

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

Studijní program: N4106 Zemědělská specializace
Studijní obor: Pozemkové úpravy a převody nemovitostí
Zadávací katedra: Katedra krajinného managementu
Vedoucí katedry: doc. Ing. Pavel Ondr, CSc.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Hydrologické simulace odtoků vody z povodí při srážko-odtokových událostech

Vedoucí diplomové práce: Ing. Václav Bystřický, Ph.D.
Autor diplomové práce: Bc. Pavel Ticháček

České Budějovice, 2018

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
Fakulta zemědělská
Akademický rok: 2016/2017

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

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel TICHÁČEK**
Osobní číslo: **Z16463**
Studijní program: **N4106 Zemědělská specializace**
Studijní obor: **Pozemkové úpravy a převody nemovitostí**
Název tématu: **Hydrologické simulace odtoků vody z povodí při srážko-odtokových událostech**
Zadávací katedra: **Katedra krajinného managementu**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

na vymezení faktorů, které ovlivňují tvorbu a velikost přímého odtoku vody z krajiny a na modelové vyhodnocení jejich vlivů.

Rámcový obsah DP:

Rešerše na dané téma.

Výběr vhodného povodí pro řešenou analýzu a jeho popis.

Výběr vhodné metody výpočtu přímého odtoku.

Identifikace parametrů ovlivňujících přímý odtok.


Modelové vyhodnocení vlivu různých scénářů (charakteristik povodí) na odtok vody z povodí.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: 50 stran textu
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

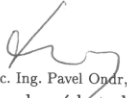
Brutsaert, W. Hydrology: An introduction. Cambridge University Press, 2005, 605 s.
Maidment, D.R. (ed.). Handbook of hydrology. McGraw-Hill, New York, 1993, 1424 s.
Davie, T. Fundamentals of hydrology. Routledge, New York, 2008, 200 s.
Daňhelka, J., Krejčí, J., Šálek, M., Šercl, P., Zezulák, J. Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. ČZU Praha, Praha, 2002, 214 s.
Kovář, P. Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích. ČZU Praha, Praha, 2000, 136 s.
Janeček, M. Ochrana zemědělské půdy před erozí (Agricultural land protection against erosion). Prague: ISV nakladatelství; 2002, 254 p.
časopisy: Hydrological processes, Journal of hydrology, Physics and chemistry of the earth, Hydrological studies, atd.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Václav Bystřický, Ph.D.
Katedra krajinného managementu

Datum zadání diplomové práce: 23. března 2017
Termín odevzdání diplomové práce: 30. dubna 2018


prof. Ing. Miloslav Šoch, CSc., dr. h. c.
děkan

JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA
studijní oddělení
Studentská 1669, 370 05 České Budějovice


doc. Ing. Pavel Ondr, CSc.
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 23. března 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích 16.4.2018

Bc. Pavel Ticháček

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu pracovníkovi mé diplomové práce Ing. Václavu Bystřickému, Ph.D. za jeho cenné rady a připomínky a za odborné vedení při sestavování diplomové práce. Díky všem těmto aspektům a úkonům mi pomohl zkvalitnit a dokončit mou diplomovou práci. Za velkou morální podporu patří poděkování mé rodině.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá hydrologickými simulacemi odtoku vody z povodí při srážko-odtokových událostech. Tato práce navazuje na bakalářskou práci „Faktory ovlivňující odtok vody z povodí při srážko-odtokových událostech“. V ní byly popsány faktory, které mají vliv na odtok vody z povodí.

Diplomová práce byla řešena na povodí Jíleckého potoka. Odtok vody z povodí je ovlivněn řadou činitelů, mezi nejvýznamnější patří sklon terénu, nasycenost půdy, geologické a pedologické poměry, vegetační pokryv a antropogenní vliv.

Výpočty přímého odtoku byly prováděny metodou CN křivek, za použití map BPEJ, land use získaným z Corine Land Cover 2006 a maximálních denních úhrnů srážek s pravděpodobností opakování 2, 10, 20, 50 a 100 let získané ze srážkoměrné stanice v Netřebicích. Výpočty byly provedeny početním způsobem za použití vektorových dat a rastrovou metodou provedenou v programu ArcMap. Dále byly provedeny simulace různých scénářů změny charakteristiky povodí jako je změna nasycenosti půd, zatravnění orné půdy ve svazích se sklonem větším než 12°, zatravnění všech pozemků, na nichž se nachází orná půda a při rozšíření zastavěného území v povodí.

Klíčová slova: hydrologický cyklus, srážko-odtokový proces, přímý odtok, Jílecký potok, CN-křivky, faktory ovlivňující odtok

ABSTRACT

This thesis deals with the event-based rainfall-runoff modelling of the selected river basin. This thesis is based on my previous work „Factors affecting the water discharge from the river basin during rainfall-runoff events“. In that work I described factors, which have effect on water runoff from the river basin.

This thesis was solved on basin of Jílecký stream. Water runoff from basin is affected with a number of factors, the most significant are slope of the terrain, soil saturation, geological and pedological conditions, vegetation cover and anthropogenic influence.

Calculations of direct runoff were realised with method of CN curves, with using BPEJ map, land use map gained from Corine Land Cover 2006 and maximum daily precipitation sums with 2, 10, 20, 50 and 100 years probabilities recurrence obtained from the rainfall station Netřebice. Calculations were performed in a numerical method using vector data and a raster method performed in ArcMap. In the next step I performed simulations of various scenarios of change in river basic characteristics such as soil saturation change, grassing of arable land with a slope greater than 12°, grassing of all arable land and enlargement the built-up area in the river basin.

Key words: hydrological cycle, rainfall-runoff proces, direct runoff, the Jílecký brook, CN-curves, factors affecting runoff

Obsah

1. Úvod	10
2. Literární rešerše	11
2.1 Oběh vody v přírodě	11
2.2 Hydrologická bilance	12
2.3 Odtok vody.....	14
2.3.1 Povrchový odtok	16
2.3.2 Podpovrchový odtok	17
2.4 Srážko-odtokový proces.....	17
2.5 Faktory ovlivňující odtok vody z povodí.....	19
2.5.1 Pedologické poměry.....	19
2.5.2 Geologické poměry	20
2.5.3 Klimatické poměry	21
2.5.4 Vliv hustoty říční sítě.....	22
2.5.5 Velikost plochy povodí	22
2.5.6 Nasycenost půdy.....	23
2.5.7 Vliv vegetačního krytu.....	23
2.5.8 Tvar povodí	25
2.5.9 Průměrná výška a průměrný sklon povodí.....	26
2.5.10 Antropogenní vlivy	26
2.6 CN – křivky	28
3. Materiál.....	30
4. Metody.....	32
4.1 Metoda CN křivek	32
4.1.1 Metoda výpočtu za použití vektorových podkladů.....	35
4.1.2 Výpočet rastrovým způsobem	36
4.1.2.1 Zjednodušený rastrový způsob výpočtu	37
4.1.2.2 Detailní rastrový způsob výpočtu.....	38
4.2 Analýza faktorů ovlivňujících přímý odtok z povodí	39
4.2.1 Zatravnění orné půdy ve svazích nad 12°	39
4.2.2 Změna nasycenosti půdy.....	40
4.2.3 Změna Land use zatravnění orné půdy	41
5. Výsledky a diskuse.....	43
5.1 Metoda výpočtu za použití vektorových podkladů.....	43
5.2 Výpočet rastrovým způsobem	47

5.2.1	Zjednodušený rastrový způsob výpočtu	47
5.2.2	Detailní výpočet rastrovým způsobem	50
5.3	Analýza faktorů ovlivňující přímý odtok z povodí	53
5.3.1	Zatravnění orné půdy ve svazích nad 12°	53
5.3.2	Změna nasycenosti půdy.....	54
5.3.3	Změna Land use – zatravnění orné půdy	57
5.3.4	Rozšíření zástavby.....	59
5.4	Porovnání výsledků	60
6.	Závěr.....	63
7.	Seznam použité literatury.....	65
8.	Seznam obrázků	70
9.	Seznam tabulek.....	72
10.	Seznam grafů.....	72

1. Úvod

Voda na naší zeměkouli i v jejím ovzduší je základním předpokladem pro vznik a udržení života nejen lidí a zvířat, ale i vegetace (Hubačiková, 2009). Velkým problémem v souvislosti s klimatickými změnami a způsobem hospodaření se stává časová a prostorová nerovnoměrnost výskytu vody, která je značně ovlivněna retenční schopností krajiny. Retenční schopnost krajiny ovlivňuje vyrovňování odtokových poměrů a napomáhá ke snižování kulminačních průtoků. Voda nejen slouží – podobně jako každý živel může být i ona v období jejího nadbytku velmi nebezpečná. Při vzniku velkých povodní z dešťů nebo tání sněhu je schopna během krátké doby svou dynamickou silou zničit výsledky práce mnohdy celých generací, a dokonce si vybírá daň lidských životů (Kemel, 1991).

Odtok je hydrologický termín vyjadřující objem vody, který odteče z povodí za určitý časový úsek. Odtok vody je ovlivňován celou řadou faktorů. Velký vliv na odtokové poměry má sklonitost území, dalšími faktory, které ovlivňují odtok, jsou vegetační pokryv, nasycenost půdy, geologické a pedologické poměry a v neposlední řadě antropogenní činnost člověka. Odtok vody se dělí na povrchový, podpovrchový a podzemní. Povrchový odtok se skládá ze soustředěného a nesoustředěného odtoku. Nesoustředěný odtok je poměrně pomalý pohyb vody stékající po celém svahu stejnosměrně. V terénních sníženinách dochází k akumulaci vody a vzniká soustředěný odtok. Podpovrchový odtok se skládá z hypodermického a podzemního odtoku. Hypodermickým odtokem je voda, která odtéká pod povrchem terénu, ale nedosahuje hladiny podzemní vody. Podzemní odtok je část celkového odtoku, která dosahuje podzemní vody.

Cílem této diplomové práce je simulování odtoku vody z povodí při použití různých scénářů změny charakteristiky povodí a následné vyhodnocení jejich vlivu na přímý odtok. Přímý odtok bude vyhodnocován na povodí Jíleckého potoka metodou CN křivky.

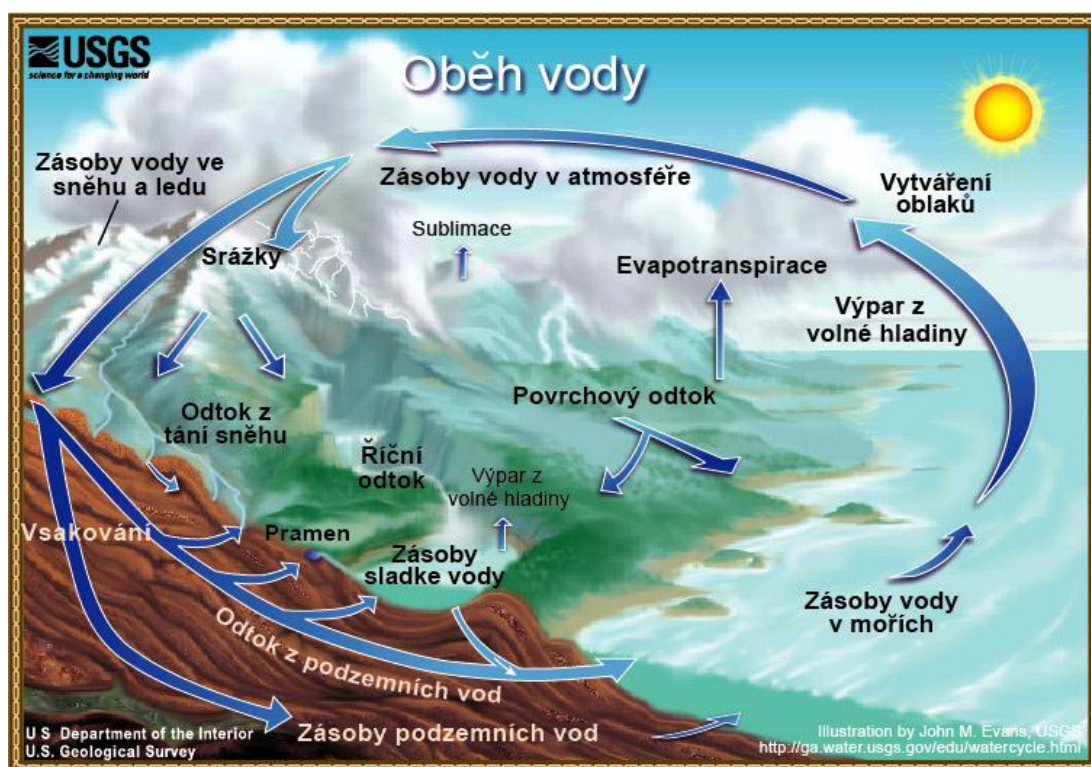
2. Literární rešerše

2.1 Oběh vody v přírodě

Stav vody v přírodě je vyrovnaný, voda nikde nevzniká, ani se neztrácí, Pouze mění skupenství (Chmelová a Frajer, 2013). Voda vyskytující se v přírodě se vyznačuje výjimečnou pohyblivostí. Vodní masy se přemísťují ve stavu kapalném nebo pevném z výše položených míst do nižších za působení zemské tíže, dále přecházejí z tuhého (sublimace) a kapalného skupenství (vypařování) ve skupenství plynné vlivem sluneční energie. Tento stále se opakující pohyb vody nazýváme oběhem vody v přírodě (Krešl, 2001). Rozlišují se dva základní oběhy vody na Zemi. První takzvaný malý oběh, při kterém dochází k výměně vody jen nad plochami moří a oceánů, a druhý velký oběh, ve kterém dochází k výměně vody mezi pevninou a oceány (Netopil, 1972). Jandora a kol. (2002) dodává, že na malé části Země existují bezodtokové oblasti, které vykonávají samostatný oběh. Optimální situace je, když voda cestou z pevniny do moře několikrát absolvuje malý vodní cyklus. Snižováním frekvence těchto koloběhů dochází k vysychání krajiny a klesají zásoby podzemní vody (Pokorný a Dvořáková, 2011).

Působením tepla ze slunečního záření se voda z hladiny moří, oceánů, půdy a vegetace nepřetržitě vypařuje (Tlapák, 1992). Voda v plynném skupenství přechází do horních vrstev atmosféry, odkud je vzdušnými proudy odtransportována na jiná místa, kde za příznivých podmínek dochází ke kondenzaci a srážky vypadnou na povrch Země (Pokorná a Zábranská, 2008). Kravka a kol. (2009) dodávají, že se vzdušná vlhkost sráží ve formě rosy nebo námrazy na rostlinstvu a jiných předmětech. Tato voda se opět vypaří nebo ji pohltnou rostliny, které ji později transpirují. Srážky ve formě deště, mlhy, krup a sněhu se částečně vypaří ještě před dopadem na zem a další část srážek je zachycena listy rostlinstva nebo na jiných předmětech, část stéká přímo na zem a část se vypařuje. Voda která dopadla na pevninu stéká ve stružkách do potoků a řek a v nich odtéká do moří a oceánů. Další část obohacuje vláhou půdní profil tím, že se zasakuje průlinkami a póry a tato voda se dále buď vypaří, nebo ji využije rostlinstvo a transpirací ji opět vypaří. Zbylá část obohatí zásoby podzemní vody prosáknutím nebo protečením většími póry nebo puklinami v půdě nebo horninách (Němec, 1965). Podzemní voda je soustava podzemních toků a jezer, které tečou v pórech a průlinkách hornin. Podzemní voda postupně odtéká do řek, nebo do oceánů, vyvěrá na zemský povrch v podobě pramenů, nebo se dostává

do větších hloubek, odkud se čerpá z obyčejných nebo artézských studní. Koloběh vody je závislý na vypařování a pohybu atmosféry, kdy je zdrojem obojího sluneční záření (Kravka a kol., 2009). Schéma oběhu vody v přírodě je znázorněno na obrázku č. 1.



Obr. č. 1: Oběh vody (USGC)

2.2 Hydrologická bilance

Zpracování hydrologické bilance je nejobecnějším řešením vzájemných vztahů složek zúčastněných v koloběhu vody. Bilanční rovnici lze rozepsat od úplně nejjednodušší rovnice, která se zabývá srážkami, odtokem a ztrátovou složkou, až po rovnice, které se zabývají jednotlivými odtokovými složkami, změnami zásob vody v jim odpovídajícím prostředí za bilancované období a také rozčleněním ztrátové složky vody na druhy výparu i transpirace. Výše zmíněné metody jsou zakládány na jednoduchém principu a při jejich použití vznikají problémy v nepřesnosti extrapolace bodově získaných hodnot a metodické obtížnosti při stanovení bilančních rovnic. Z toho důvodu je nutné při výpočtech kombinovat prvky, které jsou přímo měřeny, s hodnotami, které jsou stanoveny empiricky nebo odhadem (Kněžek, 1988).

ČHMÚ (2015) popisuje, že hydrologická bilance porovnává množství srážek, přítoků a odtoků vody a také změn vodních zásob v povodí, území nebo vodním útvaru

za daný časový úsek. Pomocí hydrologické bilance se hodnotí změny zásob povrchové a podzemní vody způsobené časovou a prostorovou proměnlivostí přirozených vlivů, hlavně klimatických činitelů a vytváří podklad pro hodnocení změn zásob vody. Při výpočtu hydrologické bilance se rozlišují dva typy bilančních veličin:

- Veličiny, které mají rozměr toků (atmosférické srážky, odtok z povodí, základní odtok z povodí, územní výpar)
- Veličiny, které mají rozměr zásoby (zásoba vody ve sněhové pokrývce, zásoba půdní vody v zóně aerace, zásoba vody v tocích a nádržích, zásoba podzemní vody)

Všechny prvky bilanční rovnice nelze s přesností změřit nebo určit. Relativně dobře se dají změřit srážky a odtok vody, u specifických prvků jako jsou změny v zásobě půdní a podzemní vody a potenciální výpar se používají speciální modely a modelové výpočty. Všechny členy bilanční rovnice se musí vztahovat ke stejnému období (Pokorná a Zábranská, 2008).

Vzájemný vztah bilančních prvků v povodí je dán bilanční rovnicí:

$$H_s = H_o + H_v \pm R$$

Kde:

H_s – výška srážek spadlých na povodí (mm)

H_o – výška odteklá uzávěrovým profilem povodí (mm)

H_v – výparná výška (mm)

R – změna v zásobách vody v povodí (mm)

Kravka a kol. (2009) rozvádí bilanční rovnici na nezjednodušenou, jelikož se objem vody v hydrosféře nemění:

$$H_S = O_V + O_P + O_Z + O_S + H_E(p) + H_E(r) + H_E(t) + H_E(v) \pm \Omega_1 \pm \Omega_2 \pm \Omega_3 \pm \Omega_4 \pm \Omega_5$$

Kde:

H_S – atmosférická srážka

O – odtok vody

O_V – soustředěný povrchový odtok

OP – nesoustředěný povrchový odtok

OZ – odtok podzemní vody

OS – odtok vody ve hlubších vrstvách

HE – klimatický výpar

HE(p) – výpar z půdy

HE(r) – výpar z povrchu rostlin, neproduktivní výpar části srážek zachycených nadzemními částmi porostů a předměty (10-50% srážek)

HE(t) – produktivní výpar z rostlin – dýchání rostlin, spotřeba vody rostlinami pro vlastní stavbu buněk

HE(v) – výpar z vodní hladiny

Ω – množství vody, které zvýšilo nebo snížilo zásoby povrchové a podzemní vody

Ω_1 – přírůstek nebo úbytek vody povrchové a podzemní

Ω_2 – přírůstek nebo úbytek vody v nádržích

Ω_3 – přírůstek nebo úbytek vody v ovzduší

Ω_4 – přírůstek nebo úbytek vody v biomase rostlinstva

Ω_5 – přírůstek nebo úbytek vody v biomase živočišstva

Kdy složky Ω_3 , Ω_4 , Ω_5 jsou kvantitativně zanedbatelné a obvykle se s nimi neuvažuje.

2.3 Odtok vody

Odtok vody Davie (2008) popisuje jako pohyb vody, který je soustředěn v proudu, poté co voda dosáhla zemského povrchu ve formě srážky. K pohybu vody dochází jak na povrchu, tak i pod povrchem a to v nejrůznějších rychlostech. Povrchová část odtoku s podpovrchovou částí odtoku nám dávají dohromady celkový odtok (Pačes, 1982).

