

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
Analýza faktorů ovlivňující přímý odtok

Vedoucí diplomové práce:
Ing. Václav Bystřický Ph.D.

Autor:
Bc. Ivo Vlasák

České Budějovice, 2016

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
Fakulta zemědělská
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ivo VLASÁK**
Osobní číslo: **Z14439**
Studijní program: **N4106 Zemědělská specializace**
Studijní obor: **Pozemkové úpravy a převody nemovitostí**
Název tématu: **Analýza faktorů ovlivňujících přímý odtok z povodí**
Zadávající katedra: **Katedra krajinného managementu**

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

Práce se bude týkat srážko-odtokových epizod a přímého odtoku vody z povodí. Bude kladen důraz na vymezení faktorů, které ovlivňují tvorbu a velikost přímého odtoku vody z krajiny a na 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.

Analýza faktorů ovlivňujících přímý odtok z povodí.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **40 - 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.

Lepš, J., Šmilauer, P. Biostatistika. Biologická fakulta JU, České Budějovice, 1996, 166 s.

Manuály statistických programů, např. Statistika, R aj.

časopisy: Hydrological processes, Journal of hydrology, Physics and chemistry of the earth, Hydrological studies, atd.

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

Datum zadání diplomové práce: **16. března 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **30. dubna 2016**

JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA
studijní oddělení
Studentůvská 13
370 05 České Budějovice



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

L.S.



doc. Ing. Pavel Ondr, CSc.
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 23. března 2015

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 (v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Zemědělskou fakultou JU) 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 byli 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.

V Českých Budějovicích dne

.....
Bc. Ivo Vlasák

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Václavu Bystřickému, Ph.D. za to, že mi pomáhal při sestavování diplomové práce, za odborné vedení, cenné rady a připomínky. Díky všem těmto aspektům a úkonům mi pomohl zkvalitnit a dokončit mou diplomovou práci.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá analýzou faktorů ovlivňující přímý odtok z povodí. DP byla řešena na vybraném povodí Kopaninského potoka. Odtok ovlivňuje vždy několik faktorů současně. Mezi tyto faktory patří zejména klima, antropogenní vlivy, odvodnění, tvar a plocha povodí, landuse, geologická struktura, poloha a nadmořská výška povodí. Přímý odtok lze separovat různými metodami (modifikovanou graficko-početní metodou, metodou GROUND, metodou separace hydrogramu, metoda digitálních filtrů), nebo použít k výpočtu metodou CN-křivek. V této práci byly výsledky pro zvolené povodí zpracovány zvolenou metodou CN-křivek. V metodické části se s využitím map BPEJ, spolu se vstupními daty získanými metodou CN křivek, vytvořily mapy přímého odtoku z povodí. Tyto výstupy byly vytvořené za různých hodnot návrhových dešťů – doba opakování $N = 2, 10, 50$ a 100 let. Vypočten byl objem přímého odtoku klasickým způsobem a druhý způsob spočíval ve využití programu ArcMap. Součástí DP bylo i namodelování různých scénářů využití území (reálný stav vs. zatravnění orné půdy) i nasycenosti povodí, resp. obsahu vody v půdě (půda suchá, střední, mokrá).

Klíčová slova: hydrologický cyklus, přímý odtok, Kopaninský potok, CN-křivky, faktory ovlivňující odtok

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the analysis of the factors which influence the direct drainage from the drainage area. The thesis specifically deals with the drainage area of the Kopaninský brook. Drainage is always influenced by several factors at the same time. These factors are above all climate, anthropogenic impact, underdrainage, shape and extent of a drainage area, land use, geologic structure, location and altitude of a drainage area. The direct drainage can be separated by different methods (modified semi-graphical method, GROUND method, method of hydrogram separation, method of digital filters) or CN-curves can be used for calculation. This thesis used the method of CN curves to process the results of a given drainage area. In the methodical part of the thesis I reached to the creation of direct drainage maps with the utilisation of the BPEJ maps together with the input data gained by the method of CN curves. These outputs were created at different values of design rains – repetition time $N= 2, 10, 50$ and 100 years. The volume of a direct drainage was calculated by a classic method and by a method using the ArcMap programme. Another part of the thesis was simulation of different area utilisation situations (real condition versus grassing of ploughland) and saturation of drainage area, or more precisely water content in soil (dry soil, middle dry soil, wet soil).

Key words: hydrological cycle, direct drainage, the Kopaninský brook, CN-curves, factors influencing drainage

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Cíl práce	10
3	Literární rešerše	11
3.1	Oběh vody v přírodě.....	11
3.2	Metoda hydrologické bilance	13
3.3	Odtok vody v přírodě	15
3.4	Charakteristika vodních toků.....	17
3.5	Složky odtoku a jejich geneze	18
3.6	Rozdělení vody.....	21
3.6.1	Povrchová voda.....	21
3.6.2	Podpovrchová voda.....	22
3.6.3	Podzemní voda.....	22
3.7	Faktory ovlivňující odtok vody z povodí	23
3.8	Metody separace přímého odtoku	29
3.8.1	Metody separace hydrogramu	29
3.8.2	Metoda MGPM (modifikovaná graficko-početní metoda)	30
3.8.3	Metoda GROUND	31
3.8.4	Metoda digitálních filtrů	31
3.9	Metoda CN - křivek.....	32
4	Materiál.....	35
5	Metody.....	43
5.1	Výpočet klasickým způsobem.....	46
5.2	Výpočet rastrovým způsobem	50
6	Analýza faktorů ovlivňujících přímý odtok z povodí	53
6.1	Změna nasycenosti povodí	53
6.2	Změna landuse.....	57
7	Závěr.....	61
8	Seznam použité literatury a zdrojů	63
9	Seznam obrázků	69
10	Seznam tabulek	70

1 Úvod

Voda je základní složkou přírodního a životního prostředí, je pro člověka nezbytnou potravinou a surovinou, je zdrojem energie, při dostatečných hloubkách v řekách, jezerech a nádržích. Spolu s půdou a ovzduším je podmínkou všeho života a práce. Je součástí veškeré živé i neživé přírody. Sále zřetelněji se ukazuje, že vodu, její povrchové zdroje lze chápat jako významnou součást přírodního bohatství státu (Kemel, 1996). Vzhledem k tomu, že se voda na Zemi vyskytuje v omezeném množství, není rovnoměrně rozložena ani prostorově ani časově, je zapotřebí s ní velmi dobře hospodařit. K tomu je nezbytně nutné znát zákonitosti výskytu a oběhu vody v přírodě, její vlastnosti a možnosti jejího využití (Bumerl, 2003). Voda nejen slouží, ale je schopna i během krátké doby zničit práce mnohých generací. Nejen nadbytek, ale i nedostatek vody přináší značné škody. Vývojem lidské civilizace dochází k mnohým změnám, růst životní úrovně přináší i nepříznivé důsledky pro životní prostředí (Kemel, 1996). Díky zásahům člověka do životního prostředí je stále náročnější zabezpečit dostatek kvalitní vody, ochrana jejích zdrojů je stále obtížnější a složitější. Dochází k chemickému, bakteriologickému a teplotnímu znečištění životního prostředí (Kemel, 1996). Voda se v přírodě účastní všech podstatných biologických procesů, fyzikálních a chemických pochodů a tvorby klimatu. Nachází se v zemské atmosféře, oceánech, pevninách, tvoří toky a přirozené i umělé vodní nádrže. Je pro život nepostradatelná a její dostatečné množství je základním předpokladem pro existenci všech žijících organismů (Červený, Bohm, 1984). Voda je roztok, v němž jsou rozpuštěny různé látky. Má četné fyzikální vlastnosti, z nichž nejznámější je maximální hustota při teplotě 4°C. Podle výskytu rozlišujeme povrchovou vodu, což je podle zákona o vodách č. 254/2001 Sb. voda přirozeně se vyskytující na zemském povrchu. Podzemní voda je vodou v zemských dutinách a ve zvodněných zemských vrstvách. Mezi zvláštní vody zařazujeme vody například léčivé minerální vody nebo vody důlní. Dále půdní voda, srážkové vody a atmosférická voda (Broža, 1988).

Vody se rozlišují podle původu a podle použití. Podle původu je dělíme na vody přírodní a odpadní. Mezi přírodní řadíme vody atmosférické, podzemní (půdní, prosté, minerální) a povrchové (tekoucí, stojaté, mořské).

Podle způsobu použití je dělíme na vodu pitnou, užitkovou, provozní a ostatní, které mají zvláštní požadavky na kvalitu a složení vody, např. vody pro rekreaci, závlahy, chov ryb a další (Bumerl, 2003). Vodní zdroje jsou považovány v zásadě za nevyčerpatelné, ale poměrně snadno poškoditelné. Jako živel může být voda ničitelkou životů, společenských hodnot i přírody (Broža, 1988).

Přímý odtok je ta část celkového odtoku vody, která se do povrchových toků dostává už během trvání deště. Přímý odtok je hlavní příčinou povodní i vodní eroze půdy. Povrchový odtok představuje tu část vody z celkového odtoku, která odtéká po povrchu terénu.

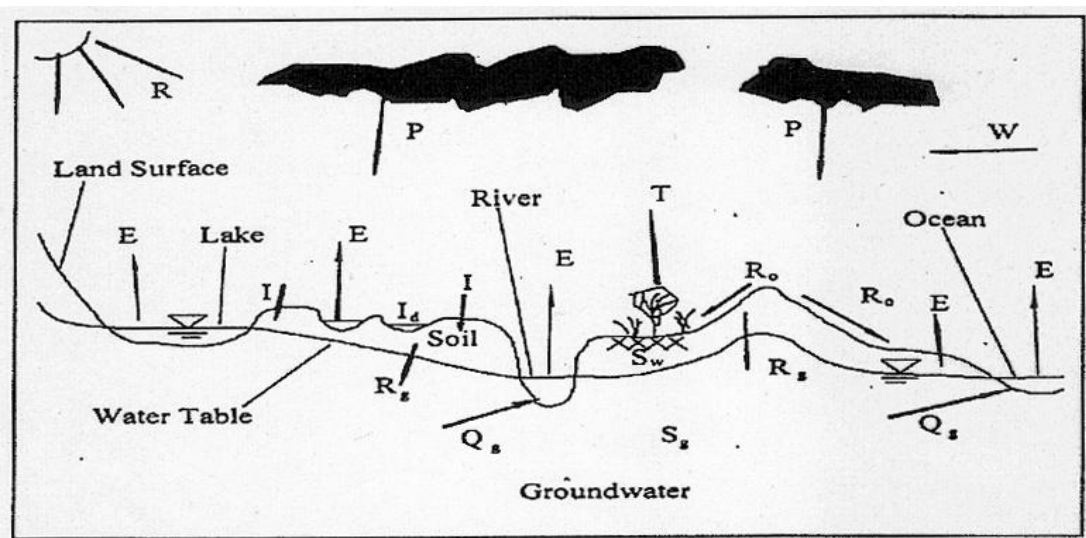
2 Cíl práce

Cílem této práce je vymezení faktorů, které ovlivňují tvorbu a velikost přímého odtoku vody z krajiny a následné vyhodnocení jejich vlivů., aplikací metody CN-křivek na povodí Kopaninského toku.

3 Literární rešerše

3.1 Oběh vody v přírodě

Veškerá voda na Zemi a v atmosféře, bez rozdílu skupenství, se nazývá hydrosféra. Podmínkou vyrovnaného stavu vody v přírodě je její oběh. Působením tepla se voda vypařuje a přechází do ovzduší jako vodní pára. Kondenzací vodních par v ovzduší vznikají srážky různých skupenství (déšť, rosa, kroupy, sníh), které spadnou zpět do oceánů, moří a na pevninu (Kvítek a kol., 2006). Po dopadu srážek na zemský povrch jsou srážky zadržovány pokrývným porostem úměrně mocnosti těchto částí a době trvání srážek. Významnou roli hrají také akumulací prostory povodí – povrchové mikrodeprese, mokřady, nádrže aj. Ta část srážek, která je zachycena na půdním povrchu a na hrabance, je nazývána povrchová akumulace (Krešl, 1999). Část vody se vypaří, část se vsákne do půdy a část oteče po povrchu. Určitý podíl vody vsáklé do půdy využije rostlinstvo, část vytváří podpovrchové vody a zbytek odtéká formou povrchové vody soustředěné v bystřinách, potocích a řekách zpět do moří, tím se oběh vody uzavírá (Kvítek a kol., 2006).



Obrázek 1 - Hydrologický cyklus (Serrano, 1997)

R – sluneční záření	I – infiltrace
E – evaporace	S _w – půdní vlhkost
T – transpirace	Q _s – podpovrchový odtok
W – rychlost větru	R _g – odtok do saturované zóny
P – srážky	S _g – rezervoár podzemní vody
I _n – intercepce	Q _g – odtok podzemní vody do řek, jezer a oceánů

Na obrázku č. 1 je zobrazen oběh vody v přírodě. Je umožněn slunečním zářením, zemskou gravitací, zemskou tepelnou energií a geochemickou energií. Rozlišujeme velký oběh vody, který je oběhem vláhly mezi pevninou a mořem a malý oběh, což je výměna vláhly jen nad plochami moří. Malý oběh vody probíhá rovněž nad tzv. bezodtokovými oblastmi, ze kterých voda do světového oceánu neodtéká. Množství vody v hydrosféře zůstává prakticky konstantní. Znamená to, že celkový výpar z oceánů, moří a pevniny je rovný objemu srážek spadlých na Zemi (Kvítek a kol., 2006) :

$$V_o = H_{so} + O_p,$$

$$V_p = H_{sp} - O_p,$$

$$V_p + V_o = H_{sp} + H_{so},$$

V_o ...výpar z oceánů a moří

V_p ...výpar z pevniny

H_{so} ...srážky spadlé na oceány a moře

H_{sp} ...srážky spadlé na pevninu

O_p ...odtok z pevniny

Množství vody v atmosféře, na povrchu země i v horninách je více méně konstantní. Voda, která tato množství tvoří, se pohybuje a přechází neustále z jednoho prostředí do druhého. Zdrojem její kinetické energie je sluneční záření, zemská gravitace, zemská tepelná energie a geochemická energie. Tyto energetické zdroje jsou příčinou neustálého hydrologického oběhu. Hydrologický oběh se skládá ze čtyř hlavních částí, a to z atmosférických srážek, povrchového odtoku, podzemního odtoku, infiltrace a vypařování spojené s transpirací, tj. předávání vody do atmosféry rostlinami. Transpirace je forma výparu z listů rostlin a stromů (Pačes, 1982). Závisí na rostlinných biologických procesech, lokalitě, půdní vlhkosti a také na meteorologických faktorech ovlivňujících výpar (SERRANO, 1997). Protože lze vypařování od transpirace obtížně odlišit, používá se sjednocujícího názvu evapotranspirace (Pačes, 1982).

3.2 Metoda hydrologické bilance

Hydrologická bilance představuje v podstatě porovnání atmosférických srážek, odtoku a změn zásob povrchových a podpovrchových vod v určitém území, nejčastěji v povodí některého toku. Jde o poměrně jednoduchou analytickou metodu, jejíž teoretická stránka je detailně propracována. V podstatě spočívá v řešení vztahu, který vyjadřuje kvantitativní rozdělení srážkové vody na jednotlivé složky hydrologické bilance a je dán základní rovnicí:

$$H_s + O_z + O_p + H_r = O'_p + H_e + O'_z + H'_r$$

H_s – voda ze srážek na ploše uvažovaného území

H_e – voda vypařená z plochy uvažovaného území

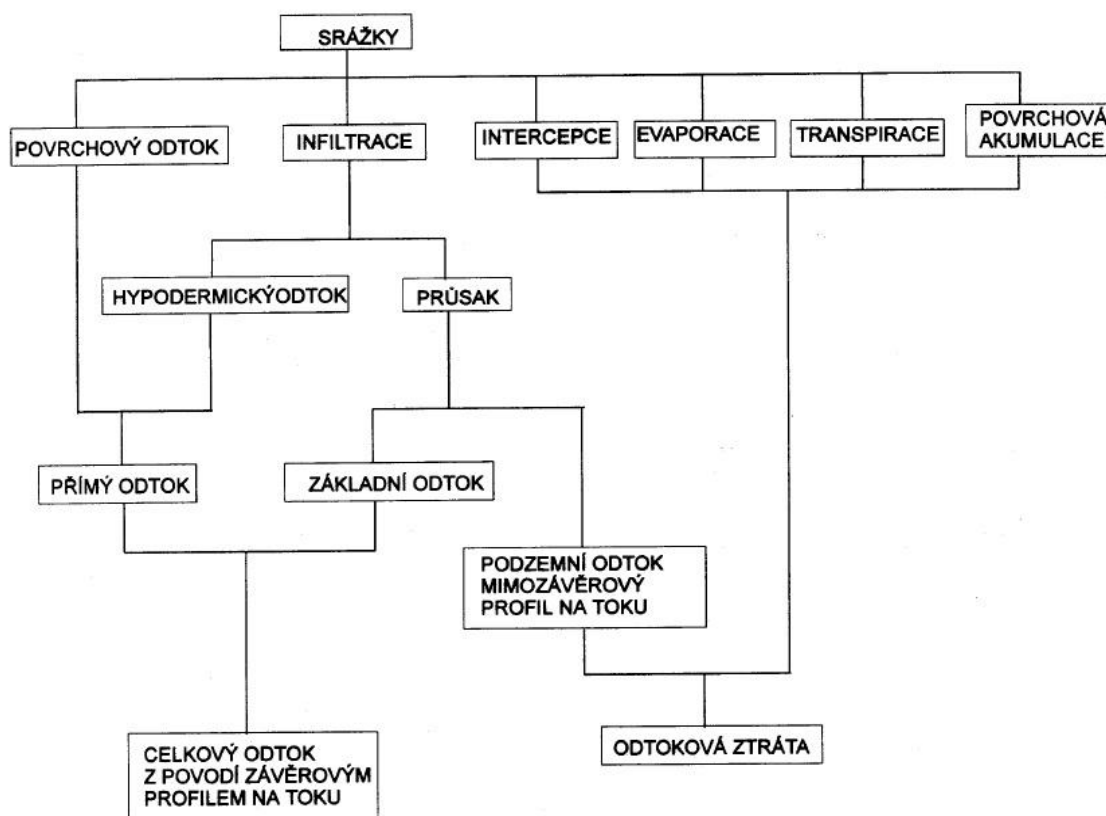
H_r, H'_r – zásoby povrchové a podpovrchové vody v území na začátku
a na konci uvažovaného období

O_p – přítok povrchové vody na území

O'_p – povrchový odtok z území

O_z – přítok podzemní vody do území

O'_z – podzemní (základní) odtok vody z území



Obrázek 2 - Schéma odtokového procesu (převzato z ČSN 73 6530 Názvosloví hydrologie)

Rozdělení atmosférických srážek spadlých na plochu určitého území je znázorněno na obrázku 2. Z tohoto schématu je patrné, že voda ze srážek v oblasti s humidním (vlhkým) podnebím se rozděluje na část, která odečte jako povrchový odtok, nebo se projeví zvětšením zásob povrchových vod v tocích, jezerech a umělých nádržích (Kříž, 1983). Srážky jsou výsledkem kondenzace nebo desublimace vodní páry v ovzduší, na povrchu půdy, předmětů a rostlin (Hrádek, Kuřík, 2002). Další část se vsákne do půdy a hornin a buďto odečte jako hypodermický odtok, anebo způsobuje zvýšení zásob podpovrchových vod. Při hydrologické bilanci se vychází ze základního předpokladu, že jediným zdrojem vody, která se zúčastňuje oběhu vody v přírodě, jsou srážky. Hydrologická bilance se převážně řeší na území vymezeném orografickou rozvodnicí, čili v povodí, znamená to, že v rámci hranic této územní jednotky není oběh vody mnohdy prostorově uzavřen, neboť dochází k výměně vody mezi ní a sousedními jednotkami. Jde o přirozenou výměnu vody, zejména podpovrchové, která je způsobena tím, že mezi geografickým a hydrogeologickým povodím jsou rozdíly dané geologickou stavbou

území a jeho tektonickými poměry. Kromě toho však může docházet i k umělému přivádění, či odvádění vody z povodí do povodí, nebo odběrem vody. Zatímco množství uměle přiváděné, nebo odváděné vody z povodí lze zpravidla do bilance zahrnout, rozsah přirozené výměny vody je možno obvykle stanovit pouze velmi přibližně.

