aktuálním stavu.

Postup lze rozdělit do 2 fází - předzpracování terénu a odhad parametrů povodí. (Fleming et Doan, 2009)

3.2.1. Předzpracování terénu

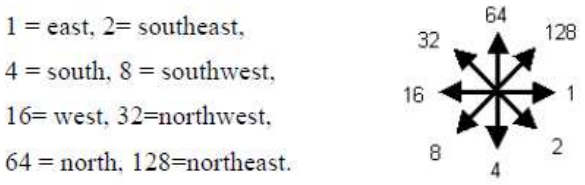
Pod pojmeme předzpracování terénu (terrain preprocessing) se rozumí soubor kroků upravujících model terénu na základě charakteristik DMT (Fleming et Doan, 2009). Nástroje se nachází na panelu HEC-GeoHMS v záložce Terrain Preprocessing. Rovněž lze využít stejné záložky na panelu ArcHydro, ovšem tato obsahuje i další nástroje, které nesouvisí s přípravou modelu pro export do programu HEC-HMS.

Vzniká 5 nových rastrových vrstev a to vrstva reprezentující směr odtoku, vrstva linií soustředěného odtoku, vrstva vygenerovaných vodních toků, vrstva obsahující segmentaci toků na úseky a vrstva subpovodí pro jednotlivé úseky. Další 2 vrstvy vznikají převedením posledních 2 rastrů na vektorové vrstvy a dále vzniká vektorová obsahující informace o vzájemném napojení subpovodí .(Fleming et Doan, 2009)

Program také nabízí možnost upřesnit model na základě informací o současném stavu. Lze do modelu „zařízнout“ vrstvu vodních toků, určit rozdělení toků, vymezit směr proudění přes vodní plochy nebo zanést do modelu známé rozvodnice. (Venkatesh, 2010).

Prvním používaným nástrojem je Fill Sinks, který umožňuje vyplnit terénní propady. Tyto deprese vznikají většinou v důsledku nepřesnosti vstupních dat do modelu, ale může se jednat i o skutečné terénní útvary (Fleming et Doan, 2009). V DTM se vyskytují nepřesnosti a to v důsledku tvorby DTM z vrstevnic v místech velkého zakřivení vrstevnic, jako jsou údolí a hřebeny. Tyto oblasti jsou pro hydrologii nejdůležitější, protože se zde nachází buď vodní tok nebo rozvodnice (Rieger, 1999). Většina vygenerovaných depresí se většinou nacházejí v těchto zónách a to zejména v hlubokých nebo úzkých údolích.

Dále je možné určit směru odtoku pomocí funkce Flow direction. Program přiřazuje směr odtoku každé buňce pomocí jednosměrného algoritmu D8. Princip je takový, že pro každou buňku se vypočítá sklon mezi ní a jejími 8 sousedními buňkami. Takto je každé buňce přiřazen 1 směr odtoku a je ji dána hodnota směru.. Tímto způsobem vzniká rastr nabývající osmi hodnot a vyjadřující směr odtoku pro každou buňku. (Fleming et Doan, 2009)



Obr.6. Přiřazené hodnoty dle směru odtoku (Zdroj: Fleming et Doan, 2009)

Pro vytvoření gridu (rastru), obsahující informace o akumulaci odtoku lze využít nástroje Flow Accumulation, který pro každou buňku sčítá hodnoty buněk, které do dané buňky přispívají. Tímto způsobem vzniká grid, který dále sloužil k vygenerování systému vodotečí použitím funkce Stream definition. Rastr nabývá hodnot 1 pro buňky, které byly definovány jako součást vodotečí. Ostatním buňkám je přiřazena hodnota „NoData“ (Paritosh, 2002). Uživatel musí zvolit prahovou hodnotu plochy, kterou bude buňka muset odvodňovat, aby byla součástí vodoteče. Tato hodnota může být zadána jako plocha (m^2) nebo jako počet buněk. Čím menší je zvolená prahová hodnota, tím větší bude počet vygenerovaných úseků vodních toků v dalším kroku a tím pádem i vznikne větší počet dílčích povodí (Fleming et Doan, 2009). Prahová hodnota by se měla ideálně pohybovat v rozmezí 0,5-1% maximální hodnoty gridu vzniklým použitím nástroje Flow Accumulation. Pokud by byla stanovena hodnota nižší než 0,5% nebude výsledek přesnější a navíc zkomplikuje další kroky předzpracování. Lze zvolit hodnoty vyšší než 1%, ale pokud by byla výrazně vyšší, docházelo by ke značnému zpomalení dalších úkonů (Djokic, 2008).

Pro rozdělení systému vodotečí na úseky mezi jednotlivými soutoky nabízí program nástroj Stream segmentation. Pro vytvoření jednotlivých subpovodí složí nástroj Catchment Grid Deliniation (Fleming et Doan, 2009). Takto vzniklé dva gridy je zapotřebí převést na vektorové vrstvy. Důvodem je především ten, že grid může obsahovat pouze 1 charakteristiku, atribut, zatímco vektor může obsahovat více atributů a tato vlastnost je pro další práci s těmito vrstvami nezbytná. K tomuto účelu nabízí program nástroje Drainage Line Processing a Catchement Polygon Processing (Fleming et Doan, 2009).

Nástojem Adjoint Catchment Processing, který připojuje jednotlivé subpovodí na sebe na základě informací z vektorové vrstvy úseků toků a subpovodí, vzniká další vektorová vrstva. Poslední vytvořený polygon v této vrstvě je proto shodný s celou plochou povodí. Závěrečným krokem v rámci terénního předzpracování je vygenerování uzávěrových profilů k jednotlivým subpovodím vytvořených pro každý dílčí úsek vodotečí. K tomuto účelu nabízí extenze HEC- GeoHMS nástroj Drainage point processing, kterým vzniká nová bodová vektorová vrstva (Fleming et Doan, 2009, Djokic, 2008).

3.2.2. Určení fyzikálních a hydrologických parametrů

Nástavba HEC-GeoHMS umožňuje vypočítat potřebné charakteristiky subpovodí a úseků toku. Charakteristiky se buď zapisují do atributové tabulky již existujících vrstev nebo se vytváří vrstvy nové. Některé údaje by se daly získat pomocí jiných funkcí programu ArcGis, bylo by to ovšem značně komplikovanější a časová náročnost práce by byla nesrovnatelná.

Jedná se o sedm fyzikálních charakteristik, tj. o délku úseků toků, sklon úseků toku, sklonitost subpovodí, informace o údolnici, těžiště každého subpovodí, jeho nadmořská výška a nejdelší dráhu povrchového odtoku z těžiště do uzávěrového profilu. V manuálu programu jsou popsány následovně (Fleming, Doan, 2009):

River length - Připíše do nového sloupce atributové tabulky vrstvy vodního toku délku. River slope - Připíše do nových sloupců atributové tabulky vrstvy vodních toků nadmořskou výšku počátečního a koncového bodu a sklon. Basin slope- Tato funkce vyžaduje existenci rastru sklonitosti terénu. Pomocí funkce Basin slope a vrstvy sklonitosti vypočítaná program průměrnou hodnota sklonitosti pro jednotlivé subpovodí a hodnoty zanese do nového sloupce atributové tabulky vrstvy povodí. Longest flowpath- Vytvoří vrstvu s nejdelší

dráhou povrchového odtoku pro všechna subpovodí. V podstatě se jedná o vygenerování údolnic a jejich charakteristik pro každé subpovodí. Do atributové tabulky se takto zapíší údaje o délce údolnice, o nadmořské výšce jejího počátku a konce a její sklon a to pro každé dílčí povodí. Basin Centroid- Tímto nástrojem se vytvoří bodová vrstva obsahující těžiště každého dílčího povodí. Centroid elevation - Připíše do nového sloupce atributové tabulky vrstvy těžišť nadmořskou jejich výšku na základě údajů z digitálního modelu terénu. Centroid flow path- Vytvoří se takto nová vrstva znázorňující nejdelší dráhu povrchového odtoku do uzávěrového profilu subpovodí z každého bodu těžiště.

Nástavba programu ArcGIS, HEC-GeoHMS mimo jiné umožňuje odhadnout některé hydrologické parametry potřebné pro srážko-odtokové modelování pomocí metody SCS-CN a transformacní metody Clarkového jednotkového hydrogramu. Obě tyto metody jsou popsány v této práci v kapitole 3.1.

V prostředí ArcGis pomocí extenze HEC-GeoHMS lze získat pro zmíněné dvě metody tyto parametry: průměrnou hodnotu CN křiky pro každé subpovodí, procentuální podíl nepropustných ploch, doba koncentrace a dále parametry potřebné pro výpočet doby zdržení.

První dva parametry se určí pomocí nástrojů ArcGis. Nástroje sady Hec-GeoHMS slouží pouze pro zápis parametrů do tvaru převeditelného do programu HEC-HMS. Tedy neslouží k vytvoření nových vrstev. Pro určení doby koncentrace je zapotřebí nejdříve určit parametr Tlag. K tomuto účelu se mezi funkcemi nabízených v extenzi HEC-GeoHMS nachází nástroj pod názvem CN Lag Method. Z této hodnoty se dopočítá doba koncentrace dle rovnice eq. 6. Dále lze v prostředí ArcGis stanovit několik parametrů potřebných pro výpočet doby zdržení pomocí nástroje Flow Path Parameters from 2D Line nástavby ArcHydro, která vyplní maximální délku povrchového odtoku (mi), sklon (ft/mi) mezi 10-85% maximální délky údolnice (S1085) do atributové tabulky (nejdelší dráhy povrchového odtoku). Dobu koncentrace lze poté pro jednotlivá subpovodí dopočítat dle rovnice eq. 7. (Fleming et Doan, 2009)

3.3. Retenční opatření v povodí

Tato práce se zabývá především vlivem vybraných „měkkých“ opatření, tj. opatřeními, která se realizují v celém povodí a jsou přírodě blízká (Jeníček, 2009), na extrémní kulminační průtoky. Z měkkých opatření se konkrétně jedná o některá protierozní opatření, která zvyšují retenční schopnost povodí.

Protierozní opatření zahrnují opatření organizačního, agrotechnického a technického charakteru.

Organizační opatření jsou základem protierozní ochrany a spočívají v delimitaci kultur, rozmísťování plodin, ochranném zatravnění a zalesňování a určení velikosti a tvaru pozemku (Holý, 1994). Agrotechnická opatření navazují na opatření organizační a používají se ke zlepšení vsakovací schopnosti půdy a vytvoření ochrany povrchu půdy především v období největšího výskytu přívalových srážek. Jedná se zejména o vrstevnicové obdělávání, výsev do strniště nebo do ochranné plodiny, hrázkování a mulčování (Janeček et al 2007). Technická opatření, se používají tehdy, pokud nelze dosáhnout požadovaného cíle organizačními a agrotechnickými opatřeními. Z hlediska protipovodňového účinku slouží především k neškodnému odvedení povrchových vod z povodí a k retardaci povrchového odtoku. Patří sem jak zemní úpravy jako jsou například terénní urovnávky, terasy, protierozní meze, tak prvky hydrografické mezi které se řadí protierozní příkopy, průlehy, zatravněné údolnice, protierozní hrázky a protierozní nádrže (Janeček et al, 2008).

Technická opatření sice nepatří do skupiny „měkkých“ opatření, ale budou zde některá zmíněna z toho důvodu, že vybraná opatření lze realizovat na velké části povodí, tedy dají se aplikovat na zemědělskou půdu, jejíž zastoupení na řešené lokalitě je 57 %.

Všechna tato opatření snižují hodnotu CN (viz tab.3)

Využití půdy	**Způsob obdělávání**	**Hydrologické podmínky**	**Čísla odtokových křivek – CN pro hydrologické skupiny půd**			
			A	**B**	**C**	**D**
Úhor	čerstvě zkypř.	-	77	86	91	94
	Pz	Šp	76	85	90	93
	Pz	Db	74	83	88	90
Širokořádkové plodiny (okopaniny)	Př	Šp	72	81	88	91
	Př	Db	67	78	85	89
	Př + Pz	Šp	71	80	87	90
	Př + Pz	Db	64	75	82	85
	Vř	Šp	70	79	84	88
	Vř	Db	65	75	82	86
	Vř + Pz	Šp	69	78	83	87
	Vř + Pz	Db	64	74	81	85
	Vř + Pr	Šp	66	74	80	82
	Vř + Pr	Db	62	71	78	81
	Vř + Pr + Pz	Šp	65	73	79	81
	Vř + Pr + Pz	Db	61	70	77	80
Úzkořádkové plodiny (obilniny)	Př + Pz	Db	60	72	80	84
	Vř	Šp	63	74	82	85
	Vř	Db	61	73	81	84
	Vř + Pz	Šp	62	73	81	84
	Vř + Pz	Db	60	72	80	83
	Vř + Pr	Šp	61	72	79	82
	Vř + Pr	Db	59	70	78	81
	Vř + Pr + Pz	Šp	60	71	78	81
	Vř + Pr + Pz	Db	58	69	77	81
Víceleté pícniny, luštěniny	Př	Šp	66	77	85	89
	Př	Db	58	72	81	85
	Vř	Šp	64	75	83	85
	Vř	Db	55	69	78	83
	Vř + Pz	Šp	63	73	80	83
	Vř + Pz	Db	51	67	76	80
Pastviny s pokryvem	< 50 %	-	68	79	86	89
	50 - 70 %	-	49	69	79	84
	> 75 %	-	39	61	74	80
Louky	sklízené	-	30	58	71	78
Křoviny s pokryvem	< 50 %	-	48	67	77	83
	50 - 70 %	-	35	56	70	77
	> 75 %	-	30	48	65	73
Sady se zatravněným meziřadím		Šp	57	73	82	86
		Stř	43	65	76	82
		Db	32	58	72	79
Lesy		Šp	45	66	77	83
		Stř	36	60	73	79
		Db	30	55	70	77
Zemědělské dvory		-	59	74	82	86
Komunikace s příkopy	dlážděné, živičné		83	89	92	93
	makadamové, štěrkové		76	85	89	91
	nezpevněné, hliněné		72	82	87	89
Nepropustné plochy			98	98	98	98

Tab. 3 Hodnoty CN pro zemědělské pozemky (Janeček et al, 2008)

3.3.1. Ochranné zatravnění

Ochranné zatravnění se používá na půdách, které nelze ekonomicky obhospodařovat a tudíž využívat jako ornou půdu a není ani účelné je zalesnit. Optimálně zapojený travní porost je nejlepší protierozní ochranou. (Holý, 1994)

Co se týče vlivu travních porostů na povrchový odtok, tak pro představu přívalová srážka, která na úhoru způsobí odtok 100 m3. ha-1 se projeví na dobře odvodněné louce jen 0 – 7 m3.ha (Hůla et al, 2003).

Travními porosty by měly být dle chráněny plochy (Janeček et al, 2008):

- Podél břehů vodních toků a nádrží (tzv. buffer zóny)
- V dráhách soustředěného povrchového odtoku
- Profily průlehů a těles ochranných hrázek

Dále by měly být zatravněny svahy se sklonem větších jak 21% a na svazích méně erozně ohrožených více jak 31%.

3.3.2. Vrstevnicové obdělávání

Samotná orba snižuje povrchový odtok a erozi tím, že mění charakteristiky půdy jako je drsnost jejího povrchu, pórovitost a omezuje tvorbu škraloupu- půdní krusty (Hůla et al, 2003). Vrstevnicová orba vede k zachycení povrchového odtoku v brázdách a řádcích. Nedochází k vytvoření dráhy soustředěného povrchového odtoku, dochází k plošnému rozptylu vody a tím i zvýšení infiltrace do půdy (viz tab 4) (Holý, 2003). Vliv orby na hodnotu odtokových křivek je patrný z tab 3, kde je toto opatření označeno zkratkou „vř“.

Způsob orby	Plocha pole (m2)	Srážka (mm)	Odtok (mm)	Součinitel odtoku
Po sklonu	2000	33	1,2	0,040
Po vrstevnicích	3000	31	0,1	0,003

Tab. 4 Souvislost směru orby s odtokem (Zdroj: Holý, 2003)

3.3.3. Výsev do strniště

Velký význam mají půdo-ochranné technologie, které ponechávají velkou část posklizňových zbytků plodin na povrchu půdy. Při přívalové srážce tím dochází k zachycení kinetické energie dopadajících kapek, k omezení destrukce půdních agregátů a vzniku půdní krusty, čímž se zvyšuje vsakovací schopnost půdy a snižuje se velikost povrchového odtoku. Nevýhodou této techniky je zvýšená možnost zaplevelení a potřeby herbicidů a případné rozšíření chorob plodin. (Hůla et al, 2010)

Vliv výsevu do strniště na hodnotu odtokových křivek je patrný z tab 3, kde je toto opatření označeno zkratkou „pz“.

3.3.4. Průlehy

Příčné průlehování spočívá v rozdělení dlouhého svahu průlehy na svahy kratší. Vzdálenost mezi průlehy jsou závislé na sklonu pozemku, propustnosti půd, úhrnu a intenzitě návrhových přívalových srážek (Janeček et al, 2007). Průlehy jsou nejvhodnějšími hydrografickými prvky pro zachycování a neškodné odvádění náhlých povrchových odtoků a smyvů půdy. Jsou budované jako mělké otevřené příkopy smírným sklony svahů, které jsou obdělávané nebo zatravněné (Hůla et al, 2003).

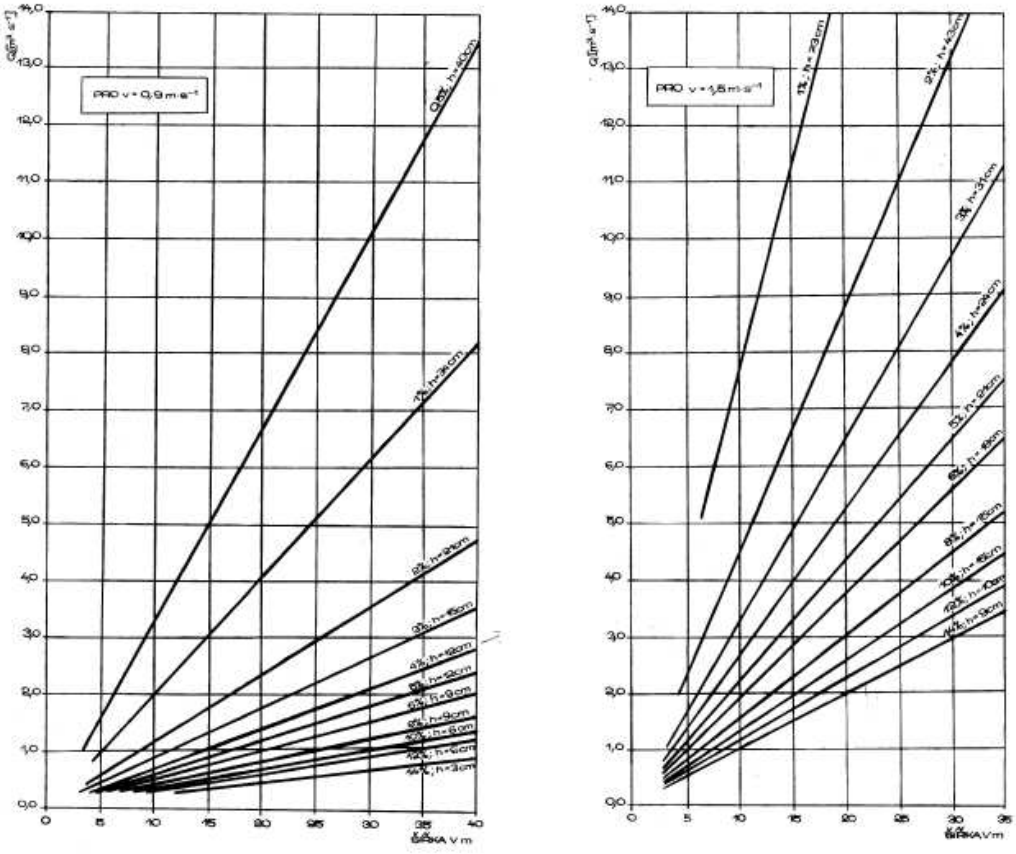
Vliv tohoto opatření na snížení hodnot odtokových křivek je patrný z tab 3, kde je toto opatření označeno zkratkou „pr“.

Z funkčního hlediska se průlehy navrhují dle Janečka et al, (2008) jako průlehy záchytné, sběrné a svodné. Záchytné slouží k ochraně pozemku před „cizí“ vodou (tj. vodou přitékající z jiných pozemků. Do skupiny se sběrnou funkcí se řadí průlehy vsakovací a odváděcí. Vsakovací průlehy slouží pouze k vsakování vody do půdy, nemusí tedy mít podélný sklon. Odváděcí průlehy se navrhují na svazích s hlubšími půdami do sklonu nejvýše 15 % a slouží k odvádění vody z pozemku do svodných průlehů, kterými jsou zpravidla zatravněné nebo obdělávatelné dráhy soustředěného odtoku. (Janeček et al, 2007)

Nejmenší hloubka sběrných průlehů se doporučuje 0,5 m, sklony svahů 1:10 (případně 1:5) kvůli přejezdům. Dimenzují se na déšť s periodicitou 0,1 (déšť s dobou opakování alespoň jedenkrát za 10 let) o době trvání 15 minut. (Holý, 2010)

Zatravněné údolnice byly u nás velmi rozšířené. Vznikaly na základě zkušeností zemědělců jako ochrana před rýhovou erozí nebo jejich častého zamokření, kdy travní, popř. lesní porost byl tím jejich nevhodnějším využitím. V rámci scelování pozemků byly neuváženě rušeny a zapojovány do bloků orné půdy. (Hůla et al, 2003)

Zatravněné údolnice chránící dráhy povrchového odtoku, který se v důsledku členitosti terénu soustřeďuje v přirozených údolnicích a úžlabinách se upravují do tvaru paraboly, zřídka do trojúhelníku nebo lichoběžníku (Janeček et al, 2008). Průtočné profily se navrhuje tak, aby byl schopné odvést návrhový kulminační průtok Q10 (s dobou opakování alespoň jedenkrát za 10 let). K návrhu lze například využít nomogramů (Obr. 7), ze kterých se pro návrhový průtok určí hloubka a šířka profilu údolnice pro daný sklon. (Janeček et al, 2007)



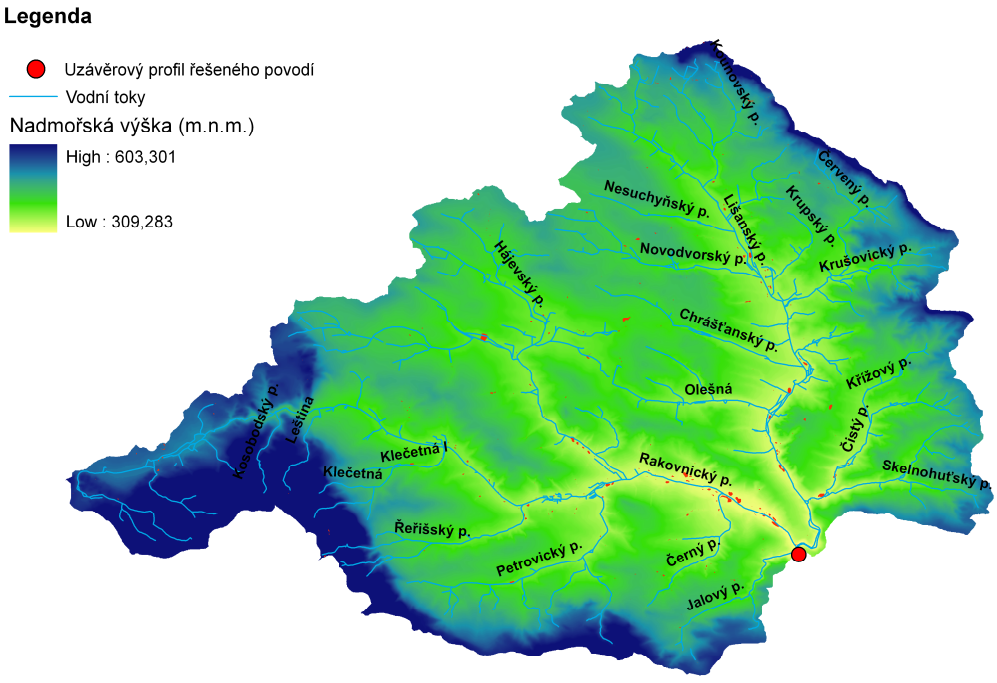
Obr. 7 Nomogramy pro dimenzování zatravněné údolnice (Zdroj: Janeček et.al, 2007)

4. CHARAKTERISTIKA STUDIJNÍHO ÚZEMÍ

Jak již bylo řečeno v úvodu, tato diplomová práce vznikala souběžně při spolupráci na dílčím úkolu pilotního projektu QH01247 „Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulační schopnosti v povodí Rakovnického potoka“, na kterém se podílí ČZU v Praze a VÚV, v.v.i. Z tohoto důvodu byly některé označené části této kapitoly částečně převzaty z textové zprávy „Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulační schopnosti v povodí Rakovnického potoka“(Kašpárek, 2010) . Vzhledem k této skutečnosti se tato kapitola nebude zabývat veškerými charakteristikami území, protože jsou již podrobně rozebrány ve zmíněném dokumentu. Je zde věnována pozornost pouze charakteristikám území, které jsou pro tuto práci nezbytné.

