

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

Vliv časového rozložení srážkového úhrnu na hydrologické  
charakteristiky srážko-odtokové události

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

Autor:  
Bc. Anna Mikolášová

---

České Budějovice, 2017

### **Prohlášení**

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

V Českých Budějovicích 9. 4. 2017

.....  
Bc. Anna Mikolášová

---

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

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

Jméno a příjmení: **Bc. Anna MIKOLÁŠOVÁ**  
Osobní číslo: **Z14426**  
Studijní program: **N4106 Zemědělská specializace**  
Studijní obor: **Pozemkové úpravy a převody nemovitostí**  
Název tématu: **Vliv časového rozložení srážkového úhrnu na hydrologické charakteristiky srážko-odtokové události**  
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 :**

Srážkové úhrny vykazují velkou časovou i prostorovou variabilitu. Tato diplomová práce bude za pomoci hydrologického modelování řešit vliv tvaru návrhového hyetogramu na odtokové charakteristiky při srážko-odtokové události.

Rámcový obsah DP:

Rešerše na dané téma.

Výběr vhodných typů návrhových hyetogramů.

Hydrologické simulace odtoků při různých návrhových deštích s různými typy hyetogramů.

Vyhodnocení dosažených hydrologických charakteristik odtoku (kulminační průtok, čas kulminace, objem přímého odtoku).

Diskuze a závěr.

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.**

**Havlíček a kol. Agrometeorologie. SZN Praha, 1986**

**Serrano, E.S. Hydrology for Engineers, Geologists and Environmental Professionals. HydroScience Inc. Lexington, Kentucky, 1997, 468 s.**


**Maidment, D.R. (ed.). Handbook of hydrology. McGraw-Hill, New York, 1993, 1424 s.**

**časopisy: Hydrological processes, Journal of hydrology, Meteorological applications, Water resources management, 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**

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

JIHOČESKÁ UNIVERZITA  
ČESKÝCH BUDĚJOV  
LEHÁŘOVA 15  
STUDIJNÍ ODDĚLENÍ  
STUDIJNÍ KANCELÁŘ

L.S.

  
doc. Ing. Pavel Ondr, CSc.  
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 23. března 2015

## **Poděkování**

Ráda bych na tomto místě poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Ing. Václavu Bystřickému Ph.D. za poskytnutí dat, ochotu, cenné rady, pomoc a trpělivost při vypracování diplomové práce.

Také bych chtěla poděkovat rodičům za podporu během mého studia.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá vlivem časového rozložení srážkového úhrnu na hydrologické charakteristiky srážko-odtokové události. Praktická část práce byla řešena na povodí toku Volšovka.

V teoretické části práce je popsán vznik, rozdělení a časová distribuce srážek, dále také odtok a některé vybrané hydrologické charakteristiky odtoku. Dále se práce zabývá hydrologickým modelováním, podrobněji popsáný je zde srážko-odtokový model HEC-HMS, který je dále použit i v praktické části této práce.

V praktické části je uvedena charakteristika zájmového území. Dále je zde popsána příprava srážkových dat s využitím programu DES\_RAIN, vytvoření digitálního modelu terénu v programu ArcGIS a příprava hydrologického modelu v programu HEC-HMS. V závěru práce byly v programu HEC-HMS simulovány průtoky v uzávěrovém profilu Volšovky a také v uzávěrových profilech dílčích povodí. Bylo provedeno celkem 16 simulací, které byly vyhodnoceny podle hodnoty kulminačních průtoků a času kulminace.

**Klíčová slova:** povodí, odtok, hydrologické modelování, CN křivky

## **Abstract**

This master thesis deals with the influence of temporal distribution of precipitation on hydrological characteristics of the rainfall-runoff process. The practical part of the thesis was carried out on the drainage basin Volšovka.

In the theoretical part, the origin, division, and temporal distribution of rainfall is described, as well as surface runoff and some chosen hydrological characteristics of flow-off. Moreover the work deals with hydrological simulation, there is also described in further detail the rainfall-runoff model HEC-HMS, which is furthermore used in the practical part of this thesis.

In the practical part, the characteristics of the area of interest is introduced. Next is described the preparation of the rainfall data with the use of DES\_RAIN programme, also creation of the digital model of the terrain in the ArcGIS programme and the preparation of hydrological model in HEC-HMS model. In the conclusion of the thesis, the flow capacities of the closure profile of Volšovka were simulated, as well as other particular closure profiles of the catchment area. There were 16 simulations carried out, which were evaluated on the basis of the peak flow capacities and the time of culmination.

*Key words:* catchment area, runoff, hydrological modelling, runoff curve number

# Obsah

1	Úvod.....	9
2	Oběh vody v přírodě .....	11
3	Vznik a rozdělení srážek.....	13
	3.1 Horizontální srážky .....	14
	3.1.1 Rosa.....	14
	3.1.2 Jíní a námraza.....	15
	3.1.3 Ledovka.....	15
	3.1.4 Mlha .....	15
	3.2 Vertikální srážky .....	15
	3.2.1 Deště.....	15
	3.2.2 Mrholení.....	16
	3.2.3 Sníh.....	16
	3.3 Časová distribuce srážek .....	17
4	Odtok .....	18
	4.1 Typy odtoku .....	18
	4.2 Hydrologické charakteristiky odtoku .....	20
	4.3 Faktory ovlivňující odtok .....	22
5	Hyetogram .....	25
	5.1 IDF křivky .....	25
	5.2 Typy hyetogramů .....	27
6	Hydrologické modelování.....	32
	6.1 Model HEC - HMS.....	32
	6.2 Komponenty modelu HEC-HMS .....	33
	6.2.1 Model povodí .....	33
	6.2.2 Meteorologický model .....	33
	6.2.3 Časové řady .....	35
7	Materiál.....	36
8	Metody .....	41
	8.1 Příprava srážkových dat .....	41
	8.2 Digitální model terénu .....	43
	8.3 Metoda čísel odtokových křivek .....	44
	8.4 Transformace přímého odtoku – Clarkův jednotkový hydrogram .....	46
	8.5 Komponenty modelu HEC-HMS .....	46
	8.5.1 Basin Model Component.....	46
	8.5.2 Meteorologický model .....	47
	8.5.3 Time-Series Data Manager.....	47
9	Výsledky a diskuze .....	48
10	Závěr .....	76
11	Seznam použité literatury .....	78



# 1 Úvod

Voda představuje nejrozšířenější látku na Zemi a zároveň naprosto nezbytnou podmínku života. Tato jednoduchá chemická sloučenina vznikla v procesu utváření Země a zdá se, že od té doby je jí na naší planetě víceméně konstantní množství. Je však nerovnoměrně rozloženo. Přes 97% vody je ve světových oceánech a slaná voda je pro člověka do značné míry nepoužitelná. Lidstvo se tedy musí spokojit se zbývajících třemi procenty a to mu dělá v posledních tisíciletích stále větší problémy. Je vlastně obrovské štěstí, že nedochází k fyzické spotřebě vody, ale mluvíme o tzv. ekonomické spotřebě. V průběhu svého koloběhu, ve styku s člověkem se mění vlastnosti vody – chemické příměsi, barva, teplota apod. Voda má velkou samočisticí schopnost a člověk zatím nedokázal vodu trvale znehodnotit. Jak roste počet obyvatelstva a zvyšují se jeho nároky, zvyšuje se i celkový objem spotřebované vody. Zatím má v tomto ohledu lidstvo stále ještě rezervy, na některých místech se však stává voda limitujícím faktorem dalšího rozvoje společnosti. V naší republice nemůžeme vodou plýtvat, neboť naprostou většinu vody získáváme ze srážek. Toto množství se odhaduje asi na 94 km<sup>3</sup> ročně. Její nedostatek jsme již pocítili ve srážkově podnormálních letech. Při globálním oteplování bude nedostatek vody jedním z největších problémů naší republiky (Kender, 2002).

Voda je základní složkou přírodního a životního prostředí. Stále zřetelněji se ukazuje, že vodu, její povrchové a podzemní zdroje lze chápat jako významnou součást přírodního bohatství státu. Dostatečné množství dobré vody je nezbytným předpokladem zachování života na zemi, předpokladem dalšího rozvoje lidské společnosti. Voda je pro člověka nezbytnou potravinou a surovinou, je zdrojem energie, poskytuje možnost vodní dopravy. Voda nejen slouží. V období jejího nadbytku, za povodňových situací vzniklých po velkých deštích nebo táním sněhu je velmi nebezpečná. Je schopna během velmi krátké doby svým dynamickým účinkem zničit výsledky práce mnohdy celých generací, neřídka si povodeň vybírá cenu nejvyšší-lidské životy (Kemel, 1996).

Atmosférické srážky představují klimatologickou a meteorologickou charakteristiku, které je zejména v poslední době věnována značná pozornost. Především v oblastech zaměřených na zemědělskou produkci, ale i jinde, je obyvateli citlivě vnímáno jejich prostorové a časové rozložení a jeho případné změny (Doleželová, 2013).