Pouze v těch případech, kdy se hydrologická bilance řeší na území s uzavřeným oběhem podpovrchové vody, tj. zejména určité hydrogeologické struktury, je možno uvažovat výměnu vody pouze ve velikosti odpovídající infiltraci z toků, popřípadě i nádrží do horninového prostředí a naopak jeho odvodňování do těchto vodních útvarů. Spolehlivost výsledných hodnot, které se získávají výpočtem z bilanční rovnice, záleží především na přesnosti výchozích údajů. Menší chybou budou výsledky zatíženy tehdy, když se dosáhne větší přesnosti ve stanovení hodnot klimatických a hydrologických prvků, které se do rovnice dosazují (Kříž, 1983).

3.3 Odtok vody v přírodě

Odtok je množství vody, které odtéká z území. Celkový odtok je tvořen jednak povrchovým odtokem v řekách a potocích, jednak podpovrchovým odtokem. Povrchový odtok sestává ze srážek, které naprší do koryt řek a potoků a do vodních nádrží (Pačes, 1982). Nejprve stéká v tenké vrstvě, tzv. roně, poté ve stružkách, potocích a řekách. Takto vznikají přirozené vodní toky a bystřiny, charakterizované soustředěným odtokem v korytě o určitém přirozeném průřezu neboli profilu (Bumerl, 2003). Část celkového odtoku tvoří voda, která se infiltrovala do provzdušněného pásma a přitekla do vodoteče po méně propustných polohách uvnitř provzdušněného pásma a konečně je v povrchovém odtoku podíl podzemní vody, která se do vodoteče vcedila z nádrže podzemní vody (Pačes, 1982). Hlavní tok se svými přítoky tvoří říční soustavu, která odvádí vodu z určitého území, tzv. povodí. Systém říčních soustav tvoří říční síť krajiny (Bumerl, 2003).

Velikost odtoku závisí na intenzitě srážek, teplotě a délce jejich trvání, na propustnosti půdy a hornin, typu vegetace, sklonu svahů, zastavěnosti terénu, drenážních konstrukcích apod. (Pačes, 1982). Odtok je důležitý člen hydrologické bilance a bilance podzemních vod. Je to množství vody odtékající z povodí nebo jeho části po povrchu nebo pod povrchem. Vyjadřuje se jako objem odteklé vody za sledované časové období.

Odtok se začíná vytvářet spadnutím srážek. Z nich se část vypaří, část se spotřebuje rostlinami, část se infiltuje a obnovuje zásoby podzemní vody a část vytváří podzemní odtok (Melioris a kol., 1986).

Odtok vody z povodí se vyjadřuje jednoduchou bilanční rovnicí na obrázku číslo 3 můžeme vidět znázornění hydrologické bilance povodí:

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

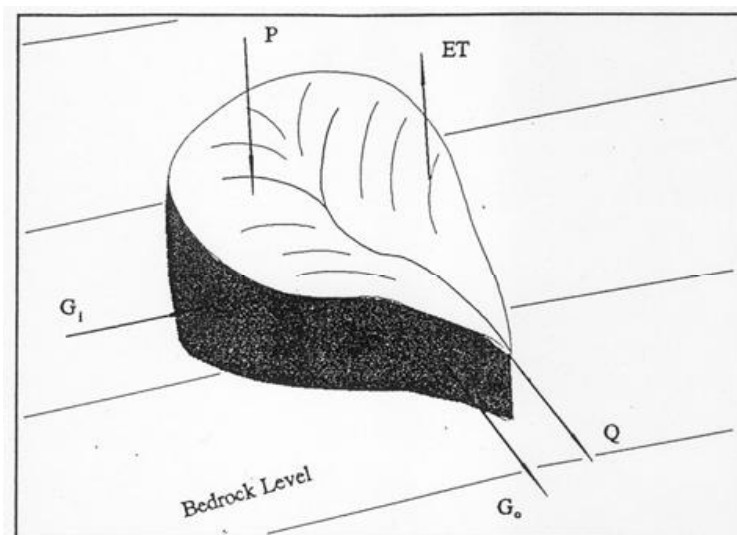
kde:

O - odtoková výška,

S - srážky,

E - evapotranspirace,

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



Obrázek 3 - Hydrologická bilance povodí (Serrano, 1997)

P - srážky

ET - evapotranspirace

Q - celkový odtok

G_i - přítok podzemní vody

ΔS - množství vody, které zvýšilo,

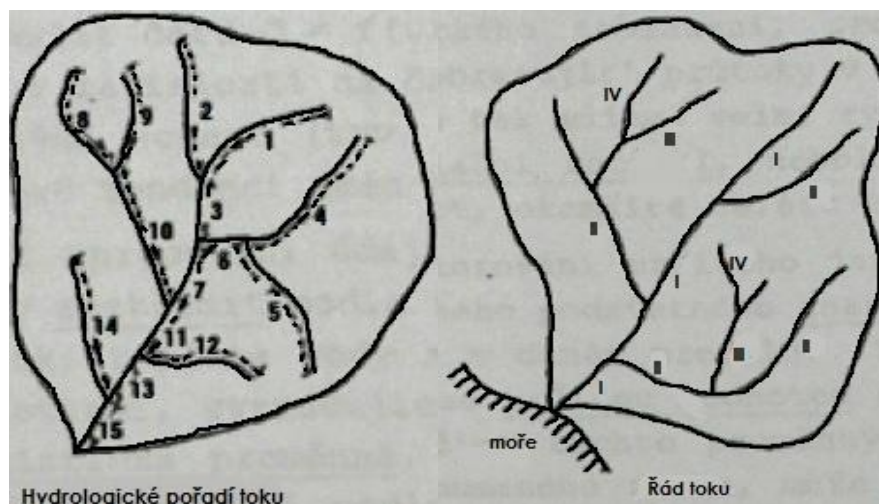
G_o - odtok podzemní vody

nebo snížilo zásoby povrchové a podzemní vody

3.4 Charakteristika vodních toků

V hydrologické části každého projektu významnějšího vodohospodářského díla je třeba kromě dat o srážkách, průtocích, teplotách, kvalitě vody apod. nutno uvést i výstižnou charakteristiku vodního toku, povodí a říční soustavy zájmového území. Počátek toku se nazývá pramen, může být soustředěný a nesoustředěný. V srážkově bohatém období roku se pramen posouvá blíže k rozvodnici. Pramenem často bývá ledovec, ledovcové nebo jiné jezero, bažina atd. Málokdy skutečným pramenem toku je individuální výron podzemní vody na povrch. Ústí toku je místo, kde se tok vlévá do jiného toku, jezera, moře atd. Přesněji je dáno průsečíkem střednice toku s vodorysem recipientu. V krasových nebo suchých oblastech se mnohdy tok ztrácí dříve, než dosáhne některého z recipientů. Délka toku je vzdálenost ústí toku od pramene měřeno po střednici toku. Ústí je považováno za počátek toku a je tedy km 0,00 (Bumerl, 2003).

Každému toku můžeme přiřadit jeho řád - je to číslo, udávající nutný počet postupných zaústění od moře. Hydrologické pořadí toku je řazení toků postupně od pramene po proudu, od toku nižšího řádu k vyššímu. Hlavní tok je tok nejvyššího řádu v daném povodí. Ten se svými přítoky tvoří říční soustavu (Kemel, 1996). Na obrázku 4 je k vidění hydrologické pořadí toku a řád toku:



Obrázek 4 - Hydrologické pořadí toku, řád toku (Kemel, 1996)

3.5 Složky odtoku a jejich geneze

Celkový odtok

Celkový odtok je hlavní odvod vody z povodí. Je tvořen několika složkami, povrchovým odtokem v potocích a řekách a také podpovrchovým odtokem (Pačes, 1982). Celkový odtok z povodí se dá charakterizovat jako objem vody, který odeteče z povodí za jednotku času (Chmelová, Frajer, 2011). Tvoří souhrn všech složek odtoku procházejícího závěrečným profilem toku za daný časový interval. Jeho hodnotu získáme měřením průtoku na jednotlivých profilech. Z celkového odtoku lze za pomoci separace hydrogramu vyčlenit: podzemní (základní) odtok a povrchový odtok (Hall, 1968).

Základní odtok

Základní odtok představuje část celkového odtoku z území k určitému profilu na povrchovém toku, který je tvořen dotací z podzemních vod. Je to část celkového odtoku vody, která se po skončení deště dostává do povrchových toků až po určité době a celkový odtok zásobuje i v období, kdy se v povodí srážky nevyskytují. Z této definice vyplývá, že představuje pouze část odvodnění z hydrogeologické struktury. Kromě základního odtoku jsou do procesu odvodnění zahrnuty i další složky, např. ztráty evapotranspirací, přetékaní přes hranice struktury, antropogenní vlivy (čerpání zdrojů podzemních vod) (Kessl, Kněžek, 2000).

Hypodermický odtok

Hypodermický odtok je odtok, který stéká do koryta toku, na níže položené území, v bezprostřední vrstvě pod povrchem povodí, aniž by dosáhl k hladině podzemní vody (Kříž, 1983).

Přímý odtok

Přímý odtok zahrnuje odtok povrchový a odtok hypodermický (Janeček a kol., 2012). Je to část celkového odtoku vody, která se do povrchových toků dostává už v průběhu trvání deště a bezprostředně po jeho skončení.

Přímý odtok je způsoben pouze nadbytkem vody v důsledku deště a je hlavní příčinou zvýšených průtoků, povodní, vodní eroze. Z praktických důvodů se za přímý odtok obvykle považuje jen povrchový odtok (Bumerl, 2003).

Podíly tohoto typu odtoku na celkovém odtoku se stanovují pomocí tzv. čísel odtokových křivek - CN. Čím větší hodnota CN, tím je pravděpodobnější, že se jedná o povrchový odtok. Odtok vody je obecně ovlivněn množstvím srážek, infiltrací vody do půdy, vlhkostí půdy, druhem vegetačního pokryvu, nepropustnými plochami a retencí povrchu (Janeček a kol., 2012).

Povrchový odtok

Voda povrchového odtoku odtéká nejprve plošně, záhy se však soustřeďuje především v přirozených terénních rýžkách, sníženinách a poté údolnicích (Vopravil a kol, 2010). Specifické podmínky pro vznik povrchového odtoku vznikají v období tání. Rychlost vsakování je minimální a kolísá u hlinitých a jílovitých půd mezi 0,01 a 1,0 mm.den⁻¹, protože půda je v zimě promrzlá a v povrchových vrstvách nasycená vodou. (Toman, Podhrázká, 2002). Zde se projeví největší škodlivost povrchového odtoku, která spočívá zejména v jeho erozní činnosti odnosu svrchní, a tedy nejúrodnější půdní vrstvy, bohaté na organické látky a živiny, popř. pesticidy, které jakkoli jsou potřebné na poli, jsou nežádoucí ve vodním prostředí. K předcházení tvorby povrchového odtoku by měla být dodržována protierozní opatření a zásady správné zemědělské praxe, jedná se hlavně o vyloučení pěstování širokořádkových plodin na svazích se sklonem 7° a vyšším (Vopravil a kol, 2010). Primárním zdrojem vody pro tento odtok je srážkový úhrn.

Odtok z překročení infiltrace – hortonovský. Vzniká v případě, že intenzita srážky přesahuje infiltrační kapacitu půdy. V současné době je známo, že povrchový odtok není univerzálně vyskytující se jev, a že se v mnoha případech nemusí vůbec objevit.

Odtok z překročení nasycení. Objevuje se na místech, kde je povrch předem nasycen (vývěr podpovrchového odtoku, zvýšená hladina podzemní vody), bez ohledu na intenzitu srážky (Žlábek, 2009).

Podpovrchový odtok

Podpovrchový odtok je tvořen odtokem podpovrchové vody z nenasycené a nasycené zóny půdního profilu. Nenasycená zóna půdního profilu, také zóna aerace, obsahuje kromě pórů vyplněných vodou i póry vyplněné vzduchem. Voda je v pórech držena tlakem, který je vyšší než atmosférický působící na hladinu podzemní vody. Nasycená zóna půdního profilu oproti nenasycené zóně obsahuje většinu pórů plně nasycených vodou (Pavlásek, 2010).

Podzemní odtok

Podzemní voda je významným článkem oběhu vody v přírodě a náleží mezi základní složky životního prostředí. Mimořádně důležitá je z hospodářského hlediska, neboť má většinou lepší fyzikální vlastnosti a chemické složení než voda povrchová, kterou lze získávat pro vodárenské účely z vodních toků nebo nádrží. Je tedy významným a někdy nenahraditelným zdrojem vody pro zásobování obyvatelstva (Říha, 1987). Jedná o vodu, která se prosakuje do půdního profilu. Tato voda si nachází cestu do potoků, řek, jezer, podzemních jezer a dalších přírodních recipientů (Brutsaert, 2005). Relativně pomalé rychlosti proudění podzemní vody a její dlouhá doba zdržení ve zvodních vytváří nepřetržitý odtok vody do vodních toků a vodních nádrží. Tento proces zajišťuje minimální výšky hladin ve vodních nádržích a minimální průtok ve vodních tocích v bezsrážkových obdobích (Serrano, 1997).

3.6 Rozdělení vody

3.6.1 Povrchová voda

Označují se tak všechny vody, které se vyskytují na zemském povrchu (Bumerl, 2003). Voda na zemském povrchu je jednak kontinentální, jednak mořská. Kontinentální voda se nachází na pevninách a zahrnujeme do ní ležící sníh a led ve formě ledovců a sněhových polí, dále vodu tekoucí, která tvoří přirozené vodní toky, umělé kanály a konečně vodní nádrže. Ty mohou být přirozené, jako jsou jezera a močály, umělé, jako jsou přehradní nádrže a rybníky. Mořská voda vyplňuje rozsáhlé prolákliny mezi pevninami a tvoří oceány (Pačes, 1982). Povrchová voda je odtékající, nebo zadržovaná v přirozených, nebo umělých nádržích na zemském povrchu.

Vzniká ze srážek, z výronů podzemních vod nebo tání ledovců. Převládajícím zdrojem povrchové vody v ČR jsou srážky (Bumerl, 2003). Povrchová voda neobsahuje pouze rozpuštěné látky, ale obvykle je v ní rozptýleno i velké množství suspendovaných částic různého původu a chemického složení, obsahuje rovněž mikroorganismy. Jsou to většinou bakterie, řasy a sinice, které mohou, ale nemusí být zdraví škodlivé a často ovlivňují chemické složení povrchových vod (Pačes, 1982).

Vodní útvar přijímající vodu z určitého povodí se nazývá vodní recipient. Vzniká buď přirozenou cestou, nebo uměle - zásahem člověka. Voda v recipientu je stojatá, nebo tekoucí.

Podle toho rozlišujeme:

1. Vody stojaté
 - a) přirozené (moře a oceány, jezera, mokřady, močály),
 - b) umělé (rybníky, přehradní nádrže).
2. Vody tekoucí
 - a) přirozené (potoky, bystřiny, řeky, veletoky),
 - b) umělé (kanály, průplavy).

Podle lokality se povrchové vody dělí na:

- povrchové vody kontinentální,
- vody mořské.

Na základě měření Mezinárodní hydrologické dekády (1965 - 1975) obsahuje světový oceán 1 338 000 km³ vody, tj. asi 96,5 % veškeré zásoby vody na Zemi (Bumerl, 2003).

3.6.2 Podpovrchová voda

Podpovrchové vody vznikají hlavně vsakováním (infiltrací) srážkové vody do půdy a částečně též srážením (kondenzací) odvdnušené vodní páry v půdě, a to v množství vymezeném pórovitostí půdy, tj. objemem průlin neboli pórů v přirozeně uložené půdní hmotě. Podle povahy půdního prostředí (zrnitosti, struktury, velikosti pórů, stupně provlhčenosti) se rozlišují různé druhy podpovrchových vod, charakteristické rozdílnou pevností vazby, pohyblivostí, použitelností aj. V podstatě se však rozlišují dva základní druhy, a to voda půdní a podzemní. Půdní voda je část půdy vsáklé srážkové vody, která je v půdním prostředí upoutána různými silami, takže nepodléhá účinkům zemské tíže a neprosakuje již do hlubších horizontů půdního profilu. Nejpevněji je poutána resp. vázána přímo v půdní hmotě (Zachar, Jůva, 1987).

3.6.3 Podzemní voda

Podzemní voda je nedílnou součástí koloběhu vody v přírodě (Kliner a kol., 1978). Představuje více než 98% objemu všech pevninských typů vod (kromě vody vázané v ledovcích). Je propojena s vodami povrchovými, přičemž dochází k oboustranné výměně (Hartman a kol., 1998). Voda podzemní je část podpovrchové vody vyplňující dutiny zvodněných hornin bez ohledu na to, zda vytváří nebo nevytváří souvislou hladinu. Podzemní voda se dále člení podle původu na vodu juvenilní, fosilní a vadózní (Tlapák a kol., 1992). Vody juvenilní představují pouze malou část podzemních vod, které vznikají kondenzací vnitrozemských par. Jsou zpravidla mineralizované a proplyněné a jako zdroje pro zásobení nevhodné (Kliner a kol., 1978). Juvenilní voda je podzemní voda uvolňující se z magmatu a poprvé vstupující do oběhu vody v přírodě (Pitter, 1999, Kříž, 1983).

Juvenilní podzemní voda se může dostat až na zemský povrch, především v oblastech s aktivní vulkanickou činností, zejména jako voda termálních pramenů

nebo gejzírů (Kříž, 1983). Fossilní voda je podzemní voda uchovaná v dutinách hornin z minulých geologických období a neúčastní se v průběhu delšího časového období oběhu vody v přírodě (Pitter, 1999). Bývá také označována jako hlubinná voda, protože se vyskytuje v hlubokých vrstvách hornin (Kříž, 1983). Vody vadózní, které označujeme jako podzemní vody mají původ v infiltraci atmosférických srážek, nebo prosakování vody z povrchových toků (Kliner a kol., 1978).

3.7 Faktory ovlivňující odtok vody z povodí

Odtok vody z povodí je ovlivněn celou řadou geografických činitelů. Patří sem fyzikálně-geometrické činitelé, geologické vlastnosti povodí, vegetační pokryv a říční síť. Geografické činitelé určují hydrodynamické vlastnosti povodí. Určují jakým způsobem se v čase a prostoru nerovnoměrná srážka dopadající na povodí postupně transformuje, až na časový průběh odtoku vody závěrovým profilem povodí. (Starý, 2005).

Mezi další fyzicko-geografické charakteristiky povodí můžeme zařadit poměry pedologické (zastoupení jednotlivých typů a druhů půd, náchylnosti k erozi, infiltračními vlastnostmi atd.), klimatické (srážkové, teplotní údaje, klimatické oblasti...) (Kravka a kol., 2009).

Dalším důležitým faktorem ovlivňující odtok vody z povodí je vliv lidské činnosti. Důležitým prvkem charakteristiky povodí, vypovídajícím o činnosti člověka se nazývá landuse. Podává informace o využití ploch v povodí, zda-li je v něm silně zastoupena orná půda, zastavěné plochy, nebo spíše lesy a pastviny. K stanovení výše zmíněných charakteristik můžeme využít mapových podkladů (geologické a pedologické mapy, Atlas podnebí ČR, základní topografické mapy, územní plány atd.), nebo dat naměřených přímo v terénu (meteorologická data, pedologické sondy, geologické vrty, terénní výzkum) (Pavelková, Frajer, 2013).