Poznávání odtokových vlastností povodí začíná zjištěním nárůstu průtoku v toku, který je závislý na srážce. Nejprve se voda z deště vsakuje do půdy, díky tomu

se průtok nezvětšuje. Zvětšovat se začne až po určité době, která je závislá na sklonitosti povodí, půdních vlastnostech a zastavěnosti povodí. Zastavěná území brání vodě v pronikání do půdy, čímž vyvolávají povrchový odtok, který způsobí v toku rychlý nárůst průtoku (Matoušek, 2010).

Voda, která spadne na zemský povrch v podobě srážky, stéká působením zemské gravitace ve směru největšího sklonu. Nejprve v tenké vrstvě v podobě plošného nesoustředěného odtoku, poté se vlivem členitosti terénu postupně spojuje ve stružky, struhy, rýhy, potoky a toky a vytváří soustředěný odtok (Hubačiková, 2009). Část vody ze srážek se infiltruje do půdy, kde se pohybuje v geologickém prostředí v puklinách a průlinách až k hladině podzemní vody a zde se tvoří podpovrchový odtok (Kravka a kol., 2009).

Chmelová a Frajer (2013) uvádějí, že průtok je základní měrnou jednotkou odtoku. Průtok, který je vztažen na jednotku plochy se nazývá specifický odtok. Specifický odtok je závislý na geografických a klimatických podmínkách a udává nám množství vody, které v průměru odečte z plošné jednotky povodí za jednotku času a je udáván v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ nebo v $\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Shaw, 2005). Tato metoda umožňuje posouzení vodnosti a celkových odtokových podmínek povodí nebo jejich částí.

$$q = \frac{Q}{Sp}$$

Kde:

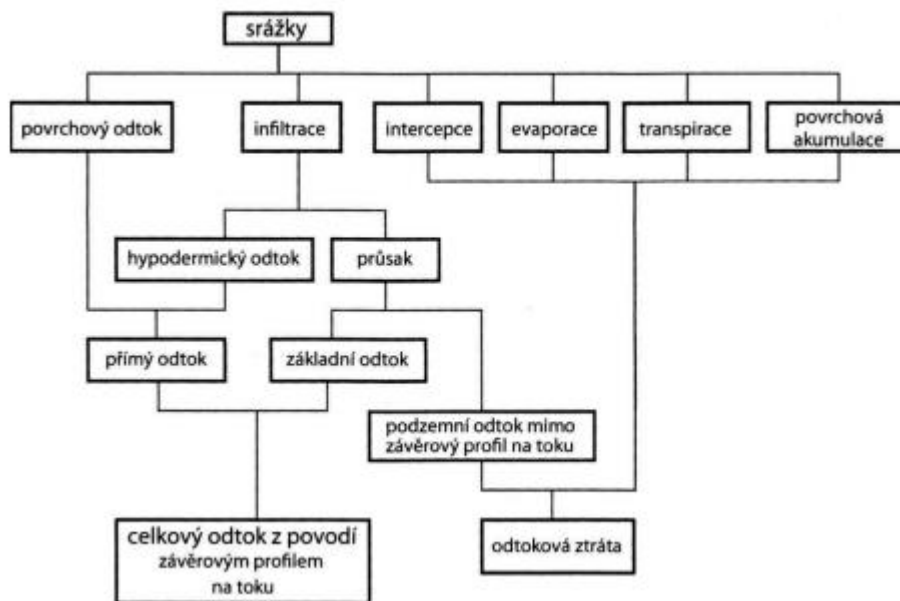
Q – specifický odtok

Q – průtok

Sp – plocha povodí

Specifická vydatnost podzemní vody je vyjádřením odtoku podzemní vody z povodí specifickým odtokem v delším období sucha a je výhodná ke zjištění a porovnání množství podzemního odtoku z různých geologických útvarů (Šilar, 1996).

Dle Němce (1965) se při analýze nebo syntéze průběhu povrchového odtoku ve vztahu ke srážce musí přihlídnout také k podpovrchovému odtoku. Na druhou stranu uvádí, že v některých případech lze zanedbat výpar. Odtok se mění v závislosti na čase i prostoru, v našich klimatických podmínkách dosahuje nejvyšších hodnot v období jara, kdy taje sníh, a nejnižších buď v zimě, kdy se voda na zemském povrchu nachází ve formě sněhu, nebo na podzim po suchém letním období (Pačes, 1982).



Obr. č. 2: Schéma odtokového procesu (Matoušek, 2010)

2.3.1 Povrchový odtok

Povrchový odtok též označován jako hortonovský odtok vzniká pokud je intenzita deště větší než infiltrační kapacita půdy. V tom případě se na půdě utváří tenká vrstva vody, která se začne pohybovat dolů po svahu a následně se začne tekoucí voda akumulovat v povrchových depresích, které po zaplnění přetékaají. Po zaplnění voda začne přetékat a vzniká povrchový odtok, který přechází do rýh a stružek a ty se následně spojují do toků (Davie, 2008). Mimo povrchový odtok rozeznáváme také nasycený povrchový odtok, který se tvoří na nasycených ploškách těsně přiléhajících k toku, na dolních nasycených částí svahů a na územích s mělkými půdami. Oblast, na které se nachází nasycený povrchový odtok, se s přibývajícím srážky rozrůstá. Rozdíl mezi hortonovským a nasyceným povrchovým odtokem je ve způsobu nasycení půdy, kdy hortonovský odtok je nasycen srážkami shora, kdežto při nasyceném povrchovém odtoku podpovrchovou vodou zdola (Blažková, 1993).

Krešl (1990) dále člení povrchový odtok na soustředěný a plošný nesoustředěný. Po dopadu srážky na zemský povrch voda stéká po svahu pomalu a stejnosměrně a tento pohyb se nazývá plošný nesoustředěný odtok. Rychlost, jakou se bude voda pohybovat, je závislá na mnoha faktorech jako je drsnost povrchu, intenzita deště, počáteční nasycení půdy, druh vegetace a podélný sklon. Z plošného odtoku se postupně stává odtok soustředěný vlivem akumulace vody v terénních sníženinách.

Rychlost, jakou se z nesoustředěného odtoku stane odtok soustředěný, je závislý na mnoha faktorech, ale k jeho urychlenému vzniku výrazně napomáhají rýhy, které byly vytvořeny při obhospodařování pozemků (Zapletal, 2004).

2.3.2 Podpovrchový odtok

Nehortonovský odtok nebo též odtok ze saturace závisí na stavu nasycení půdy před, během i po dešti. Odtok ze saturace vzniká při méně intenzivní srážce než odtok hortonovský (Davie, 2008). K odtoku ze saturace dochází, pokud se při srážce většina vody vsákne do půdy a nastává podpovrchový odtok ve svrchní sklonité vrstvě půdy směrem dolů k toku. Na úpatí svahu podél toku vzniká malá oblast nasycené půdy – zde se v případě další srážky voda již nevsákne, ale odtéká povrchovým odtokem. S přibývajícím srážky se zóna nasycení rozšiřuje směrem od toku do svahu. Tam kde se protne dráha podpovrchového odtoku s nasycenou zónou dojde k vývěru vody z půdy na povrch a vznikne zpětný tok (return flow) a voda dále teče povrchovým odtokem. Po skončení srážek rychle skončí povrchový odtok ze zóny nasycení a zpětný tok, oproti tomu podpovrchový odtok velmi pozvolně klesá (Šír, 2013).

Podpovrchový odtok se skládá z hypodermického a podzemního odtoku (Kravka, 2009). Hypodermický odtok je ta část vody, která se infiltrovala do podloží a odtéká v rámci půdního profilu těsně pod zemským povrchem a není v kontaktu s hladinou podzemní vody. Část tohoto odtoku dotuje povrchový tok bezprostředně po skončení deště, zbylá část se do toku dostává postupně až po určité době. Podzemní odtok je tvořen vodou, která se infiltrovala a odtéká podzemím. Podzemní odtok je značně zpomalený oproti hypodermickému a povrchovému odtoku (Chmelová a Frajer, 2013).

Podzemní voda je největším zdrojem vody pro vnitrozemí. Vzhledem ke své pomalé rychlosti a dlouhé době zdržení zabezpečuje neustálý odtok. Podzemní voda zajišťuje i v období bez srážek minimální výšku hladiny podzemní vody a minimální průtoky (Serrano, 1997).

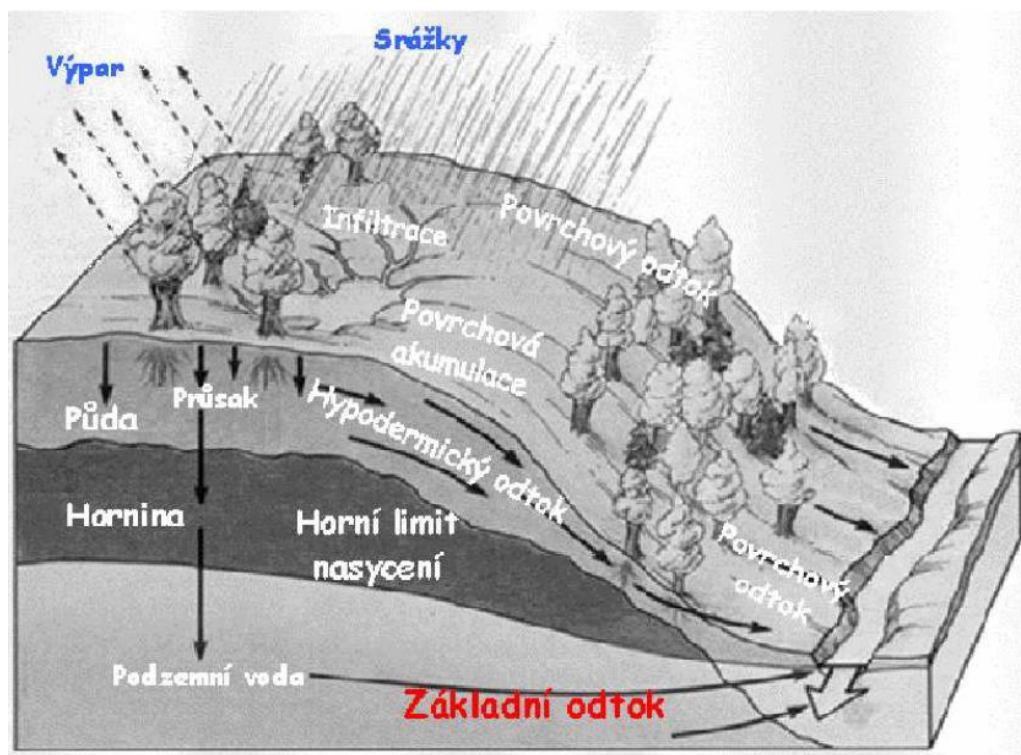
2.4 Srážko-odtokový proces

Lidé již od nepaměti využívali a ovlivňovali proces přeměny srážek na odtok úmyslně nebo i neúmyslně. Ovlivňováním srážko-odtokového procesu byla snaha především vyrovnat existující výkyvy a poupravit si je k vlastnímu prospěchu. Zásahy,

kteře vedou ke změnám ve srážko-odtokovém procesu, jsou mnohdy i zásahem do hydrologického cyklu (Červený a kol., 1984).

Srážko-odtokový proces nám udává jaké množství vody odeče z povodí uzávěrovým profilem. Je ovlivněn řadou činitelů a v našich podmínkách mají rozhodující vliv atmosférické srážky. Vztah mezi srážkou a odtokem není lineární, je ovlivňován jednak ostatními klimatickými faktory, jejich vývojem, jednak různými fyzikogeografickými činiteli, kteří určují ráz povodí. V neposlední řadě ovlivňuje proces i chování člověka (Starý, 2005). Složitost srážko-odtokového procesu je v posledních letech umocněna očekávanými a z části již probíhajícími vlivy změn klimatu, což vede ke změnám ve vydatnosti a časovém rozložení vodních zdrojů (Starý, 2005).

Jandora a kol. (2002) popisují srážko-odtokový proces jako postupnou přeměnu srážky, která dopadá na povrch povodí, až po její přeměnu na odtok, který odeče uzávěrovým profilem. Jedná se o velice komplikovaný proces, který je ovlivněn řadou činitelů jakožto klimatických (teplota a vlhkost vzduchu, atmosférický tlak, časový a prostorový průběh srážky a výpar) nebo geografických (nadmořská výška, velikost a tvar povodí, reliéf, vegetační pokryv a hydrogeologické poměry). Tento proces je vyjádřen na obrázku č. 3.



Obr. č. 3: Schéma srážko-odtokového procesu v povodí (Starý, 2005)

Vlastní srážko-odtokový proces je složen ze dvou dílčích transformací, kterými jsou hydrologická a hydraulická transformace. Hydrologickou transformací získáváme efektivní intenzitu srážky, které dosáhneme odečtením hydrologické ztráty od srážky dopadající na povodí. Do hydrologické ztráty patří výpar evapotranspirací, intercepce, infiltrace a ztráta povrchovou retencí. Hydraulická transformace začíná odtokem vody z povodí v podobě povrchového odtoku. Tento povrchový odtok se následně koncentruje v ronových a erozních rýhách, až se dostane do říční sítě a následně odtéká uzávěrovým profilem (Starý, 2005).

2.5 Faktory ovlivňující odtok vody z povodí

V tocích dochází během roku ke změnám průtoků a jejich rozdělení v průběhu roku. Těmito změnami je definován hydrologický režim, který se rozděluje na přirozený a na ovlivněný. Hydrologický režim je ovlivňován celou řadou faktorů, kterými nejsou pouze vlastnosti povrchu, ale také veškeré prostředí, které je s ním spjaté (Zapletal, 2004). Němec (1965) tyto faktory dělí do dvou skupin:

a) Fyzikálně-zeměpisné vlivy, mezi které patří klimatické a mikroklimatické podmínky v povodí, geologická a půdní charakteristika povodí, vegetační kryt, hustota říční sítě, množství umělých a přirozených vodních ploch a močálů v povodí a některé jiné.

b) Fyzikálně-geometrické vlastnosti, mezi které patří rozměry povodí, jeho tvar a reliéf terénu.

2.5.1 Pedologické poměry

Půdní poměry jsou rozhodující pro intenzitu a velikost infiltrace, pro akumulaci vody v půdním profilu a také rozhodují o velikosti podílu jednotlivých složek odtoku na celkovém odtoku, tím pádem i o stabilitě půdního profilu z hlediska intenzity erozních procesů (Soukup a Hrádek, 1999). Infiltrační schopnost povrchových vrstev v krajině hraje velice důležitou roli při ochraně vodního režimu, vodních zdrojů a životního prostředí. Při dostatečné infiltrační kapacitě povrchu krajiny lze dosáhnout snížení rizika negativních vlivů hydrologických extrémů, jako jsou záplavy nebo déletrvající sucha (Kulhavý a kol., 2015).

Schopnost půdy jímat vodu závisí na její pórovitosti a provzdušněnosti. Písek je značně jímatý, oproti tomu mokrý jíl je charakterizován svojí značnou nepropustností (Jůva, 1957). Vyskytují-li se v povodí mocnější písčité nánosy, je voda ze srážek pohlcena a dochází k postupnému uvolňování v podobě podzemní vody, čímž dochází ke zpomalení a částečnému vyrovnání odtoku. Na písčitéch půdách tedy dochází ke snížení rychlého povrchového odtoku a zvyšuje se podzemní odtok. Méně propustné až nepropustné půdy působí opačně – dochází k velkému povrchovému odtoku na úkor podzemního napájení toků. Nezáleží pouze na druhu půdy na množství vsáklé vody, ale i na intenzitě srážky, kdy při intenzivních deštích půda nestačí vsakovat vodu, která odtéká po povrchu i přesto, že půda není stále nasycená a mohla by vodu přijímat. Oproti tomu při slabých deštích může docházet k úplnému vsaku a povrchový odtok tedy nenastane (Němec, 1965). Další pedologickou vlastností je struktura, kdy se půda vyskytuje jako drobtovitá nebo prostozrnná. Drobtovitá půdní struktura je nejvýhodnější, jelikož mezi jednotlivými drobtíky vznikají nekapilární hrubší póry, které se podle okolností vyplňují vodou nebo vzduchem. Při dešti drobtovitá půda přijímá vodu a provlhuje se do hloubky až na bod nasycení hrubších pórů a po skončení deště dochází ke kapilárnímu vstřebávání vody drobtíky a hrubší póry se uvolní pro vzduch nebo další dešťovou vodu. Prostozrnná struktura půdy je nevýhodná, jelikož vytváří po vyschnutí po povodni nebo prudkém dešti na povrchu půdní škraloup nebo při suchém období dochází k odvívání půdy větrem (Jůva, 1957).

2.5.2 Geologické poměry

Geologické poměry mají výrazný vliv na mocnost půdy, její typ, na sklon povodí a také mají význam při vzniku propustných nebo méně propustných horních vrstev (Daňhelka, 2007). Tím pádem mají nepřímý vliv na samotný proces odtoku vody z povodí a na množství vody, které se vsákne do spodních vrstev a poté dotuje toky v dané oblasti. Propustnost nebo nepropustnost výrazně ovlivňuje rozdělení vodnosti v tocích. Pokud se v povodí vyskytují propustné vrstvy, tak v období bohaté srážkové činnosti dochází k nižším kulminačním průtokům a v období sucha je minimální průtok vyšší, než tomu je u nepropustných nebo méně propustných podloží. U povodí s propustným podložím dochází k rychlému vsaku, díky čemu se nemůže plnou měrou uplatnit výpar, proto se toky s propustným územím za stejných srážek jeví jako vodnatější (Kemel, 1991). Němec (1965) dělí horniny a zeminy dle hydrofyzikálních vlastností na:

- Propustné, kam patří písky, štěrky, některé pískovce, slepence, brekcie, suť, rozrušené a kompaktní horniny. Tyto horniny a zeminy lehce přijímají i propouštějí vodu.
- Polopropustné, kam patří podzolové půdy, písčité hlíny, spraše, křídly a některé vápence, které vodu sice dost lehce přijímají, ale pomalu ji propouštějí.
- Nepropustné nasáklivé, kam patří jíly, slíny, humózní půdy, rašeliny a jiné, které vodu sice snadno přijímají, avšak po nasycení přestávají být propustné.
- Nepropustné celistvé, kam patří krystalické horniny a některé vyvřeliny, které prakticky nejsou pórovité.

2.5.3 Klimatické poměry

Mezi klimatické činitele odtoku řadíme srážky, vlhkost vzduchu, druh a velikost výparu. Za nejvýznamnější složku, která ovlivňuje odtok, se považuje srážka a její prostorové a časové rozdělení (Hubačíková, 2009). Zatímco srážky a výpar přímo ovlivňují množství povrchového a podpovrchového odtoku a jejich změny v průběhu roku, ostatní klimatické faktory, mezi které patří teplota a tlak vzduchu a vlhkost vzduchu, působí na odtok nepřímě, což se opět projevuje ovlivněním srážek nebo výparu (Němec, 1965).

Plošné rozdělení srážek lze v určité oblasti názorně zobrazit izohyetami, což jsou čáry spojující na mapě místa se stejným úhrnem srážek. Izohyety mohou vyjadřovat úhrny za různě dlouhá období, jako je průměrný nebo konkrétní rok, měsíc, den nebo dokonce úhrn za jednu srážku (Pokorná a Zábranská, 2008). Rozložení srážek na Zemi je velmi rozličné, nejvíce srážek za rok spadne v oblasti rovníku, kde bývají roční úhrny vyšší než 2000 mm. V mírném pásu během roku dopadne na zemský povrch 500-1000 mm. Průměrné roční úhrny na území ČR činí asi 740 mm. Srážkové úhrny kolísají podle oblastí, kdy nejnižších hodnot dosahuje Žatecko (méně než 450 mm) a oproti tomu spadne až 1500 mm za rok v Krkonoších, Jeseníkách a Beskydech (Hubačíková, 2009).

Z hlediska časového rozdělení srážek na našem území připadá největší pravděpodobnost jejich výskytu na ranní a odpolední hodiny. V České republice vypadne přibližně 2/3 celoročního úhrnu srážek v letním pololetí od dubna do září (Pokorná a Zábranská, 2008). Roční chod srážek je závislý na zeměpisné poloze, kdy u rovníkového typu se vyskytují dvě maxima v dubnu a listopadu a dvě minima

v červenci a lednu. V přímořských oblastech je typické rovnoměrné rozložení srážek během celého roku. Pro klima monzunového typu a klima pevnin mírných šířek se typicky vyskytují velké srážky v létě a malé v zimním období. Subtropy jsou opakem monzunového typu, kdy subtropy mají suché léto a největší úhrny v zimním období (Hubačíková, 2009).