Srážky jsou typické svou velkou časovou i prostorovou variabilitou. Jak říká Jeniffer a kol. (2010), srážky jsou velmi dynamickým procesem, neustále mění svoji formu a intenzitu

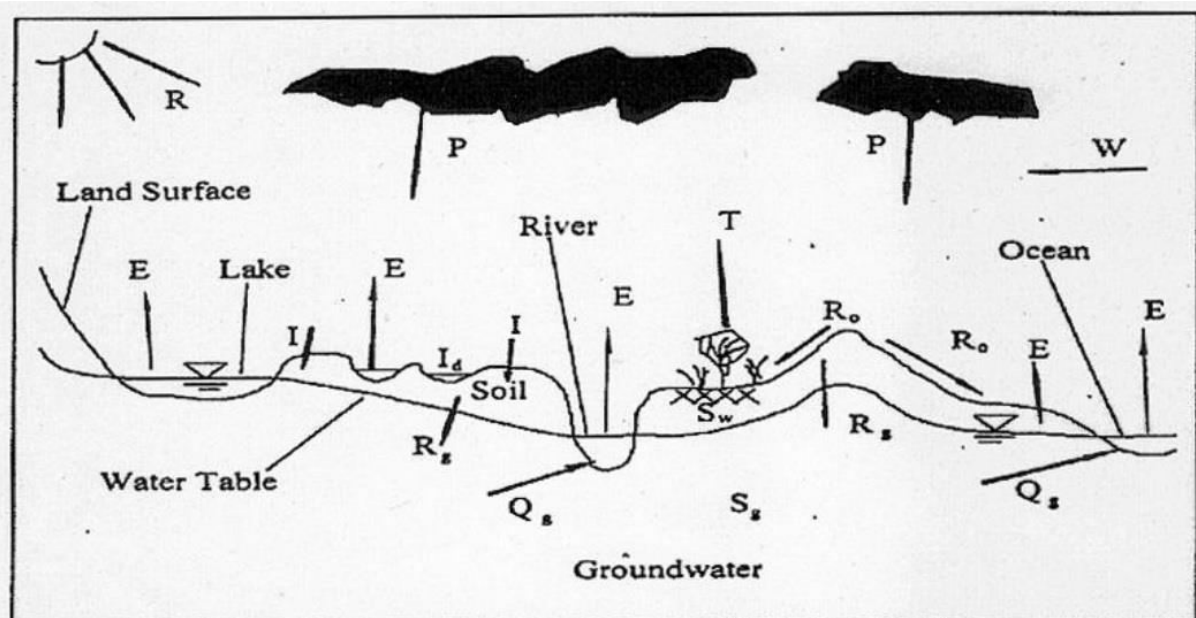
při průchodu danou oblastí. Proto jsou jedním z nejobtížněji stanovitelných atmosférických parametrů.

Cílem této práce je vytvoření hydrologického modelu a za jeho pomoci porovnání vlivu tvarů návrhových hyetogramů na odtokové charakteristiky při srážko-odtokové události v povodí toku Volšovka.

## 2 Oběh vody v přírodě

Příčinou oběhu vody v přírodě je sluneční energie. Jejím vlivem se voda vypařuje z vodních hladin, z půdy i vegetace a ve formě plynného skupenství prouděním vzduchu přechází do horních vrstev atmosféry, kde se kondenzuje a ve formě srážek padá na zemský povrch, zde se znovu vypařuje a tak nastává stále opakovaný a nepřetržitý pohyb vodních mas, který nazýváme oběhem vody v přírodě (Obr. č. 1). Rozeznáváme dva oběhy vody v přírodě, které jsou založeny na stejném principu. Při malém oběhu vody se uskutečňuje výměna vody pouze nad mořem a s ohledem na rozsáhlé vodní plochy, čistotu ovzduší a sluneční záření je tento oběh nejintenzivnější. Při velkém oběhu dochází k výměně vody mezi mořem a pevninou v důsledku činnosti větru a oběh je už méně intenzivní. Nad bezodtokovými oblastmi dochází k vlastnímu oběhu (Sommer, 1985).

Základní hydrologickou oblastí, na které zjišťujeme vzájemný vztah bilančních prvků a zkoumáme odtokový proces, je povodí. Je to území, vztažené k určitému profilu na toku, omezené rozvodnicí. Takto určená plocha povodí je plochou, z níž srážková voda, vypadlá na kterémkoli místě, má možnost stéci povrchově do říčního systému tohoto povodí a protéci jeho uzávěrovým profilem (Kemel, 1996).



Obr.1 Koloběh vody (Serrano, 1997)

E- evaporace	T- transpirace	Qs- podpovrchový odtok
R- Sluneční záření	P- srážky	Qg- odtok podzemní vody
I- infiltrace	W- rychlost větru	Rg- odtok do saturované zóny
Sw- půdní vlhkost	Ro- povrchový odtok	Sg- reservoár podzemní vody

Změnu zásob vod na ploše povodí, vyjadřuje základní hydrologická bilanční rovnice, která se uvádí v následujícím tvaru:

$$HS+HP-HO-HE=\Delta Z \text{ [mm, m}^3\text{/ha]}$$

kde:

H<sub>s</sub> - úhrn srážek, které spadly na plochu povodí za dané bilanční období [mm],

H<sub>p</sub> - úhrn přítoku vody, tzv. cizí voda, která přiteče na plochu povodí za daný časový úsek [mm],

H<sub>o</sub> - úhrn vody, která z plochy povodí odeče za daný časový interval [mm],

H<sub>e</sub> - hodnota evapotranspirace za dané časové období,

$\Delta Z$  - celková změna zásob vody za daný časový interval na ploše povodí [mm] (Dufková, 2009).

### 3 Vznik a rozdělení srážek

Pro vznik srážek je nezbytné, aby byla vodní pára ve vzduchu ochlazená na rosný bod. Výsledkem tohoto jevu jsou pak tzv. kondenzáty, což jsou kapalné srážky. Výsledkem desublimace jsou tzv. desublimáty, jedná se o srážky ve skupenství pevném. Srážky jsou atmosférickým jevem, který se mění v závislosti na zeměpisné poloze (Němec, 1965).

Vzduch může při určité teplotě obsahovat za určitých okolností maximální množství vodních par. Dojde-li k tomuto jevu a klesne-li teplota vzduchu pod teplotu rosného bodu, nastane v atmosféře kondenzace vodních par kolem kondenzačních jader (polétavé nečistoty ve vzduchu), tvoří se malé kapičky nebo krystalky vody, které se pak spojují ve větší a padají k zemi jako vertikální srážky. Naproti tomu rozeznáváme ještě srážky horizontální (jinovatka, náledí, námraza, mlha a rosa), které jsou z hydrologického hlediska bezvýznamné, jejich měření je obtížnější a provádí se dnes většinou účelově. Dle skupenství dělíme pak srážky na kapalné (déšť, rosa a mlha) a tuhé (kroupy, sníh, námraza, náledí a jinovatka). Přechodným typem mezi oběma skupenstvími je déšť se sněhem (Sommer, 1985).

Atmosférické srážky vznikají z oblaků ve volné atmosféře, nebo v přízemní vrstvě vzduchu. Atmosférické srážky vypadávají z oblaků, které jsou složené z kondenzátů či desublimátů ve formě aerosolu, složeného z drobných kapiček vody, či krystalků ledu. Rozměry těchto kondenzátů jsou však natolik malé, že i velmi slabé stoupavé proudy a vzdušné turbulence je udržují v relativní stabilitě. Proto, aby začaly padat k zemi musí se průměr několikanásobně zvýšit (Hrádek 2008).

Kromě tropických oblastí vznikají dešťové srážky důsledkem tří meteorologických situací: vlivem konvergence, konvekce a orografickým efektem (Dingman, 2002).

**Deště orografické** vznikají mechanickým účinkem pohoří, která zdvihají proudy vlhkého vzduchu do výše, kde nastává rozpínání, ochlazení, kondenzace a vznikají srážky. Srážky spadnou na návětrnou stranu pohoří, zatímco závětrná strana zůstává v dešťovém stínu (Šilar, 1996). Bývají často vytrvalé, zpravidla však s menší intenzitou (Kemel, 1996).

**Konvekční srážky** vznikají při vertikálním vzestupu vzduchu. Dochází k ohřátí vlhkého vzduchu o zemský povrch, ten poté vystoupí do vyšších vrstev atmosféry, kde se dynamicky ochladí, takže je v poměrně krátké době dosaženo rosného bodu. Srážky dosahují velkých intenzit a zasahují menší plochy, kdy může dojít k rozvodnění menších toků. Na našem území se vyskytují především v letním období (Bedient a Huber, 1988).

**Frontální srážky** jsou spojené s pohybem velkých hmot vzdušných systémů, jako je tomu v případě teplých nebo studených front. Frontální srážky před teplou frontou se objevují v podobě trvalého deště (sněžení). Srážky spojené se studenou frontou jsou před jejím přechodem obvykle ve tvaru přeháněk a bouřek, za ní mohou být ve tvaru trvalého deště. Mohou způsobovat povodně v rozsahlých povodích (Nypl, 1986).

### **3.1 Horizontální srážky**

Vznik horizontálních srážek probíhá jako kondenzace a sublimace na zemském povrchu. Ke kondenzaci dochází v tenkých vrstvách vzduchu, které přiléhají těsně k chladné zemi nebo ke studeným předmětům na ní, mohou se dotýkat s ní nebo s nimi a ochladit se až na teplotu rosného bodu, kdy dochází k nasycení vzduchu vodní parou. Pokračuje-li ochlazování dále, kondenzuje nebo sublimuje nadbytečná vodní pára na povrchu chladných předmětů nebo na studené půdě (Kopáček, 2005).

Množství horizontálních srážek je zpravidla menší než množství vertikálních srážek. Hrají však významnou roli např. v zemědělství, neboť jsou mnohdy schopny pokrýt minimální množství vody, které je potřeba pro zachování života rostlin v období, kdy je vertikálních srážek nedostatek (Kemel, 1996).

V přírodních podmínkách vzniká nepřetržitě řada produktů kondenzace a desublimace vodní páry. Vytvářejí se vždy za zcela specifických podmínek a podle toho se dělí na tři základní skupiny:

- Produkty kondenzace a desublimace na povrchu půdy na předmětech (horizontální srážky)
- Produkty kondenzace a desublimace v přízemní vrstvě vzduchu (mlhy)
- Produkty kondenzace a desublimace ve volné atmosféře (oblaky a srážky) (Havlíček 1986).

#### **3.1.1 Rosa**

Rosa jsou jemné, někdy vzájemně splývající vodní kapičky, které se při teplotě rosného bodu nad 0 °C srážejí zpravidla na horizontálních plochách předmětů při povrchu země, jako na trávě, listech apod. (Kopáček a Bednář, 2005).