Faktor vegetačního krytu

Starý (2005) uvádí že, vzhledem k celkové složitosti působení vegetačního krytu jsou rozdílné názory na vliv vegetačního pokryvu na odtok. Půda zakrytá vegetací je odolnější proti erozi, a proto je takový kryt vodohospodářsky výhodný.

Tráva zdrsňuje povrch, zmenšuje proto rychlost odtoku a zvyšuje vsakování. Přijímá prosáklou vodou z půdy pro transpiraci a vrací ji do ovzduší.

Nejdůležitějším z vegetačních činitelů je les (Starý, 2005). Les výrazně podporuje zadržování vody v krajině a ovlivňuje množství a kvalitu povrchových i podzemních vod. To se zvláště projevuje u horských a lužních lesů. Ty také hrají hlavní roli v boji s vodní erozi a zadržování vody v krajině (Poštulka, 2007). Lesní porost je vyznačován vysokou infiltrací, která doplňuje zásoby podpovrchové vody (Bruijnzeel, 2004). Nesporný je vyrovnávací účinek lesního porostu na rozdělení odtoku, zejména na snížení velkých vod. Les poskytuje velmi důležitou ochranu půdy před erozí. Příznivé účinky jsou však podmíněny správnou skladbou a polohou lesa (Starý, 2005). Vodní rovnováhu narušuje i udržování jednodruhových stejnověkových porostů. Proto by se měly podporovat stanovištně vhodné dřeviny, dostatečně adaptované na konkrétní podmínky a odolné proti škůdcům a klimatickým faktorům. Z praxe rovněž vyplývá, že lesy s více druhy mají vyšší produkci. Pro tlumení záplavových vln při povodních odedávna sloužily lužní lesy podél větších řek (Poštulka, 2007). Nejlépe působí smíšený les, ve kterém je půda chráněna dobrým zapojením porostu a dostatečnou vrstvou porostu a dostatečnou vrstvou humusu. Nejlepší vsakovací účinek má porost dubový a lipový, střední účinek mají modřiny a břízy. Nejméně vody zadržují z dlouhotrvajících srážek smrkové porosty. Lesní hrabanka a humus pohlcují dešťovou vodu i tající sníh a chrání půdu před promrzáním, takže zlepšují jímací schopnost půdy pro vodu. Nejméně vhodný účinek na odtok má jednotný les smrkový a vůbec jehličnatý, který zatím v našich krajinách přetrvává. (Starý, 2005) Poštulka (2007) uvádí, že docházelo v minulém století k ústupu lužních lesů na úkor orné půdě. Povodně se tak snadno dostávají do měst a zanášejí domy bahnem z polí. Je třeba usilovat o zachování a obnovu zdravých lesů na místech, kde zadržují vodu a brání povodním. Na zadržování vody v lesích se podílí intercepce, vsak a kapacita lesní půdy, kvalita lesní půdy, stav lesních mokřadů a lesní vodní sítě (Poštulka, 2007).

Faktor plochy povodí

Kvítek a kol. (2011) definují povodí, jako území vztažené k určitému profilu na toku omezené rozvodnicí. Jednou z nejdůležitějších charakteristik povodí je jeho plocha. (Kvítek, 2006). Je udávána v km². Velikost povodí je výrazným činitelem,

který významně ovlivňuje základní hydrologické veličiny daného povodí, např. průměrný odtok, extrémní průtoky, specifické odtoky (Starý, 2005). Daňhelka (2007) uvádí, že pokud jde o plochu povodí, tak s rostoucí velikostí povodí obvykle roste hodnota kulminačního průtoku.

Faktor tvaru povodí

Tvar povodí určuje uspořádání říční sítě, ovlivňuje dobu, za kterou přichází voda z jednotlivých částí povodí do daného profilu toku a má vliv na extrémní charakteristiky odtoku (Němec, 1965). Tvar povodí při daném časovém a plošném rozdělení příčné srážky, rozhodujícím způsobem ovlivňuje tvorbu povodňových průtoků (Starý, 2005). Příznivější je stromovité uspořádání říční sítě, v němž nedochází k interferenci povodňové vlny z přítoků. Naopak pro vznik a vývoj povodňových vln s velkým kulminačním průtokem je nepříznivé zejména vějířovité uspořádání toků povodí (Daňhelka, 2007).

Faktor geologických charakteristik

Velmi důležitým faktorem je kromě jiného i geologická struktura (Delinom, 2009). Geologie ovlivňuje charakteristiky povodí a to především typ a mocnost půdy, sklon a tvar povodí. Vlastní geologické podmínky se uplatňují převážně ve smyslu rozložení propustných a nepropustných území (Daňhelka, 2007). Geologické podloží a jeho propustnost má význam pro utváření odtoku v období bezdeští. Ovšem nepropustné vrstvy s málo mocným půdním překryvem snižují celkovou retenční kapacitu povodí a spolupůsobí při prudkém stoupání průtoků při vydatných deštích. Z toho vyplývá, že geologické poměry povodí umožňující vznik velkých zásob podzemní vody (štěrky, pískovce) (Krešl, 2001). Objemy podzemních vod v samotném skalním podloží mohou být velmi významné (McGuire a kol., 2005). Hranice mezi geologickými jednotkami se ukázaly být důležité, jako zóny interakce podzemních vod a vod povrchových (Arnott a kol., 2009).

Faktor zeměpisné polohy povodí

Zeměpisná plocha povodí je dána zeměpisnými souřadnicemi, mezi kterými se povodí nalézá. Je značný rozdíl mezi tím, zda povodí leží v subartkrických oblastech, v mírném pásmu nebo subtropích, apod. Rozdíl je rovněž v tom, zda povodí leží v nížinách, nebo je horským povodím (Starý, 2005).

Faktor průměrné nadmořské výšky povodí

Průměrná nadmořská výška povodí se určí z hypsometrické čáry, což je grafické znázornění vztahu mezi nadmořskou výškou a plochou území, ležícího v příslušné nadmořské výšce. Průměrná nadmořská výška nám společně se zeměpisnou polohou povodí implicitně určuje klimatické a meteorologické charakteristiky povodí, jako teplotu vzduchu, srážkové úhrny, vlhkost vzduchu, výpar , sluneční záření (Starý, 2005).

Faktor reliéfu

Reliéf terénu ovlivňuje odtok srážkových vod. Například větší sklon nám urychlí odtok srážek, a možnost infiltrace (vsaku) je menší (Beven, 2001). Vliv reliéfu je dán sklonitostními poměry na povodí. Čím je sklon území větší, tím jsou rychlosti odtoku větší a možnost vsaku vod do terénu menší. Tam, kde je reliéf plošší, voda zůstává po určitou dobu v prohlubních a může se tak výrazněji uplatnit výpar (Kemel, 1996).

V území tvořeném rovinami akumulárního rázu, pánvemi, kotlinami a plochými pahorkatinami, v nichž převládá rovný až mírně zvlněný povrch s menší výškovou členitostí, mohou být příznivější podmínky pro vsak srážkových vod, než v členitých pahorkatinách, vrchovinách a zejména hornatinách, kde naopak bývá zpravidla vyšší povrchový odtok vody (Kříž, 1983). Každý reliéf lze rozložit na základní geometrické plochy, jejichž vývoj je zpravidla výsledkem jednoho pochodu. Takové plochy v geomorfologii nazýváme geneticky stejnorodé plochy. Tyto jednotkové plochy mohou mít různý vzhled, sklon, orientaci vůči světovým stranám a různou expozici (Sklenička, 2003).

Faktor odvodnění

Velmi výrazným prvkem vyskytujícím se v zemědělsky využívané krajině České republiky je přítomnost drenážních systémů. Plochy v České republice odvodněné drenáží jsou uváděné Zemědělskou vodohospodářskou správou k 1. 1. 1995, na 1 064 999 ha (Kulhavý a kol., 2007). Jelikož systémy odvodnění zemědělské půdy byly navrhovány hlavně pro odvod vody z půdního profilu, která je přebytečná, tak postrádají, až na výjimku, složku retardace odtoku. U těchto systémů je nejdůležitější funkce odvodnění, kterou je třeba zachovat (Eichler a kol., 2000). Určitou změnu v případě dříve navržených systémů představuje i nárůst výkonnosti nových pěstovaných odrůd (Soukup a kol., 2001). Systémy odvodnění zemědělské půdy postrádají, až na výjimky, složku retardace odtoku, neboť byly navrhovány především pro zajištění odvodu přebytečné vody z půdního profilu. Funkce odvodnění je u těchto systémů nejdůležitější a je třeba ji zachovat, pokud odpovídá požadavkům zemědělské výroby, respektive požadavkům hlavních zemědělských plodin (Eichler a kol., 2000).

Změny ve využití pozemků, které v ČR nastaly během 90. let 20. století, způsobily, že návrhové parametry některých staveb odvodnění nebo jejich dílčích částí, již neodpovídají současným podmínkám. Platí to např. v případě, že pozemek byl odvodněn pro plodiny pěstované na orné půdě a je nyní využíván jako louka (Soukup a kol., 2001).

Faktor klimatu

Rozhodujícím činitelem ovlivňujícím charakter říčního režimu toku je klima (Kemel, 1996). Hlavními klimatickými faktory jsou srážky a výpar (Philip a kol., 1988).

Němec (1965) uvádí, že při dešťových srážkách v teplém období je odtokový součinitel nižší, jelikož v létě je větší výpar a voda se může lépe vsakovat, zatímco v zimě je tomu naopak.

Při vyšších letních teplotách a tím i zvýšené evapotranspiraci, dochází ke zvýšení konvekčních srážek. Pravděpodobné změny klimatu, které mají vliv na většinu světa, zahrnují některé kombinace zvyšování teplot se snížením nebo zvýšením srážek na změnu klimatu, která závisí na velikosti, teplotě a změně srážek (Price, 2011). Easterling a kol. (2000) prokázal, že srážky jsou výsledkem nárůstu

extrémních, vysoce intenzivních srážkových událostí. Změna klimatu, jak uvádí Ma a kol. (2009), může být spojena s intenzitou srážek a s hydrologickým oběhem, který by mohl být zhoršený v důsledku změny ve využívání půdy nebo z důvodu zhutnění půdy a následné větší nepropustnosti povrchu. Lins a Slack (2005) uvádí, že změna klimatu a hydrologické odezvy vykazují značnou proměnlivost.

Faktor antropogenní

Urbanizace zahrnuje širokou škálu vlivů ovlivňujících odtok (Doyle a kol., 2000). Antropogenní vlivy na povodí zahrnují rozsáhlé a drastické reorganizace povrchových a podpovrchových cest. Vlivem urbanizace voda rychleji odtéká z povodí a to je příčinou snížení hydraulického odporu zemského povrchu, v důsledku nepropustného pokrytí povrchu půdy, zhutnění půdy a výskytem podpovrchových dešťových kanalizačních sítí. Předpoklady, že v důsledku urbanizace klesá odtok vody z povodí, jsou obecně založeny na sníženém přítoku podzemní vody v důsledku zvýšené nepropustnosti povrchu, který je skutečně dominantním faktorem v městské hydrologii. Nepropustné pokrytí povrchu ve městech výrazně převyšuje plochy s různým využitím půdy. Silniční sítě, parkoviště, střechy, atd., to vše přispívá k procentnímu zvýšení nepropustného povrchu (Carter, Jackson, 2007). Nepropustné pokrytí má podle Landersa a kol. (2007) bezpochyby obrovský vliv na městskou hydrologii.

Tvoří odolný kryt, který má zvláště negativní dopad na množství a kvalitu odtoku. Jůva (1957) na závěr uvádí, že na utváření odtoku mají vliv také činnosti, které jsou charakterizované užíváním, hnojením, obděláváním zemědělské půdy, volbou osevních postupů a polohovým umístěním kultur.

3.8 Metody separace přímého odtoku

3.8.1 Metody separace hydrogramu

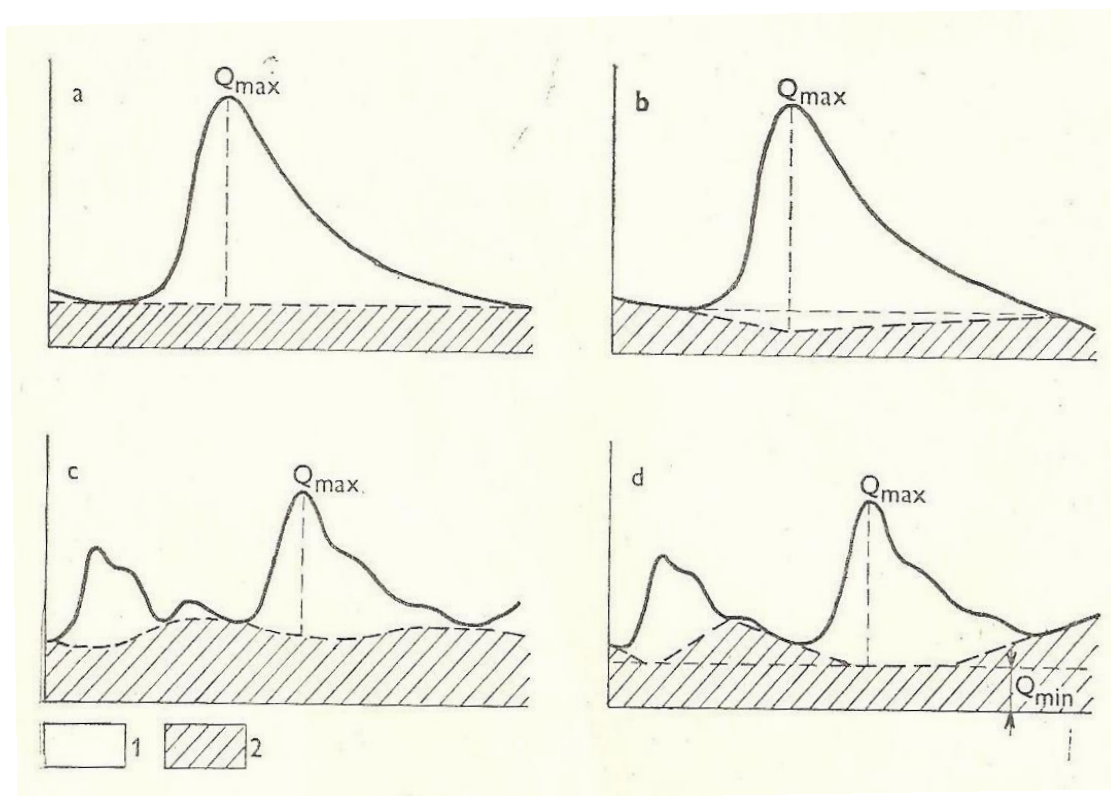
Kliner a kol. (1978) uvádí, že výchozím předpokladem metod separace přímého odtoku je, že průtok v určitém profilu toku tvoří v určitém časovém úseku z hlediska původu vody tyto složky:

povrchový odtok (ron) - část srážkové vody, která se nevypařila a nevsákla, ale odtéká po povrchu terénu

hypodermický odtok – voda, která stéká do koryta toku ve vrstvě bezprostředně pod povrchem a nedosáhne souvislou hladinu podzemní vody

základní odtok (odtok z pásma nasycení) – přirozený přítok z podzemních vod

Poměr těchto tří složek odtoku je plošně i časově proměnlivý. Zvláště pro větší bilancované celky je obtížné rozlišit hypodermický a povrchový odtok. Proto se z hydrogramu obvykle vyčleňuje jen odtok přímý, který je součtem povrchového a hypodermického odtoku. Nevýhodou všech metod je jejich značná pracnost a subjektivita při vyhodnocování (Kadlecová a kol. 2007). Existuje několik způsobů separace hydrogramu, nejjednodušším způsobem je jeho rozdělení vodorovnou čarou, probíhající počátkem průtokové vlny, za který je možno považovat okamžik, kdy dochází k výraznému zvětšování průtoků. Vzhledem k tomu, že tento postup nejméně vyhovuje z hlediska stanovení základní složky odtoku, byly vypracovány jiné metody. Metoda separace složek hydrogramu pro vyčlenění podzemního odtoku jsou založené na empirickém určení bodu ukončení povrchového odtoku. Aby se mohl tento bod na čáře průtoků resp. na čáře vyčerpávání určit, musí se vykonat její analýza (Melioris, 1986). Jde např. o určení hranice mezi základním a přímým odtokem v podobě čáry spojující měsíční minimální průtoky, v podobě různě lomené přímky, která do jisté míry přihlíží i ke tvaru průtokové vlny, tj. přechodného zvětšení a následného poklesu průtoků, avšak s tím rozdílem, že dělicí linie má zpravidla obrácený průběh, než tato vlna. Znamená to, že obvykle v době nejvyššího přímého odtoku je základní odtok relativně nejnižší (Kříž, 1983). Na obrázku č. 5 jsou zobrazeny různé způsoby rozčleňování hydrogramu.



Obrázek 5 - Různé způsoby rozčleňování hydrogramu na přímý a základní (podzemní) odtok
1 - přímý odtok, 2 - základní odtok (Kříž, 1983)

3.8.2 Metoda MGPM (modifikovaná graficko-početní metoda)

Tuto metodu vypracoval Kulhavý a kol. (2001). Vznikla z potřeby rozčlenit dlouhodobé datové řady středních denních průtoků na složky základního a přímého odtoku při nedostatku doplňujících měření, obvykle k účelům využívaných (údajích o hladinách podzemních vod, o vlhkosti půdy, srážkových poměrech apod.), s plánovanou budoucí aplikací na data drenážních odtoků. Stejně jako u předchozí popisované metody jde o rozčlenění hydrogramu podle zásady, že každá zřetelná odtoková vlna má příčinu v určité srážkové epizodě, přičemž ovšem dílčí příčinné deště na sebe mohou libovolně navazovat. Úkolem algoritmu je separovat tu část odtoku, která je přímou odezvou na příčinnou srážku (efektivní dešť). Vychází se z toho, že základní odtok má mít plynulý průběh a má kolísat jen pozvolna, v závislosti na vývoji dlouhodobé hydrologické bilance povodí (resp. drenážní skupiny). Může být maximálně roven celkovému odtoku v závěrovém profilu. Algoritmus MGPM je zpracován ve Visual Basicu jako extenze tabulky Excelu (Kulhavý a kol, 2001).

3.8.3 Metoda GROUND

Metoda GROUND ("separation of GROUND water runoff") byla vypracována Doležalem a Jainem (1997). Vznikla z potřeby urychleně a přibližně separovat přímý a základní odtok z malého povodí z datové řady středních denních průtoků v závěrovém profilu. Je to metoda empirická, odladěná tak, aby separované hydrogramy středních denních odtoků z povodí o ploše řádu 1 km² vypadaly věrohodně, jsou-li posuzovány pouhým okem. Začátek vyhodnocovaného období by měl připadnout do málo vodného období, kdy průtok nekolísá. Metoda obsahuje jediný proměnlivý vstupní parametr, koeficient přírůstku základního odtoku COEF. Empiricky odladěná hodnota COEF pro povodí řádu 1 km² je 0.075. Vnitřními parametry, nepočítáme-li pomocné proměnné, jsou přírůstek základního odtoku DIFF a logická proměnná FLOOD. Vstupem je řada středních denních nebo v jiném konstantním časovém kroku průměrovaných průtoků nebo odtoků. Výstupem jsou dvě řady středních denních nebo obdobných průtoků představujících v pořadí přímý a základní odtok z povodí. Součet přímého a základního odtoku v každém časovém intervalu je roven celkovému odtoku (Jain, 1997).

3.8.4 Metoda digitálních filtrů

Lyne a Hollick (1979) byli pravděpodobně první, kdo navrhl použití digitální filtrace k rozdělení odtoku na dvě složky, rychlý a zpožděný odtok. Byla zde myšlenka aplikovat postupy používané v elektrotechnice pro separaci signálů rozdílné frekvence na časové řady průtoků ve vodočetných stanicích. V pozadí stála představa, že časový průběh základního odtoku je vlastně záznam signálu o nízké frekvenci a naopak průběh povrchového a podpovrchového odtoku je signálem o vyšší frekvenci.