Další důležitou charakteristikou deště je jeho intenzita, která vyjadřuje podíl úhrnu a trvání deště. V závislosti na intenzitě deště se vyvíjí odezva povodí a vzniká povodňová vlna (Kemel, 1996). V zimním období v našich podmínkách vypadávají na zemský povrch srážky v podobě sněhu, které se v déletrvajících teplotách pod bodem mrazu akumulují na povrchu a vodnost toku závislá především na dotaci podzemních vod klesá (Pokorná a Zábranská, 2008). Na jaře vzrůstem teploty a intenzity slunečního záření dochází k tání sněhu, což může být umocněno ještě vypadáváním teplého deště do sněhu, tím se zvyšují odtoky z povodí, což může vést k rozvodnění toků a záplavám (Němec, 1965).

2.5.4 Vliv hustoty říční sítě

Hustota říční sítě je výsledkem mnoha složitých procesů, které probíhaly v minulosti za úplně jiných podmínek, než které probíhají v současnosti. Lze říci, že hustota říční sítě ukazuje velikost povrchového odtoku v daném povodí. Na územích s velkým povrchovým odtokem je hustota říční sítě velká, oproti tomu na územích s malým povrchovým odtokem je malá. Množství vody, které odtéká z povodí povrchově, je podmíněno vlastnostmi celého přírodního prostředí, včetně velikostí a režimem srážek (Hubačíková, 2009). Hustota říční sítě je také ovlivněna nadmořskou výškou, kdy v oblastech s vyššími srážkovými úhrny dochází vlivem erozních procesů ke vzniku členitějšího terénu a zde v rýhách teče srážková voda, těmto oblastem odpovídá větší hustota říční sítě (Pokorná a Zábranská, 2008).

2.5.5 Velikost plochy povodí

Základní hydrologickou oblastí, na které se zjišťuje vzájemný vztah bilančních prvků a zkoumá se odtokový proces, je povodí. Povodí je území, které je vztažené k určitému uzávěrovému profilu a je ohraničeno rozvodnicí, která rozděluje povrchový odtok do sousedních povodí. Rozvodnice je čára, která je kolmo vedena k vrstevnicím a probíhá po nejvyšších obvodových místech (Hubačíková, 2009). Plocha povodí je

určena planimetrováním z vhodného mapového podkladu. Plocha povodí se nejčastěji udává v km² nebo v ha. Vlivem členitosti terénu je reálná plocha oproti ploše odvozené z mapového podkladu vždy větší. Větších odchylek budou vždy dosahovat reálné plochy povodí od planimetrických v oblastech s členitějším reliéfem (Chmelová a Frajer, 2013).

Krešl (2001) uvádí, že specifický odtok je větší na povodích o menší ploše než na velkých povodích. V malých povodích je odtok během roku rozdělen nerovnoměrněji než ve velkých povodích. Daňhelka (2007) poukazuje na skutečnost, že s rostoucí plochou povodí dochází k nárůstu kulminačních průtoků a zároveň klesá maximální specifický průtok.

2.5.6 Nasycenost půdy

Nasycenost půdy vodou je jedním z činitelů, který ovlivňuje retenci krajiny. Nasycenost půdy lze vyjádřit indexem nasycení, který se dělí do 3 stupňů podle celkového množství spadlých srážek v pěti předešlých dnech před dnem, ve kterém se hodnotí návrhová srážka (Kozlovská a Toman, 2010).

Vodní půdní nasycení výraznou měrou ovlivňuje odtokové poměry v povodí. Pokud nastanou podmínky, za kterých je půda relativně suchá, dosahuje půda vysokých hodnot potenciální retence a tím je ovlivněn i povrchový odtok, který se sníží ve prospěch podzemního odtoku. Potenciální retence u půdy, která je nasycená vodou, dosahuje řádově nižších hodnot, než je tomu u půd, které jsou relativně suché. Díky tomu půda nepřijímá tolik srážkové vody spadlé na povrch a dochází ke značnému povrchovému odtoku.

2.5.7 Vliv vegetačního krytu

Vegetační pokryv a způsob jakým jsou využívány pozemky má přímý vliv na povrchový odtok a na hydrologickou bilanci povodí z hlediska celkového objemu přímého odtoku, akumulaci vody v půdě a v povrchových mikrodepresích. Vegetační kryt povodí ovlivňuje intercepci, evapotranspiraci, infiltraci, akumulaci v mikrodepresích, rychlost svahového odtoku a taktéž dobu soustředování odtoku ze svahů povodí do údolnice (Dumbrovský, 2005). Díky drsnosti vegetačního krytu dochází ke snižování rychlosti povrchového odtoku a zvyšování vsaku do půdy. Taktéž

dochází k pohlcování vody z půdy pro transpiraci, což vede k vrácení vody do ovzduší (Němec, 1965).

Z hlediska povrchového odtoku jsou zemědělské plochy bez dostatečného zapojení pěstovaných plodin chránících půdní povrch považovány za velice nepříznivé. Nedostatečná ochrana půdního povrchu se projevuje například u chmelnic, vinic a pozemků na nichž se pěstují širokořádkové plodiny (Soukup a Hrádek, 1999). Na rozdíl od těchto plodin se trvalý travní porost považuje z hlediska snížení rychlosti odtoku vody v povodí jakožto velice vhodná kultura. Travní porosty mají značnou drsnost a tím snižují rychlost odtoku a napomáhají vsakování vody do půdy. Díky tomu dochází ke snižování povrchového odtoku ve prospěch odtoku podzemního (Němec, 1965).

Z hlediska vegetačního pokryvu má les velmi významnou roli v hydrologickém režimu toku, kdy je jednoznačně uznáván jeho tlumící vliv na kulminační průtoky (Pokorná a Zábranská, 2008). Především zdravý vyspělý smíšený les, který má dostatečnou vrstvu hrabanky a humusu, zachytí poměrně velké množství vody, kterou postupně zásobuje povodí s určitým časovým zpožděním (Kemel, 1996). Ke vhodnému působení lesních porostů je potřeba dalších faktorů jako jsou velikost povodí, sklonitost, geologické a hydrologické poměry a intenzita srážek, kdy za určitých podmínek mohou tyto činitele tlumit vliv lesů (Krešl, 1990). Množství vody, které dokáže les akumulovat, je značně ovlivněno horní vrstvou půdy, která je tvořena hrabankou a humusem a tato vrstva je schopna pojmout značné množství vody a následně ji předávat do spodních vrstev (Kemel, 1996). V případě kdy je les umístěn ve spodní části povodí, může docházet k nežádoucímu efektu kulminačních průtoků. Tato varianta nastává v období jarního tání, kdy se při zastínění sněhových zásob v lesech zpozdí tání a tak se může stát, že se střetnou odtoky z horní nezalesněné a dolní zalesněné části povodí, čímž vznikne nový kulminační průtok v profilech pod těmito oblastmi (Hubačíková, 2009).

Vegetační zóna jako jsou břehová ochranná pásma nebo živé ploty hraje důležitou roli při minimalizaci vodní eroze orné půdy a zejména zvyšování hydraulické drsnosti krajiny, která snižuje rychlost povrchového proudění vody (Vought a kol., 1995).

2.5.8 Tvar povodí

Povodí přirozeného charakteru mají většinou tvar symetrického nebo asymetrického listu, který se může více podobat vějířovitému nebo protáhlému tvaru. Tvar povodí zásadním způsobem ovlivňuje povodňové průtoky při časovém a plošném rozložení atmosférické srážky (Starý, 2005). V případě vějířovitého tvaru za extrémních srážkoodtokových událostech dochází k nakumulování odtoku v závěrném profilu přibližně ve stejný čas a dochází k velkým průtokům. Zatímco u protáhlých povodí dochází k pomalejšímu nárůstu a kulminace není tak výrazná (Chmelová a Frajer, 2013).

Hubačiková (2009) vyjadřuje tvar povodí poměrem plochy povodí ke čtverci délky toku.

$$\alpha_T = \frac{P}{L_1^2}$$

Kde je:

P – plocha povodí v km²

L₁ – délka toku v km, sahá-li tok až k rozvodnici, tak L₁=L

Dosáhneme-li výsledku $\alpha = 0,07 - 0,24$ jedná se o povodí protáhlé, a když $\alpha = 0,25 - 0,50$ jde o povodí vějířovité.

Chmelová a Frajer (2013) uvádějí další možnosti, jak lze vyjádřit tvar povodí. Jeden způsob je za pomoci gravelliova koeficientu K_G, který porovnává tvar povodí od ideálního kruhového tvaru povodí K_G=1

$$K_G = \frac{L_r}{2\sqrt{P\pi}}$$

Kde je:

L_r – délka rozvodnice v km

P – plocha povodí v km²

Výsledkem je hodnota, která je větší nebo rovna jedné a čím více se od hodnoty jedna vzdaluje, tím je povodí protáhlejšího tvaru.

Další možností výpočtu je pomocí koeficientu souměrnosti povodí K_S, který udává symetričnost či asymetričnost tvaru povodí.

$$K_S = \frac{|P_L - P_P|}{P}$$

Kde je:

P_L – plocha levostranných přítoků v km^2

P_P – plocha pravostranných přítoků v km^2

P – plocha povodí v km^2

Čím víc se hodnota koeficientu K_S blíží 0, tím více je povodí souměrné.

2.5.9 Průměrná výška a průměrný sklon povodí

V České republice je množství srážek ve vzájemném vztahu s nadmořskou výškou, k odchylkám dochází pouze v návětrných nebo závětrných oblastech. Obecně můžeme říci, že se zvyšující se nadmořskou výškou rostou roční úhrny srážek. S narůstajícím množstvím srážek lze pozorovat také rostoucí podíl zimních srážek na celkových ročních srážkách a tím pádem i většinou potenciálně nižší odtokovou ztrátu (Lett, 1999). Průměrná nadmořská výška se určí z hypsometrické čáry, což je grafické znázornění vztahu mezi nadmořskou výškou a plochou území ležícího nad odpovídající nadmořskou výškou (Starý, 2005).

Sklonové poměry povodí, které jsou charakterizovány průměrným sklonem svahů a údolnic, ovlivňují rychlost proudění vody v povodí a tím i dobu soustředování odtoku ze svahů a rychlost proudění v údolnici. Sklon v terénu má v povodí významnou roli a je nutné mu věnovat pozornost.

V materiálech Chmelové a Frajera (2013) je vyjádřena rovnice pro výpočet průměrného sklonu povodí vztahem:

$$I = \frac{H_{max} - H_{min}}{\sqrt{S_p}}$$

Kde značí:

H_{max} – maximální nadmořskou výšku povodí

H_{min} – minimální nadmořskou výšku povodí

S_p – plochu povodí v m^2

2.5.10 Antropogenní vlivy

Chování člověka v krajině zásadním způsobem ovlivňuje režim toku, ať už pozitivně či negativně (Kemel, 1991). Mezi některé aktivity člověka, které ovlivňují hydrologický režim povodí, patří výstavba přehrad, úprava vodních toků, výstavba

silniční sítě, zábory půdy a následná výstavba na ní a urbanizace (Pokorná a Zábranská, 2008). Soukup a Hrádek (1999) popisují, že člověk ovlivňuje hydrologický režim způsobem využívání pozemků, což má vliv na povrchový odtok, na akumulaci vody v půdním profilu a v povrchových mikrodepresích. Se způsobem využívání pozemků souvisí i jejich obhospodařování, kdy povrchový odtok značným způsobem ovlivňuje orba, která může být provedena po vrstevnicích nebo po spádu. Orba po vrstevnicích je žádaná, jelikož zachycuje srážky. Oproti tomu při obdělávání pozemků po spádu dochází k rychlému proudění vody mezi řádky. Nepříznivou změnu bilančního stavu území ovlivňuje odvodňování a závlahy v povodí, rozorávání mezí a používání těžkých výkonných strojů (Pokorná a Zábranská, 2008). Člověk se snaží některé nepříznivé odtokové poměry napravit úpravami toků. Výstavbou nádrží se člověk snaží vyřešit zásobování vodou a výrobu elektrické energie (Kemel, 1991).

Dle Červeného a kol. (1984) lze rozdělit působení člověka s ohledem na odtok do tří skupin:

- člověk ovlivňuje říční odtok řízením odtoku pomocí nádrží, odebírá a převádí vodu a upravuje toky,
- člověk svým působením mění vztahy mezi jednotlivými složkami vodní bilance v povodí, jako zemědělské a lesnické využití půdy, odvodňování půd, urbanizace bez vlivu zásobování vodou,
- uplatnění v obou směrech, působí přímo na odtok, avšak mění také vzájemné vztahy mezi prvky vodní bilance, jako jsou závlahy, urbanizace včetně zásobování vodou.

Vodní nádrže mají taktéž svůj význam z hlediska hydrologického. U vodních nádrží je znám retardační účinek na objem odtoku a transformační vliv na kulminační průtoky. Celkovým výsledkem obou účinků je regulující účinek na odtok. Velikost regulujícího vlivu je ovlivněna velikostí nádrže a také jejím umístěním, polohou v povodí (Kemel, 1991).

Dalším významným ovlivněním odtokových poměrů činností člověka je stavební průmysl, konkrétně v rozšiřování měst. Yao a kol. (2016) poukazují na značné ovlivnění odtoku vody z povodí v městských částech, kdy významnou roli hrají ve srážkoodtokovém procesu zastavěná území vyznačující se svojí nepropustností. Ve

městech je odtok vody řízen a nepropustnost je brána jako efektivní indikátor sloužící k posouzení potenciálního rizika odtoku.

2.6 CN – křivky

Metoda CN – křivek (CN – curve number, číslo křivky), která se používá pro stanovení velikosti přímého odtoku, byla vyvinuta v USA pro potřeby Soil Conservation Service za účelem odhadu odtoku následkem přívalových srážek a hodnocení velikosti ztrát půdy erozí na hydrologicky nepozorovaných povodí s převážně zemědělsky obhospodařovanými pozemky (Šercl, 2009). Tato metoda se používá pro samostatný svah i pro povodí s údolnicí. Metoda CN – křivek umožňuje výpočet objemu přímého odtoku pro zadanou výšku deště, dobu dobíhání a dobu koncentrace a kulminační průtok pro zadanou výšku deště, zohlednění vlivu změn charakteristik povodí na hodnoty charakteristik hydrogramu maximálního odtoku. V této metodě se předpokládá, že poměr objemu odtoku k objemu přívalového deště se rovná poměru potenciální retence povodí k aktuální retenci. Retence povodí v bezodtokové fázi se odhaduje 20 % potenciální retence (Starý, 2005). Odtok je dán množstvím srážek, infiltrací vody do půdy, vlhkostí půdy, porostem, množstvím nepropustných ploch a retencí povrchu. Základním vstupem pro metodu CN – křivek je srážka o určitém časovém rozdělení za předpokladu jeho stejnoměrného rozdělení na ploše povodí. Tyto srážky se přetvářejí na objem odtoku za pomoci čísel odtokových křivek, jejichž hodnoty jsou závislé na hydrologických vlastnostech půd, vegetačním pokryvu, velikosti nepropustných ploch, intercepci a povrchové akumulaci (Chmelová a Frajer, 2013).

Úhrn přímého odtoku vypočítáme ze vztahu:

$$H_o = \frac{(H_s - 0,2A)^2}{H_s + 0,8A} \quad (\text{mm}) \quad \text{pro } H_s \geq 0,2A$$

H_o je přímý odtok v mm

H_s je úhrn návrhového deště v mm

A je potenciální retence v mm vyjádřená pomocí CN křivek

Potenciální retenci vypočítáme ze vztahu:

$$A = 25,4 * \left(\frac{1000}{CN} - 10\right) \quad (\text{mm})$$

Objem přímého odtoku lze vyjádřit vztahem:

$$O_{ph} = 1000 * P_p * H_o \quad (\text{m}^3)$$

P_p je plocha povodí v km^2

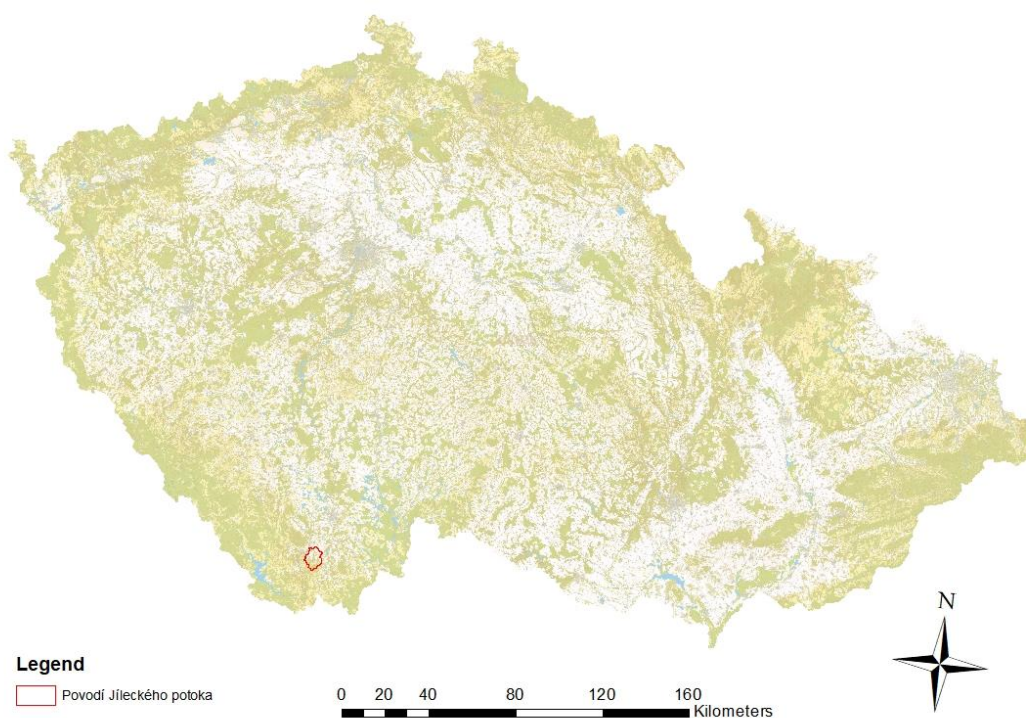
H_o je přímý odtok v mm

Hodnota CN křivek

Šercl (2009) uvádí, že hodnota CN křivek je závislá na vlastnostech půdního pokryvu, jako je využití půdy, vegetační pokryv nacházející se v dané oblasti a způsob obdělávání pozemků. Další vlastností je hydrologická skupina půd, která se dělí do čtyř kategorií označených jako A, B, C, D (A – nejpříznivější podmínky pro infiltraci srážkové vody do půdy, D – nejméně příznivé podmínky). Další významnou vlastností je vlhkost půdy, která se určuje na základě 5–ti denního úhrnu předcházejících srážek (indexu předchozích srážek IPS), který se dělí na tři stupně, kdy IPS I odpovídá relativně suchým podmínkám, IPS III pro podmínky vysoké vlhkosti půdy a IPS II se používá pro návrhové účely pro střední nasycení půdy vodou (Janeček a kol., 2012).

3. Materiál

V této diplomové práci je řešeno povodí Jíleckého potoka. Povodí Jíleckého potoka se nachází v Jihočeském kraji v okrese Český Krumlov. Pramen Jíleckého potoka se nachází přibližně 7 kilometrů západně od města Kaplice, zeměpisné souřadnice pramene jsou $48^{\circ} 44'$ s.š. a $14^{\circ} 23'$ v.d.. Nadmořská výška potoka je u pramene 845 m.n.m. a 460 m.n.m. v místě kde se potok vlévá do řeky Vltavy jakožto pravostranný přítok.



Obr. č. 4: Poloha povodí Jíleckého potoka

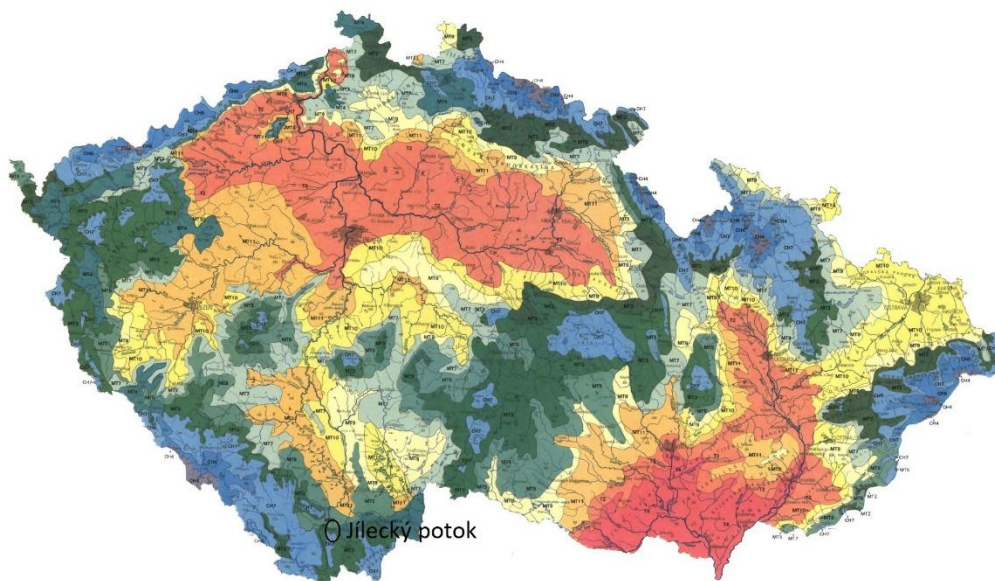
Délka Jíleckého potoka je 14,5 km a plocha povodí je 55,5 km². Levostrannými přítoky Jíleckého potoka jsou Malčický potok, Mirkovický potok a Zahrádecký potok. Pravostrannými přítoky jsou Zubčický potok a Mojenský potok.