### **3.1.2 Jíní a námraza**

Jíní a námraza, nejsou tolik důležité horizontální srážky v porovnání s rosou jak z hlediska zemědělského, tak i z hlediska odtoku na povodí. Při ochlazení povrchu pod  $0^{\circ}\text{C}$  vznikají desublimací drobné ledové jehličky, které tvoří jíní. Vznik námrazy je nejčastěji spojen se silným větrem, silnými přízemními mlhami a teplotou okolo  $0^{\circ}\text{C}$ . Vytváří se nejčastěji na svislých plochách budov, stromů či předmětů. Tloušťka takové námrazy může dosáhnout až 1 cm (Hrádek, 2002).

### **3.1.3 Ledovka**

Ledovka je hladký, průhledný, ledový povlak. Tvoří se zmrznutím přechlazených kapiček mrholení nebo dešťových kapek na předmětech, jejichž teplota je mírně pod bodem mrazu (Kopáček a Bednář, 2005).

### **3.1.4 Mlha**

Mlha je produktem kondenzace v přízemní vrstvě vzduchu. Příčinou jejího vzniku je kondenzace ve vrstvě vzduchu do 200m. Podmínkou vzniku mlhy je ochlazení vzduchu v přízemní vrstvě. Mlhy se rozlišují podle způsobu ochlazení vzduchu a plošného rozsahu (Havlíček, 1986).

## **3.2 Vertikální srážky**

Pod pojmem atmosférické srážky se rozumí voda nebo tuhé částice vypadávající v různých formách z oblaků na zemský povrch. Takové srážky se označují jako vertikální a k zemi vypadávají nejčastěji jako déšť, mrholení, déšť se sněhem, sněhová krupice nebo a kroupy. Dále mohou vypadávat jako sněhové nebo ledové krupky, zmrzlý déšť a ledové jehličky (Hrádek, 2002).

### **3.2.1 Deště**

Deště jsou vertikální kapalné srážky s průměrem kapek 0-3 mm. Rozlišují se podle tří kritérií: původu, doby trvání, podle úhrnu deště a příslušné doby trvání (Hrádek, 2002).

Velikost kapky odpovídá úměrně její rychlosti pádu a je charakterizována konečnou rychlostí, tj. maximální rychlostí, při níž nastává rovnováha mezi tíhovým účinkem kapky a odporem vzduchu. Velikost kapky závisí na síle výstupného vzdušného proudu. Platí, že čím je proud silnější, tím větší kapky jsou vyloučeny (Kříž a kol., 1988).

Při podchlazeném zemském povrchu se může vyskytnout mrznoucí déšť se vznikem ledovky (Uhlíř, 1961).

### **3.2.2 Mrholení**

Jako mrholení označujeme padající srážky složené z kapiček o průměru 0,05 až 0,5 mm. Vzhledem k malým rozměrům nemůžeme obvykle jednotlivé kapičky okem rozeznat. Mrholení je slabou stejnoměrnou srážkou se značnou hustotou kapiček, takže na předmětech vytvářejí souvislou vrstvičku vody. Jednotlivé drobné kapičky pro svou malou tíhu klesají v ovzduší pomalu a jsou ovlivňovány větrem, který je může zanášet i pod krytá místa (Kemel, 1996).

### **3.2.3 Sníh**

Jedná se o atmosférickou srážku, která dopadá obvykle na zemský povrch ve formě zmrzlých krystalků. Vzniká následkem desublimace vodní páry v led. Čerstvě napadlý sníh má většinou bílou barvu a dobře odráží sluneční záření, starší sníh je tmavší v důsledku znečištění a strukturálních změn sněhových zrn (Hrádek, 2002).

Sníh je tvořen různě uspořádanými krystalky ledu, jež narůstají na sobě často ve tvaru rozvětvených hvězdic. Při teplotách vyšších než  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  se tvoří vločky dosahující průměru až několika centimetrů a jednotlivé krystalky ledu jsou pokryty namrzlými vodními kapičkami. Při nižších teplotách se netvoří vločky a krystalky jsou menší (Kříž a kol., 1988).

Sníh, který dopadne na povrch země a neroztaje, vytvoří sněhovou pokrývku. Sněhová pokrývka je hodnocena z praktických důvodů několika hledisky:

-Hustota sněhové pokrývky, udávající hmotnost sněhu v  $\text{kg/m}^3$ . U kyprého sněhu se pohybuje kolem  $50\text{ kg/m}^3$ , starý a slehlý sníh má hustotu až  $700\text{ kg/m}^3$ , průměrně se uvažuje hustota  $400\text{ kg/m}^3$ .

-Výška sněhové pokrývky se udává v centimetrech jednak jako celková sněhová pokrývka, jednak jako vrstva nového sněhu.

Z hustoty sněhu a výšky sněhové pokrývky lze vypočítat zásoby vody ve sněhové pokrývce pro hydrologické účely (Havlíček, 1986).



### 3.3 Časová distribuce srážek

Vertikální srážky se podle průběhu srážkového jevu dělí na:

- Srážky trvalé, označované též jako krajinné, které mají sice menší intenzitu, ale vypadávají vždy delší dobu a postihují vždy větší území.
- Srážky přeháňkové, které mají větší intenzitu a kratší trvání, opakují se však během krátké doby vícekrát.
- Srážky z mrholení, které jsou nejméně intenzivní formy vertikálních srážek. Drobné kapičky o rozměrech 0,05 až 0,5 mm se v ovzduší vlivem i nepatrných vánků pohybují všemi směry (Havlíček, 1986).

K hodnocení srážek se používají především následující charakteristiky:

#### **Množství srážek (Z)**

Průměrná výška srážek na povodí, je průměrná tloušťka vrstvy vody ze spadlých srážek na povodí, která se průměruje tak aby byla stejná po celém povodí, vyjadřuje se v milimetrech. Definice průměrné výšky je vyjádřena jako podíl srážek a plochy povodí (Hrádek, 2002).

#### **Trvání srážek (t)**

Doba trvání srážek, je doba od začátku do ukončení srážky, měření této charakteristiky se obvykle provádí pouze u srážek kapalných. Vyjadřuje se v hodinách či minutách (Havlíček, 1986).

#### **Síla srážek**

Udává v milimetrech množství srážek na jeden srážkový případ (Hrádek, 2002).

#### **Intenzita srážek I (i)**

Množství srážek za čas (Havlíček, 1986).

$$i = \frac{Z}{t} [\text{mm/min}]$$

Intenzita deště je proměnlivá. Z počátku je malá, poté vzrůstá a po dosažení maxima opět klesá. Déšť s jedním maximem intenzity se nazývá jednoduchý, má-li dvě, příp. více maxim, mluvíme o dvojnásobném, příp. vícenásobném dešti (Kemel, 1996).

Rozlišujeme průměrnou intenzitu deště a okamžitou intenzitu deště. Průměrná intenzita deště je úhrn deště spadlý za zvolenou časovou jednotku, který je konstantní po celou dobu trvání deště. Okamžitá intenzita deště je intenzita v určitém časovém okamžiku (Hrádek, 2002).

## 4 Odtok

### 4.1 Typy odtoku

Odtok je hydrologický pojem, který vyjadřuje objem vody, která odečte za určitý čas z povodí, a to pokud dojde k překročení schopnosti krajiny pojmout vodu ze srážek. Odtok z povodí je celkové množství vody, která proteče uzávěrovým profilem. K jeho vytvoření dojde spadnutím srážek a působením gravitace. Tím vzniká plošný odtok (nesoustředěný), který pak se vlivem členitosti terénu koncentruje ve stružkách, struhách, rýhách, potocích a tocích a vytváří povrchový soustředěný odtok. Část spadlých srážek se vsakuje do půdy a dochází k pohybu vody puklinovým prostředím geologických vrstev až k hladině podpovrchové vody, kde se vytváří podpovrchový odtok (Hubačíková, 2002).

Odtokový součinitel  $\varphi$  ( $\varphi = \frac{O}{S}$ ) vyjadřuje poměr odtoku a srážek v dlouhodobém poměru a určuje kolik % odtéká ze srážek spadlých v daném povodí. Obecně  $\varphi$  v našich podmínkách dosahuje nejčastěji hodnoty  $0,20 \leq \varphi \leq 0,40$ . Může také nastat anomálie, že  $\varphi > 1$ . To nastává v případě tání sněhu, který leží v povodí z předcházejících měsíců a provádíme-li bilanci za krátké časové období, kdy spadlé srážky byly minimální a v povodí ležely srážky z předchozích měsíců. Známe-li odtokový součinitel  $\varphi$  a množství spadlých srážek, můžeme stanovit odtok  $O = S \cdot \varphi$ , přičemž  $\varphi$  je veličina bezrozměrná (Sommer, 1985).

Srážky, výpar i odtok vyjadřujeme buď v objemových jednotkách ( $m^3$ ,  $km^3$ ) nebo ve výškách vodního sloupce (mm), které si představujeme tak, že objem vody je rovnoměrně rozdělen po celé ploše (Sommer, 1985).

Podle způsobu, jakým se srážková voda do povrchových toků dostává, se celkový odtok rozděluje na několik složek (viz. Obr. č. 2):

#### **Celkový odtok**

Celkový odtok je souhrn všech složek odtoku procházející uzávěrovým profilem za určitý časový interval. (Shaw, 1994).

#### **Základní odtok**

Základní odtok představuje složku podzemních vod v celkovém odtoku a po uplynutí určitého času nebo v období bez srážek představuje veškerý povrchový odtok (Štamberová, 1998).

#### **Povrchový odtok**

Povrchový odtok je složkou celkového odtoku, která dotéká z povodí do sítě vodních toků po povrchu terénu (Shaw, 1994).

Povrchový odtok je přisuzován ke členité topografii zemského povrchu. Kde povrchový odtok probíhá různými způsoby. Nejběžnější způsoby jsou ze srážek, při tání sněhu nebo přelitím malými depresemi (Brutsaert, 2005).

Povrchový odtok je definován jako gravitační pohyb vody po svahu nebo soustředěný odtok říční sítě k uzavíracímu profilu povodí. Tento typ odtoku prochází nejprve nasycením půdy, poté fází svahového odtoku a nakonec fází soustředěného odtoku v říční síti (Jůva a kol., 1984).