U metody digitálního filtru je nutné odhadnout velikost koeficientu pomocí použití jiné metody (např. analýza rozčlenění hydrogramu), nebo použít již vyzkoušenou hodnotu koeficientu pro dané podmínky povodí (Pavlík, 2014).

3.9 Metoda CN - křivek

Metoda CN - křivek určuje objem přímého odtoku na základě předpokladu, že poměr objemu odtoku k úhrnu přívalové srážky se rovná poměru objemu vody, zadržené při odtoku k potenciálnímu objemu, který může být zadrženo. Odtok začíná po počáteční ztrátě, která je součtem intercepce, infiltrace a povrchové retardace (Janeček a kol., 2012). Tato metoda je využívána pro výpočet odtokové ztráty v každém pixelu povodí a je v hydrologické praxi nejznámější a často používána. Metoda CN-křivek byla vypracována Soil Conservation Service (SCS) v USA a pro naše poměry úspěšně adaptována (Janeček, 1992). Metoda umožňuje stanovení objemu „přímého odtoku“ a kulminačního průtoku na zemědělsky a lesnicky využívaných povodích i na povodích urbanizovaných, do velikosti plochy povodí cca 10 km². Účelem metody je kvantitativní ohodnocení hydrologických funkcí krajinných složek. Metoda ve svém řešení zohledňuje závislost retence povodí na hydrologických vlastnostech půd, počátečním stavu nasycenosti půd a způsobu využívání půd a hydrologických podmínkách. Odtok je především určen množstvím srážek, infiltrací vody do půdy, vlhkostí půdy, porostem, nepropustnými plochami a retencí povrchu. Základním vstupem metody CN – křivek je srážkový úhrn o určitém časovém rozdělení, za předpokladu jeho stejnoměrného rozdělení po ploše povodí. Objem srážek je přeměněn na objem odtoku pomocí čísel odtokových křivek. Jejich hodnoty jsou závislé na hydrologických vlastnostech půd, vegetačním pokryvu, velikosti nepropustných ploch, intercepce a povrchové akumulaci (Pavelková a Frajer, 2013). Hodnoty CN se nedají použít v části roku, kdy je odtok tvořen tajícím sněhem. CN je současně i ukazatelem pravděpodobnosti typu odtoku: čím větší číslo CN, tím je pravděpodobnější, že se přímý odtok týká povrchového odtoku (Krešl, 2001). Na obrázku č. 6 je znázorněna závislost výšky přímého odtoku na úhrnu deště a čísel odtokových křivek (CN).

Janeček a kol. (2012) uvádí základní vztah pro určení výšky přímého odtoku:

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

Kde: H_oje přímý odtok(mm)

H_súhrn návrhového deště (mm)

Apotenciální retence (mm), vyjádřená pomocí čísel odtokových křivek (CN)

Potenciální retenci určujeme ze vztahu:

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

Objem přímého odtoku O_{pH} odtoku je dán vztahem

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

Kde: P_p je plocha povodí (km²)

H_oje přímý odtok(mm)

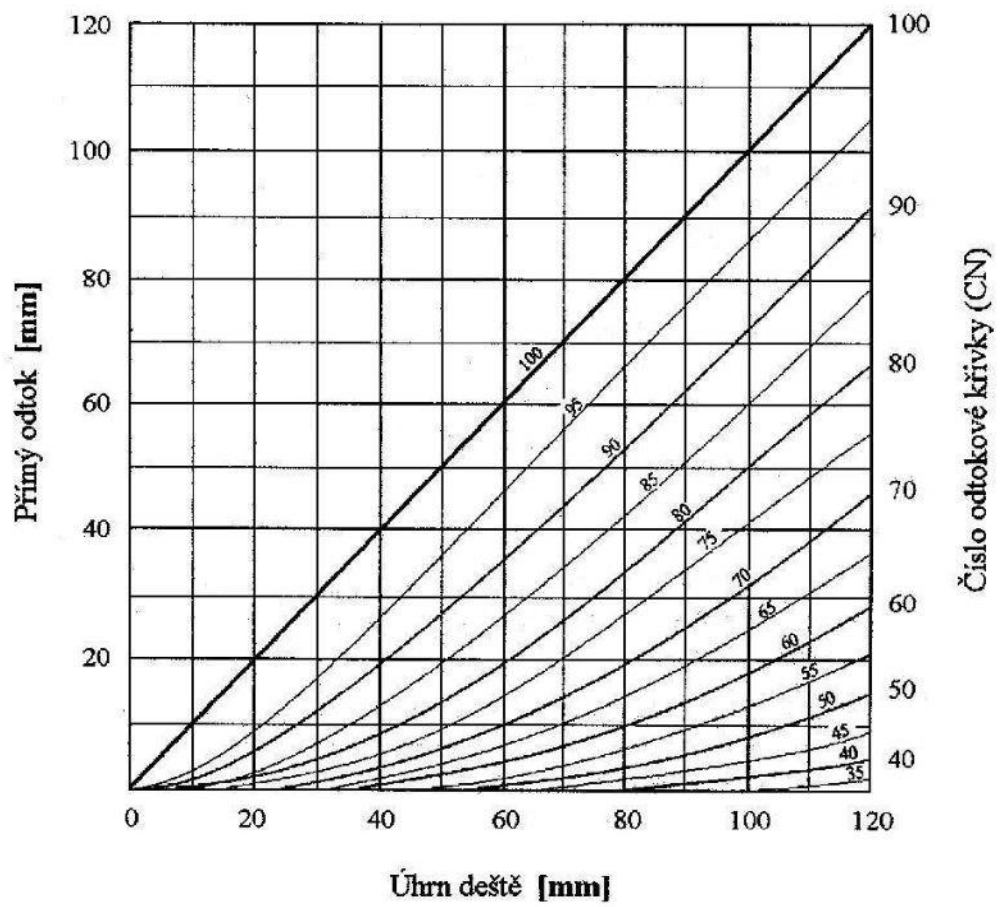
Návrhový dešť

O hodnotu úhrnu návrhového deště pro vyšetřovanou lokalitu je nutné požádat ČHMÚ. Rámcově lze použít hodnoty úhrnu maximálních 24 - hodinových srážek s návrhovou četností výskytu pro nejbližší stanici ČHMÚ nebo dle Šamaje, Valoviče, Brázdila: Hydrologické výpočty v protierozní ochraně půdy.

Čísla odtokových křivek

Čísla odtokových křivek (CN) jsou určena podle:

- hydrologické vlastnosti půd rozdělených do skupin -A, B, C, D, na základě minimálních rychlostí infiltrace vody do půdy bez pokryvu po dlouhodobém sycení.
- vlhkosti půdy určované na základě 5-ti denního úhrnu předcházejících srážek, resp. indexu předchozích srážek (IPS) ve 3 stupních, kdy IPS I odpovídá takovému minimálnímu obsahu vody v půdě, který ještě umožňuje uspokojivou orbu a obdělávání, při IPS III je půda přesycena vodou z předcházejících dešťů. Pro návrhové účely se uvažuje IPS II pro střední nasycení půdy vodou
- využití půdy, vegetačního pokryvu, způsobu obdělávání a uplatnění protierozních opatření

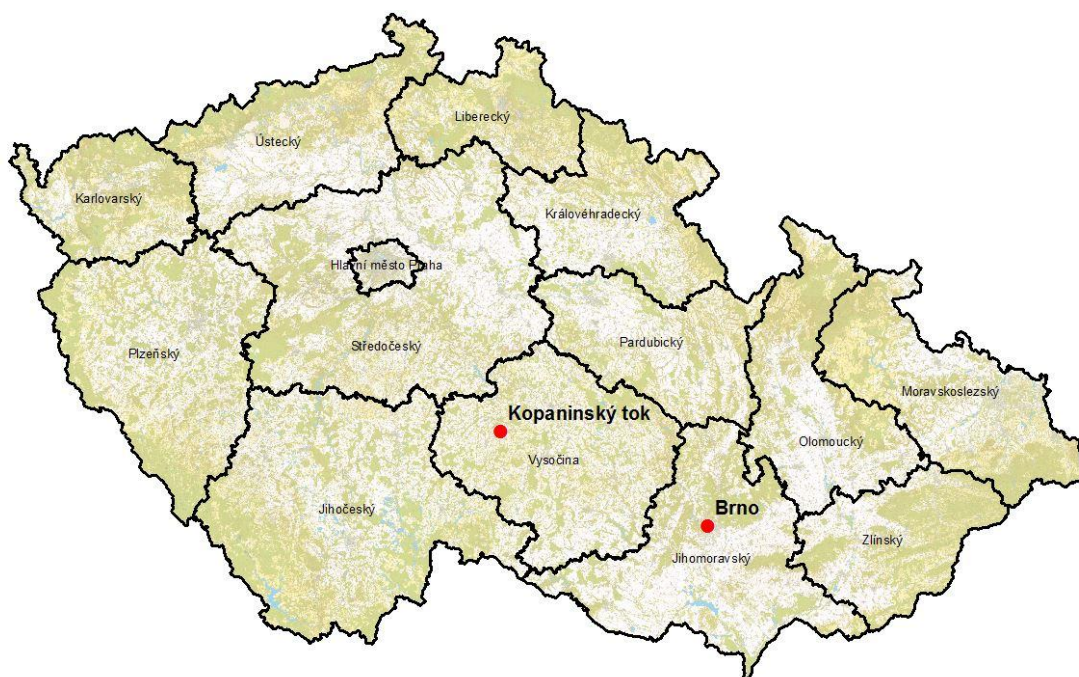


Obrázek 6 - Závislost výšky přímého odtoku (H_o) na úhrnu deště (H_S) a číslech odtokových křivek (CN)

4 Materiál

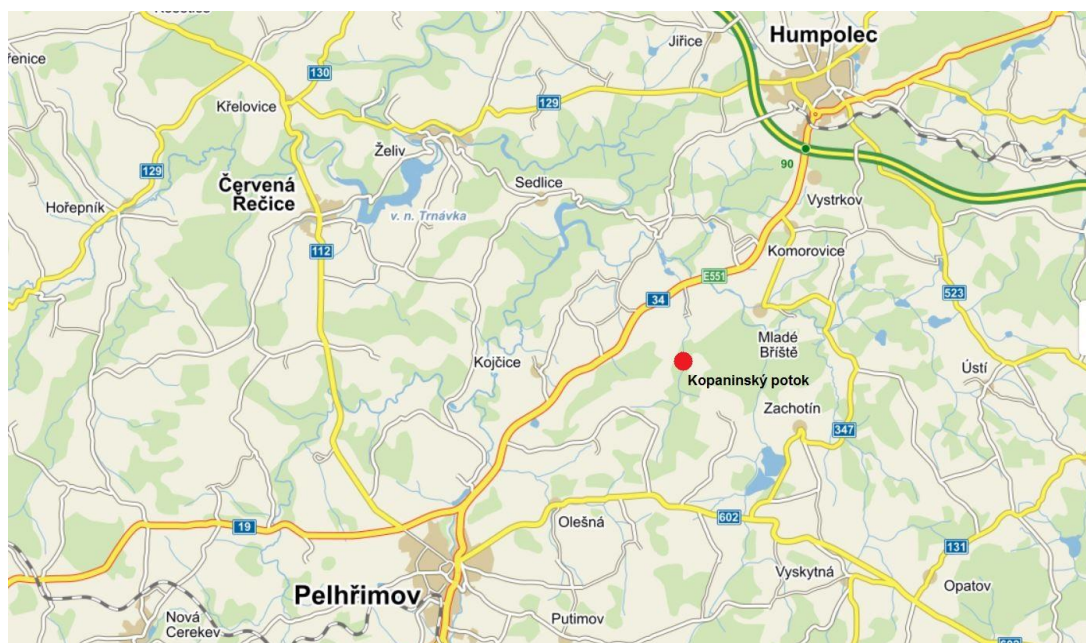
Vypracování této diplomové práce bylo zaměřeno na povodí Kopaninského potoka. Pokusné plochy v povodí Kopaninského toku byly založeny v roce 1985, původně pro výzkum regulační drenáže na lučních stanovištích v dolní části povodí pod obcí Velký Rybník. Od r. 1992 je zde systematicky sledována kvalita vody nejen v hlavním toku, ale na také na cca 17 přítocích (potocích, drenážích, pramenech). Díky tomu je možno rozlišit funkci jednotlivých lokalit a jejich podíl na odnosu dusíku. Zvláštní význam je přikládán infiltračním oblastem povodí. Na tomto povodí jsou standardně měřeny srážky, průtok, teplota vody a vzduchu, výpar, výška a objemová hmotnost sněhu. Dále je zde měřena radiace, vlhkost vzduchu, rychlost a směr větru, kvalita vody a hladina podzemní vody (Doležal a kol., 2006).

Povodí Kopaninského toku se nachází v kraji Vysočina, okrese Pelhřimov, vzdálené zhruba 11 kilometrů od města Pelhřimov, znázorněné pro orientaci na obrázku č. 7 a č. 8. Zeměpisné souřadnice toku jsou $49^{\circ} 28'$ s. š. a $15^{\circ} 17'$ v. d.. Nadmořská výška Kopaninského potoka je u pramene 523 m.n.m., a 463 m.n.m. v místě ústí toku do Jankovského potoka. Číslo hydrologického pořadí je 1-09-02-03. Kopaninské povodí je svojí polohou v terénu klasifikováno jako vnořené povodí Jankovského toku.



Obrázek 7 - Orientační poloha Kopaninského toku

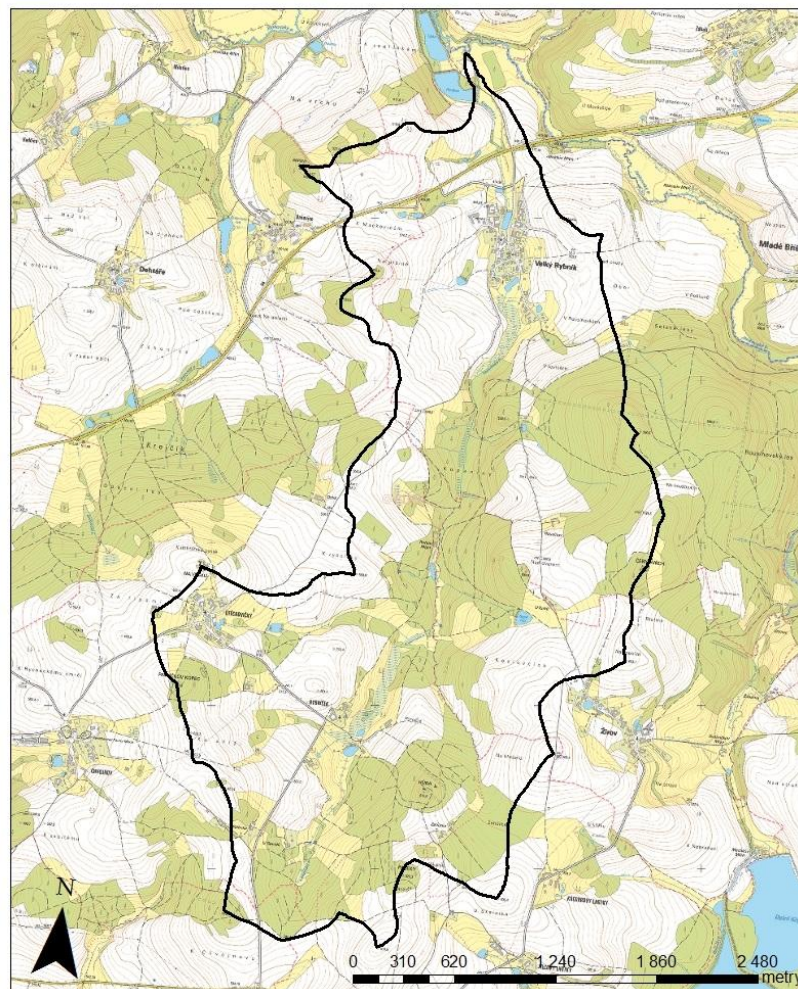
Kopaninský potok je levostraným přítokem Jankovského potoka, který se dále vlévá do řeky Želivky, která doplňuje zásoby vody ve vodní nádrži Švihov. Želivka se dále vlévá do řeky Sázavy a dále do Vltavy a Labe. Délka Kopaninského potoka je 6,5 km, jeho rozloha činí 8,73 km², dle výpočtu provedeného v programu ArcMap. Sklon povodí je 2,6% a průměrná nadmořská výška povodí je 523 m.n.m. Tyto charakteristiky jsou shrnuty v následující tabulce číslo č. 1 od Doležala a kol. (2002). Na obrázku č. 9 je znázorněna rozvodnice toku.



Obrázek 8 - Vyznačení toku na serveru www.mapy.cz

Tabulka 1 - Základní charakteristika Kopaninského potoka

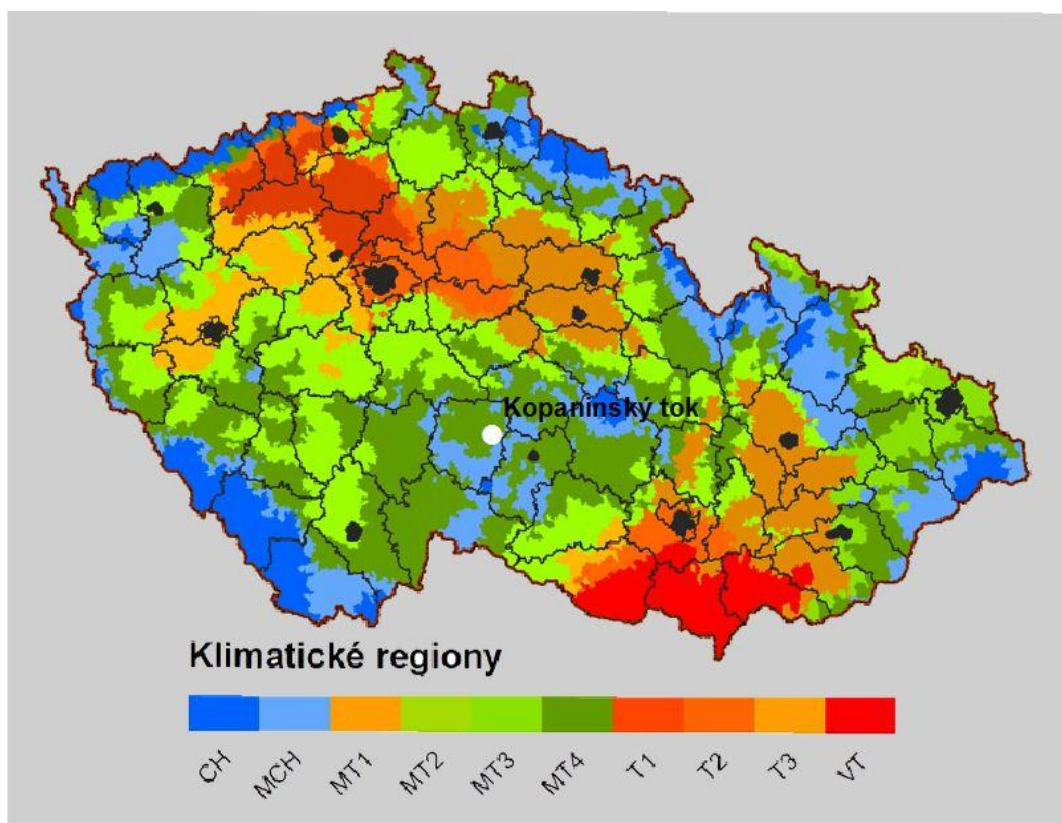
Název povodí	Kopaninský potok
Měřeno od roku	1985
Nadm.výška (m.n.m.): min - max (průměr)	467-578 (523)
Hydrologické pořadí	1-09-02-031
Nadřazené vodní toky	Želivka, Sázava, Vltava, Labe
Prům. roční teplota vzduchu (°C)	7,0
Srážkový úhrn roční prům. (mm)	665



Obrázek 9 - Rozvodnice Kopaninského potoka

Klima

Povodí Kopaninského potoka se nachází z klimatického hlediska v oblasti označené MT4 v klimatickém regionu 7, jak můžeme pro představu vidět na obrázku č. 10. Označení MT4 definuje tuto oblast jako mírně teplou a mírně vlhkou. Klimatické charakteristiky pro oblast MT4 dle Quita (1975) jsou uvedeny v následující tabulce č. 2.