Klimatické podmínky

Povodí Jíleckého potoka se nachází na hranici 4 klimatických oblastí, konkrétně v klimatických regionech MT3, MT4, MT5 a CH7, které jsou určeny dle Quitta (1971). Klimatické oblasti označeny jako MT jsou definovány jakožto mírně teplé oblasti a klimatická oblast CH7 je definována jako chladná oblast. Klimatické charakteristiky pro dané oblasti jsou uvedeny v tabulce č. 1.

Klimatické charakteristiky	MT3	MT4	MT5	CH7
Počet letních dnů	20-30	20-30	30-40	10-30
Počet dnů s teplotou alespoň 10 °C	120-140	140-160	140-160	120-140
Počet mrazových dnů	130-160	110-130	130-140	140-160
Počet ledových dnů	40-50	40-50	40-50	50-60
Průměrná teplota v lednu (°C)	-3 – -4	-2 – -3	-4 – -5	-3 – -4
Průměrná teplota v dubnu (°C)	6-7	6-7	6-7	4-6
Průměrná teplota v červenci (°C)	16-17	16-17	16-17	15-16
Průměrná teplota v říjnu (°C)	6-7	6-7	6-7	6-7
Počet dnů se srážkami alespoň 1 mm	110-120	110-120	100-120	120-130
Srážkový úhrn ve vegetačním období	350-450	350-450	350-450	500-600
Srážkový úhrn v zimním období	250-300	250-300	250-300	350-400
Počet dnů se sněhovou pokrývkou	60-100	60-80	60-100	100-120
Počet jasných dnů	120-150	150-160	120-150	150-160
Počet zatažených dnů	40-50	40-50	50-60	40-50

Tab. č. 1: Klimatické charakteristiky Jíleckého potoka (Quitt, 1971)



Obr. č. 4: Klimatické regiony s vyznačeným Jíleckým potokem (Quitt, 1971)

Geomorfologie

Z geomorfologického hlediska se povodí Jíleckého potoka nachází v Šumavské subprovincii, kdy západní část povodí leží v Šumavském podhůří, Českokrumlovské vrchovině a východní část povodí v Novohradském podhůří, Kaplické brázdě.

Geologické poměry

Povodí Jíleckého potoka se nachází v soustavě Českého masivu v moldanubické oblasti. Z hlediska hornin se v povodí nacházejí pararuly, migmatit, diorit křemenný a písčito-hlinitý až hlinito-písčítý sediment.

Půdní poměry

Půdní poměry Jíleckého povodí byly určeny z půdní mapy, kdy se v severní části povodí nacházejí kambizemě kyselé, ve střední části povodí se nacházejí pseudogleje s kambizeměmi oglejenými a v jižní části povodí se vyskytují kambizemě dystrické. Z hlediska půdní zrnitosti se jedná o půdy převážně písčitohlinité.

4. Metody

4.1 Metoda CN křivek

Odtokové charakteristiky jednotlivých částí povodí se mohou lišit na základě způsobu využití půdy, retence území, hydrologických vlastností půd a vegetačního pokryvu. Na základě určení těchto vlastností je možno přiřadit jednotlivá čísla CN křivek, která se používají v dalších výpočtech.

Mapa land use

Základním vstupem pro mapu využití území byla použita vrstva Corine Land Cover 2006, které byl přiřazen souřadnicový systém S-JTSK Křovák East North. Tato vrstva byla oříznuta podle polygonu rozvodnice vytvořeného pro povodí Jíleckého potoka pomocí nástroje Clip (Arc toolbox/Analysis tools/Extract).

Určení hydrologických skupin půd

Hydrologická skupina půd se dělí do 4 kategorií (A, B, C a D). Dále je popsána charakteristika hydrologických vlastností půd dle Daňhelky a kol. (2003).

A – Půdy s vysokou rychlostí infiltrace ($> 0,12 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) i při úplném nasycení, zahrnující převážně hluboké, dobře až nadměrně odvodněné písky nebo štěrky.

B – Půdy se střední rychlostí infiltrace ($0,06 - 0,12 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy středně hluboké až hluboké, středně až dobře odvodněné hlinitopísčité až jílovitohlinité.

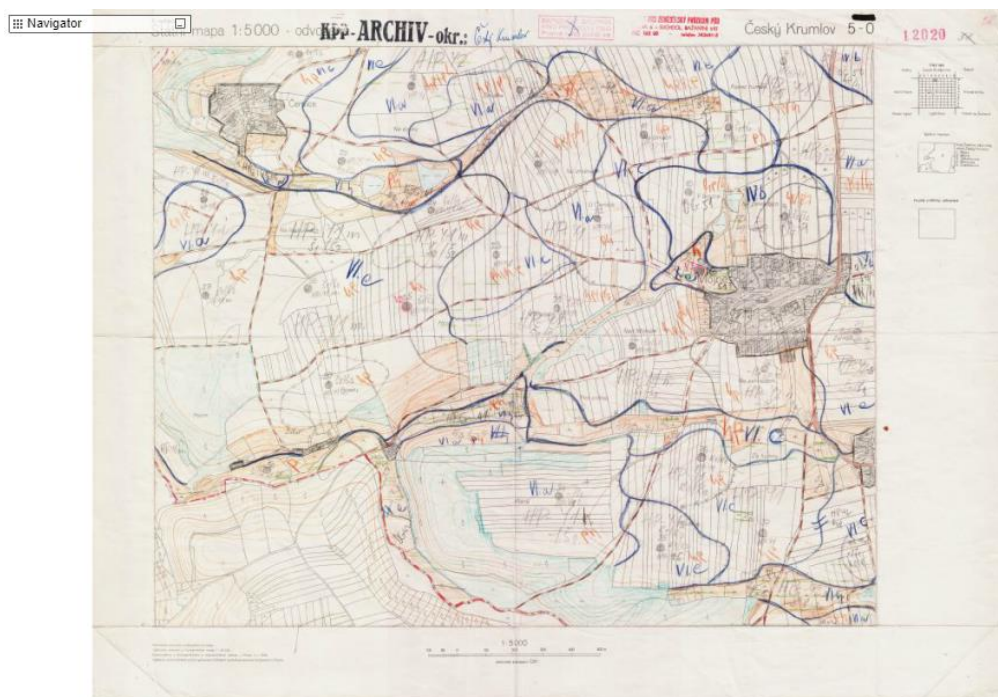
C – Půdy s nízkou rychlostí infiltrace ($0,02 - 0,06 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy s málo propustnou vrstvou v půdním profilu a půdy jílovitohlinité až jílovité.

D – Půdy s velmi nízkou rychlostí infiltrace ($< 0,02 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) i při úplném nasycení, zahrnující převážně jíly s vysokou bobtnavostí, půdy s trvale vysokou hladinou podzemní vody, půdy s vrstvou jílu na povrchu nebo těsně pod ním a mělké půdy nad téměř nepropustným podložím.

Pro tvorbu mapy hydrologických skupin půd byla použita vrstva BPEJ (bonitovaná půdně ekologická jednotka), která byla oříznuta přes nástroj *Clip* jako předešlá mapa land use. Ve vrstvě BPEJ v atributové tabulce byl vytvořen nový sloupec HPS, do kterého se zapíše hydrologické skupiny půd (A – D), které se určují z bonitované půdně ekologické jednotky, konkrétně z 2. a 3. čísla BPEJ, což je hlavní půdní jednotka, tímto způsobem je možné určit hydrologickou půdní skupinu u pozemků, u kterých je známa BPEJ. Některé pozemky, převážně lesní, nemají určenou BPEJ, u těchto pozemků se musí určit hydrologická půdní skupina jiným způsobem. Jelikož se řešené povodí nenachází v oblasti plošně rozlehlých jehličnatých monokultur, které leží většinou na podzolových půdách, bylo k určení hydrologické skupiny půd využito výsledků komplexního průzkumu půd, (dostupných na stránkách wakpp.vumop.cz – obr. č. 5) kde byly hodnoceny půdní typy na pozemcích, které se nacházejí v současných lesních porostech a jejich okolí. U pozemků v dané lokalitě byly porovnávány známé půdní typy dle KPP se známými BPEJ, respektive HPJ (hlavní půdní jednotkou). Na základě „spárování“ HPJ k pozemkům popsaných v KPP bylo poté možno přiřadit hydrologické skupiny půd. Aktuálnost dat na stránkách komplexního průzkumu půd byla ověřena místním šetřením (obrázek č. 6 a 7).

U rozsáhlejších lesních porostů byly hydrologické skupiny lesních půd určeny na základě lesnické typologie. K popisu lesních porostů je možné využít lesní typy, jejichž označení se skládá z trojmístného kódu – první číslo značí vegetační stupeň, písmeno na druhém místě půdní kategorii a poslední číslo pořadové číslo lesního typu v rámci přírodní lesní oblasti. Tyto údaje jsou dostupné na mapovém serveru Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem (ÚHÚL) v rámci Oblastních plánů rozvoje lesů, a to buď prostřednictvím WMS, nebo přímo v internetovém prohlížeči. Následně bylo použito převodního klíče souborů lesních typů na skupiny typů geobiocénů (Bínová a kol., 2017) a poté převodního klíče HPJ na pravděpodobné

trofické a hydrické řady (Bínová a kol., 2017) k získání kódů HPJ, na jejichž základě byla přiřazena hydrologická skupina půd k prozatím nevyřešeným lesním pozemkům.



Obr. č. 5: Mapa KPP katastr Mirkovice (wakpp.vumop.cz)

Místního šetření bylo využito v případě pozemků, kterým nešla přiřadit jednoznačně hydrologická skupina půd výše zmíněnými způsoby.



Obr. č. 6: Průzkum půd na HPJ 32



Obr. č. 7: Průzkum půd na HPJ 37

4.1.1 Metoda výpočtu za použití vektorových podkladů

Pro výpočet čísel CN křivky byla v programu ArcMap vytvořena nová vrstva pomocí příkazu *Union*, kdy vstupními daty byla vrstva BPEJ s již přiřazenými hydrologickými skupiny půd a vrstva Corine Land Cover 2006. Výstupem se stala vrstva, která tyto dvě vrstvy překryla a sloučila. Nyní bylo možné použít příkaz *Dissolve*, kde se použila jako vstupní hodnota vrstva již vytvořená příkazem *Union*. Příkaz *Dissolve* slouží ke sloučení několika prvků do jednoho na základě shodných hodnot dle vybraných atributů, kterými byla hydrologická skupina půd a land use. Následovalo vytvoření nového sloupce v atributové tabulce, kam byly doplněny odpovídající hodnoty čísel odtokových křivek CN podle hydrologických skupin půd a využití půdy.

Při výpočtu klasickým způsobem se v prvním kroku musí vypočítat průměrné CN pro celé povodí, které dále poslouží k výpočtu celkové potenciální retence a dále pro výpočet odtokové výšky a pro výpočet objemu přímého odtoku.

Pro výpočet průměrné hodnoty CN pro celé povodí je potřeba znát hodnoty CN a k němu rozlohu plochy pro danou hodnotu CN a celkovou rozlohu povodí. Tyto hodnoty byly exportovány z programu ArcMap do excelu, kde došlo k vypočítání průměrného CN pomocí vzorce pro vážený průměr v podobě:

$$CN_{\emptyset} = \frac{\sum_{i=1}^n (CN_i * S_{Pi})}{S_P}$$

Kde následující veličiny znamenají:

CN_{\emptyset} – průměrná hodnota čísla odtokových křivek CN pro celé povodí

CN_i – specifické číslo odtokové křivky CN pro jednotlivou plochu

S_{Pi} – rozloha plochy CN_i

S_P – celková rozloha povodí

Po vypočítání průměrného CN je možno dosadit hodnotu do vzorce pro výpočet potenciální retence, který se udává ve tvaru:

$$A = 25,4 * \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (mm)$$

Kde: A – potenciální retence

CN – průměrná hodnota čísla odtokových křivek CN pro celé povodí

Nyní, když je známa potenciální retence pro dané povodí lze přistoupit k určení výšky přímého odtoku, k tomu je potřeba znát úhrny srážek s pravděpodobností opakování 2, 10, 20, 50 a 100 let. Údaje o N letých srážkách byly převzaty z programu ERCN ze srážkoměrné stanice v Netřebicích, která se nachází na hraně povodí Jíleckého potoka. Výpočet výšky přímého odtoku se bude pětkrát opakovat, budou se lišit pouze hodnoty maximálních denních úhrnů srážek s pravděpodobností opakování N let, které jsou zobrazeny v tabulce č. 2.

Srážkoměrná stanice	Pravděpodobnost opakování za N let				
	2	10	20	50	100
Netřebice	40,3	59,5	67,4	77	84,5

Tab. č. 2: Hodnoty odběrné stanice Netřebice (ERCN)

Obecný vzorec pro výpočet výšky přímého odtoku je ve tvaru:

$$H_o = \frac{(H_s - 0,2 * A)^2}{H_s + 0,8 * A} \quad (mm)$$

Kde: H_o – výška přímého odtoku

H_s – maximální denní úhrn srážek s pravděpodobností N let

A – potenciální retence

Nyní je možno přistoupit k výpočtu výšky přímého odtoku podle rozdílných hodnot výšek srážek z přívalového deště s pravděpodobností opakování N let.

Nyní lze přistoupit k výpočtu objemu přímého odtoku s N-letou pravděpodobností. Obecný vzorec je v podobě:

$$O_{pH} = H_o * P_p * 1000 \quad (m^3)$$

Kde: O_{pH} – objem přímého odtoku

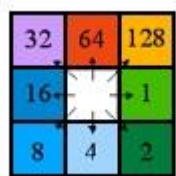
H_o – výška přímého odtoku

P_p – plocha povodí

4.1.2 Výpočet rastrovým způsobem

Vstupním údajem pro výpočet přímého odtoku rastrovým způsobem byla vrstva DME (digitální výškový model), která byla poskytnuta společností CzechGlobe (Ústav výzkumu globální změny AV ČR, veřejně výzkumná instituce), povodí Jíleckého potoka. Tento model disponuje přesností buňky 10 x 10 m. Nejdříve bylo

potřeba odstranit z daného DME bezodtoké deprese, které se mohou v území nacházet, tyto bezodtoké deprese se odstraní pomocí příkazu Fill (Spatial analyst/hydrology/fill), tento příkaz dokáže vyhladit chybné pixely, ze kterých by nemohl odtok pokračovat po směru spádu. Vyhlazené DME nyní lze oříznout podle vytvořeného polygonu rozvodnice pomocí příkazu Clip (Analysis/extract/clip). Jakmile byly odstraněny bezodtoké deprese a oříznuté zájmové území, mohlo se přistoupit k vytvoření rastrové mapy směrů odtoku. K tomu byl použit nástroj Flow direction (Spatial analyst/hydrology/flow direction). Vstupní vrstvou byl DME opravený nástrojem Fill a oříznutý příkazem Clip, výsledkem byla rastrová vrstva, která ukazovala směr odtoku pomocí hodnot, které jsou vysvětleny v obrázku č. 8.



Obr. č. 8: Směry odtoků při použití příkazu Flow direction, (pro.arcgis.com)

4.1.2.1 Zjednodušený rastrový způsob výpočtu

Výpočet zjednodušeným rastrovým způsobem CN metody je založený na základě hydrologických charakteristik získané hodnoty odtokových čísel na úrovni buňky je přepočítán váženým průměrem na reprezentativní (průměrnou) hodnotu ve vztahu k přispívající ploše dané buňky (Šinka a kol., 2013).

Pro zhotovení mapy přímého odtoku bylo potřeba vytvořit rastrovou mapu z polygonů s již dříve přiřazenými hodnotami CN podle hydrologických skupin půd a využití pozemků za pomoci příkazu Polygon to raster (Conversion/to raster/polygon to raster). Nyní s již vytvořeným rastrem směrů odtoku následuje vytvoření dvou rastrů příkazem Flow accumulation (Spatial analyst/hydrology/flow accumulation), který akumuluje do každého pixelu odtok dle vytvořených směrů odtoku. První rastr vytvořený příkazem flow accumulation byl vytvořen bez vstupující váhy, proto byla každé buňce přiřazena váha 1. Ve výstupním rastru je počet buněk, které do každé buňky proudí. Každý pixel má rozměr 10 x 10 m. Do druhého rastru vytvořeného příkazem flow accumulation vstupuje také rastr směrů odtoku, ale již s váhou udávanou rastrem CN hodnot. V tuto chvíli je možno přejít k výpočtům, které se

provádí pomocí příkazu Raster calculator (Spatial analyst/map algebra/raster calculator).

Nejprve bylo spočítáno průměrné CN pomocí vzorce:

$$CN_{REPR.} = \frac{\text{Flow Accumulation (vstup } CN_{rastr})}{\text{Flow Accumulation}}$$

Dalším krokem bylo vypočítání průměrné potenciální retence, znovu pomocí příkazu Raster calculator, za použití již známého vzorce:

$$A_{REPR.} = 25,4 * \left(\frac{1000}{CN_{REPR.}} - 10 \right) \quad (mm)$$

S rastrem potenciální retence se mohlo přistoupit k výpočtu výšky přímého odtoku, kdy byla do vzorce dosazena hodnota maximálního denního úhrnu srážky s maximální dobou opakování 100 let naměřená ve srážkoměrné stanici Netřebice:

$$H_{O,P,REPR.} = \frac{(H_{D,N} - 0,2 * A_{REPR.})^2}{H_{D,N} + 0,8 * A_{REPR.}} \quad (mm)$$

Následoval výpočet plochy povodí v km²:

$$S_P = \frac{\text{Flow Accumulation} * (\text{rozlišení buněk})^2}{1000000} \quad (km^2)$$

V současné situaci bylo možno přistoupit ke konečnému výpočtu objemu přímého odtoku z povodí pomocí příkazu Raster calculator za použití vzorce:

$$O_{O,P} = 1000 * H_{O,P,REPR.} * S_P \quad (m^3)$$

4.1.2.2 Detailní rastrový způsob výpočtu

Šinka a kol. (2013) ve své publikaci uvádí, že detailní způsob řešení rastrovým způsobem je založen na tom, že pro každou zastoupenou CN hodnotu, která není zprůměrovaná, se vypočítá výška potenciální retence, výška a objem povrchového odtoku.

Pro výpočet potenciální retence byl použit raster CN hodnot, který byl vytvořen v předešlé kapitole. Výpočet potenciální retence byl proveden pomocí příkazu Raster calculator dosazením do vzorce:

$$A = 25,4 * \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (mm)$$

Poté následoval výpočet výšky povrchového odtoku v Raster calculator:

$$H_{O,P} = \frac{(H_{D,N} - 0,2 * A)^2}{(H_{D,N} + 0,8 * A)} \quad (mm)$$

Následoval výpočet objemu povrchového odtoku v Raster calculator. Pro výpočet objemu povrchového odtoku pro každou buňku musel být vzorec vynásoben velikostí pixelu:

$$O_{bunka} = \frac{H_{O,P}}{1000} * S_{bunka} \quad (m^3)$$

Nyní se mohlo přistoupit ke konečnému výpočtu objemu povrchového odtoku pro povodí pomocí příkazu Flow accumulation, do něhož vstupoval raster flow_direction a jako váha byla použita rastrová vrstva O_{bunka} :

$$O_{O,P} = Flow\ accumulation\ (váha \rightarrow O_{bunka}) \quad (m^3)$$

4.2 Analýza faktorů ovlivňujících přímý odtok z povodí

4.2.1 Zatravnění orné půdy ve svazích nad 12°

Jednou z variant při zjišťování změny přímého odtoku byla zvolena varianta změny využití pozemků, konkrétně změna orné půdy na travní porost při svažitosti území větší než 12°. Holý (1994) považuje delimitaci kultur, konkrétně zatravnění orné půdy při sklonu nad 12°, jako účinné protierozní opatření, které přispívá k vsakování srážkové vody.