Pokud intenzita deště nepřevyší intenzitu infiltrace, povrchový odtok vzniknout nemůže. Jestliže celková vydatnost deště není dostatečná k tomu, aby se všechny půdní póry ve vrstvě nad hladinou podzemní vody zaplnily, déšť se neprojeví ani zvýšením zásob podzemních vod (Kemel, 1996).

### **Hypodermický odtok**

Složka celkového odtoku, která stéká do koryta toku v bezprostřední vrstvě pod povrchem povodí, aniž by dosáhla hladiny podzemní vody (Shaw, 1994).

Část hypodermického odtoku se dostane do povrchového toku bezprostředně po skončení deště, zbylá část až po určitém čase (Kravka 2009).

### **Přímý odtok**

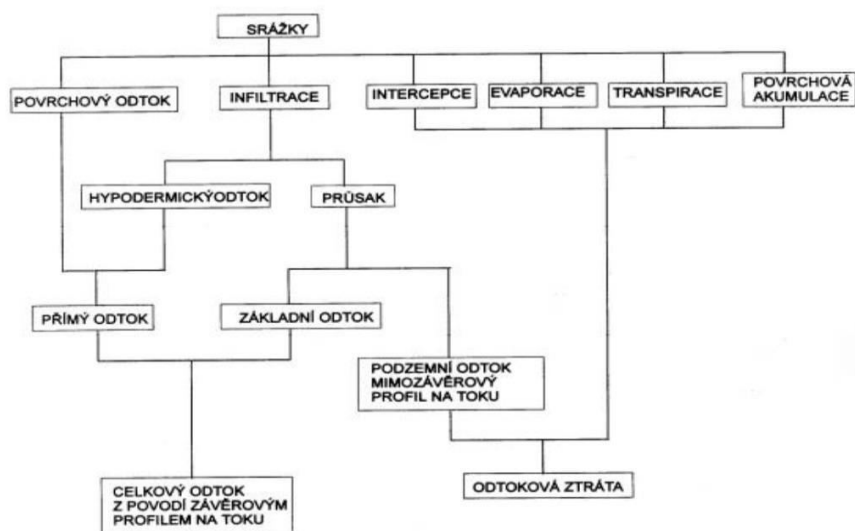
Přímý odtok je souhrnné označení pro povrchový a prosakující podpovrchový odtok, který stále nedosáhl hladiny podzemní vody během trvání deště nebo bezprostředně po něm (Cudlín, 1999).

### **Podzemní odtok**

Odtok podzemní vody je proud podzemní vody, který se pohybuje ve směru sklonu nepropustného podloží, rychlost tohoto pohybu je závislá na charakteru půdního a horninového prostředí a na zdroji podzemní vody (Hrádek, 2008).

### **Specifický odtok**

Specifický odtok je množství vody, které v průměru odečte z plošné jednotky povodí za jednotku času a vyjadřujeme ho v  $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  nebo  $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$  (Sommer, 1985).



Obr. č.2: Odtokový proces (ČSN 75-0110)

Po ukončení deště ustává povrchový odtok, doznívá odtok vody zadržené dočasně v prohlubních a průtok v koncovém profilu klesá. Někdy v poměrně dlouhém období po ukončení vydatného deště a povrchového odtoku pozorujeme zvýšenou vodnost toku. To je způsobeno dotací zvýšených zásob podzemních vod, kdy voda infiltruje do dna a břehů z těchto zásob. Lze tedy říci, že proces odtoku bude závislý na druhu deště, na stavu povodí, na nasycenosti půdy apod. (Kemel, 1996).

## 4.2 Hydrologické charakteristiky odtoku

### Dlouhodobý průměrný průtok

Dlouhodobý průměrný průtok  $Q_a$  je aritmetickým průměrem středních ročních průtoků  $Q_r$  za celé dlouhé období pozorování. Hodnota  $Q_a$  je základní charakteristikou, poskytující nejvšeobecnější názor o odtokových poměrech toku v daném profilu a dobře sloužící jako základ pro odvození dalších důležitých dat a informací (Kemel, 1996).

### Specifický odtok

Definici specifického odtoku Kvítka a kol. (2006) můžeme vyjádřit jako množství vody, která odeče z  $1 \text{ km}^2$  povodí řeky za 1 sekundu. Odtok lze zjistit tak, že průměrným odtokem  $Q$  vydělíme plochu povodí  $F$ . Rovnice pro specifický odtok  $q = Q / F$ . Výsledek se udává v litrech za sekundu na  $\text{km}^2$  ( $l/s/\text{km}^2$ ).

### **Doba doběhu a doba koncentrace**

Doba doběhu ( $T_t$ ) je čas, který potřebuje voda k přemístění z jednoho místa povodí na jiné. Je to část doby koncentrace ( $T_C$ ), jež je časem, který je potřebný pro odtok z hydraulicky nejvzdálenějšího bodu v povodí do uzávěrového profilu povodí; počítá se jako součet dílčích dob doběhu ve zvolené odtokové dráze. Doba koncentrace ovlivňuje tvar a kulminaci hydrogramu odtoku. Intenzifikace zemědělského využití pozemků v krajině obvykle zkracuje dobu koncentrace, čímž se zvyšuje vrcholový průtok (Janeček, 2012).

### **Průměrný roční průtok**

Průměrný roční průtok je dán např. jako podíl celkového proteklého množství vody za rok a počtu sekund, obsažených v tomto roce. Nejčastěji ho vypočítáme jako aritmetický průměr všech průměrných denních průtoků, nebo jako vážený průměr průměrných měsíčních průtoků příslušného roku (Kemel, 1996).

### **Kulminační průtok**

Kulminační průtok je základním a nevyhnutelným vstupem při dimenzování kapacity koryta, mostních profilů, přelivů hrází apod. Určení hodnoty  $N$  - ročního kulminačního průtoku představuje jednu z nejdůležitějších, ale současně i nejsložitějších úloh moderní hydrologie a je součástí inženýrské hydrologie (Pokorná, Zábranská, 2008).

### **Maximální průtok**

Jedná se o nejvyšší průtok za dané období, odpovídá kulminaci průtokové vlny. Zjišťování a analýza maximálních průtoků jsou nedílnou součástí vyhodnocení srážko-odtokových událostí, zejména povodní (Hrádek a Kuřík, 2002).

### **Průměrná čára překročení**

Chronologickou čáru překročení průměrných denních průtoků  $Q_d=f(t)$  určitého roku vykresluje proto, že názorně zobrazuje meze kolísání hodnot a jejich časový výskyt. Dále v rámci zpracování dat sestavená čára překročení vyjadřuje rozdělení těchto průměrných denních průtoků  $Q_d$  co do velikosti a doby překročení. Pakliže vykreslíme čáru překročení z dlouhé řady let, její průběh vyjadřuje typické rozdělení těchto průtoků v daném profilu. Můžeme tedy z ní získat představu o režimu toku. Čára překročení, získaná zpracováním průměrných denních průtoků za dlouhou řadu let, zvaná průměrná čára překročení, se

konstruuje tak, že pro dané hodnoty  $Q_d$  zjišťujeme celkový součet dob překročení z čar překročení jednotlivých let, dělený počtem roků. Celková maximální úsečka takto získané průměrné čary překročení bude rovna jednomu roku nebo 100% (Kemel, 1996).

### Objem přímého odtoku

Objem přímého odtoku  $O_{pH}$  je dán vztahem:

$$O_{pH}=1000 \cdot P_p \cdot H_o \text{ [m}^3\text{]}$$

kde:  $P_p$  je plocha povodí [ $\text{km}^2$ ]

$H_o$  je přímý odtok [mm] (Janeček, 2012).

### 4.3 Faktory ovlivňující odtok

Faktory ovlivňující odtok z povodí: antropogenní, půdní, geologické, klimatické a vegetační faktory, vodní nádrže (přírodní nebo umělé), hustota říčních sítí, velikost a tvar povodí, plocha povodí a délka toku. Největší vliv na odtok vody mají antropogenní vlivy-hospodaření s vodou, výstavba, pěstování určitých kultur, vegetační kryt a způsob využívání půdy (Soukup a Hrádek, 1999).

V období sucha je tvořen odtok vody základním odtokem, který je čerpán zejména ze zásob podzemních vod. Během extrémních srážko-odtokových situací, je dominujícím procesem rychlý povrchový odtok a mělké podpovrchové proudění, kdy voda, která se infiltruje do půdy, nedosahuje hladiny podzemní vody (Matoušek, 2010)

Z hydrologického hlediska je možno odtok z povodí považovat za výsledek hydrologického cyklu, který je ovlivněn klimatickými a geomorfologickými faktory. Klimatické faktory zahrnují účinky různých druhů srážek, intercepce, evaporaci, transpiraci. Geomorfologické faktory dále dělíme na charakteristiky povodí nebo charakteristiky koryt toků. Charakteristikami povodí jsou jeho velikost, tvar, průměrný sklon, propustnost půd, vegetační pokryv, využití území, přítomnost nádrží, bažin atd. Charakteristiky koryta se vztahují především k hydraulickým vlastnostem koryt, které ovlivňují průběh odtoku a určují kapacitu koryta (Dumbrovský, 2004).

## **Fyzikálně geografické vlastnosti**

Fyzikálně geografické vlastnosti povodí mají zásadní vliv na intenzitu, plošné a také časové rozdělení srážek. Zeměpisná poloha povodí určuje klimatické i hydrologické poměry. Orografické poměry, jako jsou výška a sklonitostní poměry mají vliv na klimatologické a meteorologické charakteristiky: teplotu vzduchu, srážkové úhrny, vlhkost vzduchu, výpar, intenzita a délku slunečního svitu a další (Hrabě a Buchgraber, 2004).

## **Geologické a půdní faktory**

Geologické podloží a jeho propustnost má význam pro utváření odtoku v období bez deště. Ovšem nepropustné vrstvy s málo mocným půdním překryvem snižují celkovou retenční kapacitu povodí a způsobují prudké stoupání průtoků při vydatných deštích. Geologické poměry povodí umožňující vznik velkých zásob podzemní vody (štěrk, pískovce) (Krešl, 2001).