4.1. Fyzicko-geografický popis území

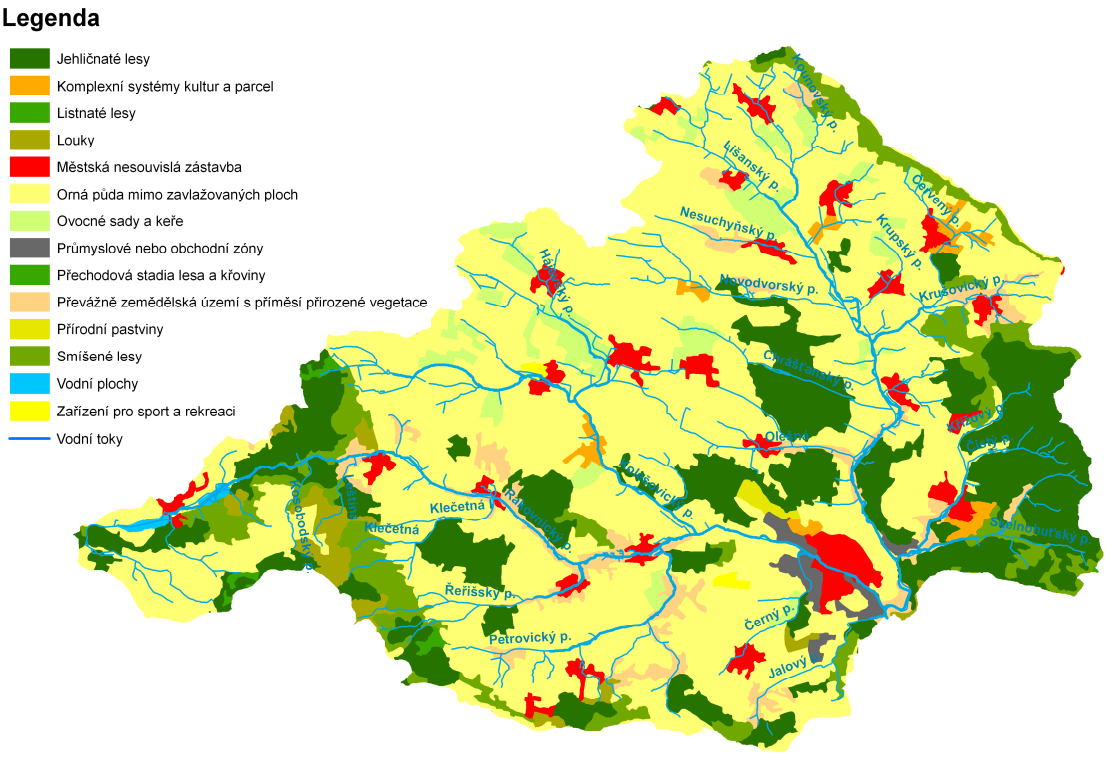
Rakovnický potok pramení u obce Drahouš přibližně 3 km od Jesenice a ústí do Berounky v obci Roztoky. V rámci diplomové práce a již zmíněného výzkumu je řešeno povodí pod městem Rakovník, který má uzávěrový profil nad vodoměrnou stanicí Rakovník. Tok vede povodím o rozloze 302,04 km² s průměrnou nadmořskou výškou 407 m.n.m východním směrem a jeho nejvýznamnější přítoky jsou oba levostranné. Jedná se o Kolešovický potok a Lišanský potok (Kašpárek, 2010). Hlavní toky a topografie jsou znázorněny na obrázku 8.



Obr. 8 Topografická mapa se znázorněním toků v povodí Rakovnického potoka

Jedná se o povodí převážně zemědělské, kde 57,2 % jeho plochy tj. 172,9 km² tvoří orná půda. Tato informace sehrála hlavní roli pro zvolení metody srážko-odtokového modelování (viz kap 3.1.1.), tak i pro zvolení návrhových scénářů. Druhým nejvíce zastoupeným druhem využití krajiny jsou lesní porosty zaujímající přes čtvrtinu plochy povodí, které jsou zde zastoupeny především jehličnatými lesy. Ty pokrývají 18,79 % plochy území , lesy smíšené 6,66 % a listnaté pouze 0,01%.

Na obrázku 9 je znázorněno rozmístění jednotlivých druhů využití krajiny dle databáze CORINE, ze kterého byly spočítané údaje o jejich rozloze a zastoupení v povodí využitím nástrojů programu ArcGis pro statistické analýzy. Dále byla pro každý krajinný typ vypočítána průměrná hodnota CN křivky. Porovnáme- li průměrnou hodnotu CN křivky pro ornou půdu pro řešené povodí (tab. 5) s tabulkou hodnot CN křivek pro jednotlivé využití (tab 2 a 3) a zastoupením hydrologických skupin půd (obr.12), lze usoudit, že i přes to, že se jedná o průměr, lze tuto hodnotu vhodnými organizačními nebo agrotechnickými opatřeními snížit.

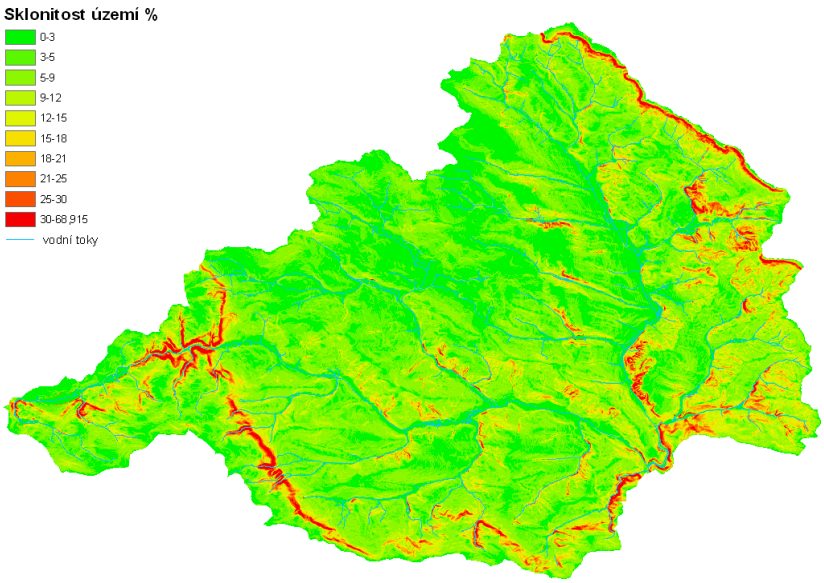


Obr. 9 Využití území povodí Rakovnického potoka dle CORINE

Využití	Plocha (km^2)	procentuální zastoupení (%)	Průměrné CN
orná půda mimo zavlažovaných ploch	172,75	57,21	73,16
Jehličnaté lesy	56,75	18,79	51,41
Smíšené lesy	20,06	6,64	53,49
Městská nesouvislá zástavba	13,32	4,41	85,02
Převážně zemědělská území s příměsí přirozené vegetace	13,24	4,38	69,20
ovocné sady a keře	12,15	4,02	66,63
Louky	4,85	1,61	69,19
Komplexní systémy kultur a parcel	3,20	1,06	70,60
Průmyslové nebo obchodní zóny	2,89	0,96	90,05
Přechodová stádia lesa a křovin	0,87	0,29	58,64
Přírodní pastviny	0,69	0,23	57,32
Vodní plochy	0,57	0,19	100,00
Zařízení pro sport a rekreaci	0,60	0,20	67,64
Listnaté lesy	0,02	0,01	55,00
	302,0	100,00	967,34

Tab.5 Zastoupení krajinných typů a jejich průměrná hodnota CN křivky

Co se týče sklonových poměrů je z obrázku 10 je patrné, že v severozápadní části povodí, kde se nachází většina ploch využívaných jako orná půda jsou sklony minimální, převážně do 12%. Na zbylé části povodí jsou sklony větší. Ve vyšších nadmořských výškách se nachází pásy vysokých sklonitostí, kde maximální sklonitost dosahuje téměř 39 %. Průměrný sklon povodí je 7%. (Kašpárek, 2010)

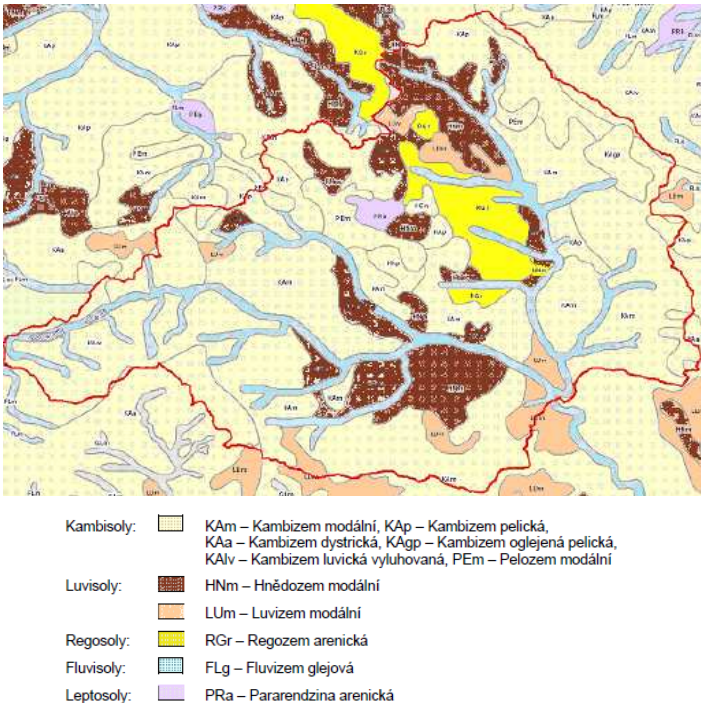


Obr. 10 Mapa sklonitosti povodí Rakovnického potoka

4.2. Pedologické poměry

Z pedologických poměrů je pro účel této práce zásadní informace o propustnosti půd. Proto se tato podkapitola bude věnovat infiltračním schopnostem půd nacházející se v povodí Rakovnického potoka z hlediska jejich zařazení do skupin hodnocení HSP (hydrologických skupiny půd).

Z obrázku 11 lze konstatovat, že převažující referenční třídou půd v území jsou Kambisoly.

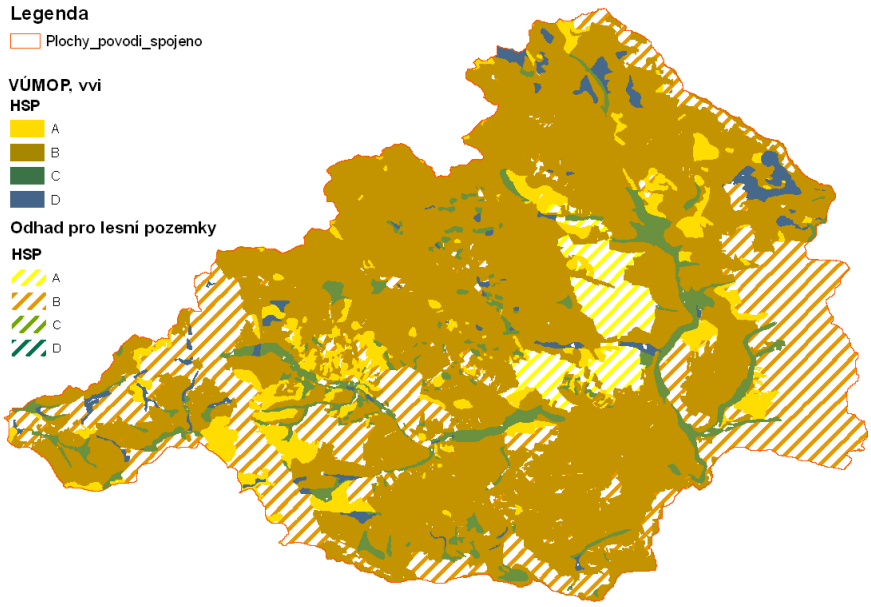


Obr. 11 Pedologické poměry (KPOP ČZU v Praze, 2008)

Kambisoly jsou zde zastoupeny především třídou Kambizem. Tato třída se objevuje ve vyšších nadmořských výškách povodí. Kambizem modální, dystrická a luvická mezi půdy se střední rychlostí infiltrace (Ks= 0,06-0,12 mm/min) a proto odpovídá skupině B v hodnocení HSP. Kambizem pelická a oglejená patří už do skupiny C HSP. Do Kambisolů patří ještě třída Pelozem, která se vyznačuje velmi malou propustností a řadí se tedy do skupiny D HSP. V nižších nadmořských výškách se vyskytují Luvisoly, přičemž z půdních subtypů je zde více zastoupen typ hnědozem modální nad Luvizem. Oba typy patří do skupiny B HSP. Dále se v území vyskytují Regosoly a to v povodí Lišanského potoka. Regosoly s rychlostí infiltrace vyšší než 0,12 mm/min se řadí do skupiny A HSP. Na fluviální náplavy v blízkosti toků jsou vázány Fluvisoly, z důvodu rozmanitosti jejich složení se řadí buď do skupiny B

nebo C HSP na základě jejich složení. Poslední vyskytující se třídou jsou Leptosoly. Tato třída má velmi malé zastoupení a řadí se do skupiny A HSP. (Kašpárek,2010)

Z obrázku 14 je patrné, že se nachází na naprosté většině území půdy se střední rychlostí infiltrace (Ks= 0,06-0,12 mm/min) a odpovídá skupině B v hodnocení HSP.



Obr. 12 Hydrologické skupiny půd v povodí Rakovnického potoka

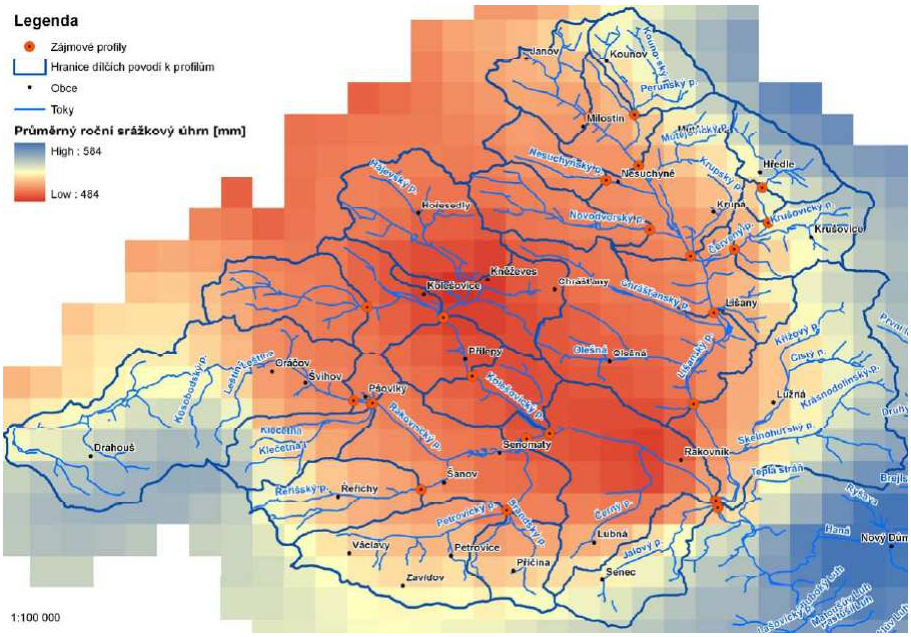
Prázdné oblasti odpovídají územím pokrytých lesním porostem, kde dle kapitoly 3.1.1 jsou hydrologické podmínky závislé především na hustotě pokryvu vegetací a mocnosti hrabanky. Tyto údaje musely být odhadnuty. Odhad proběhl na základně informací získaných terénním průzkumem oblasti a dále na základě výše uvedené mapy dle sousedních půd sousedících s těmito oblastmi a na základě pedologických poměrů. Většina území pokryta lesním porostem byla zařazena do HSP B a některé plochy v Lišanském povodí byly zařazeny do HSP A, vzhledem k výskytu Regosolů. Výsledné plošné rozdělené půdy dle HSP je znázorněn v tabulce 5.

HSP	Plocha (km^2)	Zastoupení (%)
A	37,66	12,47
B	246,59	81,66
C	11,92	3,95
D	5,80	1,92
Celkem	**302,0**	**100,0**

Tab.6 Plošné rozdělení hydrologických skupin půd

4.3. Klimatické poměry

Roční úhrn srážek se na území Rakovnického potoka pohybuje mezi 484 až 584 mm. Srážkové úhrny jsou nejnižší v severozápadní části povodí kde se nachází většina orné půdy, zatímco nejvyšší úhrny se nacházejí při severovýchodním okraji území (Kašpárek,2010). Plošné rozložení srážek průměrných ročních úhrnů srážek je vyznačen na obrázku 13.



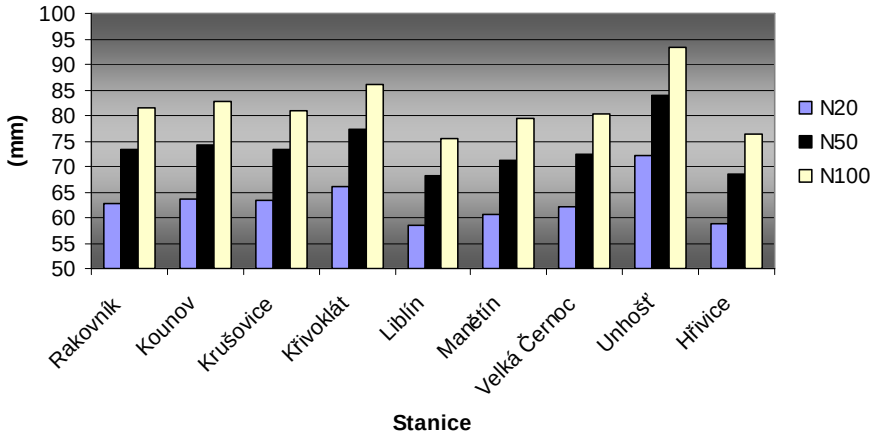
Obr. 13 Plošné rozdělení průměrný ročních srážkových úhrnů (Kašpárek, 2010)

Co se týče rozdílu výšek dlouhodobých průměrných srážek, nejsou poklesy nijak velké. Dle tabulky 7 došlo v minulém století k výraznějšímu poklesu srážek pouze ve stanici Kounov a to o 47 mm, které odpovídají změně o 8,3%. (Kašpárek,2010)

Stanice	**Nadmořská výška m.n.m.**	**Průměrný roční úhrn srážek (mm)**		
		1875 -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
Období		**Průměr po přepočtu na 407 m.n.m.**		
1875 -1925				
1901-1950		**526**		
1961-2008			**529**	
				522

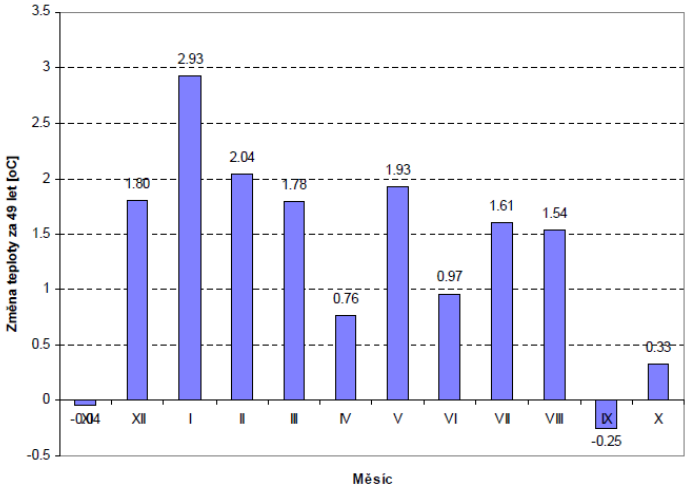
Tab.7 Dlouhodobé průměrné roční úhrny srážek ve vybraných stanicích (Zdroj: Kašpárek, 2010)

Důležitým údajem pro získání srážkového vstupu do modelu jsou hodnoty maximálních jednodenních srážkových úhrnů s požadovanou dobou opakování (viz kapitola 3.1.2). V následujícím grafu jsou zobrazeny hodnoty těchto úhrnů s dobou opakování 100, 50 a 20 let pro srážkoměrné stanice ležící v řešeném území a jeho okolí, které byly získány z tabulek Šamaje-Valoviče-Brázdila (Šamaj et.al, 1985).



Obr.14 Maximální jednodenní srážkové úhrny pro požadovanou dobu opakování

Na území se nachází pouze 3 klimatické stanice. Průměrná teplota z pozorování klimatické stanice Kněževes z období 1995-2008 je 8,5 °C, zatímco za období 1901-1950 cca 7,5 °C. Na zkoumané lokalitě je v současnosti teplota podstatně vyšší, než v první polovině 20. století. (Kašpárek,2010)



Obr.15 Roční chod změn teplot za 49 odpovídající lineárním trendům (Zdroj: Kašpárek, 2010)

4.4. Hydrologické poměry

V následujících tabulkách jsou obsaženy základní hydrologické charakteristiky, kterými jsou m-denní průtoky (průměrný denní průtok dosažený nebo překročený m-dní v roce) , N- leté průtoky (kulminační průtok, který je dosažen nebo překročen jednou za N roků). Výsledky simulace současného stavu budou porovnány s hodnotami v tabulce 9 .