Pro uskutečnění výpočtu bylo nejdříve potřeba vytvořit rastr sklonitosti území. K vytvoření rastru sklonitosti území slouží příkaz Slope (Spatial Analyst/surface/slope), do kterého vstupuje vyhlazený a oříznutý DME. Před vytvořením rastru je potřeba změnit v políčku output measurement procenta na stupně. V současné chvíli je hotový rastr sklonitosti území slope_stup, kde má každý pixel svoji hodnotu.

V dalším kroku vymezujeme území se svažitostí větší než 12°, k tomu poslouží toolbox Reclassify (Spatial Analyst/reclass/reclassify), pomocí kterého se území rozdělí do dvou skupin, kdy první je území o sklonu do 12° a druhá se sklonem nad 12°. Vstupními daty pro použití reklasifikace se stává rastr slope_stup. Díky

nástroji Reclassify byl vytvořen nový rastr slope_reclas, ke kterému byly přiřazeny hodnoty a již obsahoval atributovou tabulku. Tím bylo umožněno vytvoření polygonové vrstvy sklon_nad_12 za použití příkazu Rastr to polygon (Conversion/from raster/raster to polygon), kdy vstupní vrstvou byl rastr slope_reclas, který obsahoval dvě skupiny svažitosti a nepotřebná data o svažitosti do 12° byla z polygonové vrstvy v atributové tabulce odstraněna. Tím došlo k vyčlenění všech pozemků v povodí o svažitosti nad 12°, ale je potřeba řešit pouze pozemky na kterých se nachází orná půda. K tomu se využije vrstva dissolve_union, ze které se exportují všechny polygony s ornou půdou a vznikne nová vrstva orna_puda, v této vrstvě jsou již přiřazeny hodnoty CN, které byly přiřazeny při výpočtu objemu přímého odtoku metodou za použití vektorových podkladů.

Následovalo propojení polygonových vrstev orna_puda a sklon_nad_12 použitím příkazu Union. V atributové tabulce výsledné vrstvy union_orna_12 lze rozpoznat pomocí sloupečku gridcode, které polygony orné půdy splňují podmínku vyšší svažitosti, ostatní polygony jsou z atributové tabulky odstraněny. Následoval poslední krok, ve kterém proběhlo poslední sjednocení příkazem Union, kdy byly sloučeny vrstvy union_orna_12 a dissolve_union. V atributové tabulce výsledné vrstvy lu_orna_do12 byla změněna kultura z orné půdy na louky a současně při tom i hodnoty CN u pozemků, které mají větší sklon než 12° a jsou to pozemky na kterých se nachází orná půda.

4.2.2 Změna nasycenosti půdy

Janeček a kol. (2012) popisuje, že vlhkost půdy je určována na základě pětidenního úhrnu předcházejících srážek, respektive indexu předchozích srážek (IPS) ve 3 stupních, kdy IPS I odpovídá takovému minimálnímu obsahu vody v půdě, který ještě umožňuje uspokojivou orbu a obdělávání, IPS II odpovídá půdě středně nasycené a při IPS III je půda přesycena vodou z předcházejících dešťů. V předchozích výpočtech bylo počítáno s hodnotami CN pro středně nasycené půdy, tedy IPS II.

V literatuře Kováře a kol. (2015) jsou uvedeny vztahy pro výpočet hodnot CN pro relativně suché podmínky CN I a pro podmínky vysoké vlhkosti půdy CN III. Rovnice pro výpočet CN I je uvedena ve tvaru:

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2,334 - 0,011334 * CN_{II}}$$

Rovnice pro výpočet CN III má podobu:

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,4036 + 0,005964 * CN_{II}}$$

4.2.3 Změna Land use zatravnění orné půdy

Jako další varianta pro zjištění odtokových poměrů byla vybrána relativně extrémní varianta, při které by byla zatravněna veškerá orná půda v povodí Jíleckého potoka. Veškerá orná půda nacházející se v povodí zaujímá rozlohu 21,6 km².

V prvním kroku byla exportována data z vrstvy dissolve_union, ve které jsou již vyplněny hodnoty CN podle hydrologických skupin půd a využití území. Dále byla v atributové tabulce přepsána veškerá orná půda na louky a zároveň byly přepsány i hodnoty CN u těchto pozemků podle odpovídajících hydrologických skupin. Po exportování dat mohly proběhnout výpočty CN hodnot a výšky a objemu přímého odtoku.

4.2.4 Rozšíření zástavby

Poslední simulovaná varianta ovlivňující podmínky přímého odtoku z povodí byla rozšíření zastavěného prostoru. Nejdříve byly exportovány z vrstvy dissolve_union veškeré obytné plochy, čímž byla vytvořena nová vrstva zástavba. Rozšíření zástavby bylo provedeno pomocí příkazu Buffer (Analysis/proximity/buffer), do kterého vstupovala vrstva zástavba a výstupem byla nová vrstva zástavba_nova, která byla rozšířena o 75 m po celém obvodu každé obytné plochy. Jelikož se některé polygony nacházely na hranici povodí, musel být použit příkaz Clip, který ořízl plochy přesahující hranici povodí. Pás o šířce 75 m byl zvolen z toho důvodu, aby došlo k dvojnásobnému zvětšení zastavěného území v povodí. V dalším kroku došlo pomocí

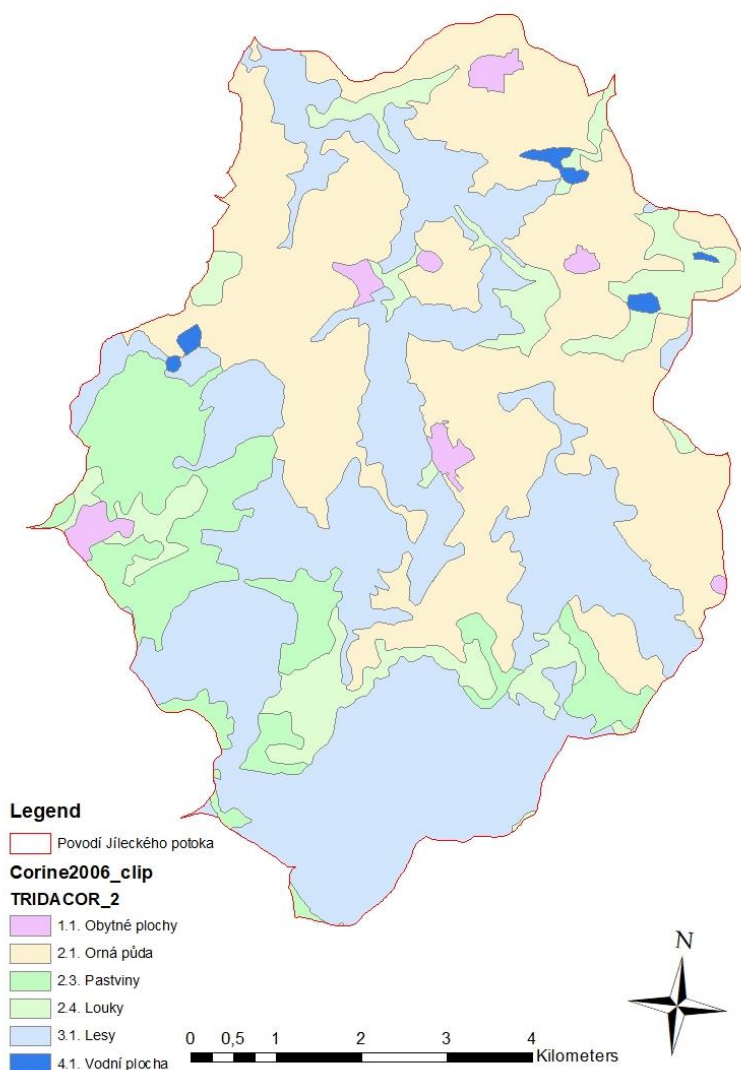
příkazu Union ke sloučení vrstvy s rozšířenou zástavbou a vrstvy dissolve_union. Výsledkem se stala vrstva LU_zastavba. V atributové tabulce byly přepsány hodnoty CN a kultura u ploch které se překrývaly a atributová tabulka mohla být dále exportována do excelu kde proběhly výpočty za použití vektorových podkladů.

5. Výsledky a diskuse

5.1 Metoda výpočtu za použití vektorových podkladů

Land use

Pro zjištění land use v povodí Jíleckého potoka byla použita vstupní data v podobě Corine Land Cover 2006. Povodí Jíleckého potoka zaujímá plochu 55,7 km². V povodí z velké části převládají lesnaté plochy a pozemky na nichž se nachází orná půda, každá z těchto kultur zaujímá plochu necelých 39 %, což činí necelých 2200 hektarů. Dále se zde vyskytují louky a pastviny, které dohromady zaujímají necelých 20 % území o výměře 1104 hektarů. Na zbývající části území se nachází zastavěné území (1,79 %) a vodní plochy (0,57 %). Zastoupení kultur je vyjádřeno v tabulce č. 3.

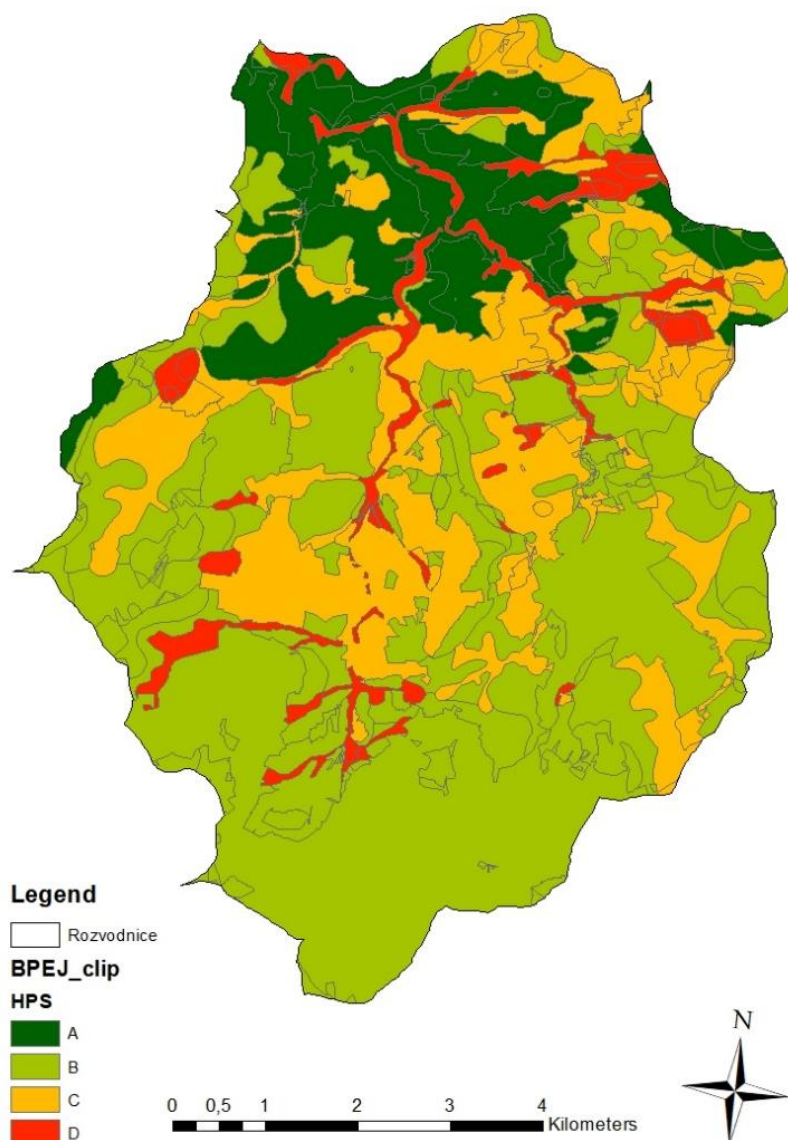


Obr. č. 9: Mapa land use povodí Jíleckého potoka (Corine Land Cover 2006)

Land use	Výměra (m ²)	Výměra (%)
Zastavěné území	998123,305	1,79
Orná půda	21632394,912	38,84
TTP	11043735,505	19,83
Lesy	21710902,472	38,98
Vodní plocha	315491,003	0,57

Tab. č. 3: Land use povodí Jíleckého potoka

Dále byla vytvořena mapa hydrologických skupin půd podle výše uvedené mapy a hlavních půdních jednotek.



Obr. č. 10: Mapa hydrologických skupin půd

Hodnoty z atributové tabulky byly exportovány do excelu, kde bylo spočítáno průměrné číslo CN pro povodí Jíleckého potoka:

$$CN_{\emptyset} = \frac{\sum_{i=1}^n (CN_i * S_{Pi})}{S_p} = \frac{3766,5}{55,7} = 67,62$$

Nyní s průměrnou hodnotou CN (67,62) byla propočítána potenciální retence:

$$A = 25,4 * \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) = 25,4 * \left(\frac{1000}{67,62} - 10 \right) = 121,6 \text{ mm}$$

Dále byly prováděny výpočty pro zjištění hodnot výšek přímého odtoku pro srážky z přivalového deště s pravděpodobností opakování 2, 10, 20, 50 a 100 let.

Výpočet pro 2letý úhrn srážek:

$$H_o = \frac{(H_s - 0,2 * A)^2}{H_s + 0,8 * A} = \frac{(40,3 - 0,2 * 121,63)^2}{40,3 + 0,8 * 121,63} = 1,9 \text{ mm}$$

Výpočet pro 10letý úhrn srážek:

$$H_o = \frac{(H_s - 0,2 * A)^2}{H_s + 0,8 * A} = \frac{(59,5 - 0,2 * 121,63)^2}{59,5 + 0,8 * 121,63} = 7,9 \text{ mm}$$

Výpočet pro 20letý úhrn srážek:

$$H_o = \frac{(H_s - 0,2 * A)^2}{H_s + 0,8 * A} = \frac{(67,4 - 0,2 * 121,63)^2}{67,4 + 0,8 * 121,63} = 11,3 \text{ mm}$$

Výpočet pro 50letý úhrn srážek:

$$H_o = \frac{(H_s - 0,2 * A)^2}{H_s + 0,8 * A} = \frac{(77 - 0,2 * 121,63)^2}{77 + 0,8 * 121,63} = 15,9 \text{ mm}$$

Výpočet pro 100letý úhrn srážek:

$$H_o = \frac{(H_s - 0,2 * A)^2}{H_s + 0,8 * A} = \frac{(84,5 - 0,2 * 121,63)^2}{84,5 + 0,8 * 121,63} = 19,9 \text{ mm}$$

S výslednými hodnotami výšek přímého odtoku bylo možno přistoupit k výpočtu objemu přímého odtoku s pravděpodobností opakování 2, 10, 20, 50 a 100 let.

Objem přímého odtoku s pravděpodobností opakování 2 roky:

$$O_{pH} = H_O * P_p * 1000 = 1,855 * 55,7 * 1000 = 103293,1 \text{ m}^3$$

Objem přímého odtoku s pravděpodobností opakování 10 let:

$$O_{pH} = H_O * P_p * 1000 = 7,890 * 55,7 * 1000 = 439493,3 \text{ m}^3$$

Objem přímého odtoku s pravděpodobností opakování 20 let:

$$O_{pH} = H_O * P_p * 1000 = 11,265 * 55,7 * 1000 = 627466,6 \text{ m}^3$$

Objem přímého odtoku s pravděpodobností opakování 50 let:

$$O_{pH} = H_O * P_p * 1000 = 15,918 * 55,7 * 1000 = 886642,0 \text{ m}^3$$

Objem přímého odtoku s pravděpodobností opakování 100 let:

$$O_{pH} = H_O * P_p * 1000 = 19,917 * 55,7 * 1000 = 1109370,6 \text{ m}^3$$

Počtení metodou CN křivek za použití vektorových podkladů bylo dosaženo takových výsledků, že při srážkách s pravděpodobností opakování 2 roky bude dosahovat výška přímého odtoku 1,9 mm, při srážce s pravděpodobností opakování 10 let bude činit výška přímého odtoku 7,9 mm, při 20leté srážce 11,3 mm, při srážce s opakováním 50 let 15,9 mm a při 100leté srážce dosahuje hodnota výšky přímého odtoku 19,9 mm. V tabulce č. 4 jsou uvedeny všechny výsledky, kterých bylo dosaženo při průměrné hodnotě CN – 67,62 a hodnotě potenciální retence 121,6 mm.

	Pravděpodobnost opakování za N let				
	2	10	20	50	100
Hs (mm)	40,3	59,5	67,4	77	84,5
Ho (mm)	1,9	7,9	11,3	15,9	19,9
Oph (m3)	103293,1	439493,3	627466,6	886642	1109370,6
Součinitel odtoku (%)	5	13	17	21	24

Tab. č. 4: Výsledky při použití klasické počtení metody

Tyto výsledky porovnáme s výsledky, kterých se dopočítala Kozlovská (2013). V práci Kozlovské je počítáno s podobnými srážkovými úhrny při srážkách

s pravděpodobností opakování 2 a 100 let. V případě 2leté srážky dospěla Kozlovská k výšce přímého odtoku 9,5 mm a při 100leté srážce k hodnotě 45,6 mm. Hodnoty přímého odtoku pro povodí Kozlovské jsou vyšší oproti hodnotám Jíleckého povodí. Rozdílnost výsledků lze vysvětlit tím, že pro každé povodí bylo počítáno s jinými hodnotami CN. Kozlovská počítala s hodnotami pro úhor čerstvě zkeypřený. Kozlovská ve své práci uvádí, že se jedná o modelovou situaci s největší náchylností k erozi a jakmile se objeví vegetace, sníží se objem přímého odtoku.

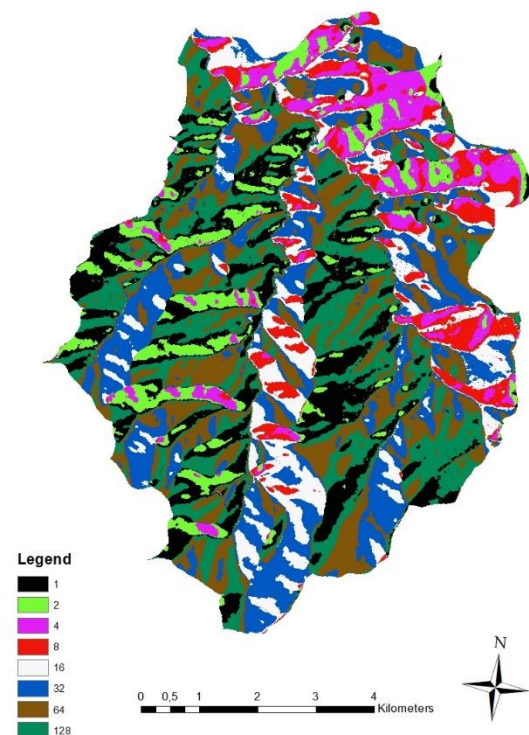
5.2 Výpočet rastrovým způsobem

5.2.1 Zjednodušený rastrový způsob výpočtu

Základní vrstva, která slouží pro výpočet rastrovým způsobem je vrstva DME (obrázek č. 11). Z této vrstvy byl následně vytvořen rastr směrů odtoku (obrázek č. 12) přes příkaz Flow direction.