## **Lesní půdy**

Vodní režim lesních půd se vyznačuje výraznou dynamikou a periodicitou, což souvisí se složitým působením lesa na jednotlivé složky vodní bilance, např. od nerovnoměrného rozdělení srážek po jejich přechod korunami stromů, stoku po kmeni, zadržení vody přízemní vegetací a humusovou vrstvou půdy, destrukci vody kořeny a rozdílného prostorového kolísání propustnosti lesních půd (Tužinský, 2004).

## **Travní porosty**

Travní porosty v krajině svým retenčním působením omezují povrchový odtok. Neutlučené, humózní a strukturní půdy travních porostů mají vysokou infiltrační schopnost. Tento efekt se uplatňuje zejména na svažitéch pozemcích, kde trvalé travní porosty zvyšují retenční schopnost půdy, zvláště při přívalových a dlouhotrvajících deštích (Hrabě a Buchgraber, 2004).

## **Vodní nádrže**

Vodní nádrže, umělé či přirozené, protékané i neprotékané mají z hydrologického hlediska velký význam. Nádrže, především neprotékané, mohou značnou část vody zadržet, takže se nepodílí na maximálním průtoku. Protékané nádrže zpomalují odtok velkého množství vody, podílí se na transformaci povodňové vlny. Kulminační průtoky jsou nádržemi snižovány (Klementová a Juráková, 2003).

## **Mokřady**

Mokřady chrání krajinu před záplavami, tím že vytvářejí prostor, který v čase povodňových průtoků umožňuje zachytit a akumulovat vodu. Mokřady působí jako vodní nádrž. Studie uvádějí, že 0,4 ha mokřadů může zadržet více než 6000 m<sup>3</sup> vody (Klementová a Juráková, 2003).

## **Činnost člověka**

Způsob obhospodařování pozemků, ať pozitivně či negativně ovlivňuje odtokové poměry v krajině. Úpravou toků se dají zlepšit nebo zhoršit odtokové poměry. Budují se přehrad, silnice a železnice, betonují či asfaltují se velké plochy. Také se odlesňují rozsáhlé plochy, zemědělské půdy se osévají monokulturami plodin (Krešl, 2001).

Jako následek nešetrného obhospodařování půdy jsou půdy nestrukturní, které neumí hospodařit s vodou, nejsou schopné vodu zadržet a odvést do větších hloubek. Tímto jsou vytvořeny ideální podmínky pro vznik povrchového odtoku a vodní eroze, což přispívá k transportu a akumulaci jemných částic (Sala, 2006).



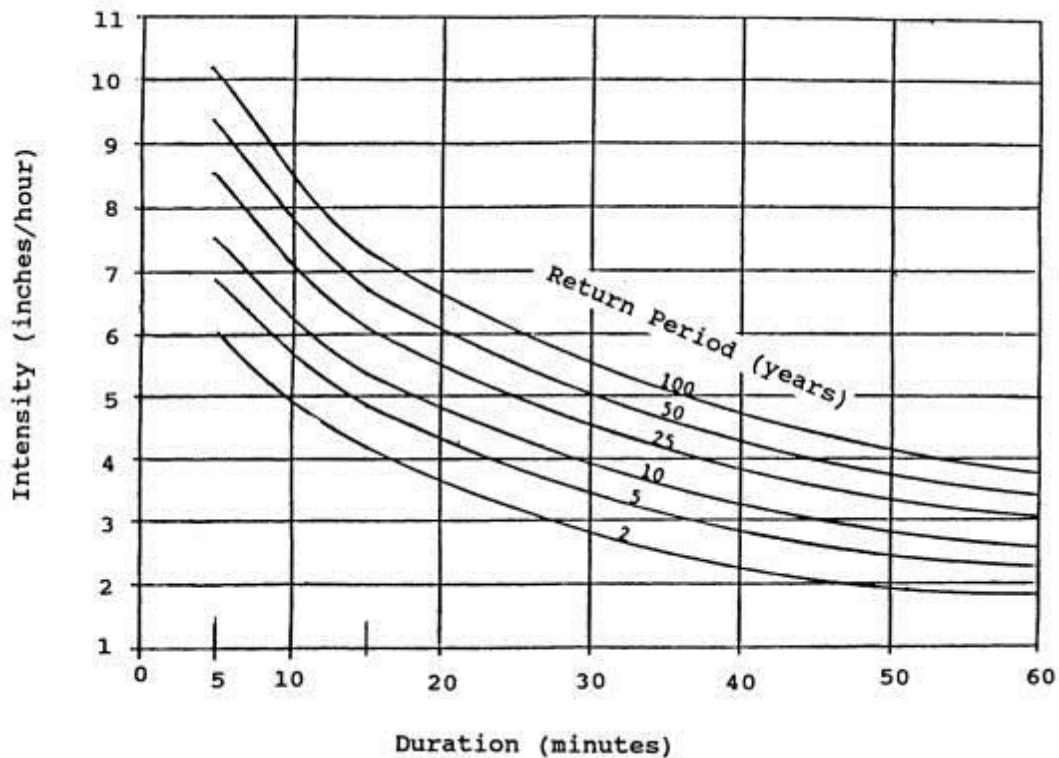
## 5 Hyetogram

Výpočet průměrné srážkové výšky na povodí je založen na použití hyetografické křivky. Na osu pořadnic vynášíme úhrny (maximální, minimální a úhrny dané jednotlivými izohyetami) a k nim, ve směru vodorovném vynášíme úsečky, jež v určitém měřítku vyjadřují plochy, na kterých byly tyto úhrny dosaženy nebo překročeny. Spojením koncových bodů plynulou čarou dostáváme hyetografickou křivku. Zplanimetrováním uzavřené plochy a převedením na půdici, vyjadřující celkovou plochu povodí, obdržíme obdélník, jehož horní strana vytíná na ose pořadnic hledanou výšku srážkové výšky (Kemel, 1996).

### 5.1 IDF křivky

Nejobvyklejší praktikou užití návrhových srážkových modelů ke správnému vyhodnocení srážkových událostí, které se vyskytují nad zkoumaným územím, je vytvoření tzv. návrhového hyetogramu, což je časové rozložení  $N$  – letých srážek do kratších kroků. Intenzita  $N$  – letých srážek je odvozena z IDF křivek pro dané území. IDF (Intenzity – duration – function) křivky jsou jedním z nejčastěji využívaných nástrojů v inženýrské hydrologii a jsou využívány při plánování a navrhování ochrany rozličných inženýrských projektů před povodněmi apod. (Sivapalan a Blöschl, 1998).

IDF křivka (viz. Obr. č.3 ) je funkcí intenzity srážek  $v$ , délky jejich trvání  $t$  a pravděpodobnosti jejich každoročního opakování  $N$ , vytvořená statistickým zpracováním dešťoměrných pozorování. Jejím užitím lze relativně snadno určit intenzitu srážek pro určitou délku trvání srážky. Konstrukce IDF křivek sestává ze tří kroků. V prvním kroku se určí hodnoty intenzity  $v$  srážky pro předem zadané časové intervaly  $t_j$ . Ve druhém kroku se hodnoty intenzity srážek příslušející jednotlivým časovým intervalům  $t_j$  roztřídí podle pravděpodobnosti jejich opakování  $N$ , tj. na 1 – leté, 5 – leté, 10 – leté srážky atd. Posledním třetím krokem je vytvoření samotných IDF křivek, což lze provést dvěma způsoby. Buď je intenzita  $v$  srážek pro každou pravděpodobnost jejich opakování  $N$  určena zvlášť a platí  $v = v_N(t)$ , nebo je intenzita  $v$  funkcí délky zadaných časových intervalů  $t$  i pravděpodobnosti  $N$ ,  $v = v(N, t)$  (Koutsoyiannis et al., 1998).



Obr. č. 3: IDF křivka (Koutsoyiannis et al., 1998)

Obvyklý model užívaný pro tvorbu IDF křivek v sobě zahrnuje empirické předpoklady, což se neslučuje s požadavkem na teoretickou odvoditelnost a tato teorie je proto rigorózní. Výsledky tohoto přístupu nejsou občas zcela konzistentní s teoretickými výsledky. Koutsoyiannis et al. (1998) se pokoušeli zformulovat nový teoretický postup, jehož výsledky by byly lépe porovnatelné s výsledky empirického postupu. Použitelnost tohoto nového postupu se ověřovala v regionu Sterea Hellas o ploše 25000 km<sup>2</sup> v centrálním Řecku na 13 stanicích, které měřily množství srážek v intervalu 1 hod. Nový postup dobře postihoval geografickou variabilitu IDF křivek jednotlivých stanic. Bylo ho také možné užít pro stanice s delšími či chybějícími intervaly měření množství srážek. Výše popsaná konstrukce IDF křivky je vhodná k určení intenzity srážek v určitém bodě. V praxi jsou ale nejvíce užívány IDF křivky pro určité povodí. Nejužívanějším postupem při konstrukci IDF křivek pro určité povodí je užití interpolací, které jsou empiricky odvozené, funkcemi plochy povodí, délky trvání srážek a někdy i pravděpodobnosti opakování srážek. Body IDF křivky pro povodí jsou součinem v jednom bodě naměřené intenzity  $i$  srážek a hodnotami získanými interpolací. Pro velmi malá povodí je výsledek interpolace zpravidla rovný jedné, a IDF křivka pro povodí je totožná s IDF křivkou pro bod, ve kterém probíhalo měření intenzity srážek. Se vzrůstající velikostí povodí se ale rozdíl mezi oběma IDF křivkami zvětšuje, hodnota střední a

směrodatné odchylky IDF křivky pro povodí se snižuje. Snížení je největší pro srážky krátkého trvání.