Potok	Profil	Prekročení dnů v roce						
		30	**90**	**180**	**270**	**330**	**355**	**364**
Rakovnický	nad Kolešovickým p.	0,4	0,23	0,15	0,11	0,07	0,04	0,02
Kolešovický	ústí	0,19	0,1	0,07	0,05	0,03	0,02	0,01
Rakovnický	pod Kolešovickým p.	0,59	0,33	0,22	0,15	0,11	0,05	0,03
Rakovnický	nad Lišanským potokem	0,64	0,36	0,24	0,17	0,12	0,06	0,03
Lišanský	ústí	0,51	0,28	0,19	0,13	0,09	0,04	0,03
Rakovnický	pod Lišanským potokem	1,15	0,64	0,43	0,3	0,21	0,1	0,06

Tab.8 M-denní průtoky dle Hydrologických poměrů III (Zdroj: Kašpárek 2010)

Potok	Profil	Prekročení dnů v roce						
		1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Rakovnický	nad Kolešovickým p.	10	12	16	19	23	30	41
Kolešovický	ústí	8	10	13	16	19	25	33
Rakovnický	pod Kolešovickým p.	14	17	21	26	33	41	56
Rakovnický	nad Lišanským potokem	15	18	23	28	31	44	60
Lišanský	ústí	14	17	21	25	30	41	55
Rakovnický	pod Lišanským potokem	24	29	38	47	57	77	102

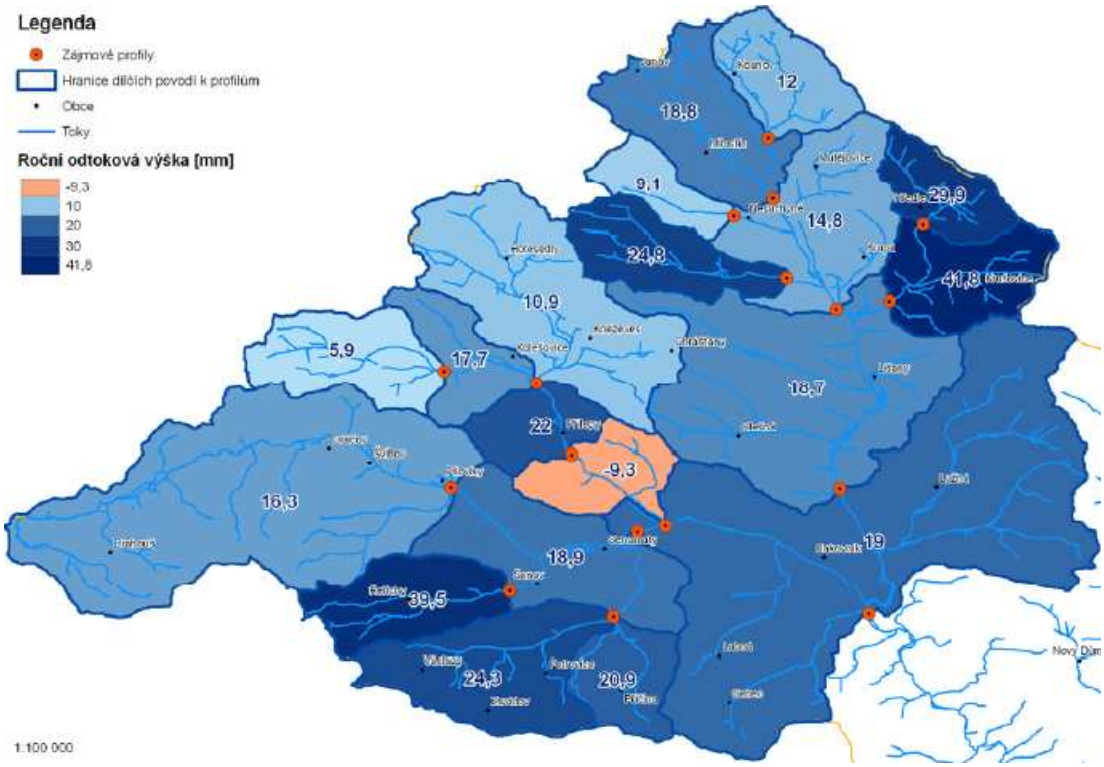
Tab.9 N-leté průtoky dle Hydrologických poměrů III (Zdroj: Kašpárek 2010)

Z následující tabulky lze vyčíst mimo jiné hodnoty průměrného roční průtoku a průměrné roční výšky odtoku pro různá období. Lze konstatovat, že v posledních obdobích klesá průměrná roční výška odtoku výrazněji než průměrná roční výška srážek, kde v posledním období je patrný pokles výšky odtoku na polovinu hodnoty, která byla odvozená pro první období. (Kašpárek, 2010)

Období	Průměrná roční výška srážek (mm)	Průměrná roční výška odtoku (mm)	Rozdíl výšky srážek a odtoku (mm)	Průměrný roční průtok (m^3/s)	Specifický průměrný průtok $l/s/km^2$
1931-1960	517	73	444	0,68	2,32
1960-1980	526	90	436	0,867	2,87
1966-2008	521	64	448	0,611	2,02
1988-2008	497	48	449	0,46	1,52

Tab.10 Charakteristiky hydrologické bilance ve vodoměrné stanici Rakovník (Zdroj: Kašpárek 2010)

V rámci projektu QH91247 , byly vypočteny průměrné průtoky za hydrologický rok 2009. Odtokové výšky byly vyhodnoceny jako dosti proměnlivé, pro které platí, že jejich plošné rozdělení není nahodilé. Nejvyšších hodnot dosáhly v jižní části povodí Rakovnického potoka. Obdobně velkých hodnot cca 40 mm dosáhy také povodí Červeného potoka. Menší otokové výšky byly vyčísleny pro dílčí povodí, která vytváří pás na severozápadním okraji povodí Rakovnického potoka. Nehorší situace je ve spodní části Kolešovického potoka, kde v roce 2009 vycházela záporná bilance. Na zbývající ploše potoka jsou odtokové výšky mezi 15- 30 mm. Je velmi pravděpodobné, že oblast, ze které podstatná část vody neodtéká vodními toky, nýbrž cestou podzemního odtoku a vodárenského využití je větší než plocha spodní části Kolešovického potoka. Tímto problémem se zabývá projekt QH01247 „Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulační schopnosti v povodí Rakovnického potoka“nadále. (Kašpárek, 2010)



Obr.16 Plošné rozdělení ročních výšek odtoku v roce 2009 (Zdroj: Kašpárek, 2010)

5. METODIKA

5.1. Metodika modelování povodňového odtoku pro současný stav

5.1.1. Zpracování modelu v programu ArcGIS

Pro zpracování hydrologicky korektního digitálního modelu terénu (HydroDEM) byla použita nástavba programu ArcGIS, HEC- geoHMS, která je propojená s další nástavbou programu ArcGIS, ArcHydro tools. Většina použitých nástrojů vyžadují předchozí instalaci nástavby 3-D Analyst a Spatial Analyst.

Pro účely práce bylo zapotřebí získat několik vstupních vrstev. Většina vrstev byla poskytnuta VÚV T.G.M, v.v.i. Jednalo se o vrstvy obsahující informaci o řešeném území (polygonová vrstva plochy povodí), o využití území (polygonová vrstva Corine_2000) a o navržených nádržích. Dále mi byl poskytnut digitální model terénu (DTM) povodí Rakovnického potoka, tudíž odpadla potřeba vytvořit si ho z výškových bodů a vrstevnic.

Z WMS serveru ústavu DIBAVOD byla stažena vektorová vrstva vodních toků a hrubých úseků vodních toků a srážkoměrných stanic. Informace o hydrologických skupinách půd byly získány z WMS serveru VÚMOP, v.v.i.. Poslední potřebná vstupní vrstva, tj. vrstva nesoucí informaci o zastavěných plochách byla získána z datové sady ZABAGED ČÚZK.

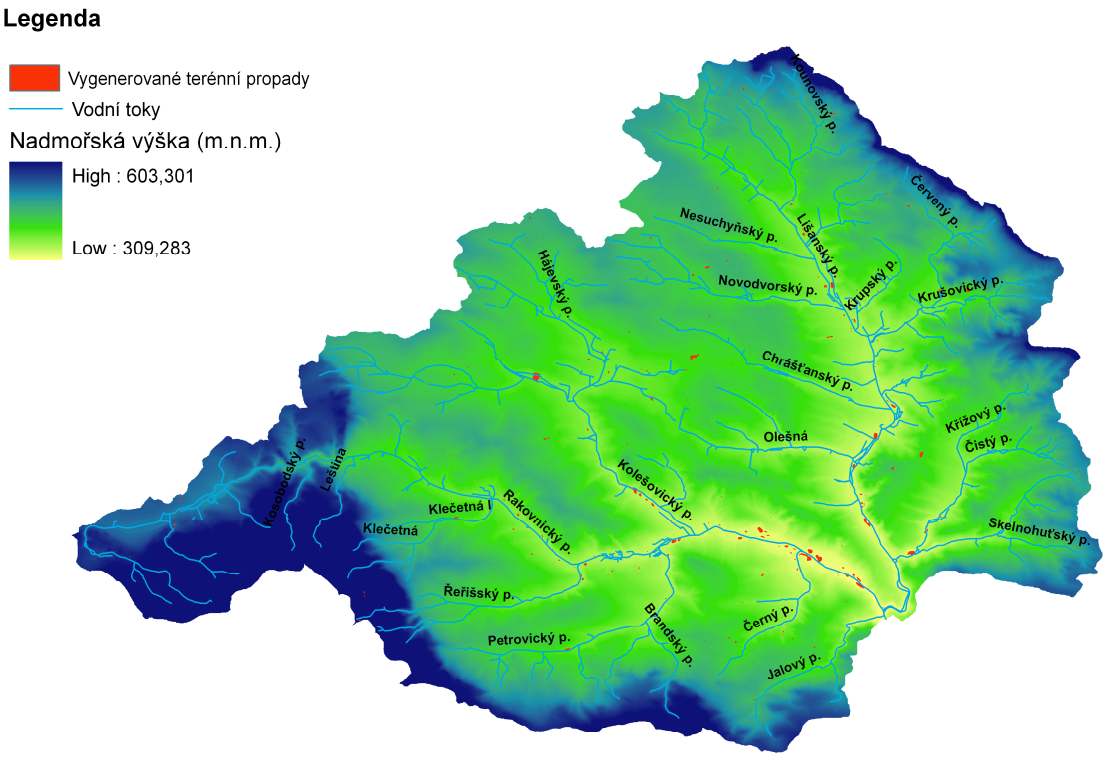
Vstupní data bylo třeba převést do stejného koordinačního systému. Všem vrstvám byl pomocí ArcCatalogu přiřazen systém Albert equal Area. Koordinační systém byl zvolen s ohledem na následný export do programu HEC-HMS, který pracuje v 5 souřadnicových systémech, mezi které nepatří systém S-JTSK Krovak East North, ve kterém byly získané vstupní vrstvy.

Mohlo se tedy přistoupit k terénnímu předzpracování. Nástroje použité v rámci předzpracování terénu jsou vysvětleny v kapitole 3.2.1. literární rešerše. Tato kapitola se proto nebude zabývat popisem postupu, ale zaměří se pouze na některé zásadní kroky, které vyžadují zvýšenou pozornost.

Potřebné nástroje se nachází na panelu HEC-GeoHMS v záložce Terrain Preprocessing. Vrstvám vznikajícím v rámci předzpracování terénu byl ponechán jejich programem vygenerovaný název.

Jak již bylo řečeno, program nabízí možnost upřesnit model na základě informací o současném stavu. Dle Vizina (2010) není pro modelování maximálních průtoků v programu HEC-HMS v dané lokalitě model upřesňovat dle údajů o současném stavu, protože program generuje pro tento účel dostatečně přesné výsledky. Při použití upřesňujících informací by vznikaly nepřesnosti, jako jsou například bezodtoková dílčí povodí nebo by systém vodotečí na sebe nebyl dendricky napojen. Z těchto důvodů nebyl model upřesňován na základě informací o aktuálním stavu.

Prvním použitým nástrojem Fill Sinks vznikl grid fil, ve kterém jsou vyplněny terénní propady nacházející se ve vstupní vrstvě, nebo-li v DTM, označovaný jako RAWDEM.



Obr.17 Vygenerované terénní deprese

Bylo zapotřebí zjistit, zda- li „vyplněním“ těchto oblastí neodstraníme některé existující významné terénní propady. Po odečtení gridu fil od digitálního modelu terénu jsme získali grid obsahující oblasti se zápornými hodnotami, tedy místa generovaných propadů. Dle obrázku 16 je patrné, že většina těchto vygenerovaných depresí se nachází kolem vodních toků. Zbylé generované propady leží u hřebenů nebo neleží v místech, kde by se tvořil

soustředěný otok. Dle informací k téhle problematice, vysvětlené v kapitole 3.2.1., proto není zapotřebí zjišťovat jakého jsou původu a lze pokračovat v předzpracování terénu.

Klíčovou roli sehrálo zadání parametrů do funkce Stream definition, kde musela být zvolena prahová hodnota plochy, kterou bude buňka muset odvodňovat, aby se stala součástí vodoteče. Důležitost volby zadaného parametru spočívá v tom, že na základě této hodnoty budou toky v následujícím kroku rozděleny na úseky, ze kterých budou poté vygenerovány dílčí subpovodí. Funkce je podrobněji vysvětlena v kapitole 3.2.1. Bylo proto zapotřebí tento a následující dva kroky opakovat, dokud rozdělení subpovodí neodpovídalo potřebám této práce. Po vyzkoušení několika variant ležících v rozmezí uvedeném ve zmíněné kapitole literární rešerše byla zvolena hodnota vyšší a to 3% nejvyšší hodnoty gridu Fac. I přes zadání hodnoty mimo ideální rozmezí, nedošlo k výraznému ovlivnění rychlosti průběhu následujících operací, a proto nebyl důvod tuto hodnotu měnit.

Použité nástroje a výsledné vrstvy vzniklé v rámci terénního předzpracování jsou znázorněny v tab. 11

Nástroj	**vzniklá vrstva**
Fill sinks	fil
Flow directions	fld
Flow Accumulation	fac
Stream definition	str
Stream Segmentation	strlnk
Catchement Grid delineation	cat
Drainage Line processing	Drainageline
Catchement Polygon Processing	Catchment
Adjoint Catchment Processing	AdjointCatchment

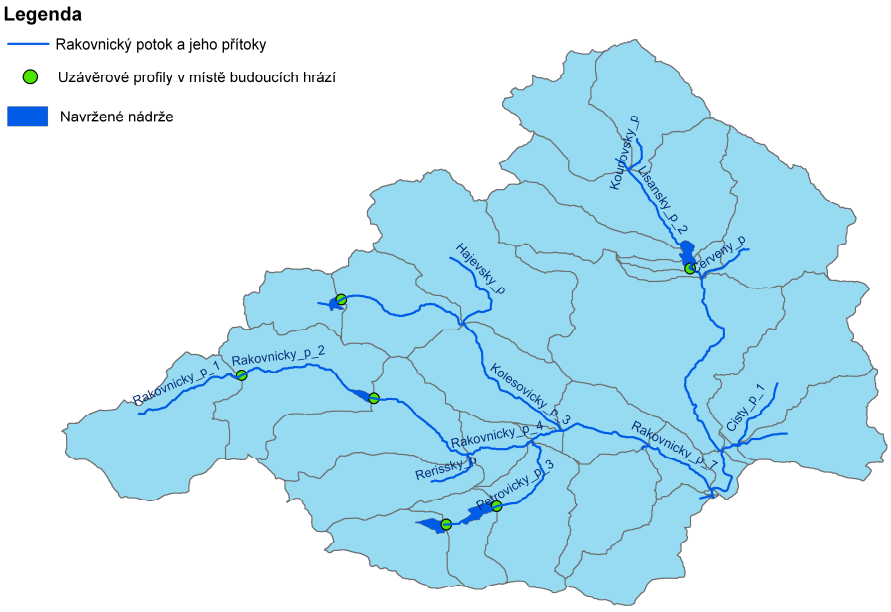
Tab.11 Nástroje použité v rámci terénního předzpracování a vzniklé vrstvy

Nyní se mohlo začít s přípravou modelu pro HEC-HMS. Příprava spočívá ve vytvoření schématického znázornění povodí, přípravu dat a výpočet parametrů. Potřebná data jsou pomocí hydrologické nástavby programu ArcGIS, HEC-GeoHMS, upravena tak, aby bylo možné získané informace exportovat do programu HEC-HMS.

Nejdříve bylo zapotřebí založit nový projekt. K tomuto účelu se používá možnost „Start New Projekt“ v záložce „HMS projekt setup“ na panelu HEC-GeoHMS. Po založení projektu je třeba určit tzv. Projekt Point, tedy místo uzávěrového profilu celého povodí. Pomocí příkazu Generate project, který se také nachází v záložce „HMS projekt setup“, se k vybranému

místu přiřadilo řešené území a vytvořila se nová geodatabáze, kam byla extrahována data potřebná k dalším výpočtům, která byla získána při předzpracování terénu.

V rámci projektu QH01247 „Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny a zlepšením akumulační schopnosti v povodí Rakovnického potoka“ jsou v povodí Rakovnického potoka navrženy 4 nové nádrže. Jak již bylo řečeno, tato diplomová práce vznikala souběžně při zpracování dílčího úkolu v rámci tohoto projektu. Bylo proto zapotřebí vytvořit v místech navrhovaných hrází nové uzávěrové profily pro následné poskytnutí údajů o maximálních průtocích způsobených hypotetickou N- letou srážkou pro další účely. Z tohoto důvodu byly dle následujícího postupu přidány nové uzávěrové profily, kterým bylo přiřazeno rozvodí.



Obr.18 Dílčí povodí a navržené nádrže

Potřebné nástroje patří do skupiny nástrojů „Basin Processing“. Pomocí tlačítka Subbasin Divide byly postupně určeny všechny čtyři body na vodotečích kudy povedou hráze nádrží. Každé z těchto původních čtyř subpovodí bylo nově rozděleno na dvě nové. V rámci tohoto kroku tedy došlo i k rozdělení původních úseků toku. Tyto části bylo nutné opět spojit pomocí funkce River Merge. Pokud by byl tento krok vynechán, nebylo by možné s takovýmto projektem dále pracovat, protože program HEC-HMS vyžaduje, aby každým subpovodím z vrstvy Catchment protékal pouze jeden vodní tok.

Nástavba HEC-GeoHMS dále umožňuje vypočítat potřebné fyzikální charakteristiky subpovodí a úseků toku pro zvolené metody modelování. Charakteristiky se buď zapisují do

atributové tabulky již existujících vrstev nebo se vytváří vrstvy nové. Tyto charakteristiky slouží pro následný odhad hydrologických parametrů. Použité nástroje jsou dostupné ze záložky „Basin parameters“ na panelu HEC-GeoHMS a jsou popsané v kapitole 3.2.2 literární rešerše. Tato kapitola se proto nebude zabývat popisem postupu, ale zaměří se pouze na některé zásadní kroky, které vyžadují zvýšenou pozornost.

Pro získání průměrného sklonu každého subpovodí bylo nutné nejprve vytvořit grid znázorňující sklonitost území. K tomuto účelu byl použit nástroj slope ze sady Spatial Analyst, který na základě DTM vytvoří potřebný grid reprezentující sklonitost území. Pomocí funkce Basin slope byla vypočítaná průměrná hodnota sklonitosti pro jednotlivá dílčí povodí a hodnoty byly zaneseny do atributové tabulky vrstvy subpovodí (vrsta Catchment, která byla přejmenovaná na dilci_povodi).

Dále bylo zapotřebí určit metodu, kterou bude stanoveno těžiště jednotlivých subpovodí. Dle literární rešerše jsou pro modelování maximálních průtoků vhodné dvě metody nabízené nástrojem Basin Centroid a to *Center of Gravity Method* a *Longest Flow Path Method*. Metoda *Center of Gravity* v případě povodí Rakovnického potoka generovala těžiště některých subpovodí mimo jejich hranice, proto byla vybrána metoda *Longest Flow Path Method*, která určuje místo těžiště jako střed údolnice.

Použité nástroje, přidané atributy a výsledné vrstvy vzniklé v rámci určení fyzikálních charakteristik subpovodí a toků jsou znázorněny v tab. 12

Nástroj	Výsledek
River Length	Pripsána délku úseků toků do atributové tabulky vrstvy rakovnicky_potok_a_přítoky.shp
River Slope	Připsán sklon úseků toků do atributové tabulky vrstvy rakovnicky_potok_a_přítoky.shp
Basin Slope	Připsána průměrná sklonitost jednotlivých subpovodí do atributové tabulky vrstvy dilci_ subpovodí.shp
Longest Flowpath	Vytvořena vrstva nejdelší dráhy povrchového odtoku LongestFlowPath.shp
Basin Centroid	Vytvořena vrstva těžišť jednotlivých subpovodí teziste_povodi.shp
Centroid elevation	Připsala do vrstvy tezite_subpovodi.shp jejich nadmořskou výšku
Centriod FlowPath	Vytvořena vrstva znázorňující nejdelší dráhu povrchového odtoku z bodu těžiště pro každé subpovodí CentroidalLongestFlowpath.shp

Tab.12 Nástroje použité pro získání fyzikálních charakteristik a jejich výsledky

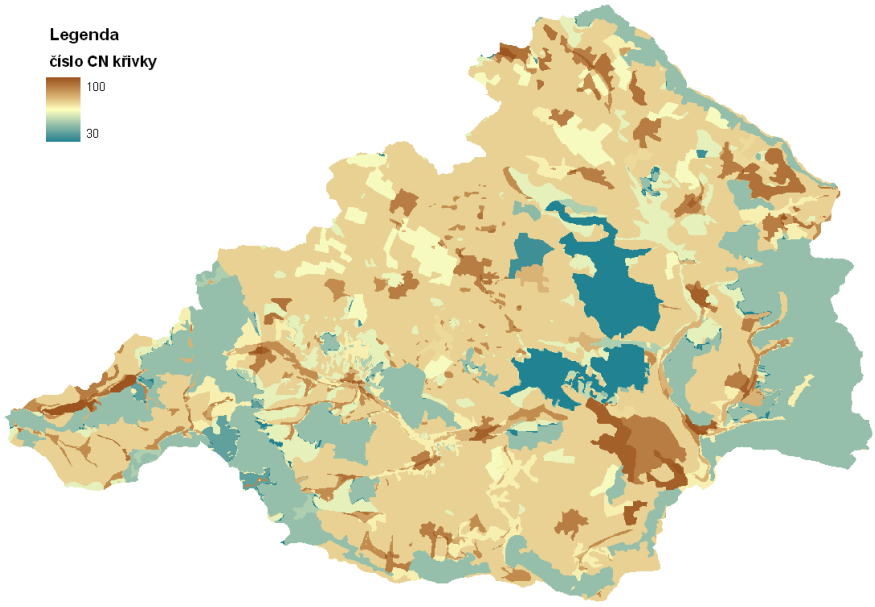
Nástavba programu ArcGIS, HEC-GeoHMS mimo jiné umožňuje odhadnout některé hydrologické parametry potřebné pro srážko-odtokové modelování pomocí metody SCS-CN a transformační metody Clarks Unit hydrograph, které jsou podrobně rozebrány v kapitole

3.1.1 a 3.1.3. Pro získání těchto parametrů bylo zapotřebí vytvořit několik nových vrstev a použít dalších nástrojů nabízených programem ArcGis mimo nástrojů zmíněné extenze. Z tohoto důvodu bude této části věnována větší pozornost. Většina použitých nástrojů je dostupná ze záložky „Hydrologic parameters“.