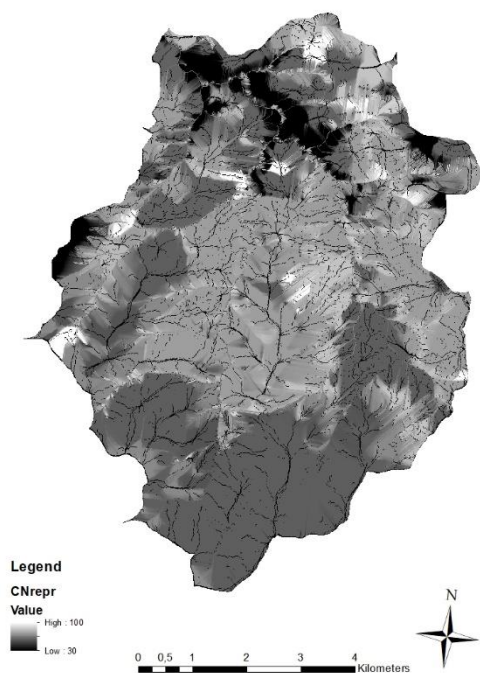


Obr. č. 11: DME Jíleckého potoka

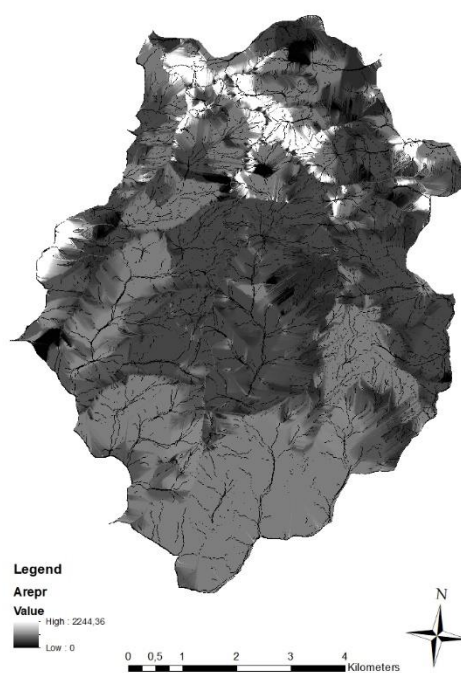


Obr. č. 12: Rastrová mapa směrů odtoků

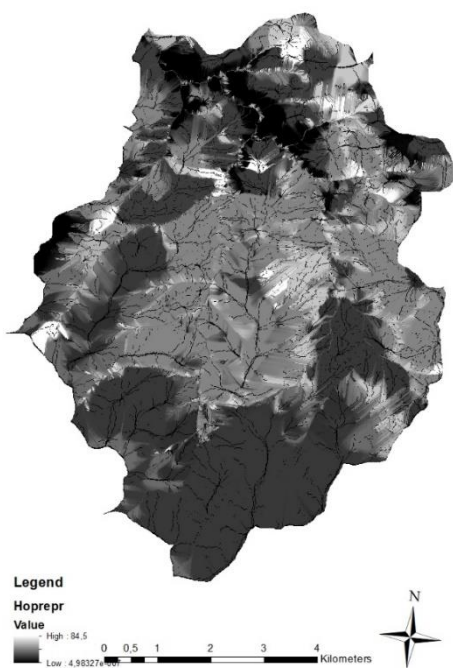
Následovalo vytvoření rastrové vrstvy, která znázorňovala v území reprezentativní hodnoty CN. K tomuto rastru se dospělo použitím Raster calculator, ve kterém se vydělily rastry vytvořené příkazem Flow accumulation, kdy v čitateli byl rastr s váhou CN a ve jmenovateli rastr bez váhy. Dále bylo pokračováno ve výpočtu potenciální retence, která dále vstupovala do výpočtu výšky přímého odtoku (obrázek č. 15).



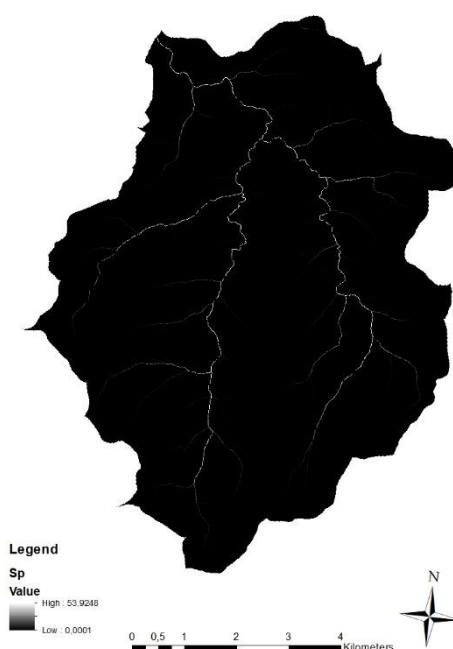
Obr. č. 13: Rastr reprezentativních CN



Obr. č. 14: Rastr potenciální retence

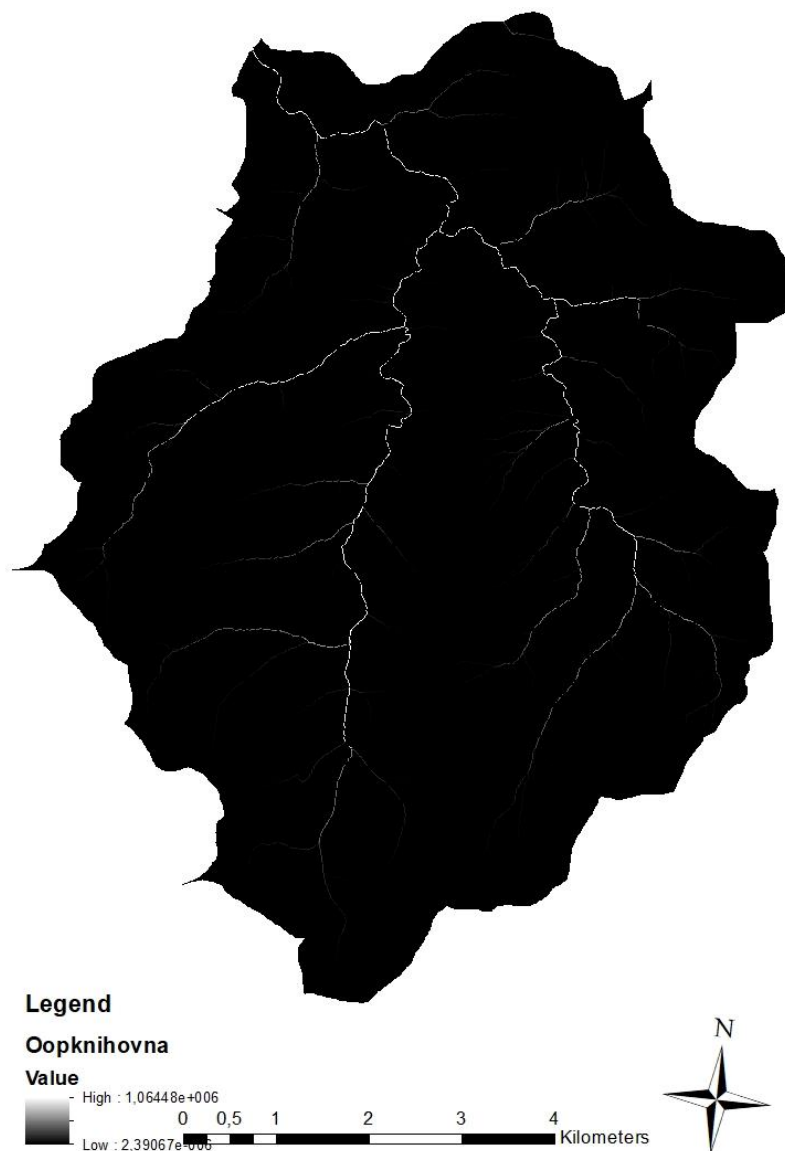


Obr. č. 15: Rastr výšky přímého odtoku



Obr. č. 16: Rastr plochy povodí

Konečný výpočet pro objem přímého odtoku byl proveden pomocí příkazu Raster calculator, do něhož byly dosazeny takové hodnoty, aby byl výsledek vyjádřen v m³. Výsledný rastr je zobrazen na obrázku č. 17.

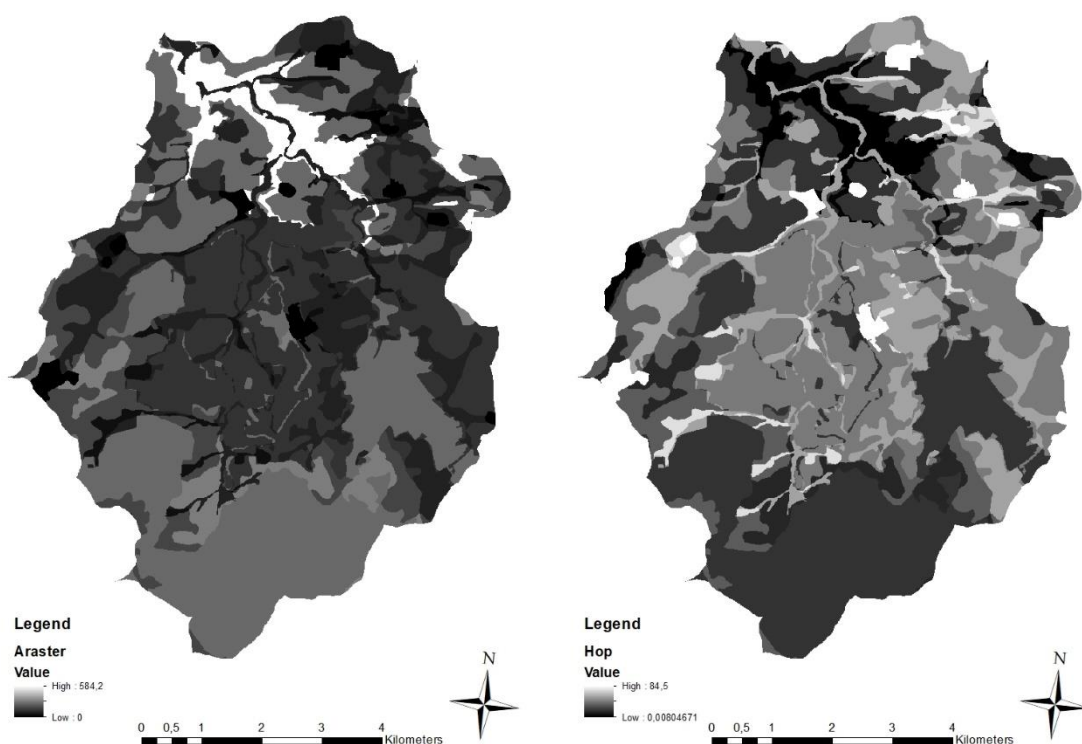


Obr. č. 17: Rastr objemu přímého odtoku Jileckého povodí při 100 leté srážce

Výsledkem se stal rastr, na kterém jsou patrné dráhy soustředěného odtoku, s maximální hodnotou přímého odtoku 1064480 m³, které je dosaženo v uzávěrovém profilu.

5.2.2 Detailní výpočet rastrovým způsobem

Pro výpočet objemu přímého odtoku detailním rastrovým způsobem je nejdříve potřeba vypočítat pomocí příkazu Raster calculator potenciální retenci v mm (obrázek č. 18). Nyní když byl vyhotoven rastr potenciální retence pokračovalo se výpočtem rastru výšky přímého odtoku (obrázek č. 19), který je dán v mm.

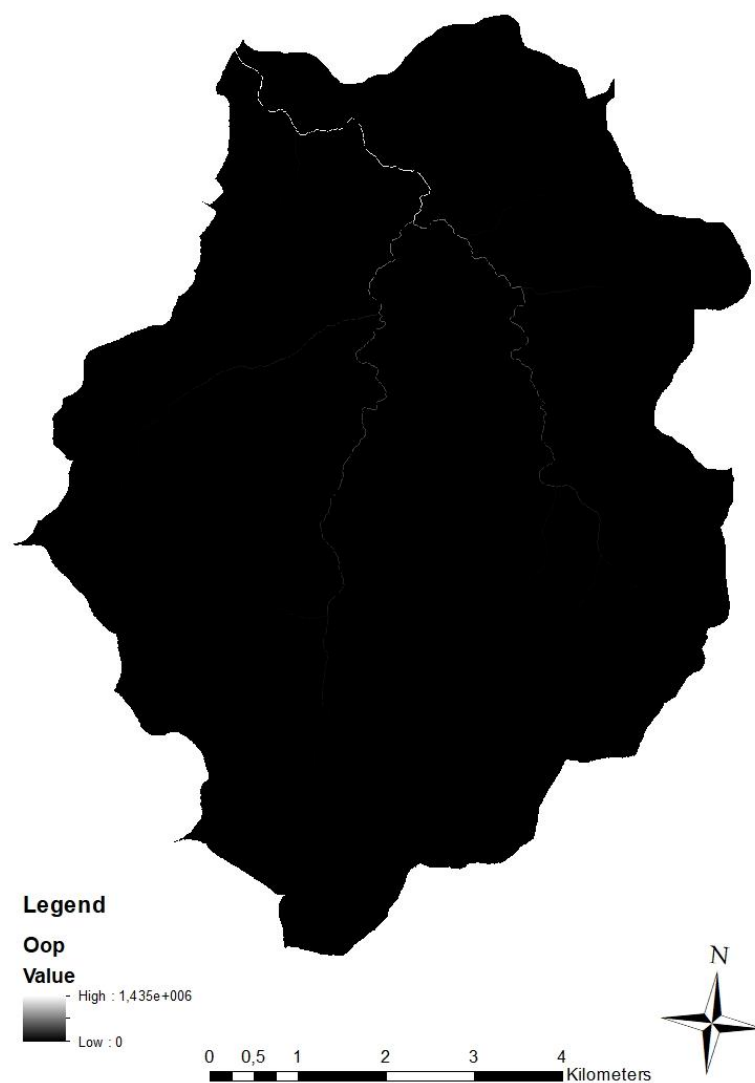


Obr. č. 18: Rastr potenciální retence

Obr. č. 19: Rastr výšky povrchového odtoku

Rastr výšky povrchového odtoku byl vydělen po vykrácení hodnot deseti, jelikož každý pixel v rastru má velikost 10x10 m. Tím byl vypočítán objem povrchového odtoku na úrovni buňky v m³.

Výsledný rastr objemu povrchového odtoku pro celé povodí při srážce s pravděpodobností opakování 100 let byl vytvořen pomocí příkazu Flow accumulation do něhož vstupoval rastr objemu povrchového odtoku na úrovni buňky jako váha.



Obr. č. 20: Rastr objemu povrchového odtoku za použití detailního výpočtu rastrovým způsobem

Výsledkem detailního výpočtu rastrovým způsobem se stal rastr, který ukazoval v uzávěrovém profilu objem vody, která odečte z Jíleckého povodí při srážce s pravděpodobností opakování 100 let. Konkrétně se jedná o hodnotu 1435000 m³.

Při porovnání zjednodušeného a rastrového způsobu výpočtu odtoku povrchové vody je vidět, že obě metody došly k relativně rozdílným výsledkům. Objem přímého odtoku vypočítaný zjednodušeným způsobem je oproti detailnímu způsobu o 25 % menší.

Šinka a kol. (2013) ve své publikaci uvádějí, že nižší výsledné hodnoty výšky přímého odtoku i objemu přímého odtoku při výpočtu zjednodušeným způsobem, jsou běžné. V publikaci Šinka a kol. (2013) byl proveden výpočet zjednodušeným i detailním způsobem a dopracovali se k výsledku, že je objem povrchového odtoku dosažený zjednodušeným způsobem oproti objemu povrchového odtoku dosaženým detailním způsobem o 10 % nižší.

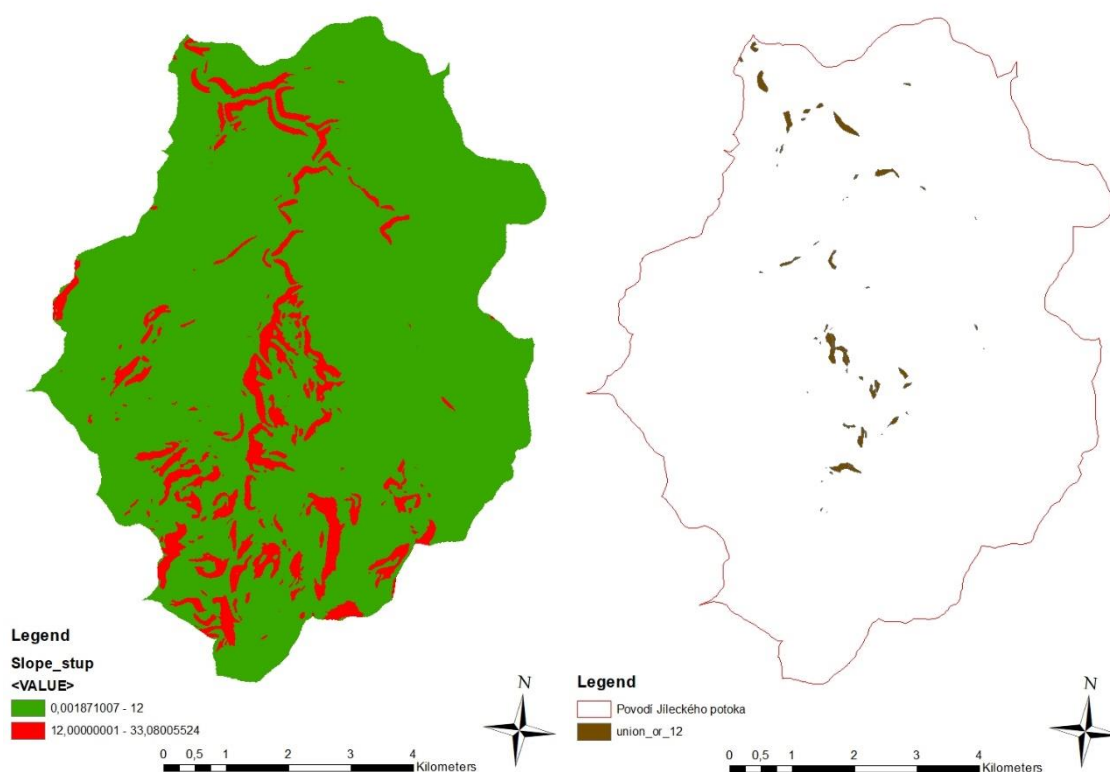
Rozdílné procentuální rozdíly mezi Jíleckým povodím a povodím se kterým počítá Šinka a kol., dosažené rastrovými výpočty může způsobovat rozdílná plocha uvedených povodí.

5.3 Analýza faktorů ovlivňující přímý odtok z povodí

5.3.1 Zatravnění orné půdy ve svazích nad 12°

Zatravnění orné půdy ve svazích nad 12° bylo provedeno na základě poznatků Holého (1994), který považuje delimitaci kultur (konkrétně zatravnění orné půdy ve svazích nad 12°) jako velice účinné protierozní opatření.

Vyjádření pozemků se sklonem větším než 12° je uvedeno na obrázku č. 21. Z tohoto výstupu byl vytvořen polygon, který byl následně použit pro vymezení veškeré orné půdy se sklonem větším než 12° nacházející se v povodí Jíleckého potoka (obrázek č. 22).



Obr. č. 21: Rastr sklonitosti terénu

Obr. č. 22: Orná půda se sklonem nad 12°

Nyní lze přistoupit k samotnému výpočtu objemu přímého odtoku stejným postupem, který je popsán v klasické početní metodě. V povodí Jíleckého potoka se nachází 37,3 ha orné půdy, které jsou situovány ve svazích nad 12°. Po aplikaci tohoto organizačního opatření se změnila hodnota CN spočítána váženým průměrem na 67,5 a potenciální retence na 122,3 mm. Výsledky přímého odtoku podle N-letých maximálních úhrnů srážek jsou znázorněny v tabulce č. 5.

	Pravděpodobnost opakování za N let				
	2	10	20	50	100
Hs (mm)	40,3	59,5	67,4	77	84,5
Ho (mm)	1,8	7,8	11,2	15,8	19,8
Oph (m3)	101096,6	434489,9	621330,8	879170,2	1100891,2
Součinitel odtoku (%)	5	13	17	21	23

Tab. č. 5: Výsledky při změně orné půdy se sklonitostí nad 12° na louky

Výsledné hodnoty přímého odtoku se oproti původnímu využití území změnilo minimálně. To že nedošlo téměř k žádné změně přímého odtoku lze vysvětlit tím, že na území se nacházelo relativně málo orné půdy, která byla nevhodně umístěna ve svazích se sklonem nad 12°.

Souchère a kol. (2003) poukazuje na to, že ve Francii dochází od roku 1970 k neustálému snižování trvalého travního porostu ve prospěch orné půdy. Ve zkoumaném území Francie bylo zjištěno, že při zornění 17 % trvalého travního porostu vedlo ke zvýšení přímého odtoku o 75 %. Souchère zdůrazňuje, že je potřeba zachovat stávající travní porosty a pokud možno je i rozšiřovat, především v ohrožených oblastech, které přispívají značnou měrou k povrchovému odtoku.

5.3.2 Změna nasycenosti půdy

V běžné projekční praxi je počítáno s hodnotami pro středně nasycené půdy. Jenže srážky nedopadají pouze na středně nasycené půdy, a proto byly v této práci provedeny výpočty indexy půdní sytosti odpovídající minimálnímu obsahu vody v půdě umožňující uspokojivou orbu a obdělávání, středně nasyceným půdám a pro půdu přesycenou vodou.

Pro výpočet hodnot CN pro IPS I a IPS III byly použity vzorce nacházející se v kapitole 3.2.2.