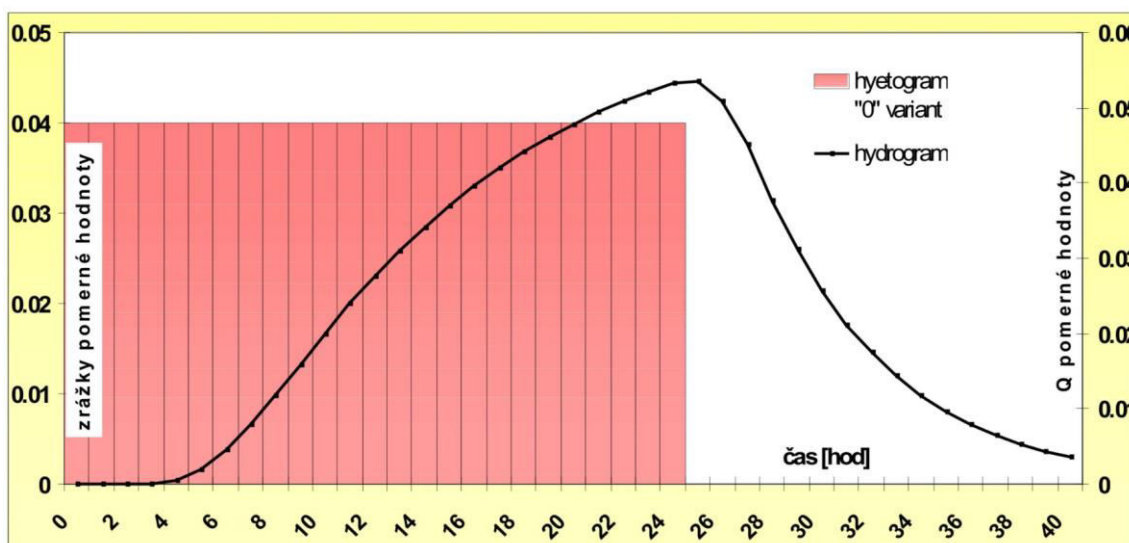
Sivapalan a Blöschl (1998) zmiňují dva nejčastěji používané postupy interpolace:

- a) První užívá metodu Thiessenových polygonů.
- b) Druhá je poměr váhy průměrné srážky v závislosti na ploše (stanovená isohyetami deště) a maximální intenzity srážky.

## 5.2 Typy hyetogramů

Prodanovic a Simanovic (2004) vyhodnocovali vhodnost použití různých typů hyetogramů pro vyhodnocení hydrologických rizik a extrémů v horní části povodí Temže. Vyhodnocované hyetogramy rozdělili do tří skupin podle způsobu jejich vytvoření.

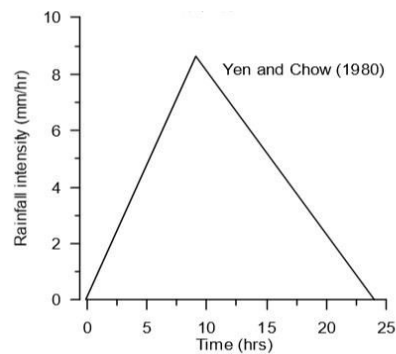
První skupina obsahuje hyetogramy vycházející pouze z jedné hodnoty IDF křivky. Při konstruování těchto hyetogramů je potřeba znalost pravděpodobnosti jejich každoročního opakování  $N$ , délka trvání srážky  $t_d$  a průměrná intenzita srážky odvozená z IDF křivky  $v$ . Patří sem např. „0“ hyetogram (viz. Obr. č. 4), tedy hyetogram s konstantní intenzitou srážek během zkoumaného časového období (Alfieri et al., 2007).



Obr. č. 4: „0“ hyetogram (Vološ,2008)

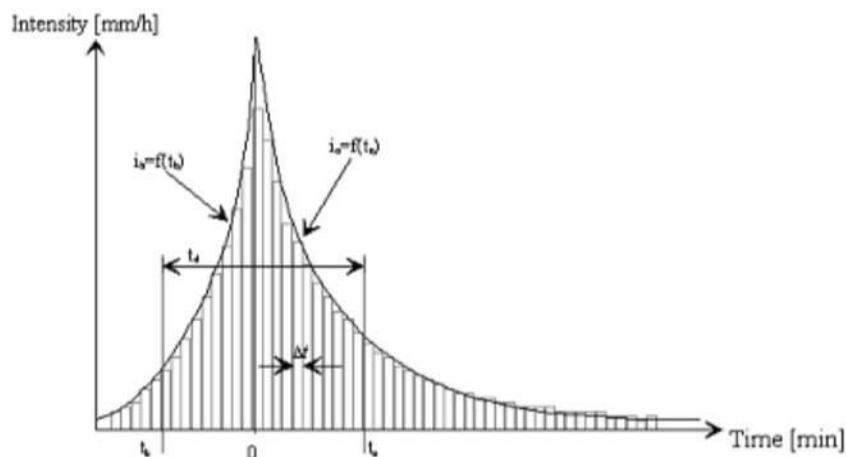
Dále lze dle Prodanovice a Simanovice (2004) do této skupiny zařadit hyetogram trojúhelníkového tvaru (viz. Obr. č. 5) vyvinutý v roce 1980, jehož autory jsou Yen a Chow (1980). Základními parametry tohoto hyetogramu jsou pravděpodobnost  $N$  každoročního opakování srážky, délka trvání srážky  $t_c$ , průměrná intenzita srážky  $v$  a parametr  $r$ , což je podíl mezi časem maximální intenzity srážky a celkové délce trvání srážky. Celkové množství

srážek je  $P = t_c \cdot v$ . Základna trojúhelníkového hyetogramu  $t_c$  a výška  $v_p$  jsou zvoleny tak, aby celkovému množství srážek odpovídala velikost plochy pod hyetogramem.



Obr. č. 5: Hyetogram trojúhelníkového tvaru (Yen, Chow, 1980).

Dalším skupinou hyetogramů jsou hyetogramy vycházející z celé IDF křivky. Patří sem např. Chicago hyetogram (viz. Obr. č. 6). Chicago hyetogram je navržen tak, aby intenzita srážky jakéhokoli časové intervalu uvnitř celkové délky trvání srážky byla shodná s IDF křivkou (Keifer a Chu, 1957).

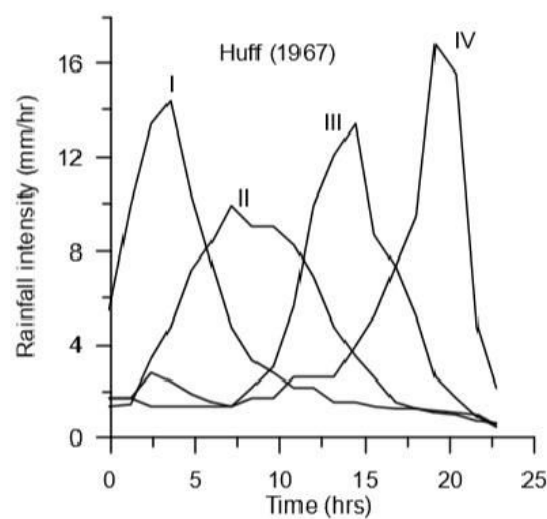


Obr. č. 6: Chicago hyetograf (Keifer a Chu, 1957).

Třetí skupinou hyetogramů jsou dle Prodanovice a Simanovice (2004) hyetogramy vycházející z jednoduchých nebo podvojných součtových čar srážek, přičemž svislá osa představuje součtovou hodnotu srážek a vodorovná jednoduchou nebo součtovou hodnotu délky srážky. Lze do ní zařadit Huffův hyetogram (viz. Obr. č. 7), který při konstrukci využívá podvojných součtových čar.

Huffova metoda vznikla při zpracování průběhu 261 srážkových událostí mezi lety 1955 – 1966 na ploše 400 čtverečních mil v Illinois v USA. Jednotlivé srážkové události

předcházely nebo následovaly další srážkovou událost minimálně o 6 hodin. Délka trvání zkoumaných srážkových událostí se pohybovala v rozmezí (1÷48) hod. 42 % zkoumaných srážkových událostí mělo délku trvání kratší než 12 hod, 33 % mělo délku trvání v rozmezí (12,1÷24) hod a 25 % mělo délku trvání delší než 24 hod. V Huffově metodě jsou rozlišeny čtyři typy podvojných součtových čar a každá z nich vyjadřuje vrchol srážkové intenzity v jiné čtvrtině doby trvání srážek. 33 % srážkových událostí mělo vrchol srážkové intenzity během prvním kvartálu, 33 % během druhého kvartálu, 23 % během třetího kvartálu a 11 % během čtvrtého kvartálu. Mezi časovým umístěním vrcholu intenzity srážek a plochou, na kterou srážky spadly nebyla prokázána žádná souvislost (Huff, 1967 – Huff, 1990).



Obr. č. 7: Huffův hyetogram (Prodanovic a Simanovic, 2004).

Prodanovic a Simanovic (2004) srovnávají Yenův a Chowův popis s Huffovou metodou na výsledcích získaných pro horní část povodí Temže. Yenův a Chowův popis se jeví jako nejvhodnější u srážkových událostí s maximální délkou trvání 6 hod. Huffova metoda je nejvhodnější pro srážky nižší intenzity a delšího trvání. Závěrem však konstatují, že žádná ze zkoumaných metod není výrazně nevhodná.