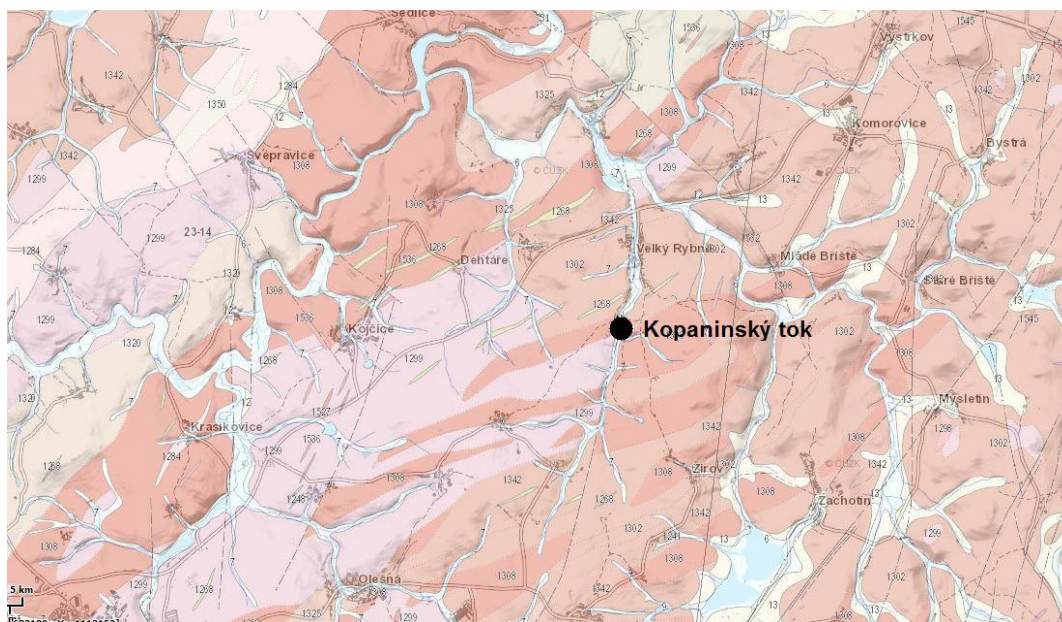
Obrázek 10 - Klimatické regiony s vyznačením Kopaninského toku (zdroj: www.migesp.cz)

Tabulka 2 - Klimatické charakteristiky Kopaninského toku

Klimatické charakteristiky	MT4
Počet letních dnů	20-30
Počet dnů s průměrnou teplotou 10°C a více	120-140
Počet mrazových dnů	110-130
Počet lednových dnů	40-50
Průměrná teplota v lednu (°C)	-2 - -3
Průměrná teplota v dubnu (°C)	6-7
Průměrná teplota v červenci (°C)	16-17
Průměrná teplota v říjnu (°C)	6-7
Průměrný počet dnů se srážkami 1 mm a více (mm)	110-120
Srážkový úhrn v vegetačním období (mm)	350-450
Srážkový úhrn v zimním období (mm)	250-300
Počet dnů se sněhovou pokrývkou	60-100
Počet dnů zamračených	120-150
Počet dnů jasných	40-50

Geologie

Povodí Kopaninského potoka náleží do oblasti, která je součástí nejstarší strukturní jednotky Českého masivu, tedy moldanubika (Váňa a kol., 2001). Geologický podklad je tvořen pararulou. Na obrázku č. 11 je zobrazení geologických poměrů v povodí.



Obrázek 11 - Zobrazení geologických poměrů (www.geology.cz)

Geomorfologie

Z geomorfologického hlediska se území Kopaninského potoka nachází v hercynském systému, v provincii Česká vysočina, subprovincii Česko-moravské soustava a oblasti Českomoravské vrchoviny. Dle Demka (1965) je další členění této oblasti na Křemešnickou vrchovinu, podcelku Želivská pahorkatina, okrsku Hořepnická pahorkatina.

Hořepnická pahorkatina je plochou pahorkatinou se zarovnaným povrchem rozřezaným neckovitými údolními vodních toků tvořená rulami a křemenci s vystupujícími křemencovými suky. Území náleží k erozně denudačnímu typu reliéfu (Demek, 1965).

Pedologie

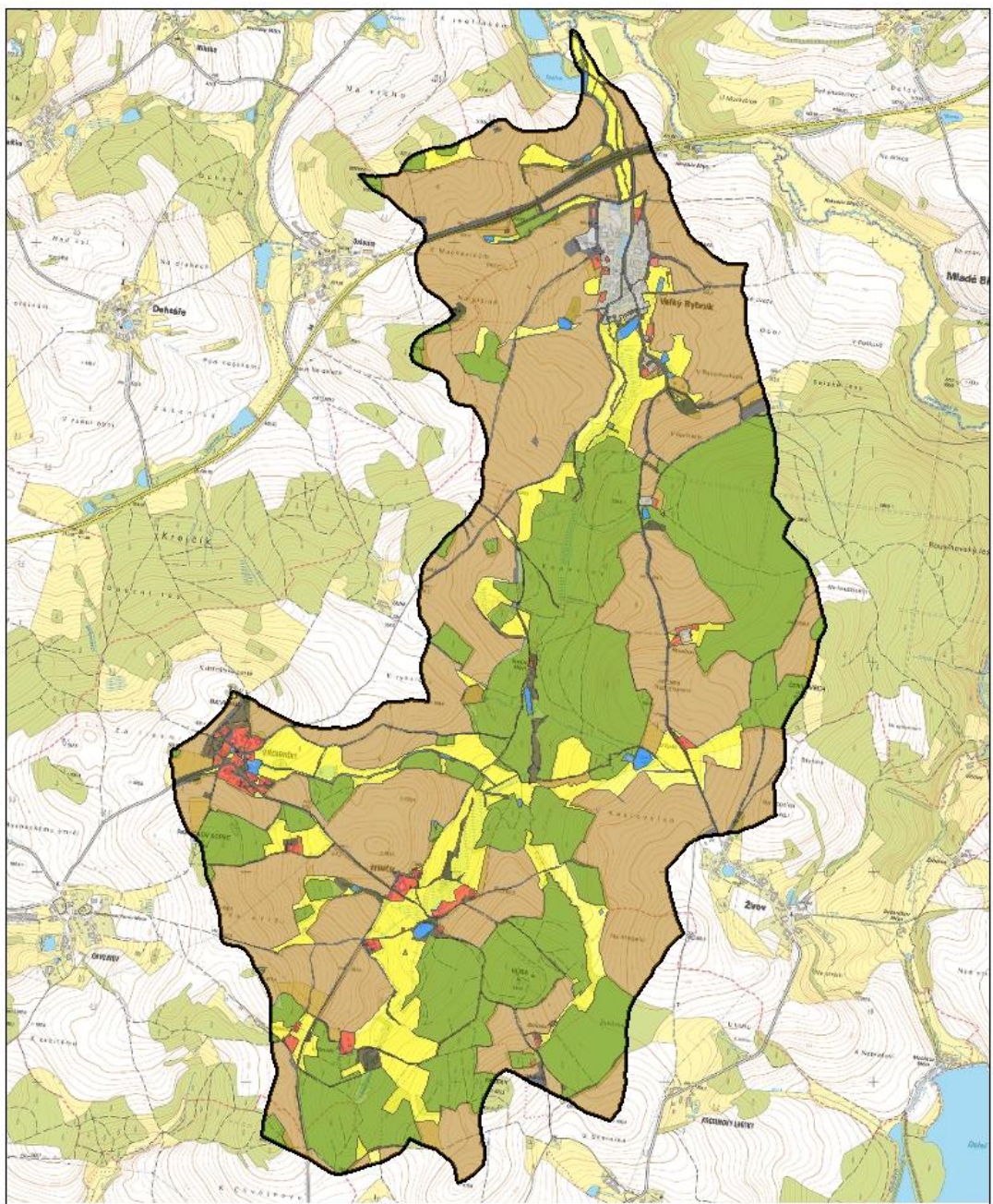
Dle Podhrázské a Uhlířové (2005) jsou pro tuto oblast charakteristické středně - těžké až středně - lehčí kambizemě modální na rulách. Plošně jsou zde dále výrazněji zastoupeny kambizemě oglejené a pseudogleje modální na rulách.

Landuse v ploše povodí

Na přiloženém obrázku č. 12 je zobrazeno landuse v povodí na kterém je vidět převládající plocha orné půdy, která dohromady zaujímá výměru 425,98 ha, to je z celkové plochy povodí 48,68 %. Výrobní typ v této zemědělské oblasti je bramborářsko-žitný. Dále se zde vyskytují lesní porosty o výměře 267,49 ha (30,58%). Nejčastěji se jedná o smrkové monokultury. V povodí je zastoupen také trvalý travní porost, který zaujímá plochu 112,03 (12,86 %). Zbývající část území je tvořena vodními plochami (0,66 %) a zastavěnou plochou (1,66 % území). Shrnutí je znázorněno v následující tabulce č. 3.

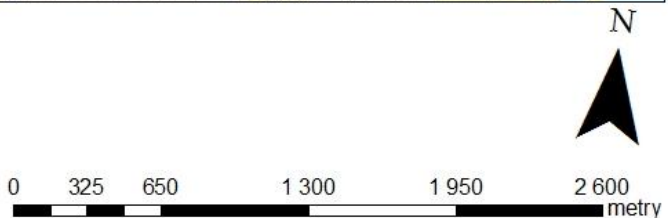
Tabulka 3 - Landuse v ploše Kopaninského toku

Název	Výměra [ha]	Výměra [%]
Orná půda	425,98	48,68 %
Les	267,49	30,58 %
TTP	112,03	12,83 %
Ostatní plocha	38,50	4,41 %
Zastavěná plocha	12,66	1,44 %
Sad, zahrady	10,71	1,2 %
Vodní plochy	5,75	0,66 %



Legenda

LU_dle_KN		Sad, zahrada
LU		TTP
		Les
		Oma puda
		Zastavena plocha
		Vodni plocha
		Ostatni plocha



Obrázek 12 - Zobrazení landuse v ploše povodí

5 Metody

Metoda CN křivek

Odtokové poměry v povodí se mohou lišit. Jejich hodnoty jsou závislé na hydrologických vlastnostech půd, vegetačním pokryvu, velikosti nepropustných ploch, intercepci a povrchové retenci. Na základě těchto hodnot bylo možné přiřadit jednotlivá čísla CN, která sloužila k dalším výpočtům. V dalších kapitolách budou popsány jednotlivé kroky, které slouží k dosažení výsledků.

Mapa využití území

V případě tohoto kroku byla vytvořena mapa, která je složena z polygonů a v atributové tabulce obsahuje hodnoty využití území. Při tvoření mapy využití území v programu ArcMap bylo prvním krokem vybrat jednotlivé skupiny polygonů se stejným způsobem využití:

- Orná půda
- Les
- Trvale travní porost (TTP)
- Ostatní plochy (polní cesty, křoviny)
- Zastavěné plochy
- Sady, zahrady
- Vodní plochy

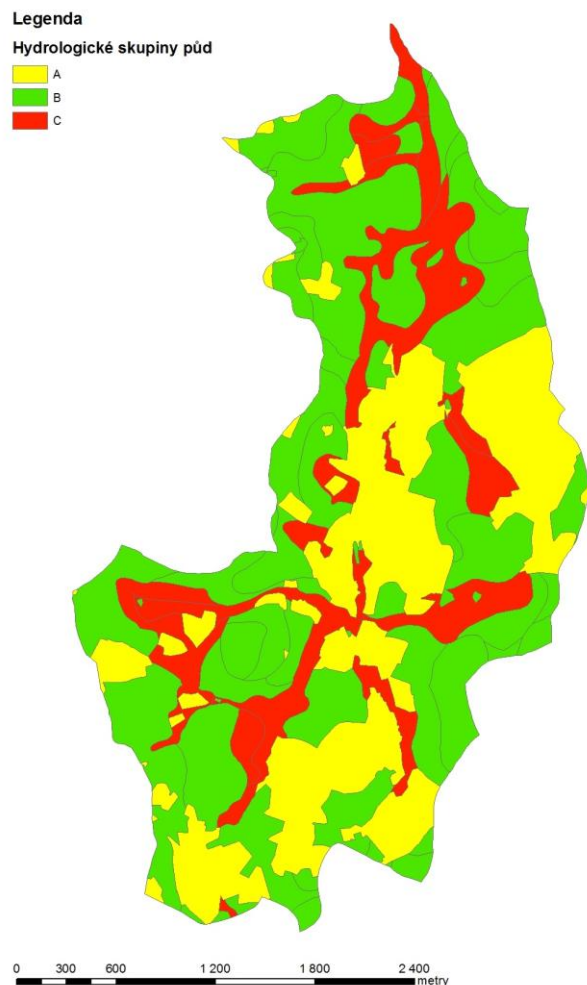
V záložce ArcCatalog byl vytvořen soubor landuse.shp, typu polygon a přiřazen k souřadnicovému systému S-JTSK Křovák East North. Po spuštění Editoru bylo možné zakreslit všechny plochy, které mají stejné využití. V atributové tabulce byl vytvořen nový sloupec pod názvem "využití". K tomuto posloužily data převzatá ze serveru geoportal.cuzk.cz., Příkazem DISSOLVE se tabulka s mnoha polygony sjednotila, a tím v atributové tabulce vzniklo pouze 7 hodnot, které měly stejný název.

Mapa hydrologických skupin půd

V tomto případě bylo v programu ArcMap vytvořeno nové pole hodnot v atributové tabulce u shapefilu BPEJ. Tyto hodnoty byly přiřazeny pouze na povodí Kopaninského toku a k nim se přiřadila charakteristická čísla. Při určování této hodnoty se vycházelo z druhé a třetí číslice kódu BPEJ v rozmezí 01-78, které se dají rovnou převést na hydrologické skupiny půd, které jsou znázorněny na obrázku č. 13.

Podle Janečka (1992) se rozlišují čtyři skupiny půd na základě rychlosti infiltrace vody:

- A.....Půdy s vysokou rychlostí infiltrace (hluboké, písky, šterky)
- B.....Půdy se střední rychlostí infiltrace (středně hluboké, hlinitopísčité, jílovitohlinité)
- C.....Půdy s nízkou rychlostí infiltrace (jílovitohlinité až jílovité)
- D.....Půdy s velmi nízkou rychlostí infiltrace (mělké půdy na nepropustném podloží, s vrstvou jílu na povrchu)



Obrázek 13 - Mapa hydrologické skupiny půd

Čísla CN-křivek

Při tvorbě této mapy byla v programu ArcMap vytvořena nová vrstva. Tato vrstva zahrnuje výše popsané vrstvy, které se příkazem UNION překryly. Mapa hydrologické skupiny půd spolu s mapou využití území vytvořily plochy s rozdílnými hodnotami CN. Výsledné hodnoty byly doplněny do nově vytvořeného pole v atributové tabulce. Tyto hodnoty dle Janečka (1992) jsou zobrazeny v tabulce č. 4.

Tabulka 4 - Hodnoty CN dle hydro. skupiny půd

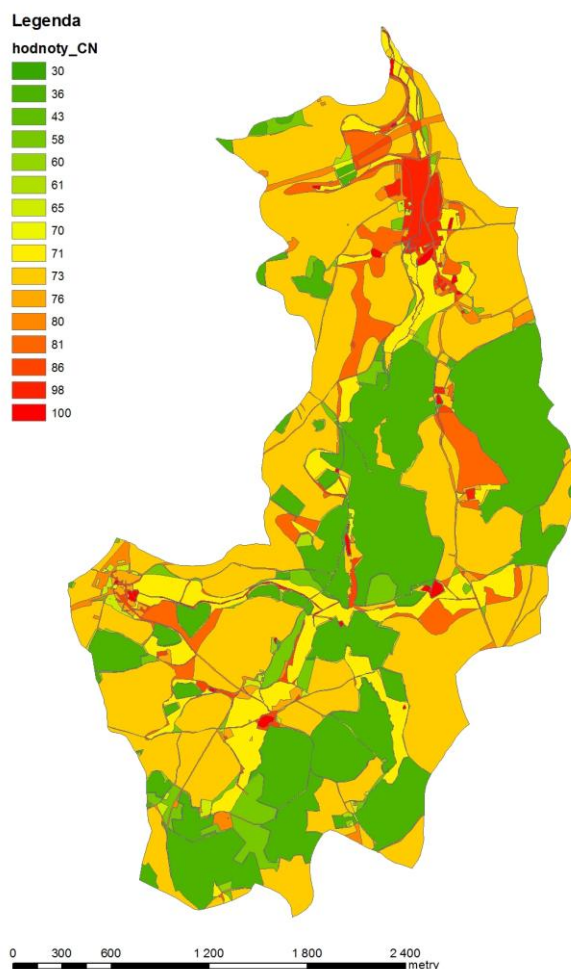
Využití půdy	Číslo odtok. křivek CN (dle hydro. skupiny půd)			
	A	B	C	D
Orná půda	61	73	81	84
Les	36	60	73	79
TTP	30	58	71	78
Ostatní plocha	70	80	86	88
Zastavěná plocha	98	98	98	98
Sad, zahrady	43	65	76	82
Vodní plochy	100	100	100	100

Tyto hodnoty se vkládaly do nově vytvořeného pole v atributové tabulce v novém shapefilu CN_2.shp. Čísla CN křivek jsou prvním krokem k výpočtu výšky přímého odtoku z daného polygonu. Lze z nich vypočítat potenciální retenci a výšku přímého odtoku podle rovnic:

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

$$\text{Výška přímého odtoku} \quad H_o = \frac{(H_s - 0,2 \cdot A)^2}{H_s + 0,8 \cdot A} \quad (mm)$$

Na přiloženém obrázku č. 14 jsou graficky znázorněny výsledné hodnoty čísel CN, které vznikly překrytím dvou vrstev a přiřazením hodnot z výše uvedené tabulky.



Obrázek 14 - Hodnoty čísel CN

5.1 Výpočet klasickým způsobem

V této metodě bude výpočet přímého odtoku spočívat v tom, že došlo ke zjištění průměrného CN pro celé povodí, které poslouží k výpočtu celkové potenciální retence a velikost přímého odtoku z povodí. Pro výpočet objemu přímého odtoku je nutno znát:

- Čísla CN křivek pro jednotlivé plochy s rozdílným landuse
- Rozlohu ploch s rozdílným CN
- Srážkový úhrn

Prvním krokem je tedy zjištění průměrné hodnoty CN pro celé povodí. Tato hodnota je odvozena ze vzorce pro výpočet váženého průměru:

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

Kde: CN_{\emptyset} - průměrné číslo křivky pro celé povodí

CN_i - specifické číslo křivky pro jednotlivou plochu

S_{Pi} - rozloha plochy CN_i

S_p - rozloha povodí

Ve vytvořeném shapefilu CN_2.shp byl v atributové tabulce vytvořen nový sloupec s názvem "výměra". U každé hodnoty CN byla pomocí příkazu "výpočet geometrických veličin" vypočtena plocha každé hodnoty. Výměra je udávána v km².