V prostředí ArcGis pomocí extenze HEC-GeoHMS byly získány pro každé subpovodí tyto parametry: průměrná hodnota CN křiky, procentuální podíl nepropustných ploch, doba koncentrace, a dále některé parametry potřebné pro výpočet doby zdržení.

Nejprve bylo nutné definovat metody, kterými bude pracováno po exportu modelu do programu HEC-HMS. K tomuto účelu slouží nástroj Select HMS Processes, kam byly zadány obě zmíněné metody. Dále byly přiřazeny identifikační kódy jednotlivým úsekům toků a subpovodím pomocí nástrojů River Auto Name a Basin Auto Name .

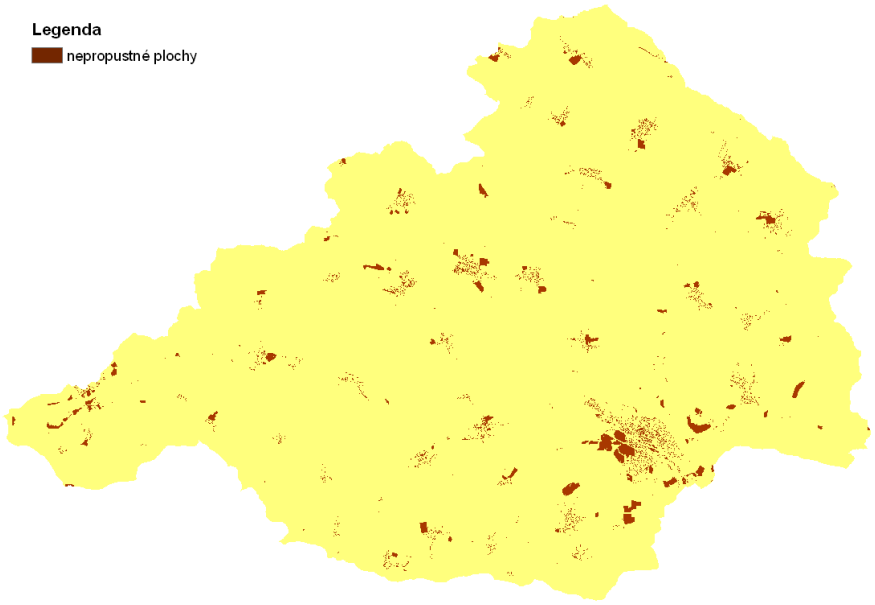
Dále bylo zapotřebí vytvořit grid, který by obsahoval průměrné hodnoty CN křivek pro jednotlivá subpovodí v řešeném povodí Rakovnického potoka. K tomuto účelu bylo dle literární rešerše 3.1.1 potřeba zkombinovat údaje o využití půdy a náležitost půdy do hydrologických skupin půd. Vstupní vrstva využití území pro řešenou lokalitu byla získána použitím nástroje Clip, pomocí kterého se z vrstvy databáze CORINE2000 tímto způsobem vyextrahovala vrstva obsahující údaje pouze pro řešenou lokalitu. Druhou vstupní vrstvou byla vrstva vyjadřující náležitost půd do hydrologických skupin půd pro povodí Rakovnického potoka. Nyní bylo nutné vrstvy spojit a určit tak nově vzniklým polygonům hodnoty CN křivek na základě těchto dvou údajů. Obě vrstvy byly vektorové, a proto byla zvolena funkce identity skupiny nástrojů „Overlay“ sady „Analysis tools“. Tímto způsobem, byla získána podrobnější polygonová vektorová vrstva obsahující ve své atributové tabulce mimo jiné sloupec s trojmístním kódem využití území a sloupec hydrologických skupin půd. Pomocí nástroje sloužící pro výpočty v rámci atributových tabulek Field Calculator došlo ke sloučení těchto dvou kódů do jednoho ve tvaru „xxxY“, kde „Y“ je hydrologická skupina půd (A, B, C, D) a „xxx““ je trojmístný číselný kód využití území. Podle tohoto kódu byla následně připojena tabulka hodnot CN křivek, která vznikla přepsáním tabulky 2 „Hodnoty CN dle využití území a HPJ“ (Kulasová et.al, 2004) do tabulkového editoru Excel 2003, její úpravou a exportem do formátu .dbf , který lze načíst v programu ArcGIS.



Obr.19 Hodnoty CN křívek pro povodí Rakovnického potoka

Průměrné hodnoty CN křivek pro každé subpovodí byly vypočítány a zapsány do atributové tabulky vektorové vrstvy polygonů subpovodí dilci_povodi.shp nástrojem extenze HEC-GeoHMS Subbasin from Raster.

Pro určení dalšího parametru, kterým je procentuální podíl nepropustných ploch se nejprve vytvořil rastr, který obsahoval zastavěné a nezastavěné plochy a nezastavěná území. Grid vzniknul vyselektováním odpovídajících vrstev z datové sady ZABAGED.



Obr.20 Nepropustné plochy

Zastavěným (nepropustným) oblastem se přiřadila hodnota 100 a nezastavěným (propustným) oblastem se přiřadila 0. Průměrné hodnoty procentuálního zastoupení nepropustných ploch pro každé subpovodí byly vypočítány a zapsány do atributové tabulky vektorové vrstvy polygonů subpovodí dilci_povodi.shp nástrojem extenze HEC-GeoHMS Subbasin from Raster.

Na základě znalosti průměrné hodnoty CN- křivky a procentuálním podílu nepropustných ploch lze pro potřeby hydrologického modelování v prostředí programu HEC-HMS dopočítat potenciální retenci, počáteční ztrátu a dobu koncentrace. Hodnota potenciální retence pro každé subpovodí se nechá dopočítat dle rovnice eq.2, ze které je dále možno vypočítat hodnotu počáteční retence dle vzorce eq.1. Počáteční retenci není potřeba zadávat, protože při nezadání této hodnoty jí v tomto případě HEC-HMS určí jako 20% potenciální retence.
Pro vypočet dob koncentrace bylo zapotřebí nejdříve vypočítat Tlag. K tomuto účelu se mezi funkcemi nabízených v extenzi HEC-GeoHMS nachází nástroj pod názvem CN Lag Method. Z této hodnoty, která byla takto vyplněna do atributové tabulky subpovodí se dále pomocí nástroje pro vypočty uvnitř atributových tabulek Field Calculator dopočítá doba koncentrace pro jednotlivá subpovodí dle rovnice eq.6.

Dále lze v prostředí ArcGis stanovit několik parametrů potřebných pro výpočet doby zdržení. Byla použita funkce Flow Path Parameters from 2D Line nástavby ArcHydro, která vyplní požadované údaje o údolnici do atributové tabulky nejdelší dráhy povrchového odtoku. Doba zdržení byla pro jednotlivé subpovodí dopočítána dle rovnice eq.7 v tabulkovém editoru Excel.

Subpovodí	Průměrná hodnota CN křivky	Doba koncentrace (h)
Černý	73,06	3,17
Červený	70,35	2,76
Čistý 1	62,36	4,05
Čistý 2	64,06	0,70
Hájenský	72,18	5,04
Jalový	68,53	2,72
Kolešovický 1	67,84	2,62
Kolešovický 2	72,25	3,80
Kolešovický 3	68,68	3,89
Kounovsky	69,54	2,60
Lišanský 1	73,20	3,31
Lišanský 2	71,42	4,66
Lišanský 3	65,72	1,90
Lišansky 4	56,50	2,61
Lišansky 5	58,92	6,33
Lišanský 6	67,97	1,19
Novodvorský	67,33	4,72
Petrovický 1	68,94	2,24
Petrovický 2	69,70	2,15
Petrovický 3	70,55	2,98
Rakovnicky 1	68,33	4,98
Rakovnicky 2	66,13	3,85
Rakovnicky 3	62,95	4,51
Rakovnicky 4	71,31	1,72
Rakovnicky 5	69,84	1,20
Rakovnicky 6	61,78	2,46
Rakovnicky 7	84,20	1,18
Rakovnicky 8	79,42	0,22
Rakovnicky 9	70,84	0,16
Řeřišský	65,51	3,68
Skelnohutský	55,84	3,27

Tab.13 Hodnota CN křivky a doba koncentrace

Po získání potřebných parametrů se mohlo začít s přípravou dat pro export modelu do programu HEC-HMS. Potřebné nástroje jsou umístěny v záložce HMS panelu HEC-GeoHMS. Nejdříve byly získané parametry převedeny do soustavy jednotek SI pomocí nástroje Map To HMS Unit. Následovala tvorba schématického znázornění povodí pomocí nástroje HEC-HMS Basin Schematic, se kterým dále pracuje program HEC-HMS. Schématu byla přiřazena legenda. Nástrojem Add Coordinates byly přiřazeny zeměpisné souřadnice všem objektům schématu.

Pomocí nástroje Prepare Data For Model Export došlo k exportu dat do struktury potřebné pro hydrologické modelování v programu HEC-HMS a pomocí nástroje Basin File byl vytvořen soubor obsahující informace o všech objektech schématu včetně jejich návaznosti a geografických informací.

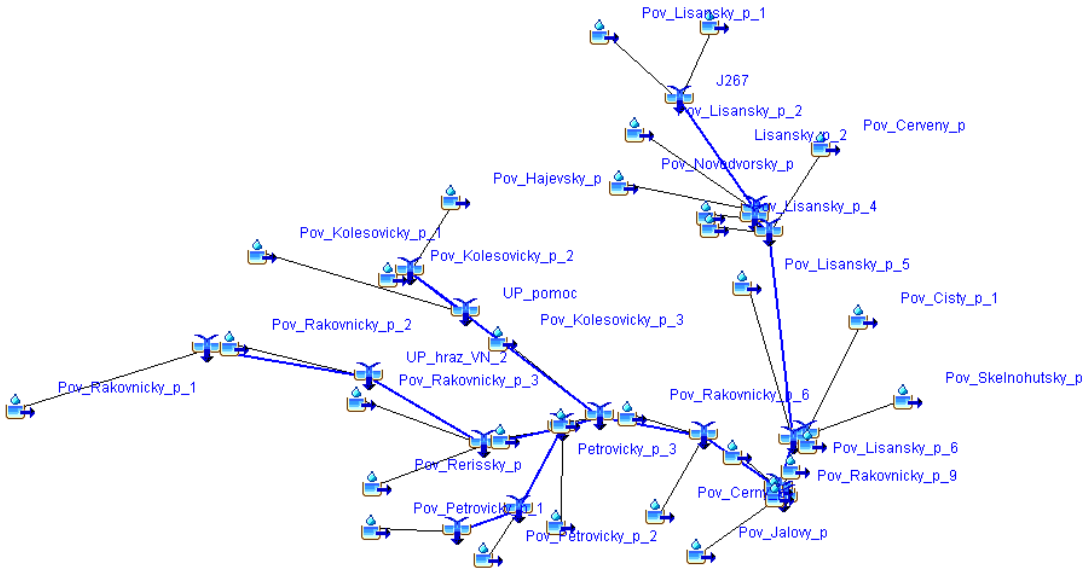
Posledním úkolem před převedením modelu do programu HEC-HMS bylo určit plošné rozložení návrhových jednodenních srážek a zprůměrovat tyto hodnoty pro jednotlivá subpovodí. Byly použity hodnoty maximálních jednodenních srážkových úhrnů s dobou opakování 100, 50 a 20 let dle tabulek Šamaj- Valovič- Brázdil (Šamaj et al. 1985). V kapitole 4.3 na obr. 14 jsou zobrazeny hodnoty těchto úhrnů s dobou opakování 100, 50 a 20 let pro srážkoměrné stanice ležící v řešeném území a jeho okolí, které byly získány z tabulek Šamaje-Valoviče-Brázdila (Šamaj et.al, 1985).

Pro plošnou interpolaci byla zvolena metoda IDW a za pomoci zonální statistiky byla vypočtena průměrná hodnota pro jednotlivé subpovodí a to pro srážkovou událost s opakováním 100, 50 a 20 let.

5.1.2. Modelování povodňového odtoku v programu HEC-HMS

Pro účely odhadu odtokových poměrů v povodí byla použita SCS CN metoda pro výpočet přímého odtoku, metoda Clarkova jednotkového hydrogramu pro transformaci přímého odtoku a metoda pro simulaci postupu vlny v toku, Muskingum- Cunge. Jednotlivé metody jsou rozebrány v kapitole 3.1. literární rešerše.

Potřebné parametry pro výpočet přímého odtoku metodou CN křivek a transformaci přímého odtoku byly získány způsobem popsaném v kapitole 5.1.1. Parametry získané pomocí nástavby HEC-GeoHMS programu ArcGIS byly automaticky zadány do modelu programu HEC-HMS. Doba koncentrace a doba zdržení byly jak již bylo řečeno dopočítány v tabulkovém editoru Excel. Tyto dva zmiňované parametry byly zadány manuálně a to pomocí záložky „Parameters“ a zvolením možnosti „Transform“- „Clark Unit Hydrograph“.

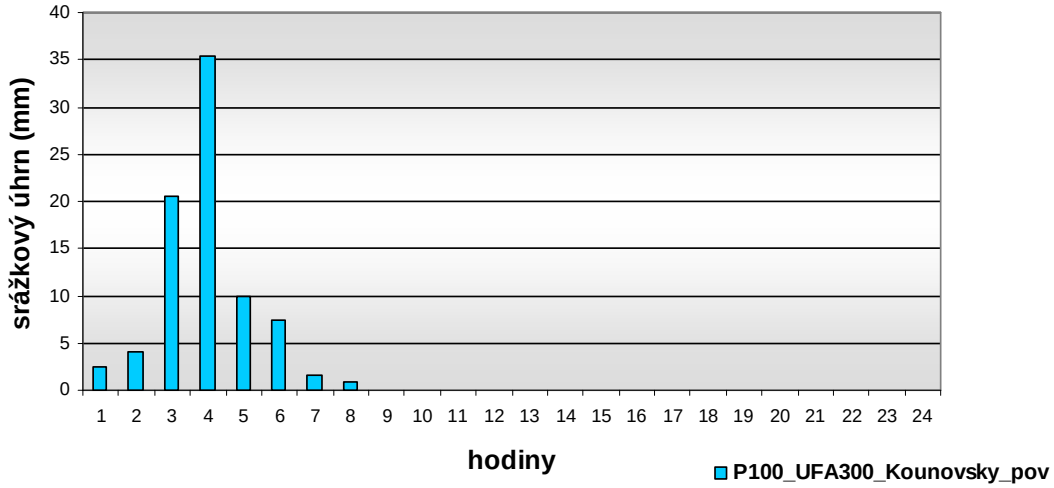


Obr.21 Schéma povodí Rakovnického potoka v programu HEC-HMS

Pro simulaci postupu vlny v korytě bylo zapotřebí, kromě údajů o sklonech úseků toků a jejich délce vypočítaných v prostředí programu ArcGIS, ještě získat informaci o drsnosti koryta a inundace vyjádřené Manningovým součinitelem drsnosti. Dále bylo nutné zadat pro každý úsek reprezentativní příčný profil. Tyto vstupy byly získány terénním průzkumem lokality.

Dalším krokem byla příprava data pro hypotetické srážkové událostí s dobou opakování 20, 50 a 100 let. Hodnoty maximálních jednodenních srážkových úhrnů pro jednotlivá subpovodí vypočítané v prostředí ArcGIS byly použity jako vstup do návrhového hyetogramu (viz kapitola 5.1.2). Sestavováním návrhového hydrogramu se zabývá kapitola 3.1.2 literární rešerše. Pro účel simulace povodňové události na povodí Rakovnického potoka byl vybrán návrhový hyetogram UFA_512, který znázorňuje rozložení 24 hodinové srážky do 8 hodin pro povodí o velikosti 512 km² (obr.2), který byl upraven na základě velikosti zasažené plochy, tj. pro plochu 300 km². Tímto způsobem byly získány 3 návrhové hyetogramy a to pro srážkové události s dobou opakování 20, 50 a 100 let.

Pro každé subpovodí byla v tabulkovém editoru Excel připraven tabulka obsahující hodnotu maximálních jednodenních srážkových úhrnů pro zmíněné 3 srážkové události rozdělené dle relativní velikosti pořadnic hyetogramu. Data o srážkách byla přidána do programu pomocí komponent „Meterologic Model“ a „Time Series Data“.



Obr.22 100-letá hypotetická srážka rozdělena dle hyetogramu pro povodí Kounovského potoka

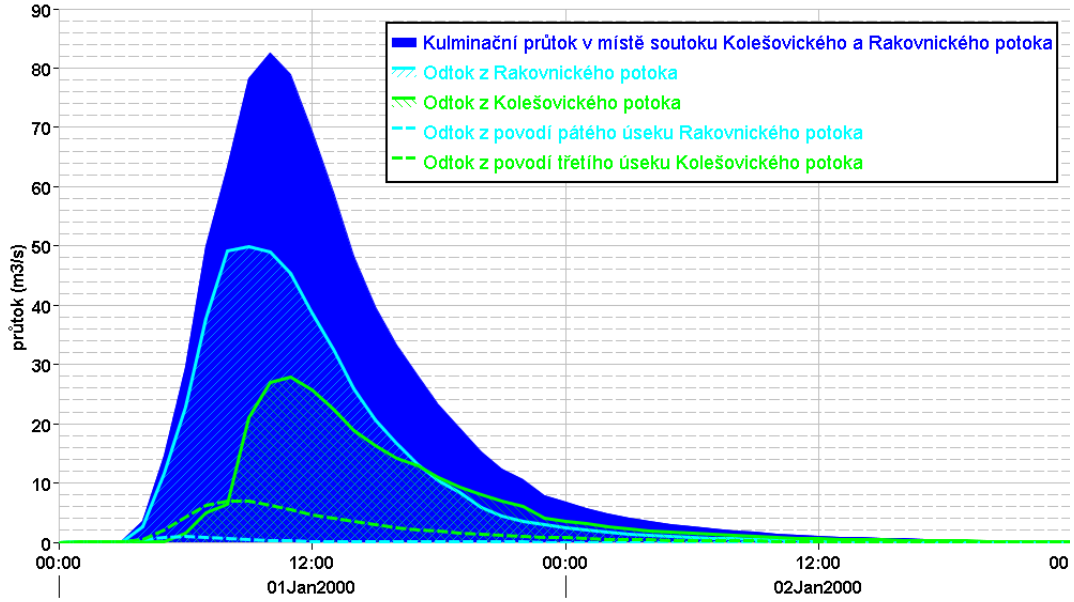
Pro účely porovnání navrhovaných scénářů bylo zapotřebí namodelovat simulace kulminačních povodňových vln vyvolané hypotetickou přívalovou srážkou s periodicitou 0,01, 0,02 a 0,05 pro současný stav. Pro posouzení použitelnosti modelu byly k dispozici návrhové průtoky z publikace Hydrologické poměry III (HMÚ, 1970) a to pro 6 profilů- pro ústí Kolešovického a Lišanského potoka, dále pro Rakovnický potok nad Kolešovickým a Lišanským potokem a pro soutoky těchto potoků. Tyto hodnoty byly zaneseny do následující tabulky, kam byly též zapsány výsledky simulací pro tyto profily.

	Hydrologické poměry III ($m^3.s^{-1}$)			**Simulace ($m^3.s^{-1}$)**		
Profil	**P100**	**P50**	**P20**	**P100**	**P50**	**P20**
Kolešovický potok-ústí	33	25	19	34,8	27,6	19,3
Lišanský potok ústí	55	41	30	54,9	41,7	29,3
Rakovnický potok nad Kolešovickým potokem	41	30	23	50,9	40	28,3
Rakovnický potok nad Lišanským potokem	60	44	31	90	68,9	46,1
Soutok Kolešovický a Rakovnický potok	56	41	33	82,5	62,9	43
Soutok Lišanský a Rakovnický potok	102	77	57	142,2	106,2	70,3

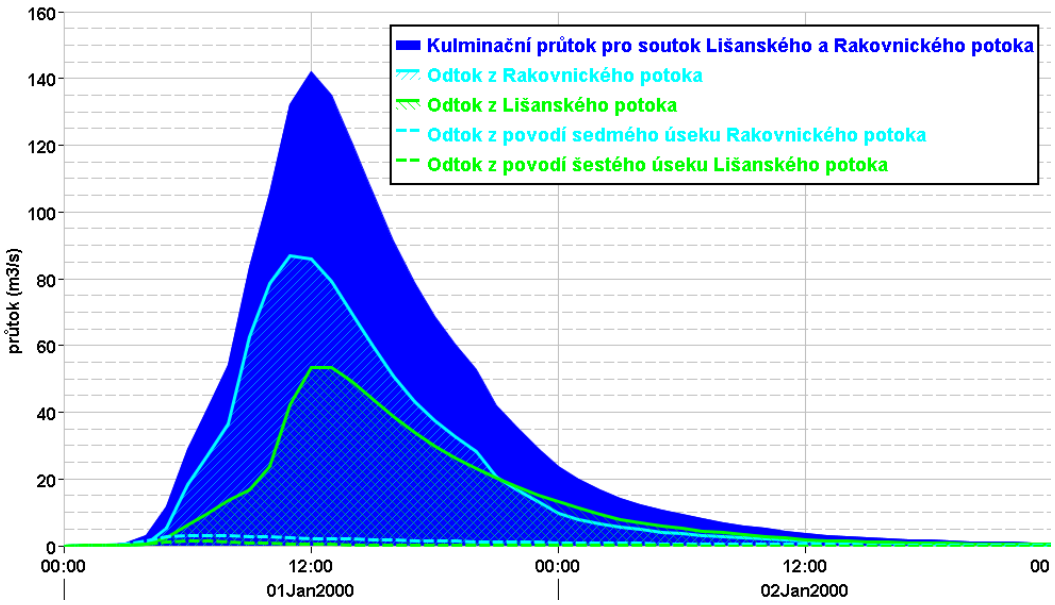
Tab.14 Průtoky uvedeny v publikaci Hydrologické poměry III a průtoky ze simulací

Z tabulky 14. a obrázků 23 a 24 je patrné, že pro povodí, která jsou odvodňována Lišanským a Kolešovickým potokem se dosáhlo velmi dobrých výsledků. Za velmi úspěšné lze považovat simulace kulminačních povodňových průtoků v místě ústí Lišanského potoka, kde bylo dosaženo velmi přesných výsledků a to i přes velké zastoupení lesních porostů v řešeném území, pro které nebyly známy hodnoty HPJ a tudíž se v těchto oblastech musela

hodnota CN křivek odhadnout způsobem popsaným v kapitole 4.2. Na území dílčího povodí Kolešovického potoka byl tento výsledek celkem očekávatelný, vzhledem k převážně zemědělskému využití krajiny. Na následujících obrázcích jsou zaznamenány kulminační vlny pro soutoky z tabulky 14. Z těchto obrázků je také patrné jaké složky odtoku se na daném průtoku podílí.