Pro ČR byly v ČHMÚ navrženy hyetogramy pro 24-hodinové návrhové 100-leté srážky, a to jak pro reálné oblasti, tak i pro oblasti synteticky vytvořené. Pro reálné oblasti byla maximální hodinová srážka  $P_{1hmax}$  umístěna do 12. hod v pořadí a vypočítána podle rovnice (Kulasová, 2004):

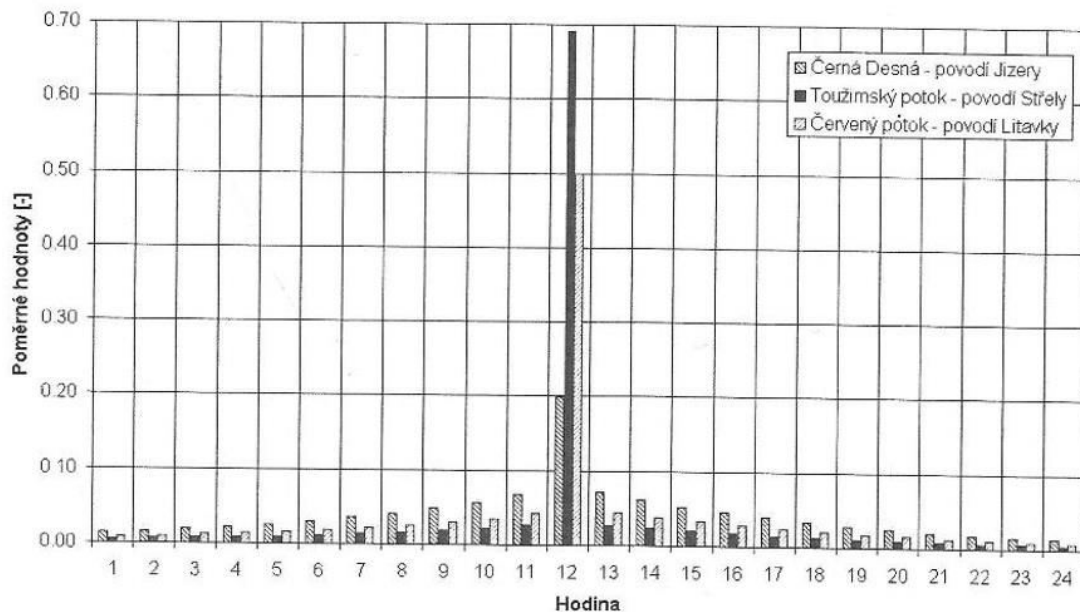
$$P_{1h_{\max}} = P_{N1dr} \cdot k_{N1h} \cdot \frac{P_{N1h}}{P_{N1d}},$$

kde  $P_{N1dr}$  je N – letá plošně redukováná 1 - denní srážka,

$k_{1h}$  je koeficient plošné redukce pro trvání srážky 1 hod,

$P_{N1h}$  je N – letá plošně redukováná 1 – hodinová srážka

Rovnice byla užita k výpočtu návrhových hyetogramů pro povodí Černé Jizery, které představuje klima horské oblasti s výrazným podílem orograficky zesílených srážek, dále pro relativně suchou oblast povodí Toužimského potoka v horní části povodí Střely a pro povodí Červeného potoka v povodí Litavky, které představuje vlhčí oblasti pahorkatin. Největší vliv na charakter 24hodinových 100letých srážek budou mít v horských oblastech orograficky zesílené srážky delšího trvání, kdežto v nížinách spíše přivalové srážky s krátkým trváním. Jednotlivé návrhové hyetogramy jsou zobrazeny na obr. č. 8 (Kulasová, 2004).



Obr. č. 8: Návrhové hyetogramy pro 24hodinové 100leté srážky (Kulasová, 2004).

Poté byly navrženy 24-hodinové návrhové hyetogramy pro 100-leté srážky pro čtyři navržené klimatické oblasti A, B1, B2, C. Hyetogramy byly navrženy pro povodí s velikostí plochy 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 a 512 km<sup>2</sup>. Oblast A představuje klimatickou oblast s denním úhrnem 100-letých srážek vyšší než 150 mm. Oblast B1 představuje klimatickou oblast s denním úhrnem 100-letých srážek mezi 100 - 150 mm. Oblast B2 klimatickou oblast

s denním úhrnem 100-letých srážek mezi 90 – 100 mm. Oblast C klimatickou oblast s denním úhrnem 100-letých srážek nižším než 90 mm. Na hodnotu 100-letých srážek v oblasti A mají dominantní vliv orograficky zesílené srážky, v oblasti B1 také převažuje vliv orograficky zesílených srážek kdežto v oblasti B2 převažuje vliv konvektivních srážek a v oblasti C mají orograficky zesílené srážky dominantní vliv. Největší plošné zastoupení na území Česka má klimatická oblast C, která zahrnuje níže položené oblasti (Kulasová, 2004).

Michálek et al. (2012) se zabývali srovnáním statistických metod odhadů IDF křivek krátkodobých (5 min až 360 min) srážek vytvořených na základě kontinuálního měření srážek na šesti stanicích v jihomoravském kraji. Kontinuální měření srážek probíhalo na těchto stanicích po dobu 11 až 41 let. I přesto, že jednotlivé stanice od sebe nebyly příliš vzdáleny, průběh jednotlivých IDF křivek se od sebe značně lišil, což lze vysvětlit rozdílnými geografickými a klimatickými faktory, v některých případech i krátkou řadou změřených srážkových úhrnů.

## 6 Hydrologické modelování

### 6.1 Model HEC - HMS

Srážkoodtokový model HEC-HMS (Hydrologic Engineering Centre – Hydrologic Modeling System) byl vyvinut hydrologickým inženýrským centrem Americké armády (HEC–USACE: Hydrologic Engineering Centre – U.S. Army Corps of Engineers), navazuje na model HEC-1 (USACE, vyvíjen od 60. let) a program je volně stažitelný ze stránek HEC-USACE (<http://www.hec.usace.army.mil/>), a to včetně kompletní technické, uživatelské a aplikační dokumentace (US Army Corps of Engineers, 2000).

Model HEC-HMS umožňuje plně distribuované řešení různých hydrologických situací. Jednou z nejpodstatnějších výhod modelu je jeho dostupnost jako freeware na internetu. HEC-HMS obsahuje sněhový model, umožňuje výpočet evapotranspirace. Pro stanovení objemu odtoku je používána také metoda SCS CN křivek, která vychází ze závislosti na hydrologických vlastnostech půd (Jeníček, 2005).

SCS CN dostupná jako modelovací technika v systému HMS je výhodná především díky svojí jednoduchosti a dostupnosti dat. Používá ale četná zjednodušení (předpokládá stejnoměrné rozložení srážky v čase i prostoru, nezohledňuje klasické teorie proudění vody v nenasycené zóně půdního profilu a případné překročení infiltrační kapacity není zohledňováno), které její využití limitují (Jeníček, 2007).

HEC-HMS dále umožňuje výpočet přímého odtoku, podzemního odtoku, korytového odtoku. Vstupní data modelu mohou být připravena pomocí nadstavby HEC-GeoHMS pro ArcGIS, která umožňuje přípravu dat jako je např. vymezení povodí, tvar terénu, fyzicko-geografické charakteristiky povodí v prostředí ArcGIS. Model HEC-HMS také umožňuje automatickou kalibraci parametrů. Ideálně prováděné na kratších časových řadách (řádově dnech). Použití modelu je vhodné pro plochy povodí do 500 km<sup>2</sup> (Unucka, 2010).

Modelování s použitím HEC-HMS je navrženo tak, aby bylo použitelné pro řešení široké škály problémů pro povodí v nejrůznějších zeměpisných šířkách. Výsledné hydrogramy jsou pak používány přímo nebo ve spojení s jinými softwarovými prostředky, např. pro studium dostupnosti vody, snižování povodňových škod, pro výzkum vlivu plánované urbanizace či vlivu hospodaření na povodí, sledování provozu či výstavby nádrží, souhrnně pro operativní a návrhové účely (HEC-HMS software) .

Hlavní výhody, které většinou rozhodnou a použití modelu, jsou následující (Unucka, 2008):

- cenová otázka – program je dostupný jako freeware



- široká nabídka metod hydrologické i hydraulické transformace
- možnost kombinace metod v rámci jednoho řešeného projektu
- propojení s GIS (extenze HEC-GeoHMS a HEC-GeoHMS Add-In pro ArcView využívány pro schematizaci)
- snadnější vizualizace a správa hydrologických dat s využitím programového prostředku HEC-DSSVue
- možnost poloautomatické kalibrace

## **6.2 Komponenty modelu HEC-HMS**

HEC-HMS obsahuje komponenty popisující jednotlivé procesy srážko-odtokového procesu: Basin Model Manager, Meteorologic Model Manager, Control Specifications Manager, Time-Series Data Manager, Paired Data Manager a Grid Data Manager. Podrobněji popsány budou pouze komponenty modelu využité v této práci.

### **6.2.1 Model povodí**

Basin Model zobrazuje skutečné povodí. Basin Model je využíván pro přidání a propojení hydrologických prvků. Hydrologické prvky používají matematické modely pro popsání fyzických procesů v povodí. Hydrologické prvky modelu jsou dílčí povodí, úsek toku, soutok, zdroj, odběr, nádrž, odbočka.

### **6.2.2 Meteorologický model**

Meteorologický model počítá zadané srážky pro dílčí povodí. Tento model také zahrnuje metody pro výpočet sněhu a evapotranspirace. Metoda měření srážek zahrnutá v meteorologickém modelu je potřebná pokaždé když model povodí obsahuje dílčí povodí. Dostupné nástroje obsahují několik postupů měření, statistická metoda používá data závislá na výšce a době trvání srážky, několik voleb návrhů srážkových událostí a metodu čtvercové sítě, která může být použita s radarovými srážkovými daty. Každý nástroj vytváří hyetogram ze srážek spadlých v každém dílčím povodí. Více detailů o každé metodě je v následující části převzaté z Hydrologic Modeling System HEC-HMS – User's Manual (2016).

#### **Frequency Storm**

Frequency storm je metoda navržená k vytvoření syntetické srážkové události ze statistických srážkových dat.

#### **Gage Weights**

Metoda Gage Weights je navržena k práci se zaznamenanými a nezaznamenanými srážkovými měřeními. Zaznamenané měření je obvykle skutečná měřená srážka která se stala.

Nezaznamenaná měření obvykle pouze poskytnou odhad celkové výšky srážky ze srážkové události.

### **Gridded Precipitation**

Metoda Gridded Precipitation je vytvořena pro práci s ModClark gridded transformací. Nicméně, může být také použita s jinými metodami transformace. Nejobvyklejší použití této metody je použití s základními radarovými odhady.

### **HMR 52 Storm**

HMR 52 Storm je jeden z výpočetních postupů pravděpodobného maxima srážek pro povodí, detailněji popsán v Hydrometeorological Report No. 52 (Hansen, Schreiner, Miller, 1982).