Vážený průměr hodnot CN po dosazení do rovnice:

$$CN_{\emptyset} = \frac{\sum_{i=1}^n (CN_i \cdot S_{Pi})}{S_p} = \frac{612,75}{8,73} = 70,19$$

Po této rovnici je možné dosadit první výsledek do rovnice pro výpočet potenciální retence:

$$A = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{70,12} - 10 \right) = 107,87 \text{ mm}$$

Pro určení výšky přímého odtoku je nutno znát hodnotu maximálních denních úhrnů srážek ze stanice Pelhřimov, která je nejbližší srážkoměrnou stanicí povodí Kopaninského toku. Pro výpočet byly do vzorce dosazeny hodnoty úhrnů s pravděpodobností opakování za 2, 10, 50 a 100 let. Tento výpočet tedy bude čtyřikrát opakován. Hodnoty maximálních denních úhrnů s pravděpodobností opakování za N let, jsou zobrazeny v následující tabulce č. 5.

Tabulka 5 - Hodnoty odběrné stanice

Odběrná stanice	Pravděpodobnost opakování za N let			
	2	10	50	100
Pelhřimov	35,5	63,3	88,8	99,8

Výpočet pro 2-letý úhrn srážek:

$$H_o = \frac{(H_s - 0,2A)^2}{(H_s + 0,8A)} = \frac{(35,5 - 0,2 \cdot 107,87)^2}{(35,5 + 0,8 \cdot 107,87)} = 1,592 \text{ mm}$$

Výpočet pro 10-letý úhrn srážek:

$$H_o = \frac{(H_s - 0,2A)^2}{(H_s + 0,8A)} = \frac{(63,3 - 0,2 \cdot 107,87)^2}{(63,3 + 0,8 \cdot 107,87)} = 11,637 \text{ mm}$$

Výpočet pro 50-letý úhrn srážek:

$$H_o = \frac{(H_s - 0,2A)^2}{(H_s + 0,8A)} = \frac{(88,8 - 0,2 \cdot 107,87)^2}{(88,8 + 0,8 \cdot 107,87)} = 25,809 \text{ mm}$$

Výpočet pro 100-letý úhrn srážek:

$$H_o = \frac{(H_s - 0,2A)^2}{(H_s + 0,8A)} = \frac{(99,8 - 0,2 \cdot 107,87)^2}{(99,8 + 0,8 \cdot 107,87)} = 32,881 \text{ mm}$$

Nyní je třeba výsledky dosadit do vzorce pro výpočet objemu přímého odtoku O_{pH} :

Výpočet pro pravděpodobnost opakování 2 roky:

$$O_{pH} = H_o \cdot P_p \cdot 1000 = 1,592 \cdot 8,73 \cdot 1000 = 13898,2 \text{ m}^3$$

Výpočet pro pravděpodobnost opakování 10 let:

$$O_{pH} = H_o \cdot P_p \cdot 1000 = 11,637 \cdot 8,73 \cdot 1000 = 101\,596 \text{ m}^3$$

Výpočet pro pravděpodobnost opakování 50 let:

$$O_{pH} = H_o \cdot P_p \cdot 1000 = 25,809 \cdot 8,73 \cdot 1000 = 225\,315 \text{ m}^3$$

Výpočet pro pravděpodobnost opakování 100 let:

$$O_{pH} = H_o \cdot P_p \cdot 1000 = 32,881 \cdot 8,73 \cdot 1000 = 287\,051 \text{ m}^3$$

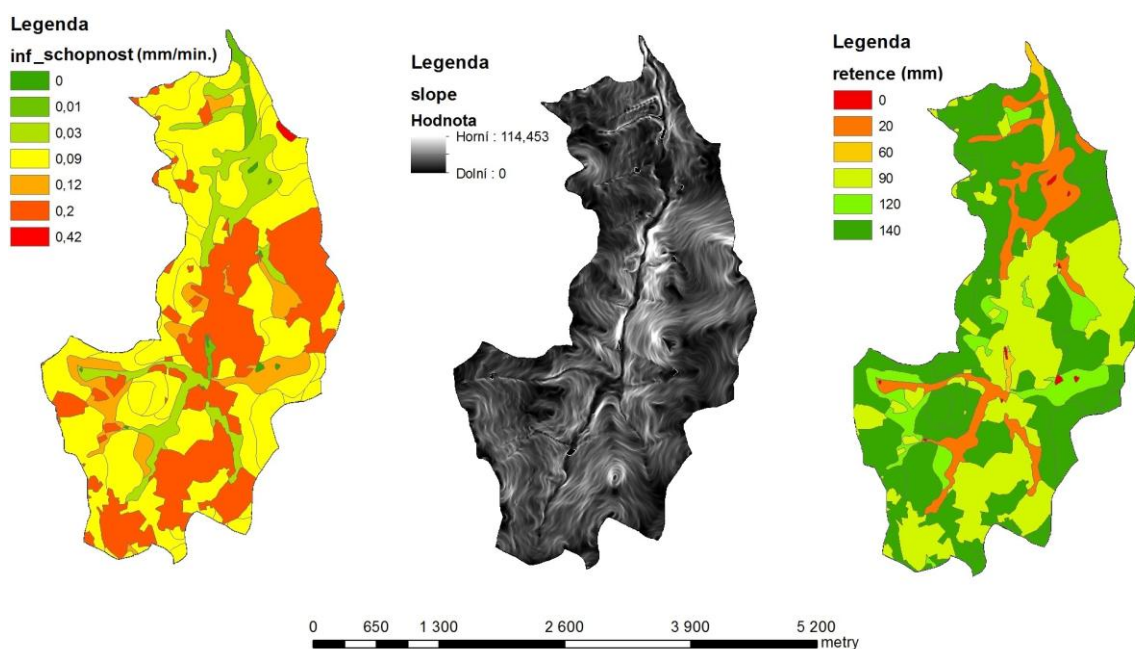
Na základě metody CN křivek bylo po použití klasické metody výpočtu zjištěno, že uzávěrovým profilem proteče 13 898,2 m³ vody při pravděpodobnosti opakování 2 roky. S pravděpodobností opakování 10 let je výsledný průtok 101 596 m³. Při opakování 50 let je výsledný průtok 225 315 m³ a se 100-letou srážkou je konečný průtok 287 051 m³. Výsledky je možné vidět v tabulce č. 6, při průměrné hodnotě CN - 62,48 a hodnotě potenciální retence 152,53 mm. V tabulce je také obsažen výpočet součinitele odtoku.

Tabulka 6 - Souhrn výsledků

	Pravděpodobnost opakování za N let			
	2	10	50	100
H _s (mm)	35,5	63,3	88,8	99,8
H _o (mm)	1,592	11,637	25,809	32,881
O _{pH} (m ³)	13898,2	101 596	225 315	287 051
Součinitel odtoku (%)	4,48	18,38	29,06	32,94

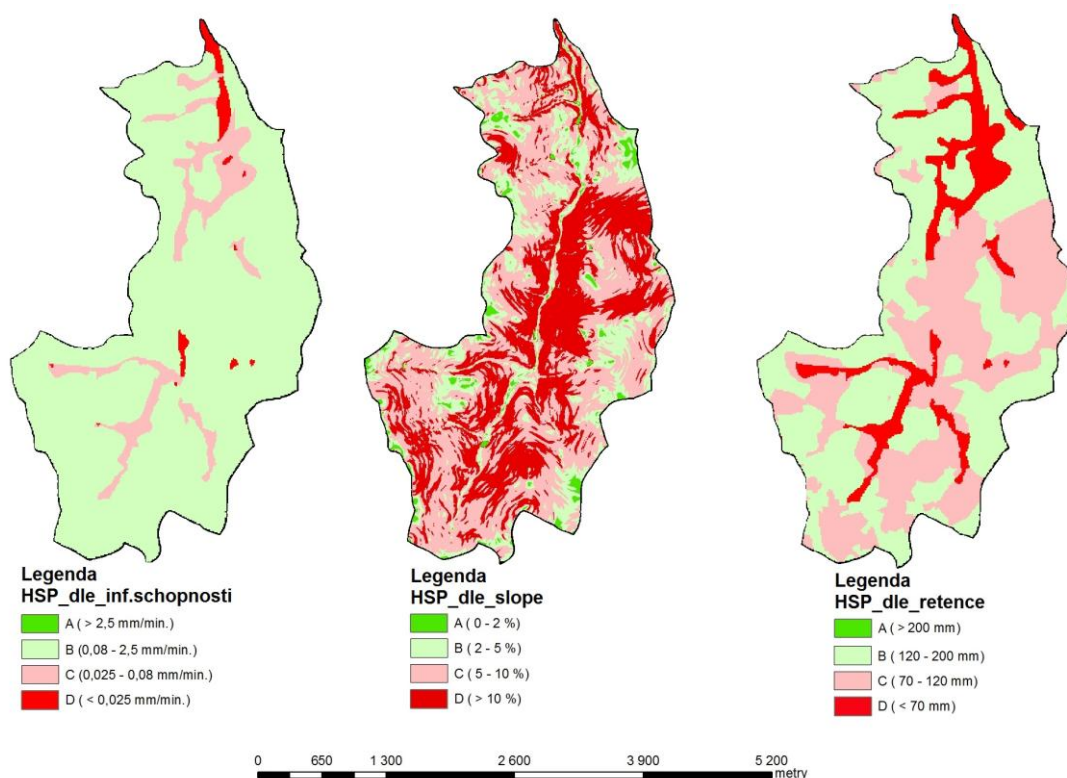
5.2 Výpočet rastrovým způsobem

Výpočet přímého odtoku v rastrové formě na povodí Kopaninského potoka, měl počátek v určení hodnot retence a infiltrace pro jednotlivé hodnoty BPEJ. Tyto hodnoty se získaly za pomoci serveru www.bpej.vumop.cz. Zjištěním těchto hodnot vznikl v atributové tabulce nový sloupec s hodnotami retence a infiltrace, které byly v dalším kroku příkazem RECLASSIFY klasifikovány do 4 tříd dle Šercla (2006). Digitální model terénu byl příkazem SLOPE kvalifikován dle sklonitosti. Tímto mohly vzniknout nové potřebné gridy. Na obrázku č. 15 jsou zobrazeny jednotlivé výstupy podle hodnot dle BPEJ.



Obrázek 15 - Výsledné rasty infiltrační schopnosti, sklonu a retence

Na obrázku č. 16 jsou patrné rastry, kde je dle hydrologické skupiny půd (HSP) klasifikována infiltrační schopnost, retenční schopnost a sklon.

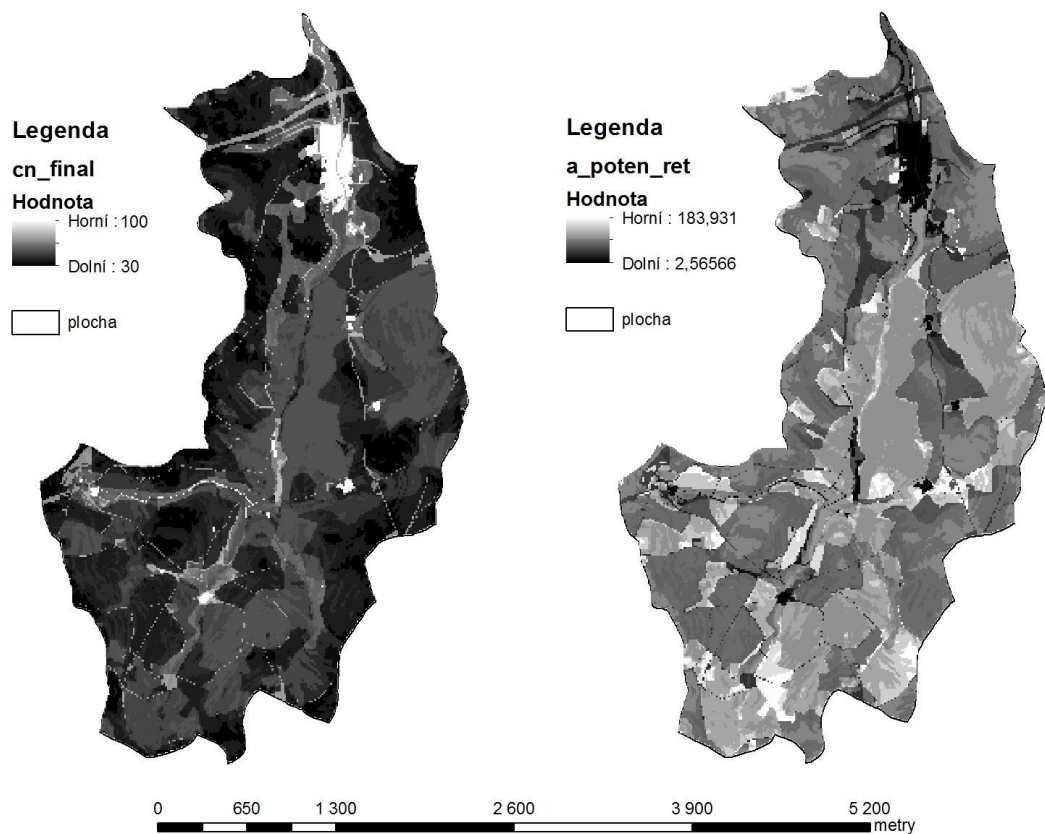


Obrázek 16 - Klasifikace infiltrační schopnosti, sklonu a retenční schopnosti dle hydrologické skupiny půd

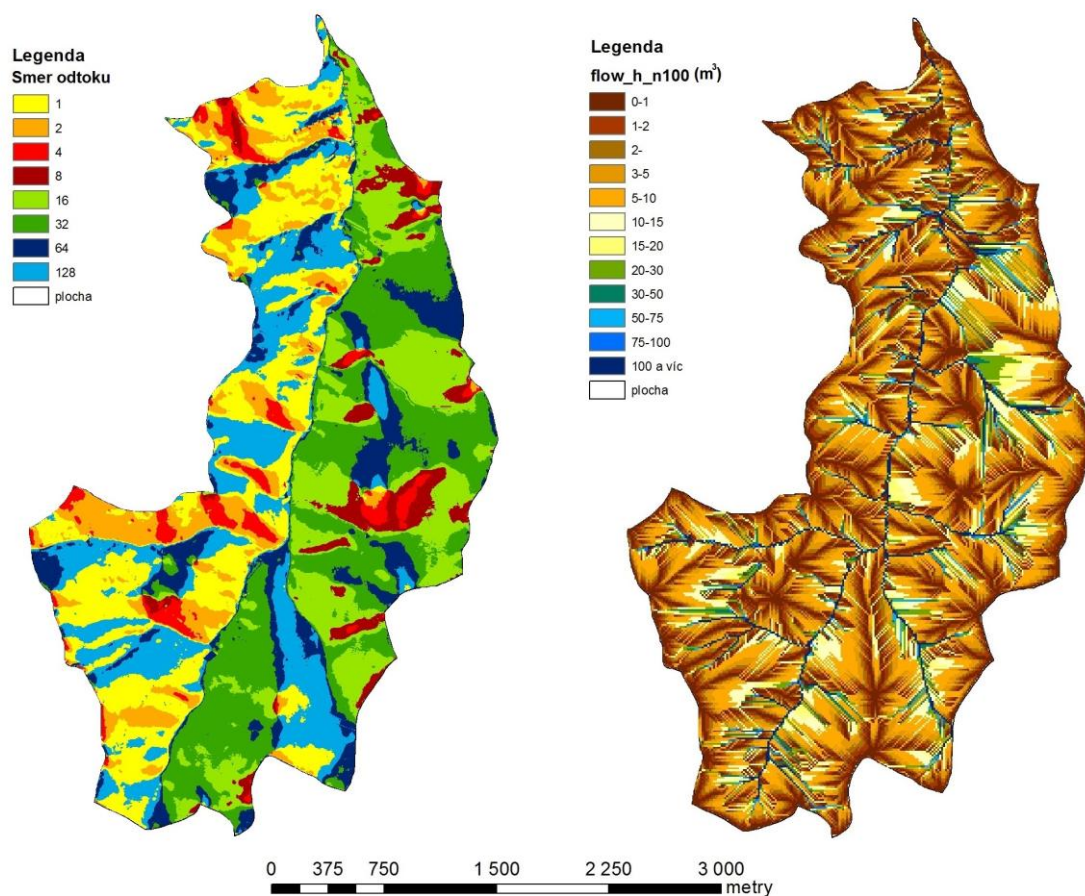
Šercl (2006) ve své publikaci shrnuje řešení tohoto výpočtu tak, že pro každou kategorizaci HSP byly posléze určeny příslušné hodnoty CN a z těchto hodnot byl určen průměr pro každý pixel. Vzhledem k tomu, že infiltraci lze považovat za nejdůležitější vlastnost půd z hlediska podmínek vytváření přímého odtoku ze srážek (převážně v rovinách), výsledná mapa hodnot CN byla vytvořena jako maximum hodnot CN určených z HSP dle infiltrace a průměrných hodnot CN z HSP dle všech použitých kategorizací. Tím byl zdůrazněn vliv nízké infiltrační schopnosti u půd v rovinatém území, a vliv retenční vodní kapacity a sklonitosti území v území s většími sklony terénu.

Po doplnění čísel CN dle landuse se nejprve vytvořil průměr všech tří gridů podle jednotlivých charakteristik. Tím vznikl výsledný CN grid. Poté se tento průměrný CN grid spojil společně s CN gridem dle infiltrace, kde byl posílen význam infiltrace. Tím vznikne výsledný rastr s názvem `cn_final`. S tímto výsledkem se přes příkaz `RASTER CALCULATOR` vypočte rastr potenciální retenční schopnosti.

Do tohoto výpočtu vstupuje již vzniklý rastr s názvem `cn_final`. Na obrázku č. 17 jsou vidět výsledné rastry. Následuje výpočet výšky povrchového odtoku, kde jsou vždy doplněny hodnoty srážkových úhrnu za 2, 10, 50 a 100 let. Předposledním výpočtem je výpočet povrchového odtoku na úrovni buňky, v mém případě je rozměr 2 x 2 m. Před výpočtem poslední hodnoty, bylo nutné příkazem `FLOW DIRECTION` určit směry odtoku v povodí. Vstupem do toho příkazu byl vyhlazený digitální model terénu. Tento příkaz vytvořil rastr s osmi směry odtoku, který můžeme vidět na obrázku č. 18. Poslední fází ke zjištění objemu povrchového odtoku z povodí bylo využití příkazu `FLOW ACUMULATION`, jehož vstup tvořil rastr směru odtoků a váhu tomuto rastru dával výpočet povrchového odtoku na úrovni buňky. Na obrázku č. 18 je ke znázornění vidět objem odtoku v m³ z povodí při stoleté srážce (N=100).



Obrázek 17 - Výsledný rastry CN s posílením vlivu infiltrace a rastr potenciální retence



Obrázek 18 - Rastr směru odtoku a rastr odtoku z povodí (m³) s pravděpodobností opakování za N100 let

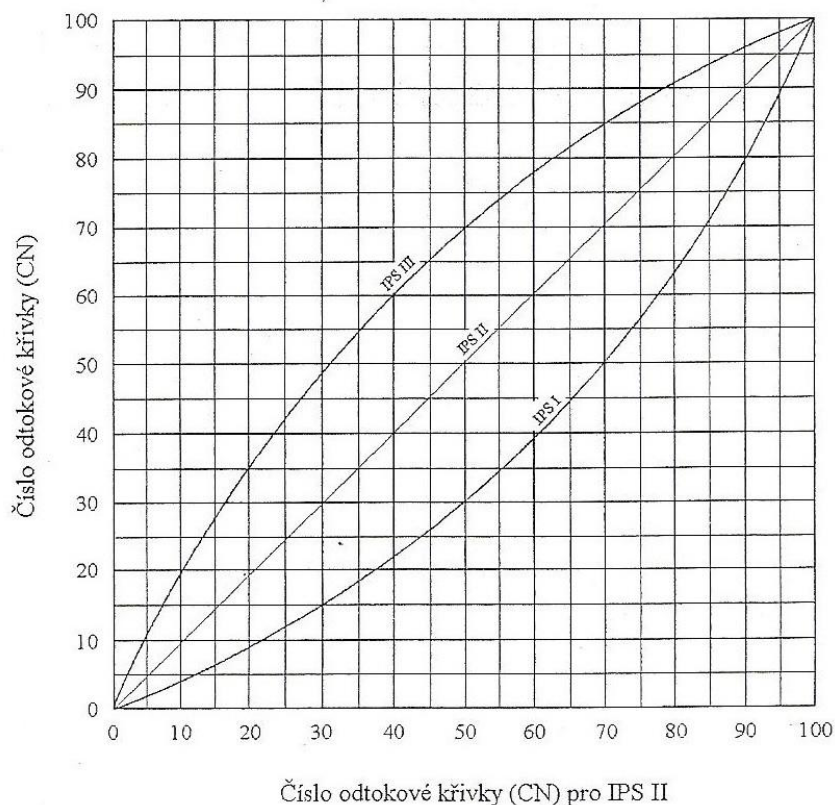
6 Analýza faktorů ovlivňujících přímý odtok z povodí

6.1 Změna nasycenosti povodí

Vlhkost půdy je určovaná na základě úhrnu srážek, tedy tzv. indexu předchozích srážek (IPS) ve třech stupních, kdy IPS I odpovídá suché půdě, IPS II středně nasycené půdě a při IPS III je půda přesycena vodou z předcházejících dešťů. V předchozích krocích bylo počítáno s hodnotami CN čísel při IPS II.