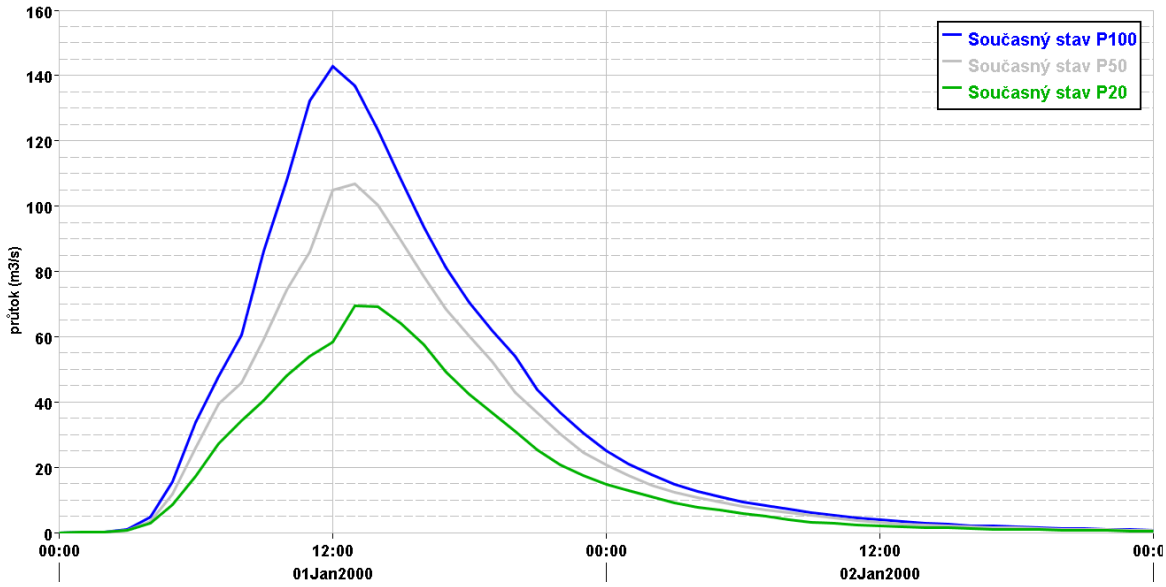
Obr.23 Hypotetická kulminační vlna v místě soutoku Kolešovického a Rakovnického potoka



Obr.24 Hypotetická kulminační vlna v místě soutoku Lišanského a Rakovnického potoka

Nadhodnocení průtoků Rakovnického potoka může být způsobeno vysokým podílem urbanizovaných ploch. Dle tabulky 13 je patrné, že dochází již u prvních úseků k jisté odchylce od hodnot návrhových průměrů z publikace Hydrologické poměry III (HMÚ, 1970). V místě soutoku Lišanského a Rakovnického potoka je už tato odchylka vyšší. Metoda CN křivek je metoda určená pro modelování na zemědělských území, a proto by se dalo vzniklou odchylku takto zdůvodnit. Je ovšem otázkou, zda-li jsou stále aktuální data použitá ke srovnání vzhledem k tomu, že od jejich získání došlo k navýšení podílu nepropustných ploch na úkor půd s lepšími infiltračními schopnostmi.

Přes větší odchylky průtoků pro Rakovnický potok model dosahuje uspokojujících výsledků pro účely simulace návrhových scénářů. Kulminační průtok v místě uzávěrového profilu bude dále sloužit pro porovnání scénářů. Grafický výstup kulminačních průtoků vyvolaných srážkou s periodicitou 0,01 0,02 a 0,05 v místě uzávěrového profilu povodí byl pořízen v programu HEC-DSS-Vue a bude dále sloužit pro porovnání účinnosti navržených protierozních a protipovodňových opatření. (obr.25)



Obr.25 Simulovaná kulminační vlna v místě uzávěrového profilu pro současný stav

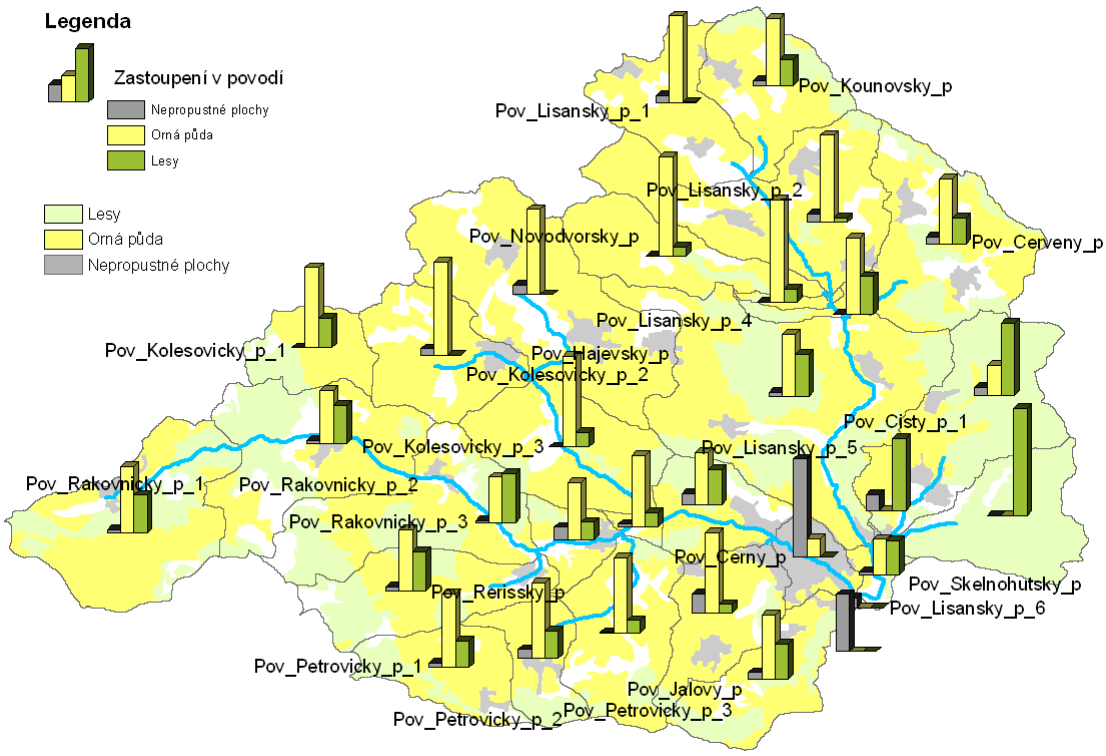
V tabulce 15 jsou zaneseny údaje o hypotetických kulminačních průtocích vyvolaných stoletým deštěm pro soutoky. V příloze A je přiložena tato tabulka pro déšť s dobou opakování 50 a 20 let. Tyto údaje budou dále také použité pro srovnání scénářů.

Soutok		Area(km²)	Q(m³.s⁻¹)	Čas kulminace
J250	Hájevský a Kolešovický_2	39,9353	28,3	01I2000, 09:00
J217	Řeřišský a Rakovnický_3	61,4551	31,5	01I2000, 09:00
J231	Petrovický a Rakovnický 4	90,2652	51,4	01I2000, 08:00
J239	Kolešovicky a Rakovnicky_5	143,8582	82,5	01I2000, 10:00
J225	Černý a Rakovnický_6	159,9825	88,2	01I2000, 11:00
J267	Kounovský a Lišanský 1	20,1663	19,6	01I2000, 07:00
J258	Novodvorský a Lišanský 2	48,5734	34,9	01I2000, 09:00
J255	Červený a Lišanský_4	67,1701	44,5	01I2000, 09:00
J236	Skelnohutský a Čistý	27,8848	11	01I2000, 08:00
J228	Čistý a Lišanský_5	127,6556	55	01I2000, 12:00
J220	Lišanský a Rakovnický_7	292,7911	142,1	01I2000, 12:00
J210	Jalový a Rakovnický 8	302,0177	143,6	01I2000, 12:00
RP	**Uzávěrový profil**	**302,0439**	**142,7**	**01I2000, 12:00**

Tab.15 Simulované kulminační průtoky soutoků pro současný stav vyvolané P100

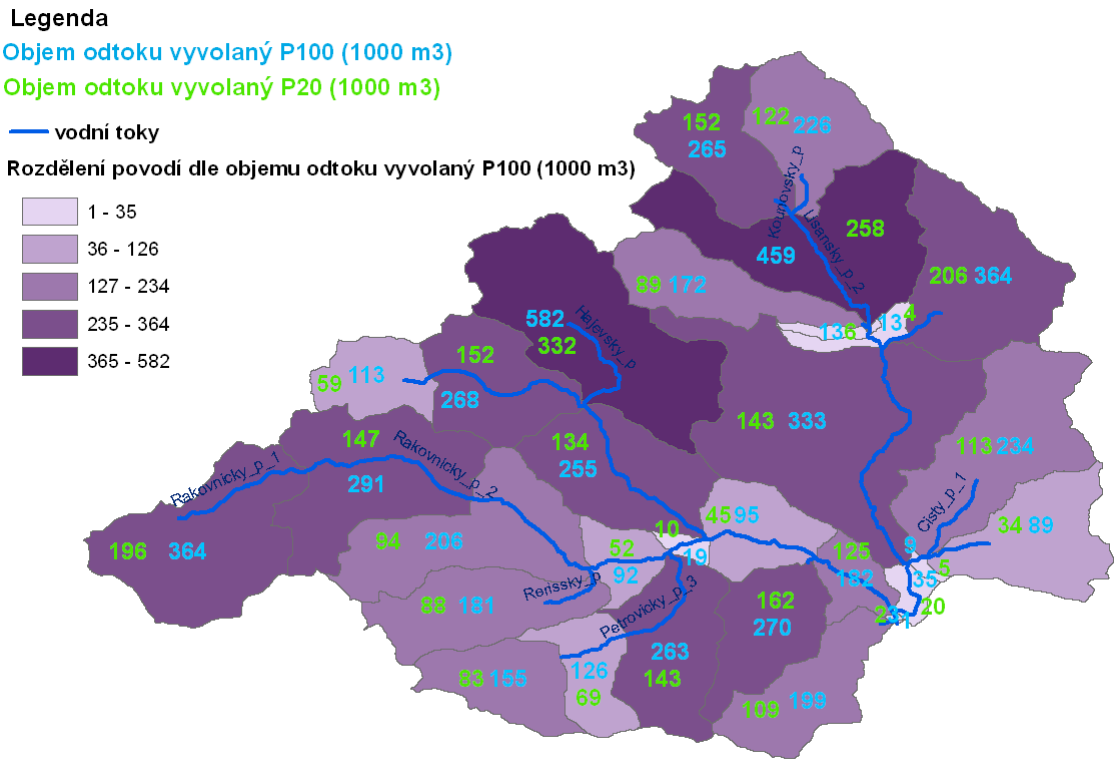
Pro lepší pochopení odtokových poměrů v povodí a následný návrh opatření bylo nutné zjistit jaká subpovodí generují největší objem odtoku a jaká výška odtoku na nich vzniká. Objem odtoku poskytuje informaci o tom, jaká povodí se nejvíce podílí na celkovém odtoku. Tento údaj je velmi důležitý pro cílení navržených opatření na určité oblasti. Výška odtoku informaci o rozloze neobsahuje, protože narozdíl od objemu je vztažená k územní jednotce 1m², nikoliv na celou plochu. Tato hodnota tudíž lépe popisuje kvalitu odtokových poměrům v dílčích povodích. Pro navrhování scénářů je tento údaj důležitý především pro určení oblastí se špatnými infiltračními podmínkami. Pro zjištění příčin těchto hodnot bylo tedy nezbytné údaje o odtoku v povodí pro současný stav porovnat s charakteristikami dílčích povodí. Za tímto účelem byly vytvořeny mapové výstupy, které znázorňují průměrnou dobu koncentrace, průměrnou sklonitost, průměrné hodnoty CN křivek a procentuální zastoupení nepropustných ploch pro jednotlivá subpovodí. Dále byla vytvořena maticová tabulka obsahující údaje o procentuálním zastoupení všech krajinných typů nacházející se v jednotlivých subpovodích. Tyto výstupy jsou umístěny v příloze A.

Pro lepší přehlednost je v této části metodiky vložen obrázek, obsahující informaci o orientačním poměrovém zastoupení orné půdy, lesních porostech a nepropustných ploch. Na tento obrázek bude v následujících odstavcích několikrát odkazováno, protože tato území nejvíce ovlivňují průměrnou hodnotu CN křivky a do určité míry i odtokové poměry v povodí, ať už v kladném nebo záporném.

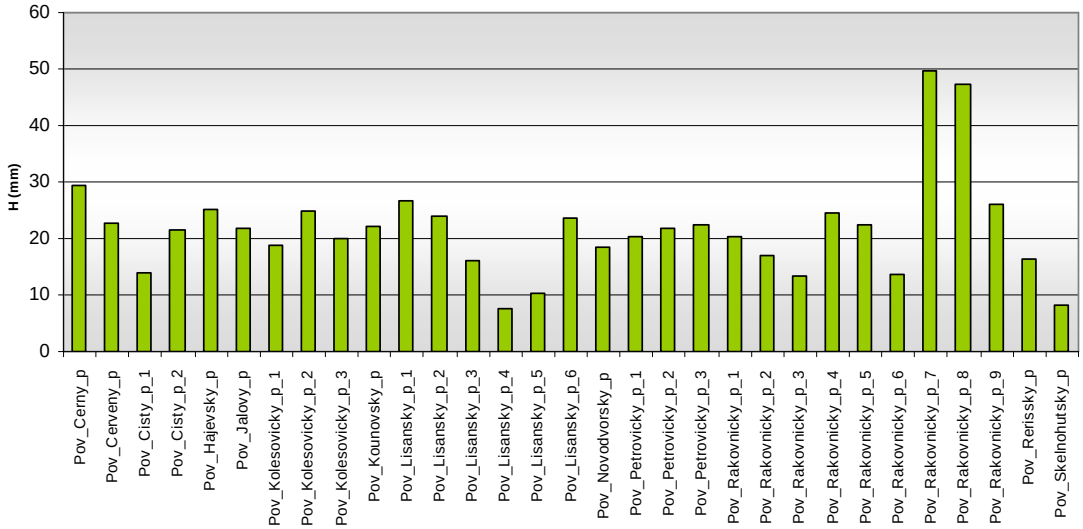


Obr.26 Zastoupení orné půdy, lesů a nepropustných ploch v povodí

Dle výsledků simulace je největší objem odtoku generován povodím Hájevského potoka, následují povodí uzávěrového profilu třetího úseku Lišanského potoka, Červeného potoka, prvního úseku Rakovnického potoka a druhého úseku Rakovnického potoka. V případě Hájevského potoka lze tento jev vysvětlit jednak velikostí povodí, jednak vysokou průměrnou hodnotou CN křivky a dále vysokým podílem nepropustných ploch (obr.26 a 27). Totéž platí povodí druhého úseku Lišanského potoka a pro Červený potok. U ostatních větších povodí je vyšší objem odtoku způsoben především jejich rozlohou. Toto tvrzení lze prokázat na povodí pátého úseku Lišanského potoka, který má nejdelší dráhu povrchového odtoku, nízkou hodnotu CN křivky způsobenou především vyšším zastoupením lesních porostů a téměř žádné nepropustné plochy, přesto generuje vysoký odtok.



Obr.27 Hypotetický objem odtoku pro jednotlivá subpovodí



Obr.28 Simulovaná výška odtoku pro jednotlivá subpovodí

Dle grafu na obrázku 28 je patrné, že nejvyšší výšku odtoku vytváří povodí osmého úseku Rakovnického potoka, dále sedmého úseku Rakovnického potoka, povodí Černého potoka a povodí uzávěrového profilu prvního úseku Lišanského potoka. Je zde také patrné, že Hájevský potok, který generuje největší objem odtoku, přitom nevytváří odtokovou výšku, která by se zásadním způsobem vymykala průměru. Lze proto u něj konstatovat, že tohoto

objemu dosahuje i z důvodu větší rozlohy. Zmíněná dvě subpovodí Rakovnického potoka mají ovšem malou plochu a navíc se zde vyskytuje vysoké procento nepropustných ploch.
Z tohoto důvodu nejsou z pohledu návrhu scénářů příliš zajímavá na rozdíl od povodí, která generují jak vyšší objemy odtoku tak vyšší výšky odtoku. Jedná se především o povodí Černého potoka, prvního úseku Lišanského potoka, druhého úseku Kolešovického potoka, Hájevského potoka, Červeného potoka, Kounovského potoka, třetího úseku Petrovického potoka, druhého úseku Lišanského potoka, druhého úseku Čistého potoka a prvního úseku Lišanského potoka.

V příloze A je přiložena tabulka obsahující údaje o výšce objemu odtoku pro jednotlivá subpovodí.

5.2. Metodika modelování povodňového odtoku pro vybrané scénáře

Podstata celé práce spočívá ve zjištění vlivu vybraných agrotechnických a organizačních opatření na odtokové poměry v povodí. Za tímto účelem byly definovány 4 scénáře, které jsou cílené na ornou půdu, která zaujímá 57, 2 % plochy povodí. Volbě jednotlivých scénářů předcházela analýza územních charakteristik pro jednotlivá dílčí subpovodí a syntéza těchto údajů s výsledky získaných ze simulace odtokových poměrů současného stavu. Bylo proto zapotřebí namodelovat změny povodňového odtoku v povodí, vznikající v důsledku změn ve fyzicko-geografických charakteristikách povodí, které jsou definovány modelovými scénáři reprezentujících navrhované protierozní a protipovodňová opatření.
Změna ve fyzicko-geografických charakteristikách povodí vznikající v důsledku aplikace opatření se projevuje na průměrné hodnoty CN křivky pro dílčí povodí a tedy i pro celé povodí Rakovnického potoka. Tato hodnota, jak již bylo několikrát řečeno, vstupuje jak do výpočtu přímého odtoku, tak do výpočtu transformace odtoku prostřednictvím doby koncentrace.

Doba koncentrace je sice do jisté míry závislá na průměrné hodnotě CN křivky pro subpovodí, ale je především dána charakteristikami nejdelší dráhy odtoku jak lze vypozorovat obrázku obsahující informaci o době koncentrace pro jednotlivá povodí (viz přílohy). Vezmeme-li v úvahu vzorce, ze kterých se tato doba počítá (eq. 2,5,6), lze konstatovat, že tuto hodnotu změnou využití nebo aplikací protierozních opatření nijak významně neovlivníme a tedy ani transformaci odtoku. Hodnota CN křivek ovšem nejdříve

vstupuje do výpočtu odtoku dle rovnice (eq.4), do které opět vstupuje ve formě potenciální retence. Lze proto očekávat větší vliv této hodnoty na výpočet přímého odtoku než na jeho transformaci.

Pro potřeby hydrologického modelování v prostředí HEC-HMS bylo zapotřebí vypočítat pro každý scénář novou průměrnou hodnotu CN křivky a novou hodnotu doby koncentrace pro jednotlivá subpovodí. Za tímto účelem byla vytvořena pro každý scénář v prostředí ArcGis nová vektorová vrstva obsahující upravené informace o hodnotách CN křivek v povodí. Z každé této vrstvy se vytvořily rastry obsahující nové průměrné hodnoty CN křivek pro jednotlivá subpovodí. Vrstva dílčích povodí byla čtyřikrát zkopírována a přejmenovaná dle názvů scénářů. Hodnoty průměrných CN křivek byly zaneseny do atributových tabulek těchto vrstev. Použitím příkazu CN Lag a nástroje sloužící pro výpočty uvnitř atributových tabulek field calculator byly dopočítány pro každý scénář nové doby koncentrace.

Pro účely simulací byly vytvořeny čtyři nové projekty v programu HEC- HMS. Do každého byly zaneseny upravené hodnoty CN křivek a dob koncentrace. Pro scénáře byly vždy spuštěny 3 simulace a to pro modelování odtoku z povodí v důsledku 100, 50 a 20-ti letého přívalového deště.

Scénař A

V tomto scénáři bylo navrženo zatravnění veškerých ploch, na kterých se nachází orná půda (kategorie corine 221- „Orná půda mimo zavlažovaných ploch“). Jedná se tedy spíše o benchmarkový (neboli- srovnávací) scénář, který byl do této práce zařazen z důvodu zjištění potenciálu území, pro snížení povrchového odtoku. Ve scénáři A došlo ke změně na ploše o rozloze 172,9 km², která představuje 57,26% plochy celého povodí. Změna se týkala 100% rozlohy orné půdy (viz obr.26 a 29).

V následující tabulce jsou zaneseny stávající hodnoty CN křivek a navržené hodnoty, pro řešené území. Navržené hodnoty byly získány z tabulky 2 - Hodnoty CN dle využití území a HPJ (Kulasová et.al, 2004).

		HSP			
		A	**B**	**C**	**D**
CN	**současný stav**	64	73	83	87
	návrh	30	58	71	78

Tab.16 Změna hodnot CN křivek pro scénář A

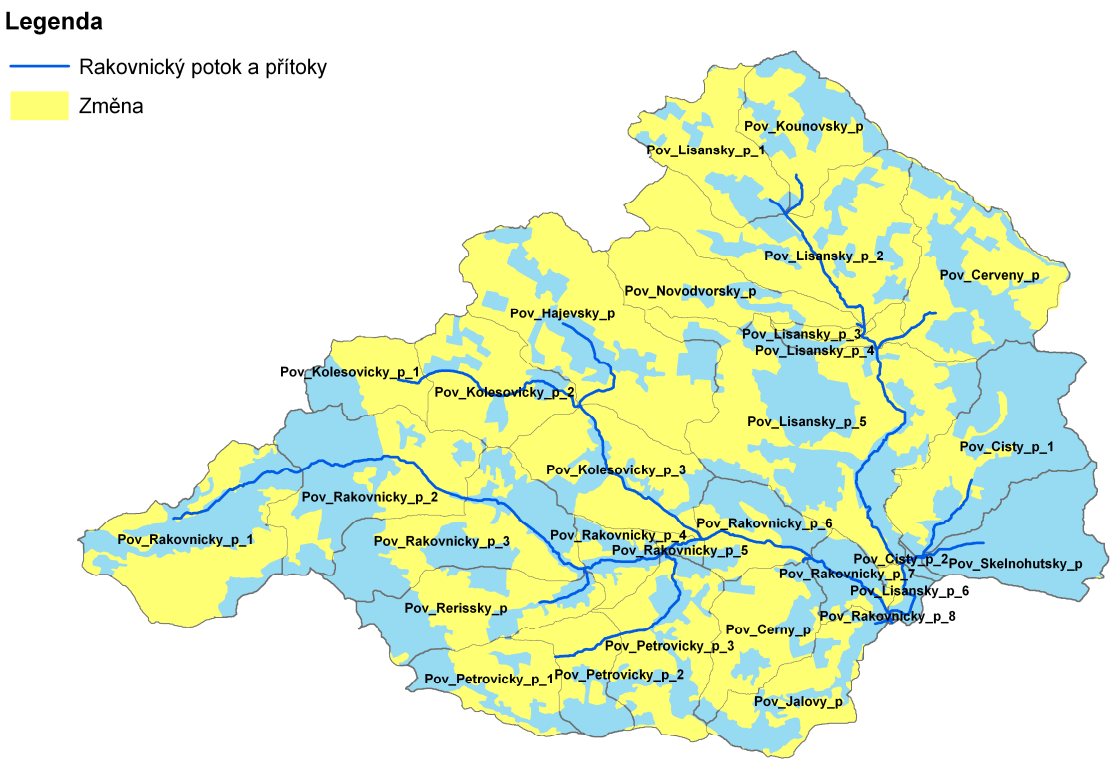
Scénář B

Navrženým opatřením ve scénáři B je vrstevnicová orba, aplikace posklizňových zbytků a realizace vsakovacích průlehů na celé ploše orné půdy.

Tento scénář je již reálnější než první zmiňovaný, ale vzhledem k tomu, že se opatření týkají celé plochy orné půdy nelze očekávat, že by se v praxi realizovala v plném rozsahu. Navrhované opatření se také týká 57,26 % plochy celého povodí (viz obrázek 26 a 29). Navržené hodnoty byly získány z tabulky 3 - Hodnoty CN pro zemědělské pozemky (Janeček et al, 2008).