Výpočet CN I:

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2,334 - 0,011334 * CN_{II}} = \frac{67,62}{2,334 - 0,011334 * 67,62} = 43,14$$

Výpočet CN III:

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,4036 + 0,005964 * CN_{II}} = \frac{67,62}{0,4036 + 0,005964 * 67,62} = 83,8$$

S novými hodnotami CN I a CN III se mohlo přistoupit k dalším výpočtům stejným postupem, jak již byl dříve počítán objem přímého odtoku klasickou početní metodou za použití hodnot CN II pro středně nasycené půdy. Odtoky byly znovu počítány pro maximální denní srážkové úhrny s maximální dobou opakování 2, 10, 20, 50 a 100 let ze srážkoměrné stanice v Netřebicích.

	Pravděpodobnost opakování za N let				
	2	10	20	50	100
Hs (mm)	40,3	59,5	67,4	77	84,5
Ho (mm)	-	-	0,0	0,3	0,9
Oph (m3)	-	-	31,2	16259,5	48595,7
Součinitel odtoku (%)	-	-	0	0	1

Tab. č. 6: Výsledky při použití CN I pro relativně suché půdní podmínky

	Pravděpodobnost opakování za N let				
	2	10	20	50	100
Hs (mm)	40,3	59,5	67,4	77	84,5
Ho (mm)	1,9	7,9	11,3	15,9	19,9
Oph (m3)	103293,1	439493,3	627466,6	886642	1109370,6
Součinitel odtoku (%)	5	13	17	21	24

Tab. č. 7: Výsledky při použití CN II pro středně nasycené půdy

	Pravděpodobnost opakování za N let				
	2	10	20	50	100
Hs (mm)	40,3	59,5	67,4	77	84,5
Ho (mm)	11,7	25,0	31,1	38,8	45,1
Oph (m3)	650413,4	1391953,7	1731342,5	2162171,5	2509970,1
Součinitel odtoku (%)	29	42	46	50	53

Tab. č. 8: Výsledky při použití CN III pro půdu přesycenou vodou

	Pravděpodobnost opakování N let				
	2	10	20	50	100
Odtok při CN I (m3)	-	-	0,0	0,3	0,9
Odtok při CN II (m3)	1,9	7,9	11,3	15,9	19,9
Odtok při CN III (m3)	11,7	25,0	31,1	38,8	45,1

Tab. č. 9: Porovnání výsledků odtokových výšek při rozdílném nasycení půdy

U tabulky č. 6 za použití hodnot CN I pro relativně suché půdní podmínky nemohly být vypočítány hodnoty výšky přímého odtoku pro srážkové úhrny s pravděpodobností 2 a 10 let, jelikož srážkové úhrny nesplňují podmínku $H_s \geq 0,2A$.

Z tohoto důvodu nebylo možné dále pokračovat ani výpočtem objemu přímého odtoku.

Z výsledných hodnot je patrné, jak velký vliv na odtok vody z povodí má nasycenost půdy. V případě suchých půdních podmínek si lze povšimnout, že se veškerá voda dopadající na zemský povrch při 2 a 10leté srážce zadrží v povodí a nenastává přímý odtok. Při 100leté srážce nastává přímý odtok o výšce necelého 1 mm, což je v porovnání s ostatními hodnotami při stejné srážce a jiném nasycení půdy zanedbatelné číslo. V případě půd středně nasycených vodou byly výsledky již jednou zmíněny v kapitole metoda výpočtů za použití vektorových podkladů. Zde je možnost porovnání výsledků odtoku vody při 100leté srážce pro CN I a CN II, kdy je patrný až extrémní nárůst odtokové výšky z 1 mm na 23,5 mm.

V případě výpočtů s hodnotami CN III, které jsou používány pro půdy přesycené vodou, je značná výška přímého odtoku již při 2leté srážce, která se v porovnání s 2letou srážkou při středně nasycených půdách 6x zvětšila z výšky 2 mm na 12 mm. Se zvyšující se srážkou rostou i hodnoty přímého odtoku a nejvyšších hodnot je dosaženo při 100leté srážce, kdy je půda přesycená vodou. Pokud se bude znovu porovnávat výška přímého odtoku při 100leté srážce dopadající na středně nasycenou půdu se stejnou srážkou na přesycenou půdu je patrný více než 2násobně zvětšený přímý odtok z hodnoty 19,9 mm na hodnotu 45 mm.

Významným ukazatelem, pro posouzení odtokových poměrů z povodí, lze považovat součinitele odtoku. Součinitel odtoku udává procentuální zastoupení výšky přímého odtoku v mm z N-leté srážky. Z tabulky č. 10 je patrné, jak značný vliv na přímý odtok vody z povodí má nasycenost půdy. Při hodnotách CN I (relativně suché půdní podmínky) dosahuje součinitel odtoku i při 100leté srážce minimální hodnoty 1 %. U výpočtů, kde se používaly hodnoty CN II (středně nasycené půdy), byly nárůsty hodnot součinitele odtoku mnohem výraznější. Při 2leté srážce byl součinitel odtoku 5 % a při 100leté srážce dosahoval již hodnot 24 %, což způsobuje v porovnání s relativně suchou půdou zmenšení potenciální retence, která klesla z 334 mm na 121 mm. Jednoznačně nejvyšších hodnot dosahuje půda, která je přesycená vodou (hodnoty CN III), což je dáno i malou potenciální retencí. Již při pouhé 2leté srážce nedochází k potřebnému vsaku a téměř 29 % ze srážky odečte uzavěrovým profilem.

Se zvětšujícími se srážkami se zvětšuje i součinitel odtoku až na hodnotu 53 %, které je dosaženo při 100leté srážce.

	Součinitel odtoku (%)				
	2letá	10letá	20letá	50letá	100letá
CN I	-	-	0	0	1
CN II	5	13	17	21	24
CN III	29	42	46	50	53

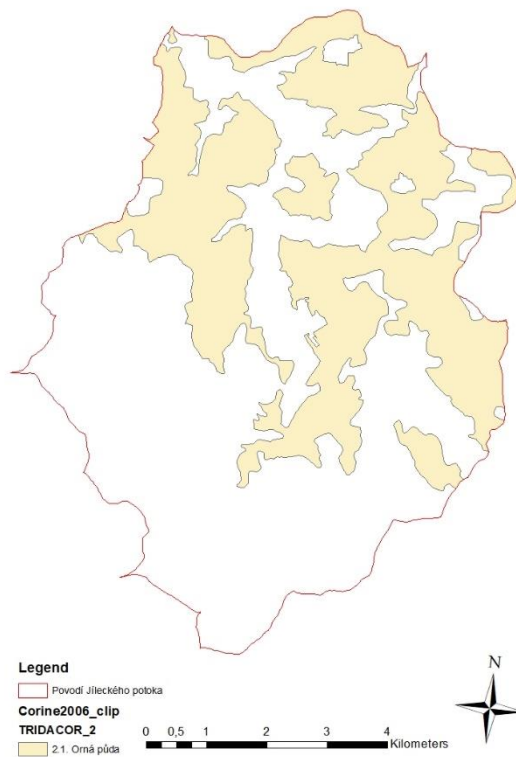
Tab. č. 10: Součinitel odtoku při různých sytostních podmínkách půdy

Kozlovská (2013) uvádí, že se v běžné projekční praxi používají hodnoty pro středně nasycené půdy, ale v jejím modelovém povodí se vyskytují extrémní srážky převážně v režimu relativně suchých půd IPS I. Například pro stanici Brno Tuřany byl výskyt dešťů s vydatností nad 30 mm v období 1961–2009 pro IPS I 91,5 %, pro IPS II 2 % a pro IPS III 6,5 %. Dále uvádí Kozlovská s Tomanem (2010), že při stanovení odtoků z povodí by se neměly brát automaticky hodnoty pro středně nasycené půdy, jelikož je tato metoda neopodstatněná a mělo by se provádět skutečné ověření správnosti volby indexu půdní sytosti. Rozdíl ve volbě IPS se projeví především v nutnosti protierozních a protipovodňových opatření v povodí, což určuje výši finančních nákladů.

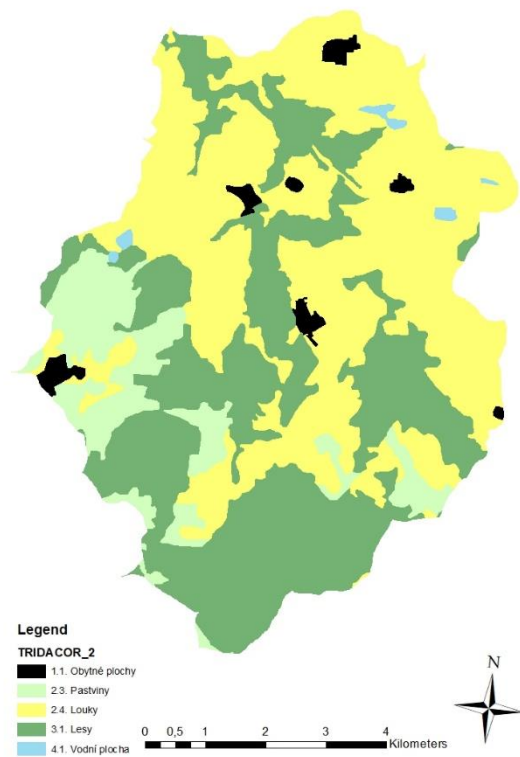
5.3.3 Změna Land use – zatravnění orné půdy

Další varianta, která vedla ke změně odtokových poměrů byla zatravnění veškeré orné půdy nacházející se v povodí Jíleckého potoka. Orná půda zaujímala v povodí rozlohu 21,6 km². Na obrázku č. 23 je znázorněna orná půda která byla v rámci simulace zatravněna. Výsledné Land use po zatravnění veškeré orné půdy je znázorněno na obrázku č. 24.

Po převedení orné půdy na trvalé travní porosty proběhl propočet hodnot CN. Nová průměrná hodnota CN činila 60,94 a s touto hodnotou byla vypočtena potenciální retence, která vyšla 162,8 mm. Dále následovaly výpočty výšky přímého odtoku a objemu přímého odtoku, výsledky jsou uvedeny v tabulce č. 11.



Obr. č. 23: Orná půda v povodí



Obr. č. 24: Land use po zatravnění

	Pravděpodobnost opakování za N let				
	2	10	20	50	100
Hs (mm)	40,3	59,5	67,4	77	84,5
Ho (mm)	0,4	3,8	6,1	9,5	12,6
Oph (m3)	19568,2	213061,6	342095,8	530809,8	699768,4
Součinitel odtoku (%)	1	6	9	12	15

Tab. č. 11: Výsledky při úplném zatravnění orné půdy

Pro vytvoření lepší představy se porovnají výsledky dosažené při původním využití krajiny s výsledky po celkovém zatravnění orné půdy. Po zatravnění orné půdy je vidět poměrně značný pokles přímého odtoku, kdy při srážce s pravděpodobností opakování 2 let klesla výška přímého odtoku z 1,9 mm na 0,4 mm. V případě srážky s opakováním 100 let došlo k poklesu z 19,9 mm na 12,6 mm, což je podloženo i snížením součinitele odtoku, který klesl téměř o 10 %.

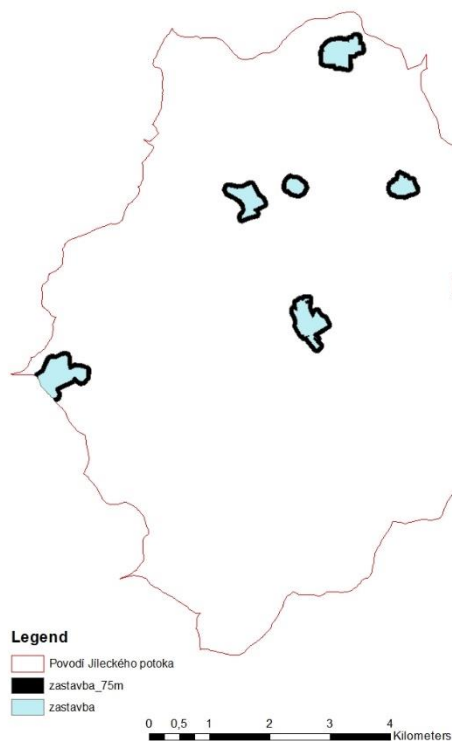
Čejka a kol. (2016) prováděl simulace na území Kopaninského potoka, kdy porovnával různé způsoby zemědělského hospodaření. Simuloval varianty – současný stav území, pěstování pouze kukuřice, ochranný osevní postup, technické opatření, zalesnění a zatravnění. Ve výsledku se ukázalo jako nejúčinnější varianta ke zvýšení vodní retence zatravnění a zalesnění. Při celkovém zatravnění orné půdy by se snížil

objem odtoku o 11 %. Rozdíl ve snížení odtoku mezi subpovodím Kopaninského toku a povodím Jíleckého potoka, který se snížil při celkovém zatravnění orné půdy o 36 %, může být dán různými faktory, například mohla být zatravněna procentuálně rozdílná plocha území.

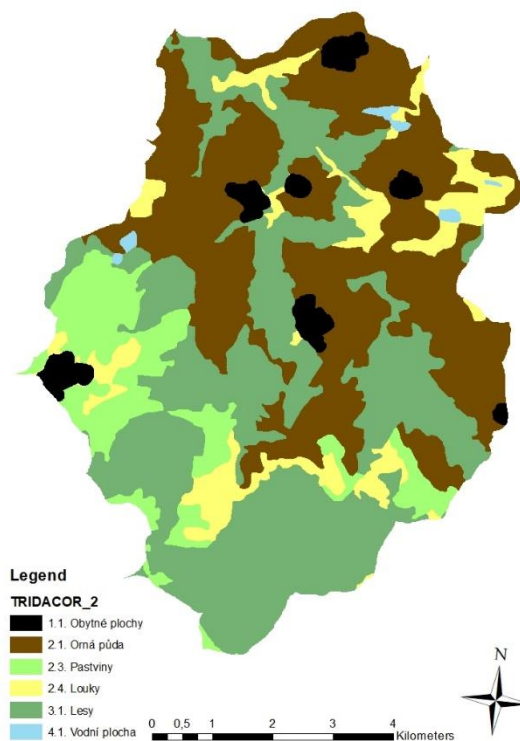
V práci Furlana a kol. (2012) byla prováděna simulace, kdy byly na dvou zemědělských plochách simulovány srážky o velikosti 40 mm na současný porost a poté byla provedena simulace zatravnění určitých částí území. Dospělo se k závěru, že v případě vhodné implementace travních porostů se může zredukovat odtok vody o 40–50 %.

5.3.4 Rozšíření zástavby

Rozšíření zastavěného území v povodí bylo poslední simulovanou variantou. Zastavěné území bylo rozšířeno o 75 m, aby došlo k jeho zdvojnásobení. Rozšíření zástavby je znázorněno na obrázku č. 25 a výsledné Land use na obrázku č. 26.



Obr. č. 25: Rozšíření zástavby



Obr. č. 26: Land use s novou zástavbou

	Pravděpodobnost opakování za N let				
	2	10	20	50	100
Hs (mm)	40,3	59,5	67,4	77	84,5
Ho (mm)	2,0	8,3	11,7	16,5	20,6
Oph (m3)	112537,6	460270,8	652885,5	917529,7	1144377,7
Součinitel odtoku (%)	5	14	17	21	24

Tab. č. 12: Výsledky po rozšíření zastavěného území

Zástavba byla rozšířena z původních 998123 m² na 1959606 m². Po rozšíření zástavby a přepočítání průměrné hodnoty CN, která činila 68,13, byla spočítána i potenciální retence, která dosahovala hodnoty 118,8 mm. Výsledky objemu přímého odtoku z povodí se oproti původnímu zastoupení kultur příliš nezměnily a při 100leté srážce vzrostl odtok uzávěrovým profilem o 35000 m³, což činí rozdíl ve výšce přímého odtoku 0,5 mm.

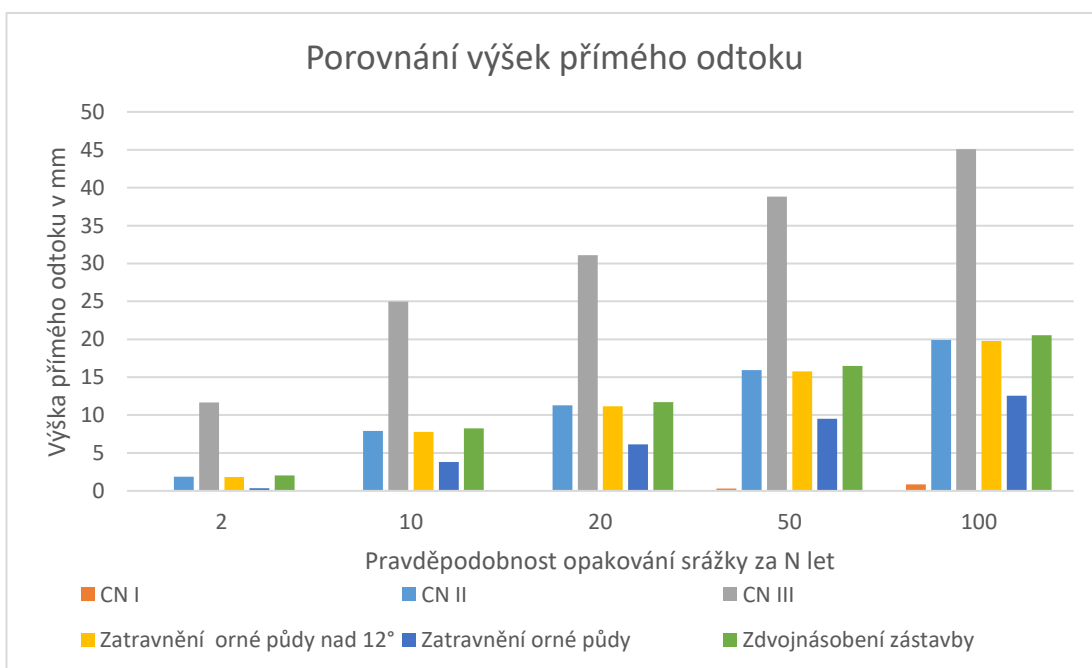
Xiao (2001) ve svém článku uvádí, že má proces urbanizace značný hydrologický dopad z hlediska ovlivnění povahy odtoku a dalších hydrologických charakteristik jako je znečišťování řek. Různé fáze růstu měst mají odlišné dopady. V počáteční fázi, kdy dochází k odstraňování stromů a vegetace, dojde k poklesu evapotranspirace. Ve fázi výstavby domů a ulic je snížena infiltrace a hladina podzemní vody a v období sucha snížený základní odtok. Po vývoji obytných a komerčních budov se díky zvýšené nepropustnosti snižuje doba odtoku. Tím dochází ke koncentraci odtoků a tím vzrůstá potenciál povodňových škod.

5.4 Porovnání výsledků

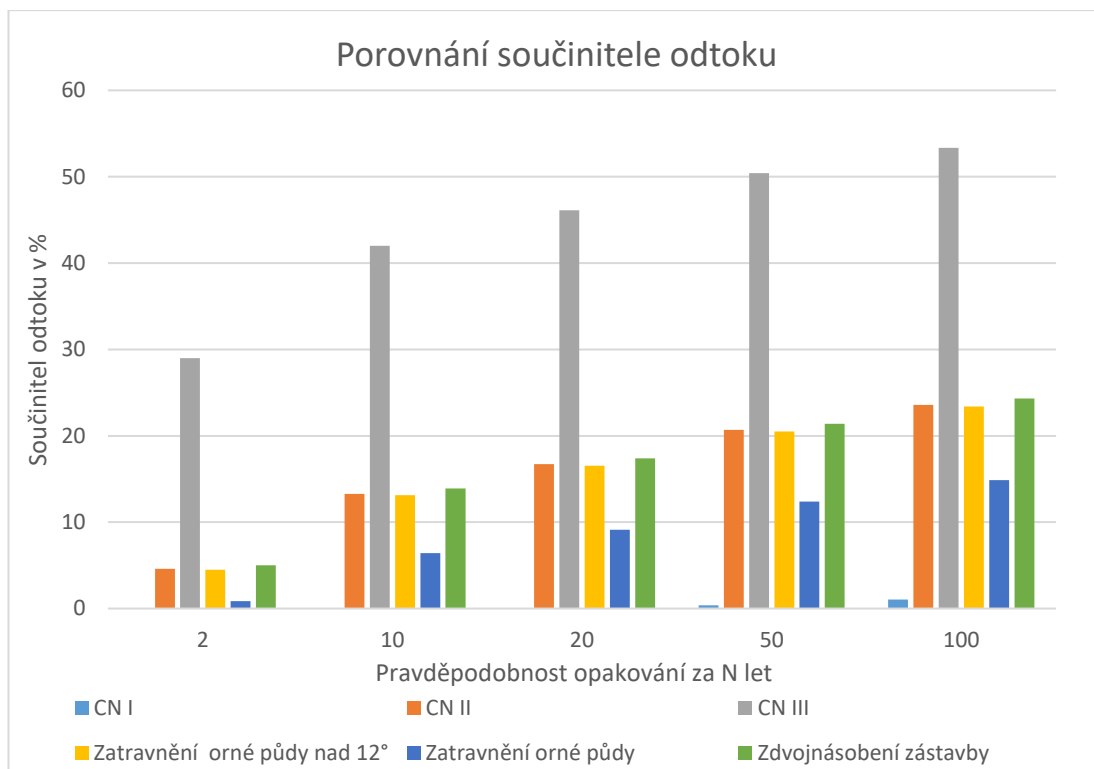
Pro vytvoření si lepší představy o výsledcích, které byly dosaženy při simulaci analýz ovlivňujících přímý odtok (změna nasycenosti půdy, zatravnění orné půdy nad 12°, zatravnění veškeré orné půdy nacházející se v povodí a rozšíření zástavby), byla vytvořena tabulka č. 13 ve které jsou porovnány výšky přímého odtoku a součinitel odtoku pro srážky s pravděpodobností opakování 2, 10, 20, 50 a 100 let. Pro lepší vizuální zhodnocení byl vytvořen graf porovnávající výšky přímého odtoku (graf č. 1) a graf součinitelů odtoku (graf č. 2).