Ke změně nasycenosti povodí byl využit přiložený graf zobrazený na obrázku č. 19, na kterém se dle čísel odtokových křivek (CN) pro IPS II určily hodnoty pro IPS I a IPS III a na ose odtokové křivky určily příslušnou hodnotu. Index IPS I značí suchou půdu, IPS II střední a označení IPS III označuje mokrou půdu.

I v případě těchto výpočtů se postupovalo obdobně jako při výpočtu objemu přímého odtoku pro IPS II. Hodnoty čísel odtokových křivek se měnily z IPS II na nové hodnoty dle IPS II a IPS III, které vstupovaly do dalších výpočtů. Odtoky byly znovu vypočteny pro srážkové úhrny s pravděpodobností opakování za 2, 10, 50 a 100 let a souhrn těchto výsledků je zaznamenán v tabulce č. 7.



Obrázek 19 - Vliv obsahu vody v půdě (IPS I - suchá, IPS II - střední, IPS III - mokrá) na změnu čísla odtokové křivky (CN) (Janeček, Váška, 2001)

Tabulka 7 - Výsledné odtoky dle vlivu obsahu vody v půdě na povodí Kopaninského potoka

	Pravděpodobnost opakování za N let			
	N2	N10	N50	N100
Odtok při IPS I (m³)	7997,47	23111,1	68242,2	94,7085
Odtok při IPS II (m³)	23088,45	103410,75	206934,75	257174,25
Odtok při IPS III (m³)	79897,5	218359,5	362673,75	427563

Tabulka 8 - Výpočet součinitele odtoku pro IPS I

Pravděpodobnost opakování	IPS I (m³)	Odtoková výška (mm)	Součinitel odtoku (%)
N2	7997,47	0,918	2,5
N10	23111,1	2,647	4,2
N50	68242,2	7,816	8,7
N100	94,7085	10,848	10,8

Tabulka 9 - Výpočet součinitele odtoku pro IPS II

Pravděpodobnost opakování	IPS II (m³)	Odtoková výška (mm)	Součinitel odtoku (%)
N2	23088,45	1,763	7,4
N10	103410,75	7,897	18,6
N50	206934,75	15,803	26,7
N100	257174,25	19,639	29,5

Tabulka 10 - Výpočet součinitele odtoku pro IPS III

Pravděpodobnost opakování	IPS III (m³)	Odtoková výška (mm)	Součinitel odtoku (%)
N2	79897,5	6,102	25,8
N10	218359,5	16,675	39,6
N50	362673,75	27,696	46,8
N100	427563	32,651	49,1

Ve výsledných tabulkách je vidět, jak se odtok na povodí měnil v závislosti na nasycenosti půdy. Ve srovnání se středním nasycením půdy, se kterým se počítá ve většině analytických případů, se suchou půdou se voda vsákla a při odtoku s pravděpodobností 2 let, odteklo z povodí 7997,47 m³ vody, což odpovídá tomu, že se odtok snížil zhruba o 33 %. Ve formě přímého odtoku v této fázi tedy odteklo 2,5 % z návrhového deště. Při suché půdě se tedy odtok při pravděpodobnosti opakování 10 let snížil o 22 % a po výpočtu součinitele odtoku byl výsledek takový, že ve formě přímého odtoku za toto období odteklo 4,5 %. Při pravděpodobnosti opakování srážek za 50 a 100 let se odtok při suché půdě (IPS I) snížil o 33 %. Rozdíl je zde u součinitele odtoku, kde u N50 vyšel odtok 8,7 % a při N100 10,8%.

Poslední tabulka č. 10 je výpočet odtoku pro mokrou půdu (IPS III). V tomto případě došlo k převlhčení půdy, která nebyla schopna zasakovat další příval srážek a proto odtok vody z povodí vzrostl. Součinitel odtoku zde při opakování za 2 roky tvořil 25,8 %. Při opakování za 10 let byl výsledný součinitel odtoku 39,6 %.

Největší podíl vody, která odtekla z povodí ve formě přímého odtoku byl za 50 a 100 let, kdy součinitel odtoku vyšel zhruba stejný a to 46,8 % za 50 a 49,1% za 100 let.

Kozlovská (2013) ve své práci uvádí modelový příklad výpočtu objemu přímého odtoku, při využití návrhů úhrnů srážek z měřicích stanic pro periodu opakování 2 roky a 100 let a pro 2 typy IPS (IPS I a IPS II). Přesto, že v projekční praxi se užívá IPS II, převažující extrémní srážky se vyskytují v režimu IPS I. Např. pro stanici Brno - Tuřany byl výskyt dešťů s vydatností nad 30 mm v období 1961 – 2009 pro IPS I 91,5 %, IPS II 2 %, IPS III 6,5 %.

Porovnání naměřených hodnot u nízkých srážkových úhrnů ($H_s=50$ a 40 mm) s hodnotami počítanými by ukazovalo spíše na přiblížení se hodnotám pro IPS II, ale u takto nízkých srážkových úhrnů jsou výsledky výpočtů pomocí použité metody méně přesné. Vyhodnocení odtoků z nízkých srážkových úhrnů při IPS I nebylo možné provést, protože stanovená čísla CN byla příliš nízká. Předpokládá se, že za této situace v povodí je velikost infiltrace povodí vyšší než srážkový úhrn a odtok nenastává (Podhrázká, 2002).

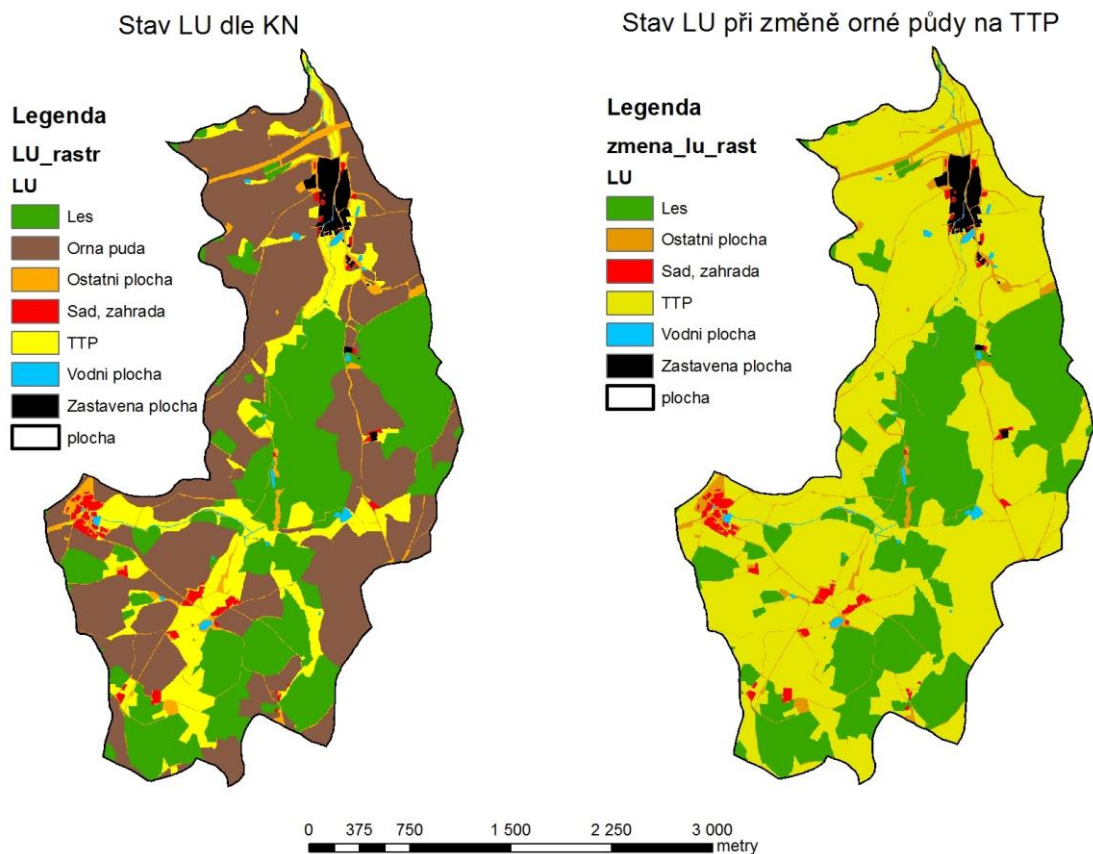
Kozlovská a Toman (2010) ve své další práci uvádí ilustrační příklad výpočtu potenciální retence a objemu přímého odtoku pro povodí o ploše 1 km^2 a pro všechny typy IPS je uveden na obrázku č. 20. Příklad demonstruje významnost volby IPS pro výši potenciální retence a přímého odtoku z povodí. Běžně používaný IPS II by v tomto příkladě vedl k výši potenciální retence povodí 41 mm, kdežto reálná hodnota dle IPS I by se zvýšila na 99 mm. Toto se projeví i v dalších návrhových hodnotách, například přímý odtok z povodí by se výrazně snížil ze 7,5 mm (25 % z návrhové přívalové srážky) na 1 mm (3,3 % z návrhové přívalové srážky). Výše uvedené hodnoty návrhových parametrů pro IPS I by platily průměrně v 90 % případů (84,5 %–98 % dle stanice), kdežto IPS II se reálně vyskytlo pouze u 7,4 % případů (v rozmezí 2 %–15 % dle stanice). Rozdíly ve volbě IPS se projeví především v nutnosti návrhu protierozních a protipovodňových opatření v povodí, tedy i ve výši nezbytných finančních nákladů (Kozlovská, 2010).

	IPS II	IPS I	IPS III
číslo CN křivky	86	72	94
potenciální retence A (mm)	41,3	98,8	16,2
Návrhová srážka (mm)	30	30	30
Plocha povodí (km ²)	1	1	1
Přímý odtok (mm)	7,5	1,0	16,7
Objem přímého odtoku (m ³)	7486	963	16662

Obrázek 20 - Stanovení potenciální retence povodí – příklad čerstvě zkypleného úhoru na půdě se střední rychlostí infiltrace (Kozlovská, Toman, 2010)

6.2 Změna landuse

Extrémní změna landuse spočívala v teoretickém zatravnění veškeré orné půdy na povodí Kopaniského potoka, zobrazené na obrázku č. 21. Nově vzniklý shapefile se tedy musel násobit s gridy určenými dle hydrologických skupin půd. I v této části výzkumu vznikl nový finální rastr, který dále vstupoval do dalších výpočtů. Na obrázku je vidět jak se povodí změnilo po-té, kdy došlo k zatravnění veškeré orné půdy. V tabulce č. 12 je zaznamenán odtok při středním nasycení půdy a zároveň porovnání jak se odtoky změnily při zatravnění. Leitinger (2010) uvádí, že zapojený travní porost má průměrně o 10 % vyšší pórovitost než orná půda a má lepší půdní strukturu, což umožňuje plynulý vsak srážek. V České republice i nadále trvá nepříznivý poměr orné půdy k travním porostům. To sebou přináší mnoho známých široce diskutovaných problémů jako je např. eroze, úbytek vody v krajině, znečištění vod dusičnany nebo ztrátu druhové rozmanitosti na zemědělské půdě. Zatravnění orné půdy je tedy podporováno Evropskou unií ve formě dotačních titulů. Dotace se poskytuje na plochu orné půdy, která se zatravní a pak se udržuje jako travní porost. Cílem podpory je účinná a trvalá ochrana půdy před erozí, vody před znečištěním, zvýšením druhové pestrosti a atraktivity krajiny (Ministerstvo zemědělství, 2015).



Obrázek 21 - Rastry reálného stavu landuse vs. zatravnění orné půdy

Tabulka 11 - Výpočet součinitele odtoku při změně landuse

Pravděpodobnost opakování	Odtok při změně LU (m ³)	Odtoková výška (mm)	Součinitel odtoku (%)
N2	12217,65	1,39	3,75
N10	67 777,2	7,76	12,3
N50	150 466,5	17,23	19,42
N100	192 527,25	22,05	22,125

Tabulka 12 - Porovnání odtoku při středním nasycení půdy proti odtoku při změně landuse

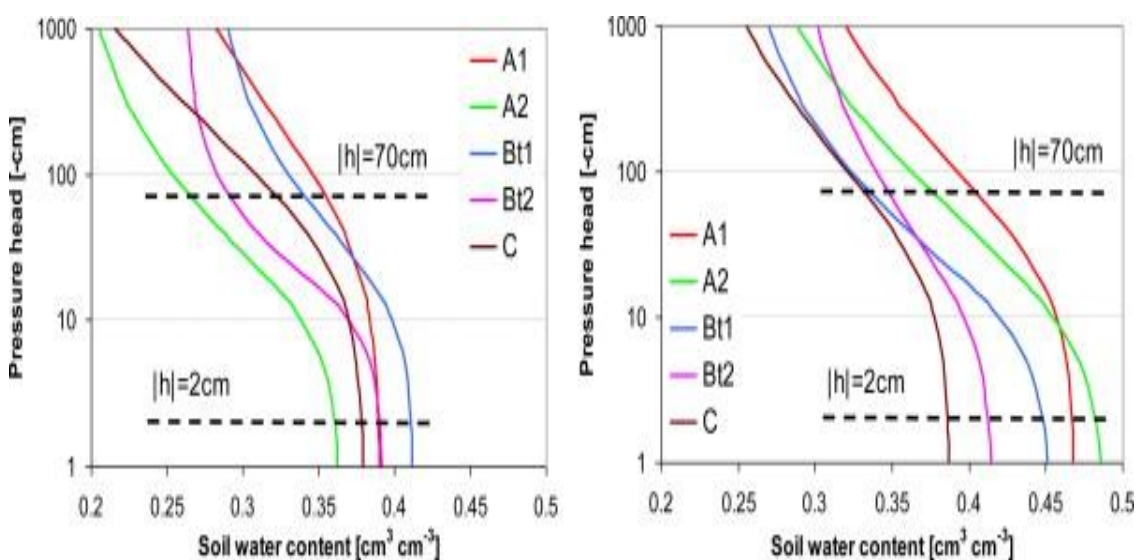
	Pravděpodobnost opakování za N let			
	N2	N10	N50	N100
Odtok při IPS II (m³)	23088,45	103410,75	206934,75	257174,25
Součinitel odtoku při IPS II (%)	7,4	18,6	26,7	29,5
Odtok při změně LU (m³)	12217,65	67 777,2	150 466,5	192 527,25
Součinitel odtoku při teoretickém zatravnění (%)	3,75	12,3	19,42	22,13

Z tabulky č. 11 je možné vidět, že po zatravnění ploch s ornou půdou se odtok při středním nasycení půdy a při pravděpodobnosti opakování za 2 roky snížil o 47 %, při opakování za 10 let o 35 % a při pravděpodobnosti opakování za 50 a 100 let se odtok po zatravnění snížil zhruba o 25 %. V tabulce č. 12 byl proveden výpočet součinitele odtoku, který udává že při pravděpodobnosti opakování za 2 roky odeče z povodí 3,75 % vody ve formě přímého odtoku. Při opakování za 10 let tvoří přímý odtok 12,3 %. Odtok při pravděpodobnosti srážky 50 let, je výsledný součinitel odtoku 19,42 % a za 100 let 22,12 %.

Souchere a kol. (2003) zveřejňuje graf, ze kterého je patrná změna v objemu povrchového odtoku v případě, že se zvýší množství pastvin o 1 %. Hodnoty byly zjištěny ze zkoumané oblasti, která se nachází v blízkosti města Rouen (2905 ha). Jde o zemědělské povodí, jelikož pouze 2% z celkové plochy jsou v zastavěných oblastech. Většina území je rozdělena na ornou půdu (63%), stálou pastvinu (30%) a lesní půdu (5%). Je zde znázorněn objem odtoku 40 mm srážek za 1 hodinu. V tomto případě dosáhl objem hodnoty 92, 330 m³. Pokud bude na území o 29 ha více zatravněné plochy bude hodnota povrchového odtoku 50,540 m³. Z těchto číselných údajů lze usoudit, že pokud na tomto území zvýšíme množství zatravněných ploch o 1%, sníží se povrchový odtok o 41,79 m³.

Furlan (2011) říká, že vegetační kryt ve formě pastvin, luk a zimních plodin snižuje povrchový odtok a zvyšuje infiltraci, zatímco plodiny pěstované na jaře pokrývají méně než 20% povrchu půdy. Intenzivní srážky tak zasáhnou nechráněnou půdu s nízkou strukturální stabilitou a nastane tak povrchový odtok. Simon a Souhrada (2004) ve své práci uvádí tabulku povrchového odtoku a ztráty půdy na svažitém pozemku s různými zpracováními půdy, ve které jsou hodnoty uváděny na základě modelové srážky 31 mm. Na základě uvedených hodnot lze porovnat půdu zpracovávanou orbou, na které je povrchový odtok 6mm s půdou zatravněnou bez jakéhokoliv narušení, kde byl odtok na hodnotě 0, tedy vůbec nenastal.

Dalším důkazem toho, že zatravnění má vliv na zadržování vody v půdě, je fakt, že zatravněná plocha obsahuje více kapilárních pórů. Na obrázku č.22 jsou vyobrazeny tvary retenčních křivek znázorňujících zadržování vody v půdě. Větší retenční schopnost půd byla pozorována v půdě na pastvinách (tedy na ploše zatravněné) v porovnání s půdou ornou, kde byla retenční schopnost nižší. Tvary retenčních křivek ukazují, že půda, která nebyla pravidelně obdělávána, obsahovala více větších kapilárních pórů, které jsou velice důležité pro zadržování vody, půdní provzdušňování, distribuci půdních živin apod. (Kodešová, 2011).



Obrázek 22 - Půdní retenční křivky na orné půdě (vlevo) a na pastvinách (vpravo), kde:

- A jsou naměřené hodnoty,
- B jsou optimální hodnoty,
- C je 95% interval spolehlivosti

7 Závěr

Diplomová práce se zabývala analýzou faktorů ovlivňující přímý odtok. Vybraným zájmovým územím, je povodí Kopaninského potoka, které se nachází v okrese Pelhřimov. Cílem této práce bylo vyhodnocení výšky přímého odtoku v závislosti na reálném stavu, extrémní změně landuse (reálný stav vs. zatravnění orné půdy) i nasycenosti povodí, resp. obsahu vody v půdě (půda suchá, střední, mokrá). Odtok může být ovlivněn celou řadou faktorů, mezi které patří změna landuse, plocha a tvar povodí, geologická charakteristika, nadmořská výška a poloha povodí, klima, odvodnění, reliéf a v neposlední řadě také člověk. K separaci odtoku lze využít metodu MGPM, metodu GROUND, metodu digitálních filtrů a metodu separace hydrogramu. Pro výpočet objemu přímého odtoku na povodí slouží metoda CN-křivek. Jednotlivé výstupy byly vytvořeny za různých hodnot návrhových dešťů, při době opakování 2, 10, 50 a 100 let.