		HSP			
		A	**B**	**C**	**D**
CN	**současný stav**	64	73	83	87
	návrh	58	69	77	80

Tab.17 Změna hodnot CN křivek pro scénář B

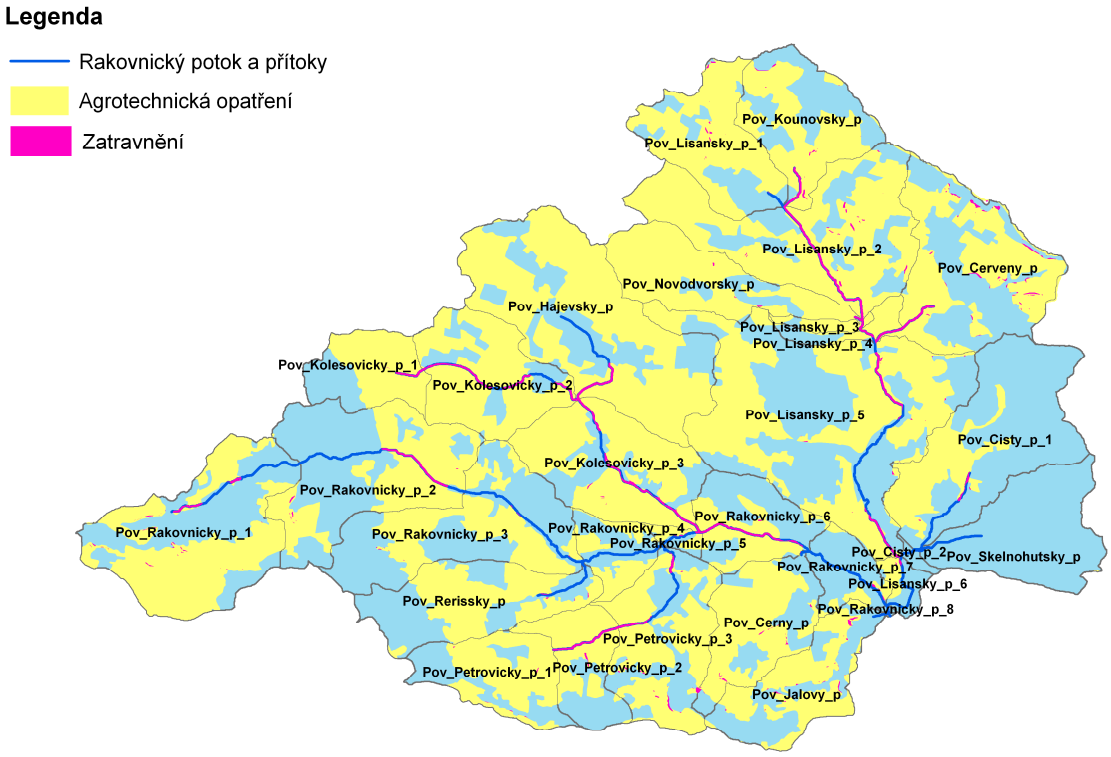


Obr.29 Změněné plochy dle scénáře A a B

Scénář C

Dle literární rešerše (kap 3.3) by měly být na orné půdě chráněny travními porosty plochy se sklonem větším než 21 %, buffer zóny vodních toků a profily průlehů. Poslední zmíněné doporučení je již splněno v rámci opatření navrženými ve scénáři B. Přistoupilo se zde k úpravě scénáře B o ochranné zatravnění svahů a niv toků.

V scénáři C byla na ploše o rozloze 170,42 km², která představuje 98,83% orné půdy simulována aplikace vrstevnicové orby včetně ponechání posklizňových zbytků a realizace průlehů. Dále byla zatravněna plocha o rozloze 2,53 km² která odpovídá 1,47 % orné půdy. Celkem se upravilo oproti původnímu stavu 100% rozlohy orné půdy, což odpovídá 57,26 % plochy celého povodí. Čísla CN křivek jsou obsaženy v tabulkách 16 a 17. Na následujícím obrázku je patrná skladba a rozmístění opatření v rámci tohoto scénáře.



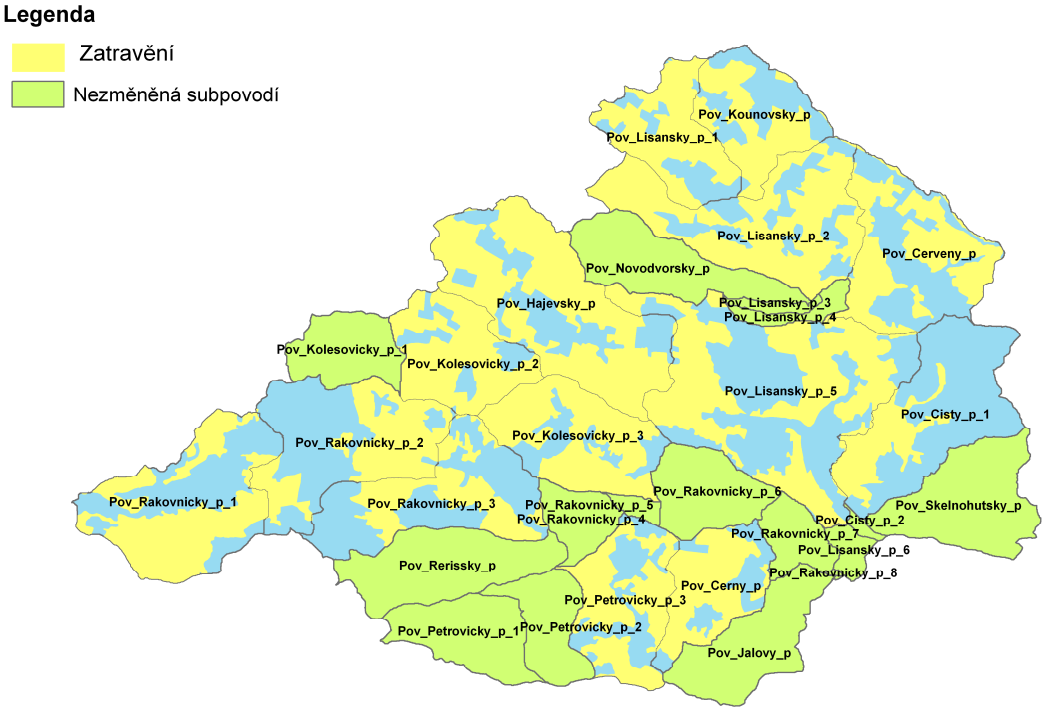
Obr.30 Změněné plochy dle scénáře C

Scénař D

Tento scénář navrhuje zatravnit pouze dílčí povodí, na kterých vzniká nejvyšší objem odtoku. Jedná se o zatravnění orné půdy ve 14-ti subpovodích. Kritériem pro výběr dílčích povodí byl současný stav objemu odtoku, který je generován při přívalové srážce P100, tedy srážce s dobou opakování jednou za sto let. Mezi vybraná subpovodí patří 11 povodí, která generují jak vysoký objem odtoku tak vyšší výšky odtoku (viz obr. 27 a 28) a dálé 3 povodí, na kterých vznikají vysoké objemy odtoku z důvodu jejich rozlohy.

Změna využití území se týká povodí Černého potoka, prvního úseku Lišanského potoka, druhého úseku Kolešovického potoka, Hájevského potoka, Červeného potoka, Kounovského potoka, třetího úseku Petrovického potoka, druhého úseku Lišanského potoka, druhého úseku Čistého potoka a prvního úseku Lišanského potoka a dále z důvodu vysokých objemů generovaných z důvodu jejich rozlohy povodí prvního a druhého úseku Rakovnického potoka a povodí pátého úseku Lišanského potoka.

Změna se týká 100% orné půdy v těchto čtrnácti dílčích povodích, celkově 132,62 km², což odpovídá 76,68% plochy orné půdy a 43,91% plochy celého povodí.
Na následujícím obrázku jsou znázorněné stávající plochy orné půdy, které budou zatravněny.



Obr.31 Změněné plochy dle scénáře D

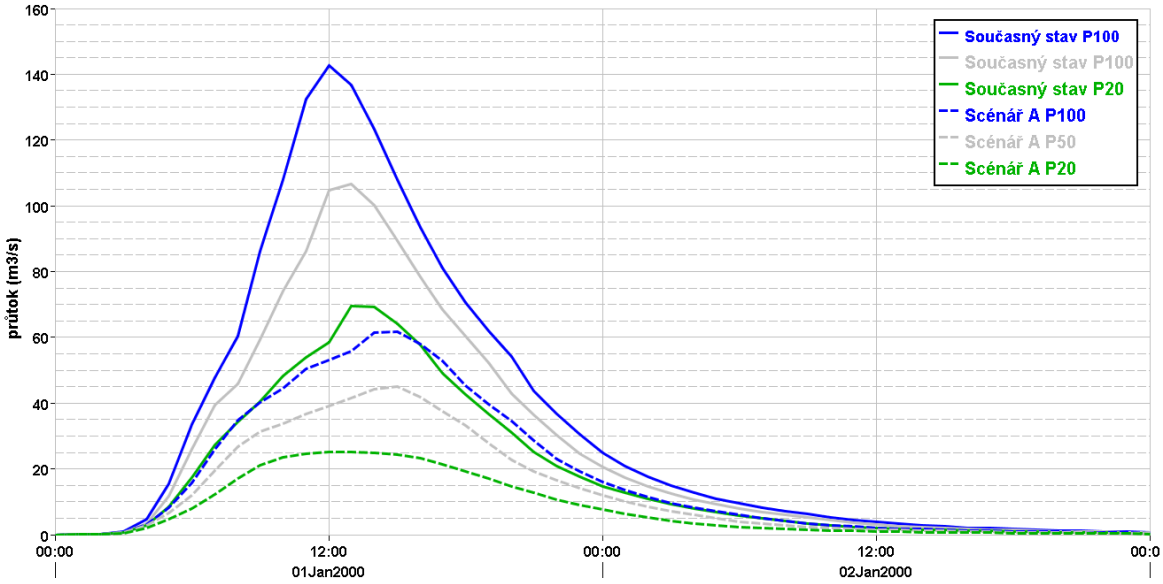
Vybraná opatření jsou podrobněji popsána v kapitole 3.3 literární rešerše.

6. VÝSLEDKY

6.1. Scénář A

V tomto scénáři bylo navrženo zatravnění veškerých ploch, na kterých se nachází orná půda (kategorie corine 221- „Orná půda mimo zavlažovaných ploch“). Bylo dosaženo snížení průměrné hodnoty CN křivky pro povodí Rakovnického potoka z 68,23 na 59,41, tj. o 12,94 %.

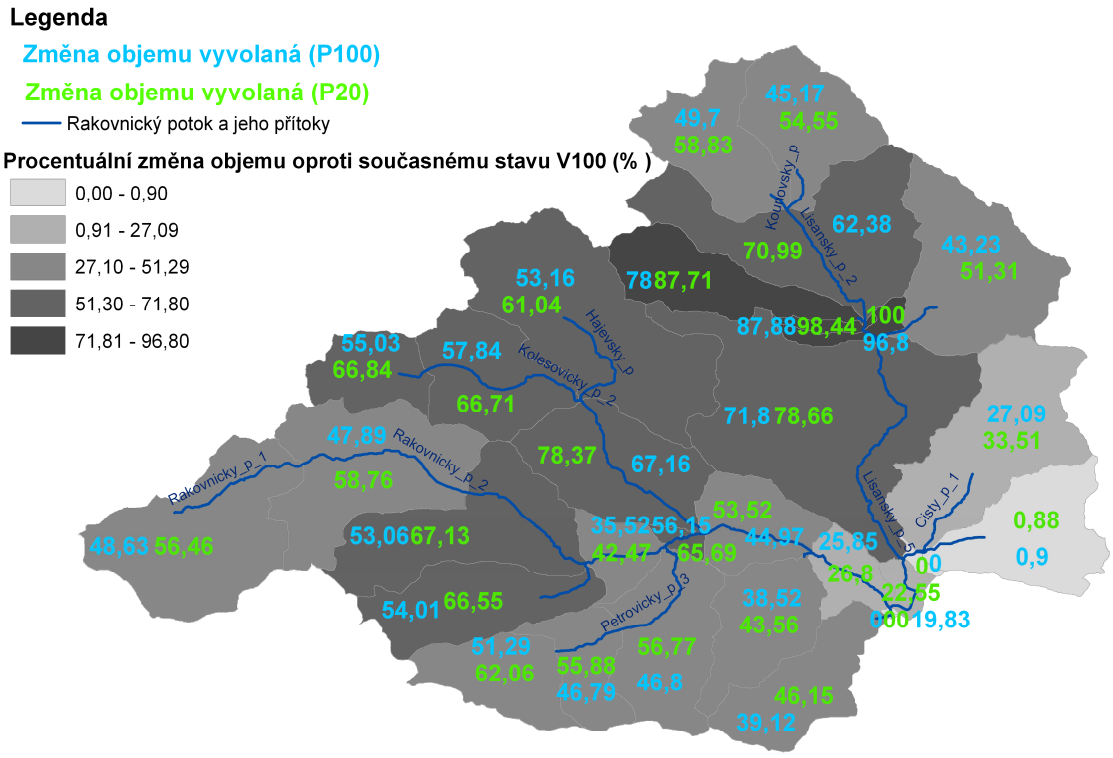
Na následujícím grafu jsou znázorněny hypotetické kulminační vlny pro uzávěrový profil a to jak pro současný stav povodí Rakovnického potoka, tak pro jeho hypotetický stav po aplikaci opatření navržených v rámci scénáře A. Simulace byly provedeny pro teoretickou srážkovou událost s dobou opakování 100, 50 a 20 let.



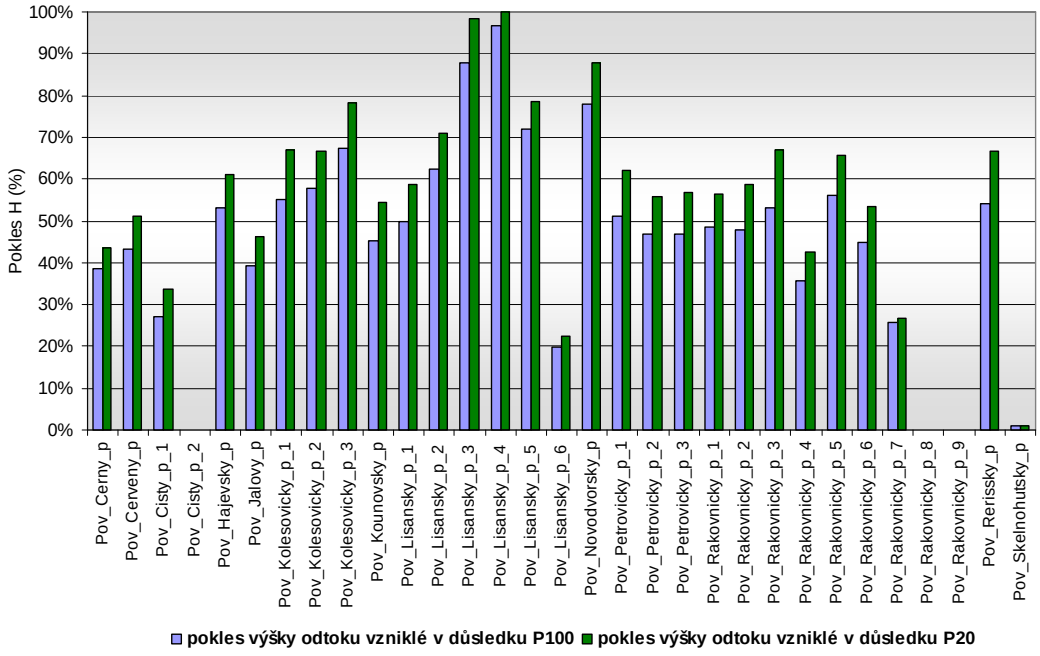
Obr.32 Porovnání hypotetických kulminačních vln- Scénář A

Došlo k výraznému snížení hypotetického kulminačního průtoku. Tento průtok se snížil pro povodeň vznikající v důsledku teoretické dešťové události s dobou opakováním jednou za sto let (dále P100) z původních 142,7 $m^3.s^{-1}$ na 61,6 $m^3.s^{-1}$, tedy o 57 %. Výrazněji se tato změna projevila u hypotetického kulminačního průtoku způsobeného teoretickou srážkovou událostí s dobou opakování dvacet let (dále P20), kdy bylo dosaženo snížení hypotetického kulminačního průtoku z původních 69,5 $m^3.s^{-1}$ na 25,1 $m^3.s^{-1}$, což odpovídá poklesu o 64%.

Na celém povodí Rakovnického potoka došlo ke snížení objemu odtoku vzniklém v důsledku povodňové události způsobené P100 o 50,09%, na 2 932 600 m³. Výraznějšího snížení bylo dosaženo pro objem odtoku vznikající v důsledku P20, kdy došlo k poklesu tohoto objemu na 1 321 100 m³, tj. o 58,12%.



Obr.33 Změna hypotetického objemu odtoku z jednotlivých subpovodí- Scénář A



Obr.34 Změna hypotetické výšky odtoku z jednotlivých subpovodí- Scénář A

Nejvýraznějšího snížení výšky odtoku oproti současnému stavu bylo dosaženo pro povodí čtvrtého a třetího úseku Lišanského potoka. Dle grafu na obrázku 34 lze konstatovat, že tato hodnota poklesla o více než 60 % pro povodeň způsobenou P100 i pro povodí Novodvorského potoka, třetího a pátého úseku Lišanského potoka, všechna povodí Kolešovického potoka, Hájevského potoka, Řeřišského potoka, druhého úseku Lišanského potoka, a dále třetího a pátého úseku Rakovnického potoka.

Následující tabulka obsahuje hodnoty procentuálního poklesu hypotetických kulminačních průtoků pro soutoky na území povodí Rakovnického potoka. Dále sem byly zapsány tyto hodnoty pro uzávěrový profil celého povodí.

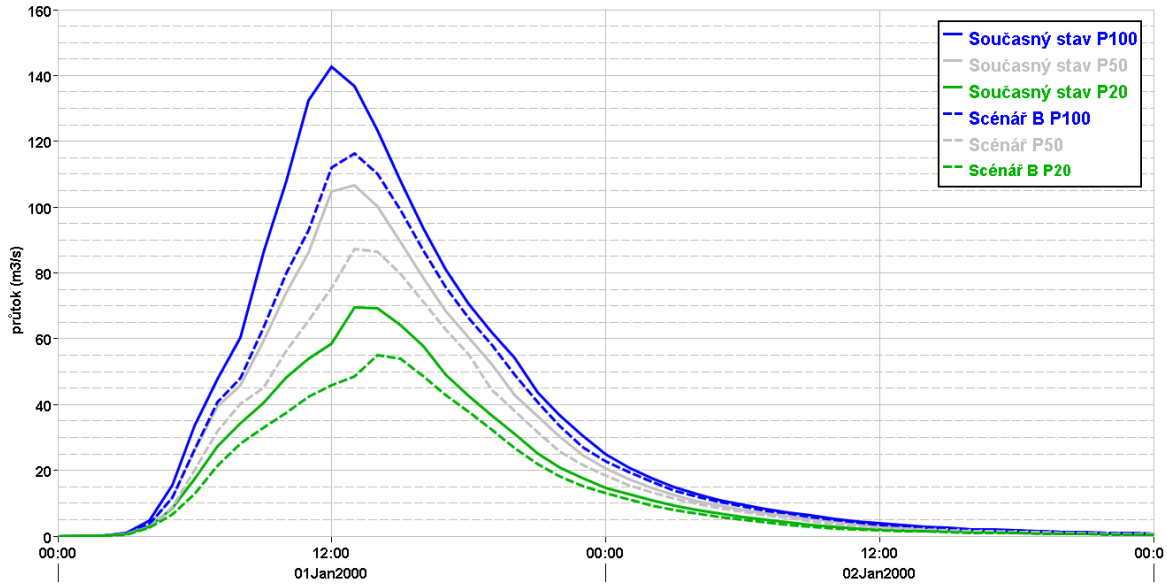
Soutok		**Q100 (%)**	**Q20 (%)**
J250	Hájevský a Kolešovický_2	54,77	63,92
J217	Řeřišský a Rakovnický_3	52,38	61,29
J231	Petrovický a Rakovnický 4	49,03	62,06
J239	Kolešovicky a Rakovnicky_5	56,24	62,79
J225	Černý a Rakovnický_6	55,90	60,89
J267	Kounovský a Lišanský 1	50,00	59,26
J258	Novodvorský a Lišanský 2	57,31	65,96
J255	Červený a Lišanský_4	57,75	75,22
J236	Skelnohutský a Čistý	20,91	26,53
J228	Čistý a Lišanský_5	57,64	61,89
J220	Lišanský a Rakovnický_7	56,72	65,15
J210	Jalový a Rakovnický 8	56,96	64,10
RP	**Uzávěrový profil**	**56,83**	**63,83**

Tab.18 Změna hypotetických kulminačních průtoků– Scénář A

6.2. Scénář B

Navrženým opatřením ve scénáři B byla vrstevnicová orba, aplikace posklizňových zbytků a realizace vsakovacích průlehů na celé ploše orné půdy. Aplikací těchto opatření bylo dosaženo snížení průměrné hodnoty CN křivky pro povodí Rakovnického potoka z 68,23 na 65,96, tedy o 3,39%.

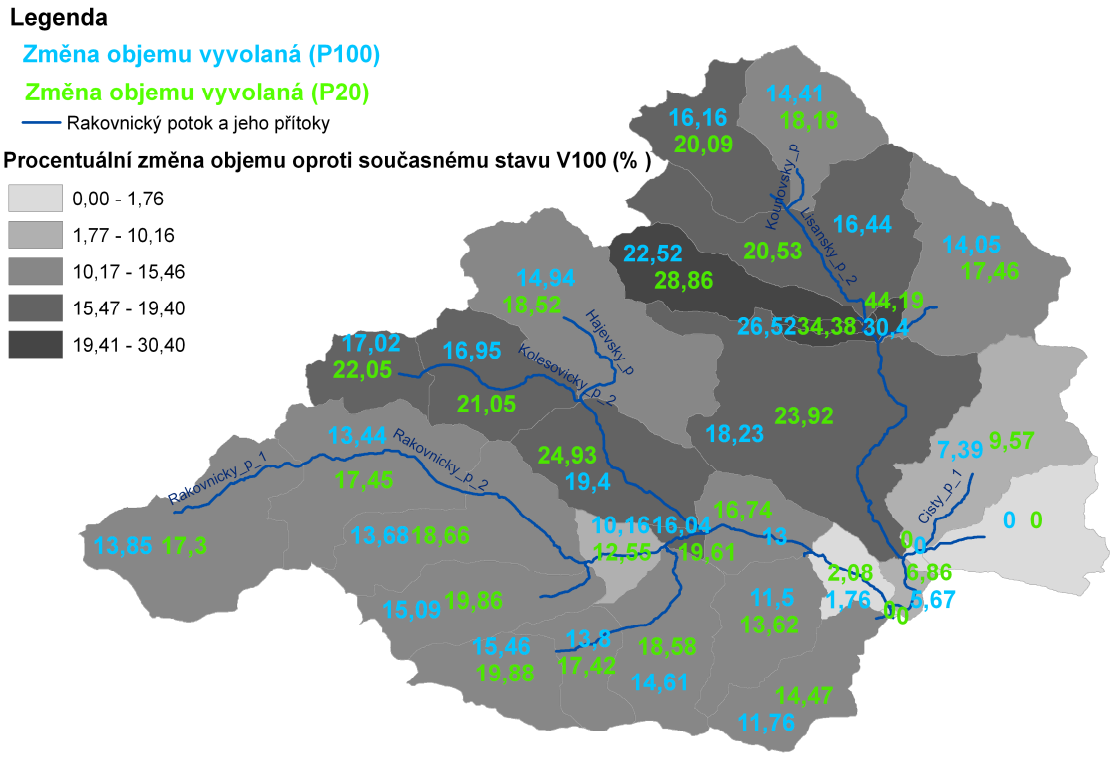
Došlo ke snížení hypotetického kulminačního průtoku pro povodeň způsobenou P100 na 116,4 $m^3.s^{-1}$, tj. o 18,43 %. Pro kulminační průtok, vznikající v důsledku P20, bylo dosaženo snížení hypotetického kulminačního průtoku o 20,61% odpovídající snížení na 55,1 $m^3.s^{-1}$.