		Pravděpodobnost opakování srážky za N let				
		2	10	20	50	100
CN I	Ho (mm)	-	-	0	0,3	0,9
	Součinitel odtoku (%)	-	-	0	0	1
CN II	Ho (mm)	1,9	7,9	11,3	15,9	19,9
	Součinitel odtoku (%)	5	13	17	21	24
CN III	Ho (mm)	11,7	25,0	31,1	38,8	45,1
	Součinitel odtoku (%)	29	42	46	50	53
Zatavnění orné půdy nad 12°	Ho (mm)	1,8	7,8	11,2	15,8	19,8
	Součinitel odtoku (%)	5	13	17	21	23
Zatavnění veškeré orné půdy	Ho (mm)	0,4	3,8	6,1	9,5	12,6
	Součinitel odtoku (%)	1	6	9	12	15
Zdvojnásobení zastavěného území	Ho (mm)	2,0	8,3	11,7	16,5	20,6
	Součinitel odtoku (%)	5	14	17	21	24

Tab. č. 13: Porovnání výsledků výšek přímého odtoku a součinitelů odtoku



Graf č. 1: Porovnání výšek přímého odtoku



Graf č. 2: Porovnání výsledků součinitelů odtoku

Z grafů je zřetelně vidět, že absolutně nejvyšších odtoků dosahuje povodí při přesycení půdy vodou. Porovná-li se výsledky dosažené při středně nasycených půdách se zatravněním orné půdy nad 12° a zdvojnásobení zastavěného území v povodí Jíleckého potoka, dojde se k závěru, že se odtoky příliš neliší. V případě zatravnění všech pozemků s ornou půdou se odtok vody sníží a v případě, že srážka dopadne na půdu relativně suchou, dosahují odtoky zanedbatelných hodnot.

6. Závěr

Diplomová práce se zabývala hydrologickými simulacemi odtoku vody z povodí při srážko-odtokových událostech. Za zájmové území, na kterém byly prováděny simulace odtoku, bylo vybráno povodí Jíleckého potoka. Ten se nachází v Jihočeském kraji, okrese Český Krumlov. Simulace byly prováděny v programu ArcMap 10.5.1. Pro výpočet přímého odtoku z povodí Jíleckého potoka byla využita metoda CN křivek. Cílem této práce bylo vyhodnocení přímého odtoku v závislosti na změně charakteristik povodí. Výška přímého odtoku byla zjišťována pro reálný stav povodí, dále při změně nasycení půdy, při zatravnění orné půdy se sklonitostí větší než 12°, při celkovém zatravnění orné půdy a při simulaci rozšíření zastavěného prostoru v povodí. V úvodu bylo charakterizováno zájmové území z hlediska klimatických, geologických a pedologických podmínek. Pro výpočty byly použity hodnoty maximálních denních srážkových úhrnů s pravděpodobností opakování 2, 10, 20, 50 a 100 let ze srážkoměrné stanice v Netřebicích.

Pro výpočty objemu přímého odtoku v povodí byla použita metoda CN křivek a její aplikace v rámci hydrologických analýz v GIS. Při použití hodnot odpovídajících skutečnému stav povodí byl součinitel odtoku pro srážky s pravděpodobností opakování 2 roky 5 %, při opakování 10 let 13 %, při opakování 20 let 17 %, při opakování 50 let 21 % a při opakování 100 let 24 %.

Jako první simulace byla brána změna nasycení půdy vodou, konkrétně byly použity hodnoty pro relativně suché půdy a půdy přesycené vodou. Nejdříve byly zjištěny výsledky pro relativně suché půdy, u kterých se ukázalo rapidní snížení odtokových poměrů, což bylo zapříčiněno výrazným zvýšením potenciální retence. Pro 2letou a 10letou srážku nebylo možno přímý odtok vody počítat kvůli nízkému poměru výšky srážky a potenciální retenci, při 20leté a 50leté srážce se součinitel odtoku dostal na nulovou hodnotu a při 100leté srážce na 1 %. V případě přesycenosti půd se dospělo k opačným výsledkům, kdy kvůli nízké potenciální retenci výrazně vzrostly odtoky vody z povodí. Při 2leté srážce činil součinitel odtoku již 29 %, při 10leté 42 %, při 20leté 46 %, při 50leté 50 % a při 100leté srážce již 53 %.

Dále byla simulována změna land use. Jednou simulovanou variantou bylo zatravnění orné půdy nacházející se ve svazích se sklonem větší než 12°. Tato varianta přímý odtok oproti reálným podmínkám povodí příliš nezměnila. Výsledné hodnoty

součinitele odtoku pro 2leté srážky jsou 5 %, pro 10leté 13 %, pro 20leté 17 %, pro 50leté 21 % a pro 100leté 23 %. Další variantou změny land use bylo zatravnění všech pozemků s ornou půdou. Při této simulaci se přímý odtok snížil, důvodem je, že vegetace oproti orné půdě vytváří podmínky pro lepší zasakování vody a část zadrží na svém povrchu. Výsledné hodnoty součinitele odtok jsou pro 2letou srážku 1 %, pro 10letou 6 %, pro 20letou 9 %, pro 50letou 12 % a pro 100letou 15 %. Poslední změnou land use bylo rozšíření zastavěného prostoru, kdy byla zástavba v povodí zdvojnásobena. Při této simulaci došlo k nepatrnému nárůstu přímého odtoku – v případě že by byla zástavba ještě více rozšířena dospělo by se jistě k většímu nárůstu přímého odtoku. Výsledné hodnoty součinitele odtoku po zdvojnásobení zastavěného území byly pro 2letou srážku 5 %, pro 10letou 14 %, pro 20letou 17 %, pro 50letou 21 % a pro 100letou 24 %.

Výpočty přímého odtoku rastrovými způsoby sloužily především k podrobnému sestavení mapy, na které je vidět, v jakých místech dochází k akumulaci odtoku oproti výpočtu za použití vektorových dat, který udává pouze odtok v uzávěrovém profilu povodí.

7. Seznam použité literatury

1. BÍNOVÁ, L., CULEK, M., GLOS, J., KOVIÁN, J., LACINA, D., NOVOTNÝ, M. a ZIMOVÁ, E. *Metodika vymezení územního systému ekologické stability*. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2017. 185 s.
2. BLAŽKOVÁ, Š. *Srážkoodtokové modelování založené na principu jednotkového hydrogramu*. 1. vyd. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, 1993. 114 s. ISBN 80-901181-3-5.
3. ČEJKA, F., FUČÍK, P. a STALNACKE, P. *Hospodaření s vodními zdroji a management krajiny v České republice – poučení z projektu LaPlaNt*. 1. vyd. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 2016. 34 s. ISBN 978-80-87361-60-3.
4. ČERVENÝ, J., BÖHM, B., BUBENÍČKOVÁ, L., BUCHTELE, J., ČULÍK, J., DAŇKOVÁ, H., FRIGA, J., HLADNÝ, J., KŘÍŽ, V., KURPELOVÁ, M., NEDELKA, M., ŠEBEK, O., ŠKULEC, Š., VANÍČEK, K., VITOSLAVSKÝ, J. a ZÁVODSKÝ, D. *Podnebí a vodní režim ČSSR*. Vyd. 1. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1984. 414 s.
5. DAŇHELKA, J. *Operativní hydrologie: hydrologické modely a nejistota předpovědí*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2007. 104 s. ISBN 978-80-86690-48-3.
6. DAŇHELKA, J., KREJČÍ, J., ŠÁLEK, M., ŠERCL, P. a ZEZULÁK, J. *Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2003. ISBN 80-86690-03-2.
7. DAVIE, T. *Fundamentals of hydrology*. London: Routledge, 2008. 200 s. ISBN: 978-0-415-39987-6.
8. DUMBROVSKÝ, M. *Příspěvek k řešení vodního hospodářství krajiny v pozemkových úpravách: The contribution for solving the landscape water management in the proces of land consolidation: zkrácená verze habitační práce*. Brno: VUTIUM, 2005. 44 s. ISBN 80-214-3082-6.
9. FURLAN, A., POUSSIN, J., MAILHOL, J., LE BISSONNAIS, Y. a GUMIERE, S. *Designing management option to reduce surface runoff and sediment yild with*

- farmers: An experiment in south-western France. Journal of Environmental Management.* 2012, č. 96, s. 74-85.
10. HOLÝ, M. *Eroze a životní prostředí*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1994. 383 s. ISBN 80-01-01078-3.
 11. HUBAČÍKOVÁ, V. *Hydrologie*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2009. 43 s. ISBN 978-80-7157-638-9.
 12. JANDORA, J., STARA, V. a STARÝ, M. *Hydraulika a hydrologie*. Brno: CERM, 2002. 186 s. ISBN 80-214-2204-1.
 13. JANEČEK, M. *Ochrana zemědělské půdy před erozí: metodika*. 1. vyd. Praha: Powerprint, 2012. 113 s. ISBN 978-80-87415-42-9.
 14. JŮVA, K. *Odvodňování půdy*. 1. vyd. Praha: SZN, 1957. 526 s.
 15. KEMEL, M. *Hydrologie*. 3. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1991. 222 s. ISBN 80-01-00509-7
 16. KEMEL, M. *Klimatologie, meteorologie, hydrologie*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. 289 s. ISBN 80-01-01456-8.
 17. KNĚŽEK, M. *Podzemní složka odtoku*. 1. vyd. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1988. 61 s.
 18. KOVÁŘ, P., BAČINOVÁ, H., HEŘMANOVSKÁ, D., HRABALÍKOVÁ, M., ŠTIBINGER, J., KAST, M., DVOŘÁKOVÁ, Š., ZEMAN, J., KŘOVÁK, F., ŠIMKOVÁ, J., PONDĚLÍČEK, V. a VESELÝ, S. *Certifikovaná metodika optimalizace vodního režimu krajiny ke snižování dopadů hydrologických extrémů*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2015. 106 s.
 19. KOZLOVSKÁ, S. *Vliv metody stanovení N-letých maximálních denních úhrnů srážek na objem přímého odtoku*. Brno. 2013. 8 s.
 20. KOZLOVSKÁ, S. a TOMAN, F. *Vyhodnocení indexu předchozích srážek u vybraných klimatologických stanic*. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. 2010, sv. LVIII, č. 4, s. 135-140.
 21. KRAVKA, M., MARKOVÁ, J., DOMOKOŠOVÁ, K., FIALOVÁ, J. a VYSKOT, I. *Základy lesnické a krajinářské hydrologie a hydrauliky*. Vyd. 1. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009. 113 s. ISBN 978-80-7375-338-2.
 22. KREŠL, J. *Hydrologie*. Vyd. 1. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2001. 125 s. ISBN 80-7157-513-5.

23. KREŠL, J. *Lesnické meliorace*. 1. vyd. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1990. 226 s.
24. KULHAVÝ, Z., ŠTIBINGER, J., KŘOVÁK, F., KASL, M., PELÍŠEK, I., SOUKUP, M., MACEK, L., JAKOUBEK, J. a PAVLÍČEK, T. *Opatření k posílení infiltračních procesů v krajině: metodika*. 1. vyd. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 2015. 232 s. ISBN 978-80-97361-52-8.
25. MATOUŠEK, V. *Poznávání odtokových vlastností malých povodí za regionálních dešťů*. Vyd. 1. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, 2010. 103 s.
26. NĚMEC, J. *Hydrologie*. 1. vyd. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1965. 237 s.
27. NETOPIL, R. *Hydrologie pevnin*. 1. vyd. Praha: Academia, 1972. 294 s.
28. PAČES, T. *Voda a Země*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1982. 174 s.
29. PAVELKOVÁ CHMELOVÁ, R. a FRAJER, J. *Základy fyzické geografie 1: Hydrologie*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013. 141 s. ISBN 978-80-244-3843-6.
30. POKORNÁ, D. a ZÁBRANSKÁ, J. *Hydrologie a hydroopedologie*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2008. 218 s. ISBN 978-80-7080-707-1.
31. POKORNÝ, J. a DVOŘÁKOVÁ, J. *Voda v krajině*. Jindřichův Hradec: Hamerský potok, 2011. 22 s. ISBN 978-80-904858-0-8.
32. POLCAR, P., LETT, P., KŘIVANCOVÁ, S., VAVRUŠKA, F. a STAROSTOVÁ, M. *Klimatologické a hydrologické studie z pobočky ČHMÚ České Budějovice*. 1. vyd. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 1999. 170 s. ISBN 80-85813-65-3.
33. QUITT, E. *Klimatické oblasti Československa: Climatic regions of Czechoslovakia*. Brno: Geografický ústav ČSAV, 1971. 73 s.
34. SERRANO, E. S. *Hydrology for Engineers, Geologists and Environmental Professionals*, HydroScience Inc. Lexington, Kentucky, 1997. s. 468.
35. SHAW, E. *Hydrology in practice*. 3rd ed., Taylor & Francis e-Library ed. Oxford, UK: Routledge, 2005. 613 s. ISBN 0-203-01325-5.
36. SOUCHÉRE, V., KING, CH., DUBREUIL, N., LECOMTE-MOREL, V., LE BISSONNAIS, Y. a CHALAT, M. *Grassland and crop trends: role of the*

- European Union Common Agricultural Policy and consequences for runoff and soil erosion.* Environmental Science & Policy. 2003, č. 6, s. 7-16.
37. SOUKUP, M. a HRÁDEK, F. *Optimální regulace povrchového odtoku z povodí.* Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 1999. 98 s.
38. STARÝ, M. *Hydrologie.* VUT Brno, 2005. 213 s.
39. STARÝ, M. *Operativní řízení odtoku vody z povodí za povodňových situací a užití metod umělé inteligence: Operative control outflow from river basins during floodings and use of artificial intelligence methods: teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru Vodní hospodářství a vodní stavby.* Brno: VUTIUM, 2005. 41 s. ISBN 80-214-2935-6.
40. ŠERCL, P. *Vliv fyzicko-geografických faktorů na charakteristiky teoretických návrhových povodňových vln.* Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2009. 88 s. ISBN 978-80-86690-62-9.
41. ŠILAR, J. *Hydrologie v životním prostředí.* Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1996. 136 s. ISBN 80-7078-361-3.
42. ŠINKA, K., MUCHOVÁ, Z. a KONC, L. *Aplikácie geografických informačných systémov v pozemkových úpravách.* Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, 2013. 251 s. ISBN 978-80-552-1128-2.
43. ŠÍR, M. *Základy technických znalostí ve vodním hospodářství.* České Budějovice: Vysoká škola evropských a regionálních studií, 2013. 144 s. ISBN 978-80-97472-50-7.
44. TLAPÁK, V., ŠÁLEK, V. a LEGÁT, V. *Voda v zemědělské krajině.* 1. vyd. Praha: Zemědělské nakladatelství Brázda, 1992. 318 s. ISBN 80-209-0232-5.
45. VLNAS, R., PECHA, M., SOSNA, V. a ČERNÁ, L. *Hydrologická bilance množství a jakosti vody České republiky.* Český hydrometeorologický ústav, 2015. 171 s.
46. VOUGHT, L., PINAY, G., FUGLSANG, A. a RUFFINONI, C. *Structure and function of buffer strips from a water quality perspective in agricultural landscapes.* Landscape and Urban Planning. 1995, č. 31, s. 323-331.
47. WENG, Q. *Modeling Urban Growth Effects on Surface Runoff with the Integration of Remote Sensing and GIS.* Environmental Management. 2001 č. 28, s. 737-748.

48. YAO, L., WEI, W. a CHEN, L. *How does imperviousness impact the urban rainfall-runoff process under various storm cases?* Ecological Indicators. 2016, č. 60, s. 893-905.
49. ZAPLETAL, M. *Hydrologie*. 2. vyd. Vodňany: Střední rybářská škola a Vyšší odborná škola vodního hospodářství a ekologie, 2004. 102 s. ISBN 978-80-87096-04-8.

Další zdroje:

1. CORRINE LANDCOVER 2006 European Environment Agency (EEA) under the framework of the Copernicus programme - copernicus@eea.europa.eu
2. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/>

8. Seznam obrázků

Obrázek č. 1 – Oběh vody (<http://water.usgs.gov/edu/watercycle.html>)

Obrázek č. 2 – Schéma odtokového procesu (Matoušek, 2010)

Obrázek č. 3 – Schéma srážkoodtokového procesu v povodí (Starý, 2005)

Obrázek č. 4 – Poloha povodí Jíleckého potoka

Obrázek č. 5 – Mapa KPP katastr Mirkovice (wakpp.vumop.cz)

Obrázek č. 6 – Průzkum půd na HPJ 32

Obrázek č. 7 – Průzkum půd na HPJ 37

Obrázek č. 8 – Směry odtoků při použití příkazu Flow direction, (pro.arcgis.com)

Obrázek č. 9 – Mapa land use povodí Jíleckého potoka (Corine Land Cover 2006)

Obrázek č. 10 – Mapa hydrologických skupin půd

Obrázek č. 11 – DME Jíleckého potoka

Obrázek č. 12 – Rastrová mapa směrů odtoků

Obrázek č. 13 – Rastr reprezentativních CN

Obrázek č. 14 – Rastr potenciální retence

Obrázek č. 15 – Rastr výšky přímého odtoku

Obrázek č. 16 – Rastr plochy povodí

Obrázek č. 17 – Rastr objemu přímého odtoku Jíleckého povodí při 100 leté srážce

Obrázek č. 18 – Rastr potenciální retence

Obrázek č. 19 – Rastr výšky povrchového odtoku

Obrázek č. 20 – Rastr objemu povrchového odtoku za použití detailního výpočtu rastrovým způsobem

Obrázek č. 21 – Rastr sklonitosti terénu

Obrázek č. 22 – Orná půda se sklonem nad 12°

Obrázek č. 23 – Orná půda v povodí

Obrázek č. 24 – Land use po zatravnění

Obrázek č. 25 – Rozšíření zástavby

Obrázek č. 26 – Land use s novou zástavbou

9. Seznam tabulek

Tabulka č. 1 – Klimatické charakteristiky Jíleckého potoka (Quitt, 1971)

Tabulka č. 2 – Hodnoty odběrné stanice Netřebice (ERCN)

Tabulka č. 3 – Land use povodí Jíleckého potoka

Tabulka č. 4 – Výsledky při použití klasické početní metody

Tabulka č. 5 – Výsledky při změně orné půdy se sklonitostí nad 12° na louky

Tabulka č. 6 – Výsledky při použití CN I pro relativně suché půdní podmínky

Tabulka č. 7 – Výsledky při použití CN II pro středně nasycené půdy

Tabulka č. 8 – Výsledky při použití CN III pro půdu přesycenou vodou

Tabulka č. 9 – Porovnání výsledků odtoku vody při rozdílném nasycení půdy

Tabulka č. 10 – Součinitel odtoku při různých sytostních podmínkách půdy

Tabulka č. 11 – Výsledky při úplném zatravnění orné půdy

Tabulka č. 12 – Výsledky po rozšíření zastavěného území

Tabulka č. 13 – Porovnání výsledků výšek přímého odtoku a součinitelů odtoku

10. Seznam grafů

Graf č. 1 – Porovnání výšek přímého odtoku

Graf č. 2 – Porovnání výsledků součinitelů odtoku