V této práci byla provedena hydrologická analýza v programu ArcMap 10.1. Byly prozkoumány možnosti tohoto programu v oblasti hydrologie a hydrologického modelování. Pro výpočet přímého odtoku v této práci byla použita metoda CN - křivek, která slouží pro výpočet odtokové ztráty v každém pixelu v povodí. Pixely v případě této práce měly rozměr 2 x 2 m. Při středním nasycení půdy (IPS II), který se běžně používá k výpočtům byl součinitel odtoku pro opakování za 2 roky 7,4 %, při opakování za 10 let 18,6 %. Pravděpodobnost opakování za 50 let stanovila výsledný součinitel odtoku na 26,7 % a při N100 byl výsledek 29,5 %. Výsledky ukázaly, že při suché půdě (IPS I) se odtok snížil, díky zvýšené infiltraci. Při pravděpodobnosti opakování 2 let odteklo z povodí 2,5 % vody ve formě přímého odtoku. Při pravděpodobnosti opakování za 10 let se součinitel odtoku zvýšil na 4,5 % přímého odtoku.. U pravděpodobnosti opakování srážek za 50 a 100 let byl výsledný součinitel odtoku při N50 8,7 % a při N100 10,8%. Nasycení půdy (IPS III) označuje mokrou půdu, kde bude menší infiltrace, a proto odtok z povodí bude větší. Proto zde byl výsledný součinitel odtoku při opakování za 2 roky 25,8 %, při opakování za 10 let 39,6 %, při pravděpodobném opakování 50 let odteklo z povodí ve formě přímého odtoku 46,8 % z návrhového deště a při hodnotě N100 byla tato hodnota 49,1 %.

Při změně landuse, kde došlo k teoretickému zatravnění bylo zjištěno, že povrchový odtok se zpomalí a zmírní a zvýší se infiltrace. Při opakování za 2 roky je

součinitel odtoku 3,75 %. Při pravděpodobnosti opakování za 10 let byl výsledný součinitel odtoku 12,3 % a při opakování za 50 let 19,42 %. Výsledek pro součinitel odtoku při opakování za 100 let je 22,13 % .

Přínos rastrového výpočtu přímého odtoku metodou CN křivek je především v podrobném sestavení mapy přímého odtoku, oproti metodě pro výpočet klasickým způsobem, která udává pouze odtok v uzávěrovém profilu v povodí.

8 Seznam použité literatury a zdrojů

1. Arnold, J. G., Allen, P. M., Muttiah, R., Bernhardt G. *Automated Baseflow Separation and Recession Analysis Techniques*. Ground Water 33. 1995. 1010-1018 s.
2. Beven, K. J. *The Primer*. Chichester: John Wiley and Sons. *Rainfall – Run-off Modelling*. 2001. 360 – 372 s.
3. Broža, V., *Vodní hospodářství a vodní stavby*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988, 195 s.
4. Bruijnzeel LA., *Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees?* Agriculture, Ecosystems, and Environment 104(1): 2004. 185–228 s.
5. Brutsaert, W. *Hydrology: An introduction*. Cambridge University Press, 2005, 605 s.
6. Bumerl, M., *Hydrologie*. Veselí nad Lužnicí. 2003. 56 s.
7. Carter, T., Jackson, C.R., *Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales*. Landscape and Urban Planning 80. 2007. 84–94 s.
8. Coufal, P., *Hodnocení vlivu pozemkových úprav na hydrologická rizika v povodí Trkmanky*. Diplomová práce. Brno. 2015. 75 s.
9. Červený, J., *Podnebí a vodní režim ČSSR*. 1. vyd. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1984, 414 s.
10. Daňhelka, J. *Operativní hydrologie: hydrologické modely a nejistota předpovědí*. Sborník prací ČHMÚ. Praha. 2007. 104 s.
11. Daňhelka, J. *Operativní hydrologie: hydrologické modely a nejistota předpovědí*. Sborník prací ČHMÚ, Praha, 2007, 104 s.
12. Delinon, R.M., *Structural geology controls on groundwater flow: Lembang Fault case study*, West Java, Indonesia. Hydrogeology Journal 17. 2009. 1011–1023 s.
13. Demek, J. *Geomorfologie českých zemí*. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 1965, 335 s.
14. Doležal F., Čmelík M., Kulhavý, Z., Kvítek, T., Pilná, E., Soukup, M., Tippl, M., *Základní charakteristika pokusných povodí*. Sborník workshopu. Pokusná zemědělsko-lesní povodí VÚMOP ve středočeském krystaliniku. 2002. 96 s.
15. Doyle, M.W., Harbor, J.M, Rich, C.F., Spacie, A., *Examining the effects of urbanization on streams using indicators of geomorphic stability*. Physical Geography 21. 2000. 155–181 s.

16. Easterling DR, Karl TR, Gallo KP, Robinson DA, Trenberth TE, and Dai A
Observed climate variability and change of relevance to the biosphere. Journal of Geophysical Research – Atmospheres 105(D15): 2000. 2101–2114 s.
17. Eichler, J., Soukup, M., Pilná, E. *Využití DMT při návrhu retardace podzemního drenážního odtoku.* Sborník GIS Seč 2000. Seč. 2000. 57-63 s. In: ŽLÁBEK, P., *Vliv uspořádání krajinné matrice na složky odtoku.* České Budějovice. Dizertační práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. 2009. 106 s.
18. Eichler, J., Soukup, M., Pilná, E. *Využití DMT při návrhu retardace podzemního drenážního odtoku.* Sborník GIS Seč 2000, Seč. 2000.
19. Furlan, A., et al. *Journal of Environmental Management. Designing management options to reduce surface runoff and sediment yield with farmers: An experiment in south-western France.*, 2011. 81 s.
20. Hall, F. R.: *Base flow recessions-a review.* *Water Resour*, 1968, 973-983 s.
21. Hartman, P., Přikryl, I., Štědranský, E., *Hydrobiologie.* Praha: Informatorium, spol. s r. o., 1998. 335 s.
22. Hrádek, F., Kuřík, P. *Hydrologie.* Skriptum FLE ČZU Praha. 2002. 280 s.
23. Chmelová Pavelková, R., Frajer, J., *Základy fyzické geografie 1 – Hydrologie.* UPOL. 2011. 131 s.
24. Jain, S. K.: *Evaluation of catchment management strategies by modelling soil erosion / water quality in EPIC supported by GIS.* M.Sc. thesis, Galway: National University of Ireland, Department of Engineering Hydrology 1997. 41-56 s.
25. Janeček, M. *Ochrana zemědělské půdy před erozí.* Praha: ÚVTIZ, 1992. 110 s
26. Janeček, M., Dostál, T., Kozlovsky Dufková, J., Dumbrovský, M., Hůla, J., Kadlec, V., Konečná, J., Kovář, P., Krása, J., Kubátová, E., Kobzová, D., Kudrnáčová, M., Novotný, I., Podhrázká, J., Pražan, J., Procházková, E., Středová, H., Toman, F., Vopravil, J., Vlasák, J., *Ochrana zemědělské půdy před erozí.* ČZU Praha. Praha. 2012. 117 s.
27. Janeček, M., Váška, J., *Hydrologické výpočty v protierozní ochraně půdy.* Informační centrum ČKAIT. Praha. 2001. 24 s.
28. Jůva, K. *Odvodňování půdy.* Státní zemědělské nakladatelství. Praha. 1957. 264 s.

29. Kadlecová, R., Herrmann, Z., Kašpárek, L., Vlnas, R., Frydrych, V., Stibitz, M., Slavík, J., Milický, M., Olmer, M., a kol., *Sborník geologických věd. Hydrologie, Inženýrská geologie*. Praha. 2010. 76 s.
30. Kemel, M., *Klimatologie. Meteorologie. Hydrologie*. ČVUT. 1996. 289 s.
31. Kessler, J., Kněžek, M., *Metody výpočtu základního odtoku*. Podzemná voda. č.2. Praha. 2000. 52 – 58 s.
32. Kliner, K., Kněžek, M., Olmer, M., *Využití a ochrana podzemních vod*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství. 1978. 295 s.
33. Kodešová, R., et al. *Soil and Tillage Research. Soil structure and soil hydraulic properties of Haplic Luvisol used as arable land and grassland.*, 2011. 155 s., 157 s.
34. Kozlovská, S., Toman, F., Vyhodnocení indexu předchozích srážek u vybraných klimatologických stanic. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2010. sv. LVIII, č. 4, 135-140 s.
35. Kozlovská, S., Vliv metody stanovení N-letých maximálních denních úhrnů srážek na objem přímého odtoku. Brno. 2013. 8 s.
36. Kravka, M., *Základy lesnické a krajinářské hydrologie a hydrauliky*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. Brno. 2009. 113 s.
37. Krešl, J. *Hydrologie*. MZLU Brno. Brno. 2001. 128 s.
38. Krešl, J., *Vliv lesa na utváření odtoku při přívalových a dlouhotrvajících deštích*. Lesnická práce 78. 1999. 501-503 s.
39. Kříž, H., *Hydrologie podzemních vod*. Academia. Praha. 1983. 268 s.
40. Kulhavý, Z., Doležal, F., Soukup, M., *Separace složek drenážního odtoku a její využití při klasifikaci existujících drenážních systémů*. Vědecké práce VÚMOP Praha. 2001. č. 12. 29-52 s.
41. Kulhavý, Z., Soukup, M., Doležal, F., Čmelík, M. *Zemědělské odvodnění drenáží – Racionalizace využívání*, VUMOP Praha, 2007, 86 s.
42. Kvítek, T., Libichová, H., Peterková, J., Šádek, D., *Vliv rozmístění druhů pozemků v povodí na odtok a odnos vybraných látek*. Redakčně upravená roční zpráva za rok 2011, projekt NAZV QH82095, VÚMOP, v.v.i., Praha, 2011. 69 s.
43. Kvítek, T., Gergel, J., Ondr, P., Zámešková, K., *Zemědělské meliorace*. České Budějovice. 2006. 164 s.

44. Landers, M.N., Ankcorn, P.D., McFadden, K.W., *Watershed impacts on streamflow quantity and quality in six watersheds of Gwinnett County, Georgia*. Scientific Investigations Report 2007-5132, Reston, VA: US Geological Survey. 2007. 62 s.
45. Line, D.E., White, N.M., *Effects of development on runoff and pollutant export*. Water Environment Research 79. 2007. 185–190 s.
46. Lyne, V., Hollick, M.: Stochastic time variable rainfall runoff modeling. National Committee on Hydrology and Water Resources of the Institution of Engineers, Australia, 1979, s. 89–92. In: LIN, K., GUO, S., ZHANG, W., LIU, P.: A new baseflow separation method based on analytical solutions of the Horton infiltration capacity curve. Hydrol. Process. 21, 2007, s. 1719–1736.
47. Ma, X., Xu, J., Luo, Y., Aggarwal, S.P., Li, J., *Responses of hydrological processes to land-cover and climate changes in Kejie watershed, south-west China*. Hydrological Processes 23. 2009. 1179–1191 s.
48. McGuire, K.J., McDonnell, J.J., Weiler, M., Kendall, C., McGlynn, B.L., Welker JM, et al., *The role of topography on catchment-scale water residence time*. Water Resources Research 41. 2005. W05002.
49. Melioris, L., Mucha, I., Pospíšil, P., *Podzemná voda – metódy výskumu a prieskumu*. Bratislava. 1986. 429 s.
50. Němec, J. *Hydrologie*, Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1965. 237 s.
51. Pačes, T., *Voda a Země*. Praha. 1982. 174 s.
52. Pavelková Chmelová, R., Frajer, J., *Základy hydrologie*. Univerzita Palackého v Olomouci. 2013. 141 s.
53. Pavlásek J., 2010: *Modelování proudění podzemní vody nad horizontálním a nakloněným nepropustným podložím*. ČZU, Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.Masaryka, v.v.i., Praha, 68 s.
54. Pavlík, F., *Kvantifikace přirozené vodní retenční schopnosti krajiny ve vybraných povodích*. Dizertační práce. VÚT Brno. 2014. 140 s.
55. Philip, B. B., Wayne C. H. *Hydrology and floodplain analysis*. Addison – Wesley Publishing Company, New York, 1988. 815 s.
56. Pitter, P., *Hydrochemie*. VŠCHT Praha. 1999. 568 s.
57. Podhrázká, J. *Ochrana a organizace povodí vodárenské nádrže Nová Říše*. Doktorská disertační práce. Brno : MZLU Brno, 2002. 133 s.

58. Podhrázská, J., Uhlířová, J. *Možnosti stanovení účinnosti ochrany před povodňemi retencí krajiny: Výstup etapy 06 výzkumného záměru VÚMOP Praha*. VÚMOP, Praha, 2005, 29 s.
59. Poštulka, Z., *Příští povodeň může být menší*. Praktická příručka pro obce, místní organizace, lesníky a zemědělce. Hnutí Duha. Brno. 2007. 28 s.
60. Price, K., *Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: A review*. US Environmental Protection Agency. USA. 2011. 465-492 s.
61. Quitt, E.: *Klimatické oblasti ČSR, 1 : 500000*. Brno, Geografický ústav ČSAV, 1975
62. Říha, J., *Voda a společnost*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha. 1987. 338 s.
63. Serrano, E.S., *Hydrology for Engineers, Geologists and Environmental Professionals*. HydroScience Inc. Lexington. Kentucky. 1997. 468 s.
64. Sklenička, P. *Základy krajinného plánování*. 2. vyd. Naděžda Skleničková, Praha, 2003, 321 s.
65. Souchere, V., at. al. *Environmental science and polici. Grassland and crop trends: role of the European Union Common Agricultural Policy and consequences for runoff and soil erosion*. 2003. 12 s., 13 s.
66. Soukup, M., Kulhavý, Z., Pilná, E., Mimrová, K., Eichler, J. *Opatření pro regulaci odtoku v zemědělsky využívaném povodí*. METODIKA 26/2001, VÚMOP Praha, 2001, 51 s.
67. Starý, M., *Hydrologie*. Modul 01. VUT Brno. 2005. 213 s.
68. Šercl, P. : *Metoda CN křivek – průběžná zpráva na ČHMÚ Praha*. In: Rozvoj a testování modelovacího systému pro predikci povodňových odtoků v malých povodích, Zpráva za rok 2005 projektu VaV 1D/1/5/05, DHI Hydroinform a ČHMÚ Praha. 2006. 50 s.
69. Tlapák, V., Šálek, J., Legát, V., *Voda v zemědělské krajině*. Praha: Zemědělské nakladatelství Brázda. 1992. 320 s.
70. Toman, F., Podhrázská, J. *Vliv klimatických podmínek na vznik eroze způsobené táním sněhu*. In: Rožnovský, J., Litschmann, T. (ed.): XIV. Česko-slovenská bioklimatologická konference, Lednice na Moravě, 2002, 456-464 s.

71. Váňa, M., Holoubek, I., Pacl, A., Pekárek, J., Smrčková, V., Machálek, P., Helešic, J., Šeda, Z., Adamec, V., Janouch, M., Honzák, J., Ansorgová, A., Kohoutek, J., Holoubková, I., Šatalov, V., Dutčák, S., Fottová, D., Hruška J., Hofman, J., Anděl, P. *Quality of the Natural Environment in the Czech Republic at the Regional Level*. Results of the Košetice Observatory. Nakladatelství ČHMÚ, Praha, 2001, 189 s.
72. Vopravil, J., Khel, T., Vrabcová, T., Havelková, L., Procházková, E., Novotný, I., Novák, P., Fučík, P., Duffková, R., Jacko, K., Tylová, J., Hodek, T., *Vliv činnosti člověka na krajinu českého venkova s důrazem na vodní režim a zadržování vody v krajině*. VUMOP Praha. 2011. 75 s.
73. Zachar, D., Jůva, J., *Využití a ochrana vod ČSSR z hlediska zemědělství a lesního hospodářství*. 1. vyd. Praha: Academia, 1987, 567 s
74. Žlábek, P., *Vliv uspořádání krajinné matrice na složky odtoku*. České Budějovice. Dizertační práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. 2009. 106 s.

Internetové zdroje

1. Česká geologická služba. [online] [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://geology.cz/>
2. Geoportál SOWAC – GIS [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://geoportal.vupom.cz/>
3. Mapový portál www.mapy.cz [online]. [ci. 2016-04-19]. Dostupné z www.mapy.cz

9 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Hydrologický cyklus (Serrano, 1997)	11
Obrázek 2 - Schéma odtokového procesu (převzato z ČSN 73 6530 Názvosloví hydrologie)	14
Obrázek 3 - Hydrologická bilance povodí (Serrano, 1997)	16
Obrázek 4 - Hydrologické pořadí toku, řád toku (Kemel, 1996)	17
Obrázek 5 - Různé způsoby rozčleňování hydrogramu na přímý a základní (podzemní) odtok 1 - přímý odtok, 2 - základní odtok (Kříž, 1983)	30
Obrázek 6 - Závislost výšky přímého odtoku (H_o) na úhrnu deště(H_S) a číslech odtokových křivek (CN)	34
Obrázek 7 - Orientační poloha Kopaninského toku	35
Obrázek 8 - Vyznačení toku na serveru www.mapy.cz	36
Obrázek 9 - Rozvodnice Kopaninského potoka	37
Obrázek 10 - Klimatické regiony s vyznačením Kopaninského toku (zdroj: www.migesp.cz)	38
Obrázek 11 - Zobrazení geologických poměrů (www.geology.cz)	40
Obrázek 12 - Zobrazení landuse v ploše povodí	42
Obrázek 13 - Mapa hydrologické skupiny půd	44
Obrázek 14 - Hodnoty čísel CN	46
Obrázek 15 - Výsledné rasty infiltrační schopnosti, sklonu a retence	50
Obrázek 16 - Klasifikace infiltrační schopnosti, sklonu a retence dle hydrologické skupiny půd	51
Obrázek 17 - Výsledný rastry CN s posílením vlivu infiltrace a rastr potenciální retence	52
Obrázek 18 - Rastr směru odtoku a rastr odtoku z povodí (m^3) s pravděpodobností opakování za N100 let	53
Obrázek 19 - Vliv obsahu vody v půdě (IPS I - suchá, IPS II - střední, IPS III - mokrá) na změnu čísla odtokové křivky (CN) (Janeček, Váška, 2001)	54
Obrázek 20 - Stanovení potenciální retence povodí – příklad čerstvě zrypřeného úhuru na půdě se střední rychlostí infiltrace (Kozlovská, Toman, 2010)	57
Obrázek 21 - Rastry reálného stavu landuse vs. zatravnění orné půdy	58
Obrázek 22 - Půdní retenční křivky na orné půdě (vlevo) a na pastvinách (vpravo), kde:	60

10 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Základní charakteristika Kopaninského potoka.....	37
Tabulka 2 - Klimatické charakteristiky Kopaninského toku.....	39
Tabulka 3 - Landuse v ploše Kopaninského toku	41
Tabulka 4 - Hodnoty CN dle hydro. skupiny půd.....	45
Tabulka 5 - Hodnoty odběrné stanice	48
Tabulka 6 - Souhrn výsledků	49
Tabulka 7 - Výsledné odtoky dle vlivu obsahu vody v půdě na povodí Kopaninského potoka.....	54
Tabulka 8 - Výpočet součinitele odtoku pro IPS I.....	55
Tabulka 9 - Výpočet součinitele odtoku pro IPS II	55
Tabulka 10 - Výpočet součinitele odtoku pro IPS III	55
Tabulka 11 - Výpočet součinitele odtoku při změně landuse	58
Tabulka 12 - Porovnání odtoku při středním nasycení půdy proti odtoku při změně landuse.....	59