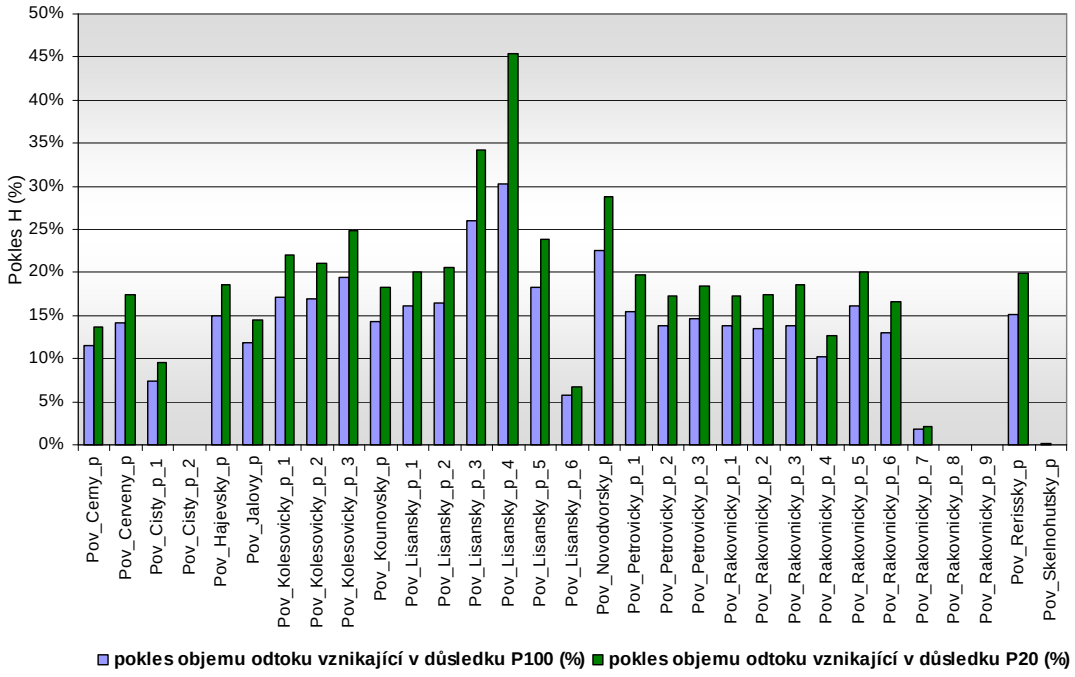
Obr.35 Porovnání hypotetických kulminačních vln- Scénář B

Co se týče hypotetického objemu odtoku, který je generováno jednotlivými subpovodími, bylo dosaženo snížení téměř pro všechna území, jak lze vypozorovat na obrázku 34. Maximálně však o 30,4 % pro povodeň způsobenou P100 a 44,19% pro P20. Těchto hodnot bylo dosaženo v povodí čtvrtého úseku Lišanského potoka.

V řešeném území došlo ke snížení hypotetického objemu odtoku vnikající v důsledku P100 o 14,23 %, tedy na 5 039 500 m³. Pro povodňovou událost vznikající v důsledku P20 , došlo k poklesu tohoto objemu z původních na 2 590 800m³, což odpovídá poklesu o 17,86%.



Obr.36 Změna hypotetického objemu odtoku z jednotlivých subpovodí- Scénář B



Obr.37 Změna hypotetické výšky odtoku z jednotlivých subpovodí- Scénář B

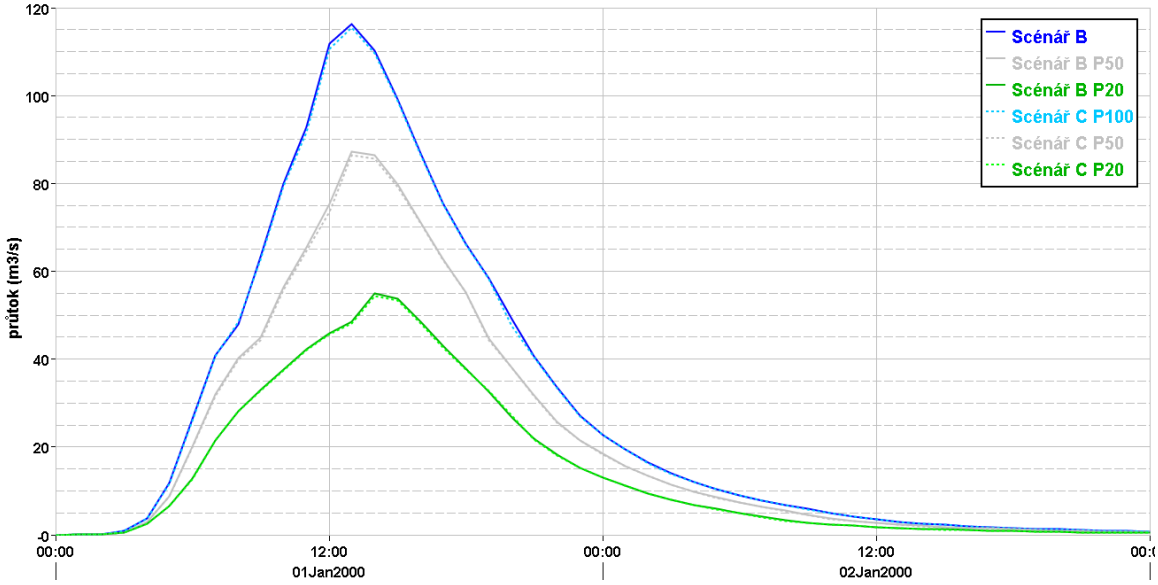
Nejvýraznějšího snížení výšky odtoku oproti současnému stavu, bylo dosaženo stejně jako ve scénáři A pro povodí čtvrtého a třetího úseku Lišanského potoka. Dle grafu na obrázku 37 lze konstatovat, že tato hodnota poklesla o více než 20 % i pro povodí Novodvorského potoka a druhého úseku Lišanského potoka.

Soutok		Q100 (%)	Q20 (%)
J250	Hájevský a Kolešovický_2	17,67	21,52
J217	Řeřišský a Rakovnický_3	14,92	20,00
J231	Petrovický a Rakovnický 4	16,93	19,15
J239	Kolešovicky a Rakovnicky_5	18,67	23,02
J225	Černý a Rakovnický_6	18,37	21,56
J267	Kounovský a Lišanský 1	31,12	20,37
J258	Novodvorský a Lišanský 2	19,48	23,40
J255	Červený a Lišanský_4	18,65	22,17
J236	Skelnohutský a Čistý	8,18	8,16
J228	Čistý a Lišanský_5	18,73	20,38
J220	Lišanský a Rakovnický_7	18,65	21,05
J210	Jalový a Rakovnický 8	18,66	20,80
RP	**Uzávěrový profil**	**18,43**	**20,61**

Tab.19 Změna hypotetických kulminačních průtoků– Scénář B

6.3. Scénář C

Tento scénář navazuje na opatření navržené v rámci scénáře B. K opatření z předchozího scénáře bylo přidáno zatravnění ploch se sklonem vyšším než 21% a dále zde bylo navrženo zatravnění tzv. buffer zón vodních toků. Bylo dosaženo snížení průměrné hodnoty CN křivky pro povodí Rakovnického potoka z 65,96 na 65,85, tj. o 3,5 %.

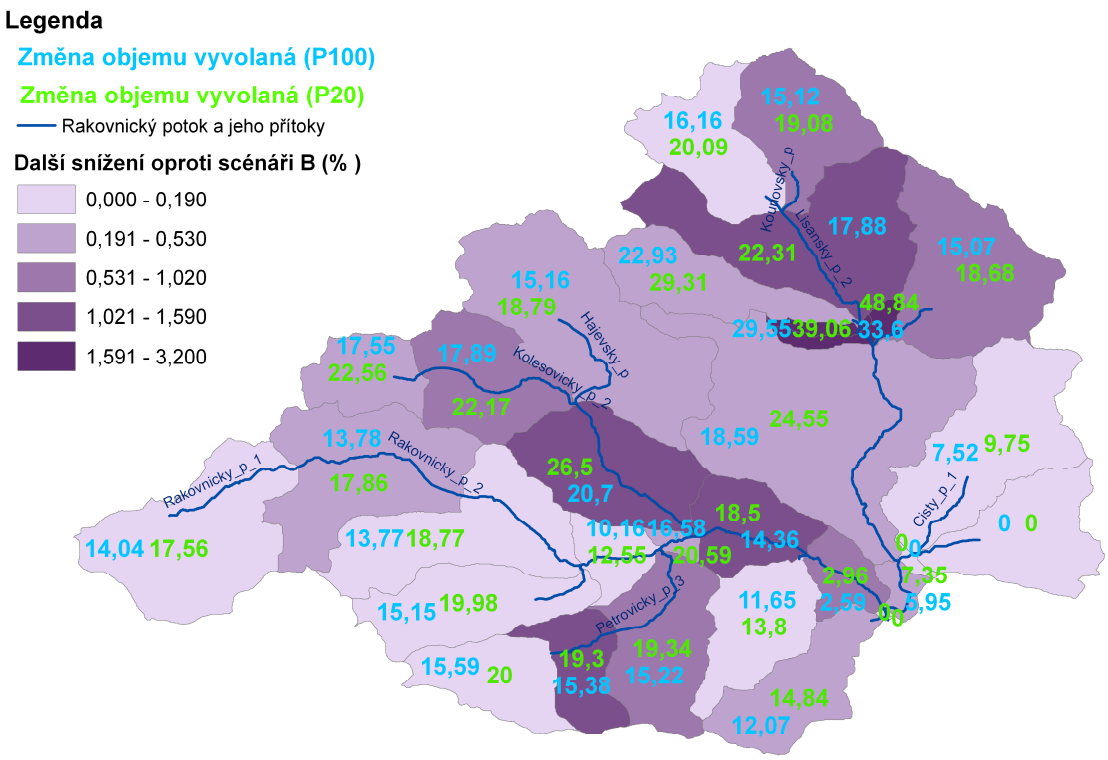


Obr.38 Porovnání hypotetických kulminačních vln- Scénář C

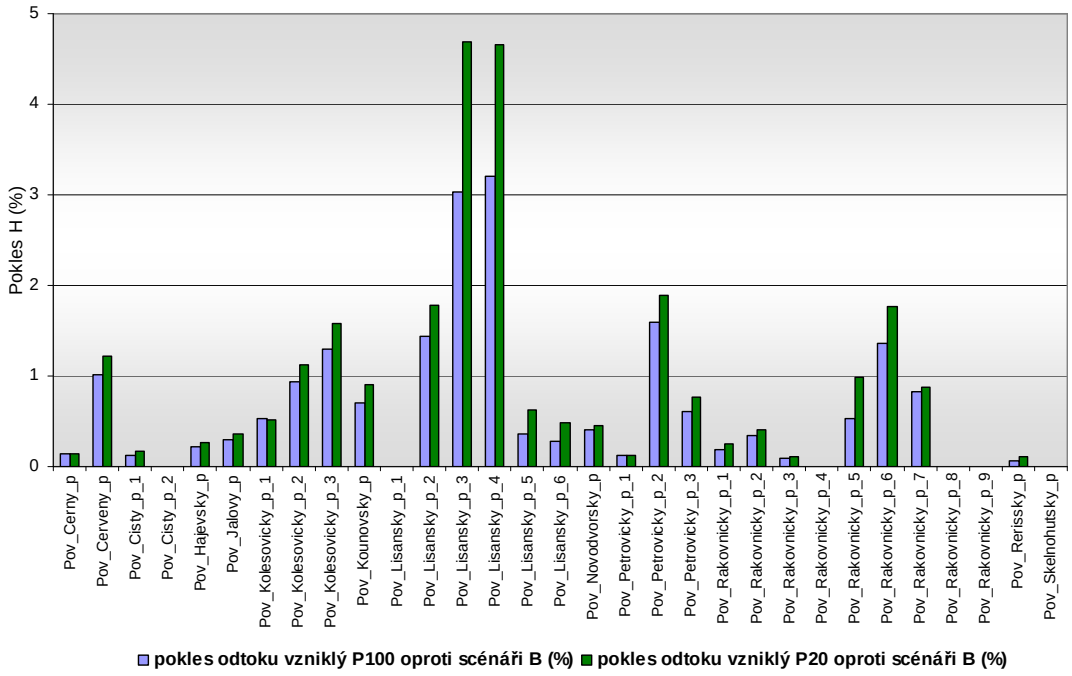
Hypotetický kulminační průtok pro povodeň vznikající v důsledku P100, byl snížen na 115,4 $m^3.s^{-1}$, tj. o 19,13 %. Hypotetický kulminační průtok způsobený P20 klesl o 21,76 %. Tento pokles odpovídá snížení na 54,3 $m^3.s^{-1}$.

Na celém povodí Rakovnického potoka došlo ke snížení hypotetického objemu odtoku generovaný při povodňové události způsobené P100 o 14,79%, na 5 006 000 m^3. Výraznějšího snížení bylo dosaženo pro objem odtoku vznikající v důsledku P20, kdy došlo k poklesu tohoto objemu na 2 569 000m^3, tedy o 18,56%.

Nejvýraznějšího snížení výšky i objemu odtoku oproti scénáři B bylo dosaženo pro třetí a čtvrtý úsek Lišanského potoka,a to o více jak 3% z hodnoty současného stavu..



Obr.39 Změna hypotetického objemu odtoku z jednotlivých subpovodí- Scénář C



Obr.40 Změna hypotetické výšky odtoku z jednotlivých subpovodí- Scénář C (P100)

Dle obrázku 40 je patrné, že se výšky odtoku moc neliší od těchto hodnot pro scénář B.

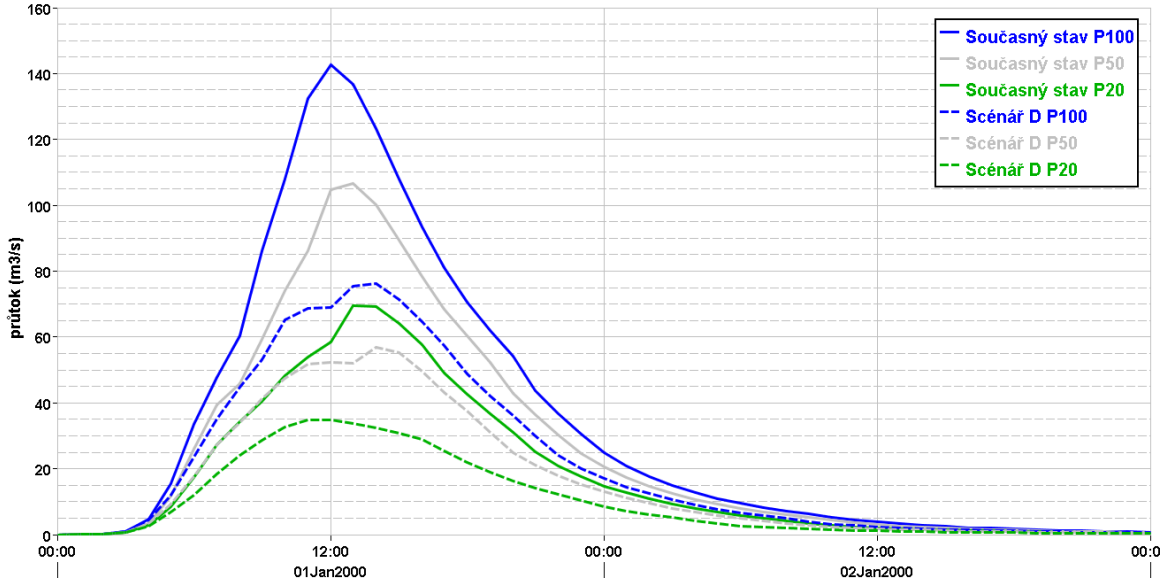
Soutok		Q100 (%)	Q20 (%)
J250	Hájevský a Kolešovický_2	18,37	22,15
J217	Řeřišský a Rakovnický_3	15,24	20,65
J231	Petrovický a Rakovnický 4	17,51	19,50
J239	Kolešovicky a Rakovnicky_5	19,27	23,72
J225	Černý a Rakovnický_6	18,93	22,22
J267	Kounovský a Lišanský 1	31,63	21,30
J258	Novodvorský a Lišanský 2	20,06	24,47
J255	Červený a Lišanský_4	19,33	23,91
J236	Skelnohutský a Čistý	8,18	8,16
J228	Čistý a Lišanský_5	19,27	21,89
J220	Lišanský a Rakovnický_7	19,28	22,76
J210	Jalový a Rakovnický 8	19,22	22,08
RP	**Uzávěrový profil**	19,13	21,76

Tab.20 Změna hypotetických kulminačních průtoků – Scénář C

6.4. Scénář D

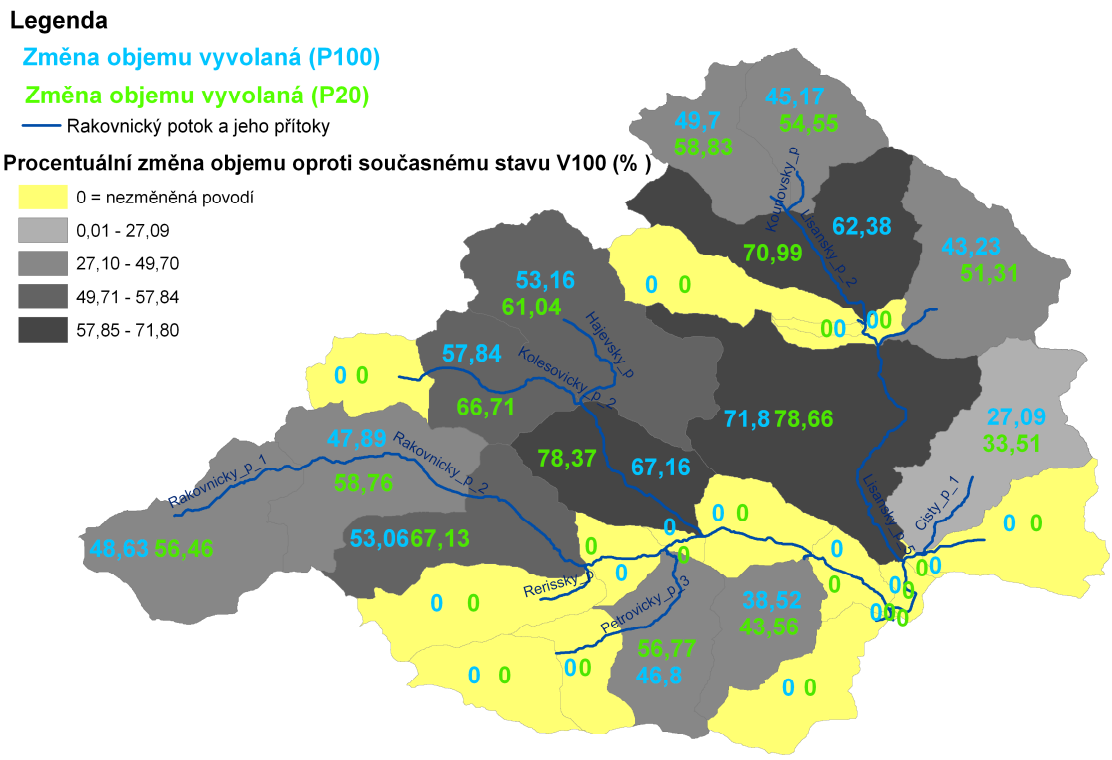
V rámci tohoto scénáře bylo navrženo zatravnit pouze ta dílčí povodí, na kterých vzniká nejvyšší objem odtoku. Jedná se o zatravnění orné půdy ve 14-ti subpovodích. (viz 5.2) Aplikací těchto opatření bylo dosaženo snížení průměrné hodnoty CN křivky pro povodí Rakovnického potoka z 68,23 na 63,71, tj. o 6,63%.

Došlo ke snížení hypotetického kulminačního průtoku pro povodeň způsobenou P100 na 76,2 $m^3.s^{-1}$, tj o 46,6 %. Pro hypotetický kulminační průtok vznikající v důsledku P20 bylo dosaženo snížení tohoto průtoku o 49,7%, které odpovídá snížení na 34,9 $m^3.s^{-1}$.



Obr.41 Porovnání hypotetických kulminačních vln- Scénář D

V řešeném území došlo ke snížení hypotetického objemu odtoku generovaný při povodňové události způsobené P100 o 36,5 %, na 3 730 900 m^3. Pro povodňovou události vznikající v důsledku P20 , došlo k poklesu tohoto objemu z původních 1 789 600m^3, což odpovídá poklesu o 43,26%.



Obr.42 Změna hypotetického objemu odtoku z jednotlivých subpovodí- Scénář D

Výsledky snížení odtokových výšek pro povodí, na kterých došlo k aplikaci organizačního protierozního opatření navrženého v tomto scénáři, jsou patrné z obrázku 34.

Soutok		Q100 (%)	Q20 (%)
J250	Hájevský a Kolešovický_2	44,17	53,16
J217	Řeřišský a Rakovnický_3	45,71	52,90
J231	Petrovický a Rakovnický 4	24,90	33,69
J239	Kolešovicky a Rakovnicky_5	44,12	44,65
J225	Černý a Rakovnický_6	40,48	40,89
J267	Kounovský a Lišanský 1	50,00	59,26
J258	Novodvorský a Lišanský 2	48,71	55,32
J255	Červený a Lišanský_4	49,44	51,30
J236	Skelnohutský a Čistý	20,91	26,53
J228	Čistý a Lišanský_5	49,64	52,08
J220	Lišanský a Rakovnický_7	47,08	52,20
J210	Jalový a Rakovnický 8	46,87	49,86
RP	**Uzávěrový profil**	46,60	49,71

Tab.21 Změna hypotetických kulminačních průtoků– Scénář D

V příloze B jsou uvedeny průměrné hodnoty CN křivek, výšek odtoku a objemu odtoku jednotlivých subpovodí pro všechny scénáře.

7. DISKUZE

Simulace jednotlivých scénářů napovídají o skutečné síle posuzovaných opatření a o retenčním potenciálu území.

Po simulaci odtokových odezev v povodí vyvolané změnami ve fyzicko-geografických charakteristikách, které jsou definovány modelovými scénáři reprezentujícími navrhované protierozní a agrotechnické opatření, bylo potřeba tyto odezvy porovnat.

Za tímto účelem byla vytvořena tabulka obsahující údaje o procentuálním snížení hypotetického kulminačního průtoku a objemu odtoku pro všechny modelované scénáře.

	Kulminační průtok snížení (%) (uzávěrový profil)	**Objem odtoku snížení (%)**
P100		
Scénář A	56,83	50,09
Scénář B	18,43	14,23
Scénář C	19,13	14,79
Scénář D	46,60	36,51
P20		
Scénář A	63,83	58,12
Scénář B	20,61	17,86
Scénář C	21,76	18,55
Scénář D	49,71	43,26

Tab.22 Porovnání scénářů

Z výsledků simulací (tab. 22) je zřejmé, že největší vliv na snížení kulminačního průtoku a objemu odtoku měl scénář A navrhující zatravnění veškeré orné půdy na povodí Rakovnického potoka. Následuje scénář D, ve kterém bylo stejně jako ve dříve zmiňovaném scénáři navrženo zatravnění orné půdy s tím, že toto opatření bylo aplikováno pouze na 14-ti subpovodích generujících dle simulace povodňového odtoku současného stavu největší objem odtoku a zároveň významné výšky odtoku. Oba tyto scénáře jsou nereálné, ale byly sem zařazeny z důvodu zjištění retenčního potenciálu území.

Maximální potenciál území reprezentuje výsledek ze scénáře A, ze kterého vyplývá, že zatravněním celé plochy orné půdy lze dosáhnout snížení hypotetického kulminačního průtoku o 57% a objem odtoku o 50%.

Co se týče reálné míry snížení odtokových poměrů v území, lze usoudit, že se scénář B a C více blíží této hodnotě. Zavedením opatření navržených těmito scénáři je možné snížit hypotetický kulminační průtok vyvolaný teoretickou stoletou srážkovou událostí o 18-19 % a objem odtoku o 14-15 %. (viz tab.22)

Lze předpokládat, že scénář C, který navrhuje kromě vrstevnicové orby, ponechání posklizňových zbytků a realizaci průlehů navržených v rámci scénáře B ještě zatravnění svahů se sklonem vyšším než 21% a buffer zón vodních toků, by ve skutečnosti dosáhl vyšší účinnosti. Jak již bylo řečeno, jedním z opatření navržených v rámci tohoto scénáře je zatravnění břehů vodních toků nacházejících se v územích současně využívaných jako orná půda. Tyto zatravněné pásy mají přece jen významnější vliv na zadržení povodňového odtoku než pásy nacházející se ve větší vzdálenosti od vodního toku. HEC- HMS ovšem počítá s průměrnou hodnotou CN křivky pro každé subpovodí, tudíž nebere v úvahu jeho umístění v rámci subpovodí.

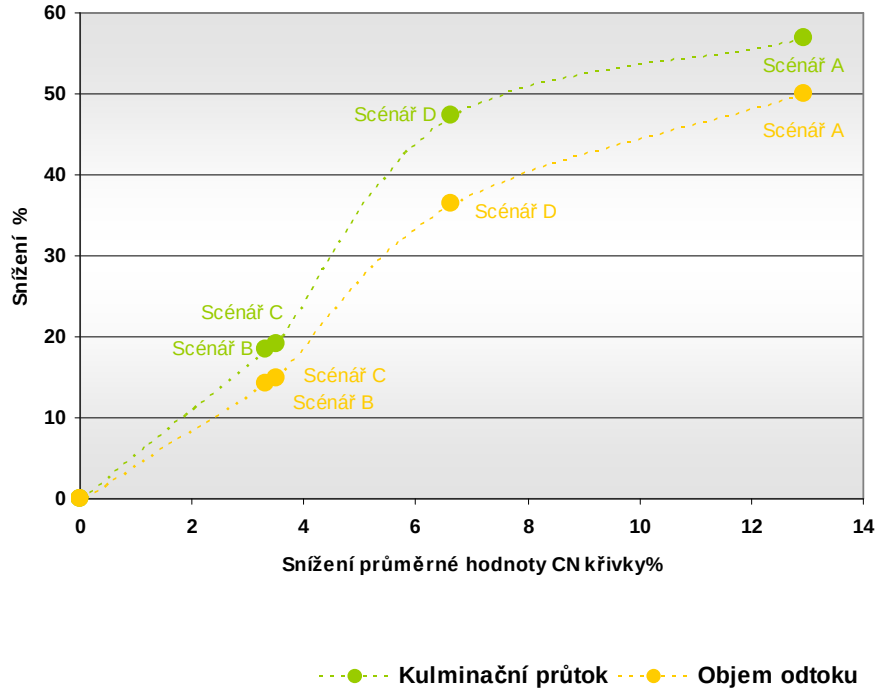
Vzhledem k tomu, že nelze nařídit vlastníkům pozemků opatření, navržená v rámci těchto dvou scénářů, aplikovat a dodržovat, lze konstatovat, že je reálná míra snížení kulminačního průtoku a objemu bude nižší než 18 % a 14% .

Co se týče retenčních schopností, lze usoudit, že povodí Sklenohutského potoka, u kterého se aplikací scénářů změna objemu a výšky odtoku projevila jen minimálně, již v současné době využívá téměř plně svého potenciálu pro zadržení vody.

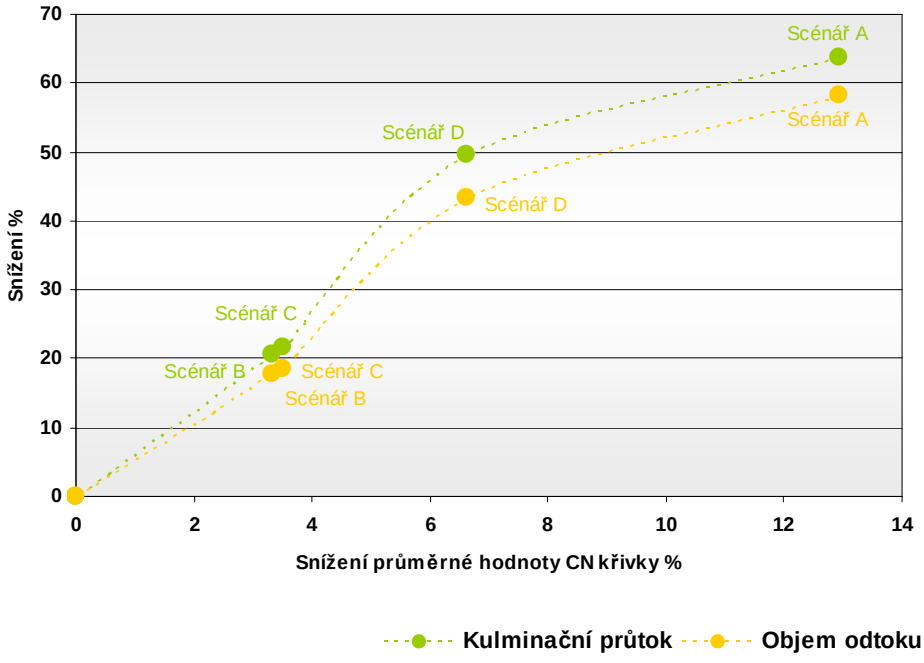
Minimální změny objemu odtoku a výšek odtoku se týkají také povodí posledních tří úseků Rakovnického potoka, posledního úseku Čistého potoka a posledního úseku Lišanského potoka. Zde má tento výsledek jiný význam než v případě Sklenohutského potoka. Retenci a v těchto oblastech nelze téměř zvýšit aplikací organizačních nebo agrotechnických opatření a problém povrchového odtoku bude potřeba řešit opatřeními technického charakteru. Tento výsledek je dán malou plochou orné půdy a vysokým podílem nepropustných ploch, které se nachází v těchto územích.

Zavedením opatření organizačního a agrotechnického charakteru lze nejvíce ovlivnit retenční schopnost povodí třetího a čtvrtého Lišanského potoka, Novodvorského potoka a posledního úseku Kolešovického potoka.

Byly vytvořeny grafy (obr. 43 a 44) vyjadřující procentuální závislost povrchového odtoku na snížení průměrné hodnoty CN křivky pro celé území Rakovnického potoka, přičemž se vycházelo pouze z pěti známých hodnot získaných v rámci simulací odtokových poměrů pro jednotlivé scénáře.



Obr.43 Závislost povodňového odtoku vyvolaného P100 na průměrné hodnotě CN křivky



Obr.44 Závislost povodňového odtoku vyvolaného P20 na průměrné hodnotě CN křivky

Prokládání křivek mezi 5 známými body a vyslovení závěru o závislosti je v tomto případě obtížné z důvodu nedostatečného počtu simulací. Tedy pro určení závislosti mezi odtokovými poměry a průměrnou hodnotou CN křivky by bylo nutné vytvořit více simulací.

Model povodňového odtok v daném povodí je zatížen několika nedostatky vzhledem ke zvoleným metodám. Jedná se o výskyt subpovodí s vyšším podílem urbanizovaných ploch, o nesplnění podmínky o maximální rozloze jednotlivých subpovodí ve všech případech a dále o nepřesnosti v podobě vstupních srážkových dat. I přes tyto nedostatky byla zvolena metoda SCS CN a metoda Clarkových jednotkových hydrogramů. Nespornou výhodou použití těchto metod je možnost využití extenzí programu ArcGIS pro stanovení vstupních parametrů potřebných pro modelování těmito metodami v programu HEC-HMS. Tato kombinace metod je tudíž vhodná pro modelování povodňového odtoku způsobeného změnami ve fyzicko-geografických charakteristikách povodí.

8. ZÁVĚR

Výsledky porovnání odtokových odezev simulovaných pro jednotlivé scénáře potvrdily, že se vybraná agrotechnická a organizační opatření projevují při povodňových stavech, přičemž jejich účinnost je vyšší u povodní vznikajících v důsledku dešťové události o menší N-letosti.

Aplikací protierozních opatření ve formě organizačních a agrotechnických opatření lze pro povodňovou událost vnikající v důsledku teoretické stoleté srážkové události dosáhnout maximálního snížení hypotetického kulminačního průtoku o 57% a zvýšit objem retence maximálně o 50%. Pro povodeň způsobenou teoretickou dvacetiletou srážkou lze těmito opatřeními snížit objem odtoku o maximálně o 58% a kulminační průtok o 64%.

Co se týče reálnosti snížení odtokových poměrů v území, lze usoudit, že není reálné snížit hypotetický kulminační průtok pod 19 % a zvýšit objem retence nad 15 %. V případě teoretického dvacetiletého deště o 22% a 19%. Tyto výsledky odpovídají aplikaci protierozních opatření na ploše současně využívané jako orná půda ve formě vrstevnicové orby, ponechání posklizňových zbytků, dále zatravněných průlehů ,niv toků a svahů se sklonem vyšším než 21%. Ovšem zde není uvažováno s ochotou vlastníků pozemků realizovat tyto změny, tudíž lze očekávat ve skutečnosti přece jen nižší výsledky.

Aplikací opatření organizačního a agrotechnického charakteru těchto lze nejvíce ovlivnit retenční schopnost povodí třetího a čtvrtého Lišanského potoka, Novodvorského potoka a posledního úseku Kolešovického potoka. Naopak pro povodí posledních tří úseků Rakovnického potoka, posledního úseku Čistého potoka a posledního úseku Lišanského potoka nelze zvýšit retenci území za pomoci těchto opatření, protože se zde nachází pouze malé procento orné půdy. Vzhledem k tomu, že se jedná o urbanizované oblasti, na kterých se nachází vysoké procento nepropustných ploch, bude v těchto oblastech potřeba řešit problém povodňového odtoku opatřeními technického charakteru.

V současné době vykazuje dobré retenční schopnosti povodí Sklenohutského potoka. Jedná se o povodí, které již v současné době využívá téměř plně svého potenciálu pro zadržení srážkové vody.

9. SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

AHMAD M.M, GHUMMAN A., AHMAD S. 2009: *Estimation of Clark´s Instantaneous Unit Hydrograph Parameters and Development of Direct Surface Runoff Hydrograph.* In: Water Resource Managent (2009) 23 : s. 2417–2435

BRUNNER G., GORBRECHT J., 1991: *A Muskingum- Cunge Channel Flow Routing Method for Drainage.* US ACE HEC, Davis, CA.

DINGMAN S.L. 2002: *Physical Hydrology- Second Edition*. Prentice Hall, New Persey.

DJOKIC D., 2008: *Comprehensive Terrain Processing Using Hydro Tools*, Esri, New York.

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

FELDMAN D.,2000: *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual.* US ACE HEC, Davis, CA.

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.

HOLÝ, M., 1994: *Eroze a životní prostředí*. Vydavatelství ČVUT Praha, 1994.

HOŠKOVÁ V., PAVLÍK F., UHROVÁ J., 2009: *Návrh protierozních opatření v ploše povodí v programu ArcGIS.,* online: *http://www.vodohospodarske-stavby.cz/clanek/navrh-protierozniho-opatreni-v-plose-povodi-v-programu-arc-gis,* cit. 24.3.2011.

HRÁDEK F. et KUŘÍK P., 2002: *Hydrologie*, Česká zemědělská univerzita v Praze, Lesnická fakulta, Praha

HYDROLOGICKÉ POMĚRY ČSSR. Hydrometeorologický ústav, 1970, díl III..

HŮLA J., JANEČEK M., KOVAŘÍČEK P., BOHUSLÁVEK J., 2003: *Agrotechnická protierozní opatření*. VÚMOP Praha.

HŮLA J. et al, 2010: *Dopad netradičních technologií zpracování půdy na půdní prostředí*. VÚMOP Praha.

CHOW, V.T, 1964, *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill.

JANEČEK M. et al., 2007: *Ochrana zemědělské půdy před erozí, Metodika*, Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., Praha 2007.

JANEČEK M. et al., 2008: *Základy erodologie,* Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí, Praha 2008.

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

KAŠPÁREK, L., 2010: *Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulační schopnosti v povodí Rakovnického potoka*, Periodická zpráva za rok 2009, odpovědný řešitel: Kašpárek, L., Zadavatel: Ministerstvo zemědělství ČR, Národní agentura pro zemědělský výzkum Praha 2010.

KATEDRA PEDOLOGIE A OCHRANY PŮDY, 2009. *Pedologická mapa 1:100 000***.** Katedra pedologie a ochrany půdy ČZU Praha, on-line: *http://geoportal.cenia.cz.,* cit. 23.03.2010

KOVÁŘ P., 1990: *Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích*, Dotisk 2000, Česká zemědělská univerzita v Praze, Lesnická fakulta, Katedra biotechnických úprav krajiny, Praha

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.

MÁCA, P., 2010: *Jednotokový hydrogram*, Česká zemědělská univerzita v Praze, Výzkumný ústav vodohodspodářský T.G. Masaryka v.v.i. Praha.

NOORBAKHSH M. E., RAHNAMA M.B. et MONTAZERI S.,2005: *Estimation of Instantaneous Unit Hydrograph with Clark's Method Using GIS Techniques,* In Journal of Applied Sciences 5 (3) str.455-458

PARITOSH GUPTA, DAMANJIT S. MINHAS, RAJENDRA M. TAMHANE et A.K. MOOKERJEE, 2002: *Application of Geographical Information System (GIS) tools in watershed analysis,* ESRI India New Delhi, LEA Associates South Asia Pvt. Ltd.

RIEGER W, 1999: *A phenomenon- based approach to upslope contributing area and depressions in DEMs.* In: GURNELL A.M., MONTGOMERY D.R., 1999 Hydorlogical Applications of GIS. Chechister, str. 37-52.

RESHMA T. et al, 2010: *Simulation of Runoff in Watersheds Using SCS-CN and Muskingum- Cunge Methods Using Remote Sensing and Geografical Information Systems*,In: International Journal of Advanced Science and Technology, Vol. 25, 2010

ŘEZÁČOVÁ D., SOKOL Z.,ŠERCL P.,2006:*Use of radar data to estimate design hyetographs. In: Extréme Precipitation, Multisource Data Meassurement and Uncertainty*. Proceedings of the 7th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, St. Moritz, Zurich: Instute of Enviromental Engineering. Str 66-70.

ŠAMAJ F., VALOVIČ Š., BRÁZDIL R.,1985: *Denné úhrny zrážok s mimoriadnou výdatnosťou v ČSSR v období 1901 – 1980.* Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava, 1985.

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

TODINI E, 2007, *A mass conservative and water storage consistent variable parameter Muskingum-Cunge approach*, In Hydrology and Earth System Science (11), str. 1645-1659

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

VENKATESH MERWADE, 2010: *HMS Model Development using HEC-GeoHMS* School of Civil Engineering, Purdue University

VIZINA Š., 2010: *Modelování maximálních průtoků v povodí Rakovnického potoka pomocí hydrologického programu HEC-HMS, Diplomová práce*, Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí, Praha 2010

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

YILMAZ M., USUL N.,: *Estimation of Instantaneous Unit Hydrograph with Clark´s Technique in GIS*, online: *http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc02/pap1229/p1229.htm*, cit. 1.4.2011

10. SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

Seznam tabulek

Tab.1 Hydrologické skupiny půd a jejich charakteristika (Zdroj: Janeček et al., 2008) 12
Tab.2 Hodnoty CN dle využití území a HPJ (Kulasová et.al, 2004)..... 13
Tab.3 Hodnoty CN pro zemědělské pozemky (Janeček et al, 2008)..... 27
Tab.4 Souvislost směru orby s odtokem (Zdroj: Holý, 2003)..... 28
Tab.5 Zastoupení krajinných typů a jejich průměrná hodnota CN křivky 33
Tab.6 Plošné rozdělení hydrologických skupin půd..... 35
Tab.7 Dlouhodobé průměrné roční úhrny srážek ve vybraných stanicích (Zdroj: Kašpárek, 2010)... 36
Tab.8 M-denní průtoky dle Hydrologických poměrů III (Zdroj: Kašpárek 2010)..... 38
Tab.9 N-leté průtoky dle Hydrologických poměrů III (Zdroj: Kašpárek 2010)..... 38
Tab.10 Charakteristiky hydrol. bilance ve vodoměrné stanici Rakovník (Zdroj: Kašpárek 2010) 38
Tab.11 Nástroje použité v rámci terénního předzpracování a vzniklé vrstvy..... 42
Tab.12 Nástroje použité pro získání fyzikálních charakteristik a jejich výsledky 44
Tab.13 Získané hydrologické charakteristiky 48
Tab.14 Průtoky uvedeny v publikaci Hydrologické poměry III a průtoky ze simulací..... 51
Tab.15 Simulované kulminační průtoky soutoků pro současný stav vyvolané P100..... 54
Tab.16 Změna hodnot CN křivek pro scénář A 58
Tab.17 Změna hodnot CN křivek pro scénář B..... 59
Tab.18 Změna hypotetických kulminačních průtoků– Scénář A 64
Tab.19 Změna hypotetických kulminačních průtoků– Scénář B..... 67
Tab.20 Změna hypotetických kulminačních průtoků – Scénář C..... 70
Tab.21 Změna hypotetických kulminačních průtoků– Scénář D 72
Tab.22 Porovnání scénářů..... 73

Seznam obrázků

Obr. 1 Hydrologické skupiny půd a jejich charakteristika (Zdroj: Janeček et al, 2007) 12
Obr. 2 Návrhový hydrogram dle UFA pro povodí o ploše 512 km² (Zdroj: Kulasová et al, 2004) 15
Obr. 3 Rozdělení ČR do 4 oblastí na základě radarových dat (Zdroj: Kulasová et al, 2004)..... 16
Obr. 4 Pokles srážky daného trvání s velikostí zasažené plochy (Zdroj: Kulasová et al, 2004)..... 16
Obr. 5 Princip metody Clarkova jednotkového hydrogramu. (Zdroj: Yilmaz et Usul.,2011) 19
Obr. 6. Přiřazené hodnoty dle směru odtoku (Zdroj: Fleming et Doan, 2009)..... 23
Obr. 7 Nomogramy pro dimenzování zatravněné údolnice (Zdroj: Janeček et.al, 2007)..... 30
Obr. 8 Topografická mapa se znázorněním toků v povodí Rakovnického potoka..... 31
Obr. 9 Využití území povodí Rakovnického potoka dle CORINE..... 32
Obr. 10 Mapa sklonitosti povodí Rakovnického potoka 33
Obr. 11 Pedologické poměry (KPOP ČZU v Praze, 2008) 34
Obr. 12 Hydrologické skupiny půd v povodí Rakovnického potoka 35

Obr. 13 Plošné rozdělení průměrný ročních srážkových úhrnů (Kašpárek, 2010) 36
Obr. 14 Maximální jednodenní srážkové úhrny pro požadovanou dobu opakování 37
Obr. 15 Roční chod změn teplot za 49 odpovídající lineárním trendům (Zdroj: Kašpárek, 2010) 37
Obr. 16 Plošné rozdělení ročních výšek odtoku v roce 2009 (Zdroj: Kašpárek, 2010) 39
Obr. 17 Vygenerované terénní deprese 41
Obr. 18 Dílčí povodí a navržené nádrže 43
Obr. 19 Hodnoty CN křívek pro povodí Rakovnického potoka 46
Obr. 20 Nepropustné plochy 46
Obr. 21 Schéma povodí Rakovnického potoka v programu HEC-HMS 50
Obr. 22 100-letá hypotetická srážka rozdělena dle hyetogramu pro povodí Kounovského potoka 51
Obr. 23 Hypotetická kulminační vlna v místě soutoku Kolešovického a Rakovnického potoka 52
Obr. 24 Hypotetická kulminační vlna v místě soutoku Lišanského a Rakovnického potoka 52
Obr. 25 Simulovaná kulminační vlna v místě uzávěrového profilu pro současný stav 53
Obr. 26 Zastoupení orné půdy, lesů a nepropustných ploch v povodí 55
Obr. 27 Hypotetický objem odtoku pro jednotlivá subpovodí 56
Obr. 28 Simulovaná výška odtoku pro jednotlivá subpovodí 56
Obr. 29 Změněné plochy dle scénáře A a B 59
Obr. 30 Změněné plochy dle scénáře C 60
Obr. 31 Změněné plochy dle scénáře D 61
Obr. 32 Porovnání hypotetických kulminačních vln- Scénář A 62
Obr. 33 Změna hypotetického objemu odtoku z jednotlivých subpovodí- Scénář A 63
Obr. 34 Změna hypotetické výšky odtoku z jednotlivých subpovodí- Scénář A 63
Obr. 35 Porovnání hypotetických kulminačních vln- Scénář B 65
Obr. 36 Změna hypotetického objemu odtoku z jednotlivých subpovodí- Scénář B 66
Obr. 37 Změna hypotetické výšky odtoku z jednotlivých subpovodí- Scénář B 66
Obr. 38 Porovnání hypotetických kulminačních vln- Scénář C 68
Obr. 39 Změna hypotetického objemu odtoku z jednotlivých subpovodí- Scénář C 69
Obr. 40 Změna hypotetické výšky odtoku z jednotlivých subpovodí- Scénář C (P100) 69
Obr. 41 Porovnání hypotetických kulminačních vln- Scénář D 71
Obr. 42 Změna hypotetického objemu odtoku z jednotlivých subpovodí- Scénář D 72
Obr. 43 Závislost povodňového odtoku vyvolaného P100 na průměrné hodnotě CN křivky 75
Obr. 44 Závislost povodňového odtoku vyvolaného P20 na průměrné hodnotě CN křivky 75

11. PŘÍLOHY