### **Inverse Distance**

Metoda inverzních vzdáleností byla původně navržena pro využití předpovědních systémů v reálném čase. Mohou být použita zaznamenaná měření s pravidelným intervalem např. 15 minut nebo 1 hodina.

### **SCS Storm**

Metoda Soil Conservation Service Storm vytvoří srážkovou událost použitelnou pro povodí ve venkovských a zemědělských oblastech.

### **Specified Hyetograph**

Metoda Specified Hyetograph umožňuje uživateli určit přesnou časovou řadu pro použití hyetogramu v povodí. Tato metoda je použitelná, když jsou srážková data zpracována mimo program a v podstatě beze změn importována. Tato metoda je také použitelná pro konkrétní měřenou srážku pro představu, co se stane v povodí.

### **Standard Project Storm**

Metoda Standard Project Storm splňuje požadavky Engineering Manual EM-1110-2-1411 (Corps, 1965). Přestože metodologie není častěji používána, je tato metoda zahruta v programu pro projekty, pro které je ještě pořád nezbytná.

### **6.2.3 Časové řady**

Hydrologické modely často požadují časové řady srážkových dat pro odhad průměrného srážkového úhrnu v povodí. Časové řady průtoku sledovaného toku nebo pozorovaný odtok, jsou užitečné pro kalibraci modelu a jsou potřebné pro optimalizaci. Jsou také používány další druhy časových řad. Časové řady jsou uloženy v projektu jako měření. Program rozděluje různé typy dat s různými typy měření. Měřená data je potřeba vložit jen jednou. Měření mohou být použita jen v části projektu nebo mohou být použita i vícekrát v modelu povodí nebo v meteorologickém modelu.

## 7 Materiál

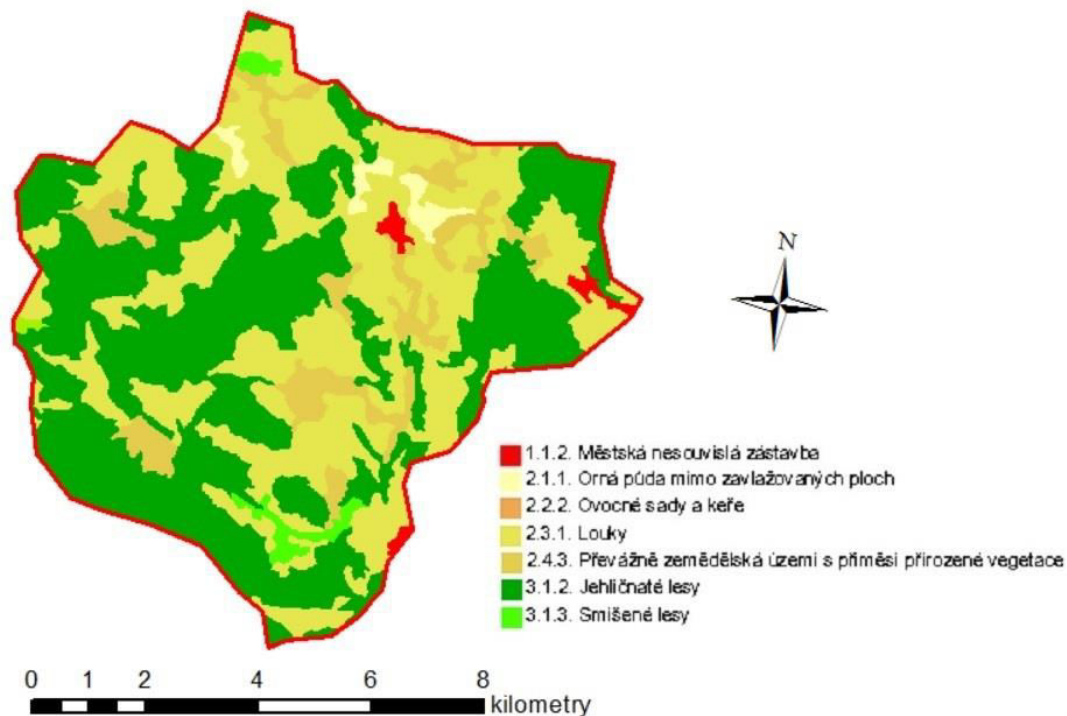
Tato diplomová práce je zaměřena na povodí toku Volšovka. Povodí Volšovky se nachází v Plzeňském kraji, okrese Klatovy, jihozápadně od města Sušice. Poloha povodí Volšovky je znázorněna na obrázku č. 9. Tento tok pramení necelý kilometr od obce Radkov, v nadmořské výšce 914 m. Volšovka ústí do Otavy nedaleko Sušice v nadmořské výšce 482 m. Celková délka toku je 16,4 km a povodí má rozlohu 74,8 km<sup>2</sup>. Číslo hydrologického pořadí je 1-08-01-0571. Volšovka má jeden levostranný přítok Kepelský potok. Horní tok Volšovky se nachází v CHKO Šumava.



Obr. č. 9 – Poloha toku Volšovka

## Využití území

Na obrázku č. 10 je zobrazeno využití území, nejvíce jsou zde zastoupeny jehličnaté lesy, dále také trvalý travní porost a orná půda.



Obr. č. 10 : Mapa využití území

## Geomorfologie

Geomorfologické členění je zobrazeno na obrázku č. 11.

system: Hercynský

provincie: Česká vysočina

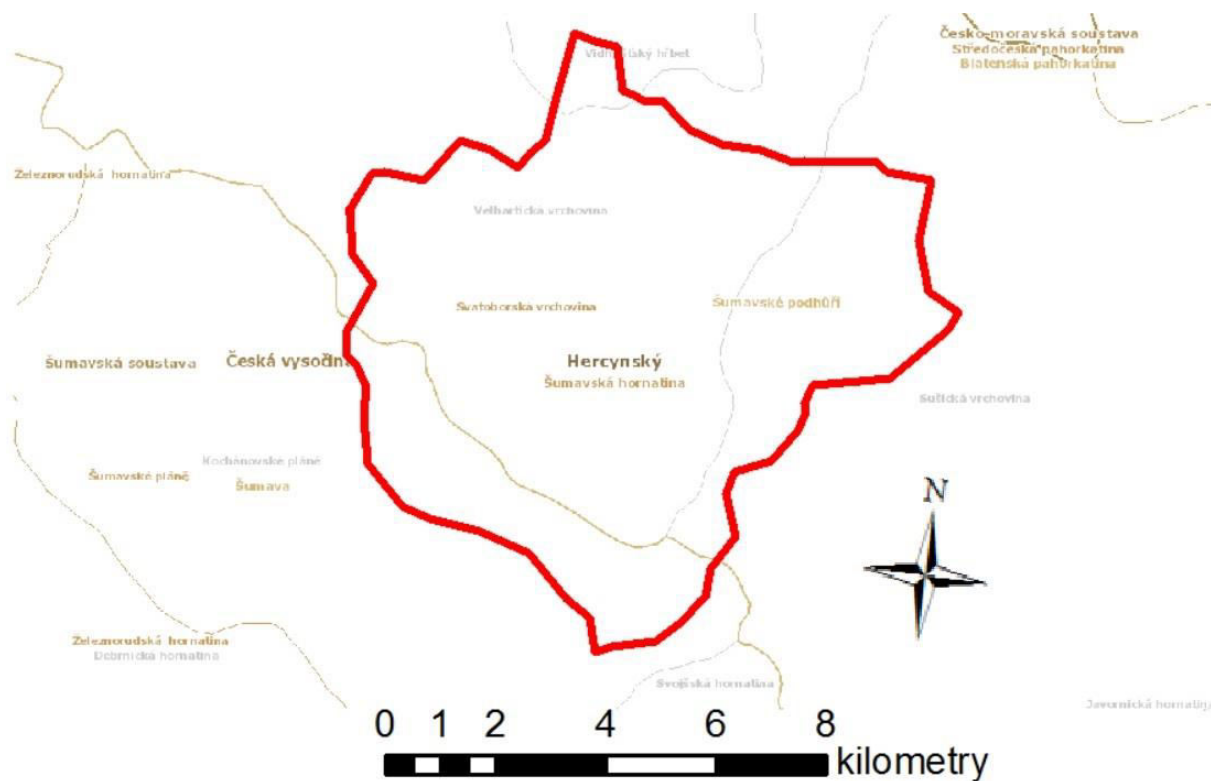
subprovincie: Šumavská soustava

oblast: Šumavská hornatina

celek: Šumavské podhůří, menší část Šumava

podcelek: Svatohorská vrchovina a část Šumavské Pláně

okrsek: Velhartická vrchovina, Sušická vrchovina, Kochánovské pláně, Vidhošťský hřbet



Obr. č. 11 - Geomorfologie

## **Klima**

Největší část území se nachází v mírně teplé klimatické oblasti, část území v oblasti mírně teplé na srážky bohaté. Jihozápadní část území leží v oblasti chladné, bohaté na srážky. Na obrázku č. 12 jsou zobrazeny klimatické oblasti.

### Mírně teplá oblast

Léto: přiměřené s 20-40 letními dny, mírně teplé s průměrnou teplotou 13-15 °C, přiměřeně vlhké se srážkami 200-400 mm, 100-140 dnů se srážkami většími než 1 mm za den

Přechodné období: přiměřeně dlouhé se 140-160 mrazovými dny, chladným jarem s průměrnou teplotou 5-7 °C, mírně teplým podzimem a průměrnou teplotou 6-8 °C

Zima: normálně dlouhá s 5,-60 ledovými dny, mírně clasná s průměrnou teplotou -2 až -3 °C, přiměřenými srážkami 200-400 mm, přiměřeným trváním sněhové pokrývky 50-80 dnů

### Oblast mírně teplá na srážky bohatá

Léto: normálně dlouhé s 20-40 letními dny, mírně teplé s průměrnou teplotou 13-15 °C, vlhké se srážkami většími než 400mm, více než 140 dnů se srážkami většími než 1 mm za den.

Přechodné období: přiměřeně dlouhé se 140-160 mrazovými dny, chladným jarem s průměrnou teplotou 5-7 °C, mírně teplým podzimem s průměrnou teplotou 6-8 °C

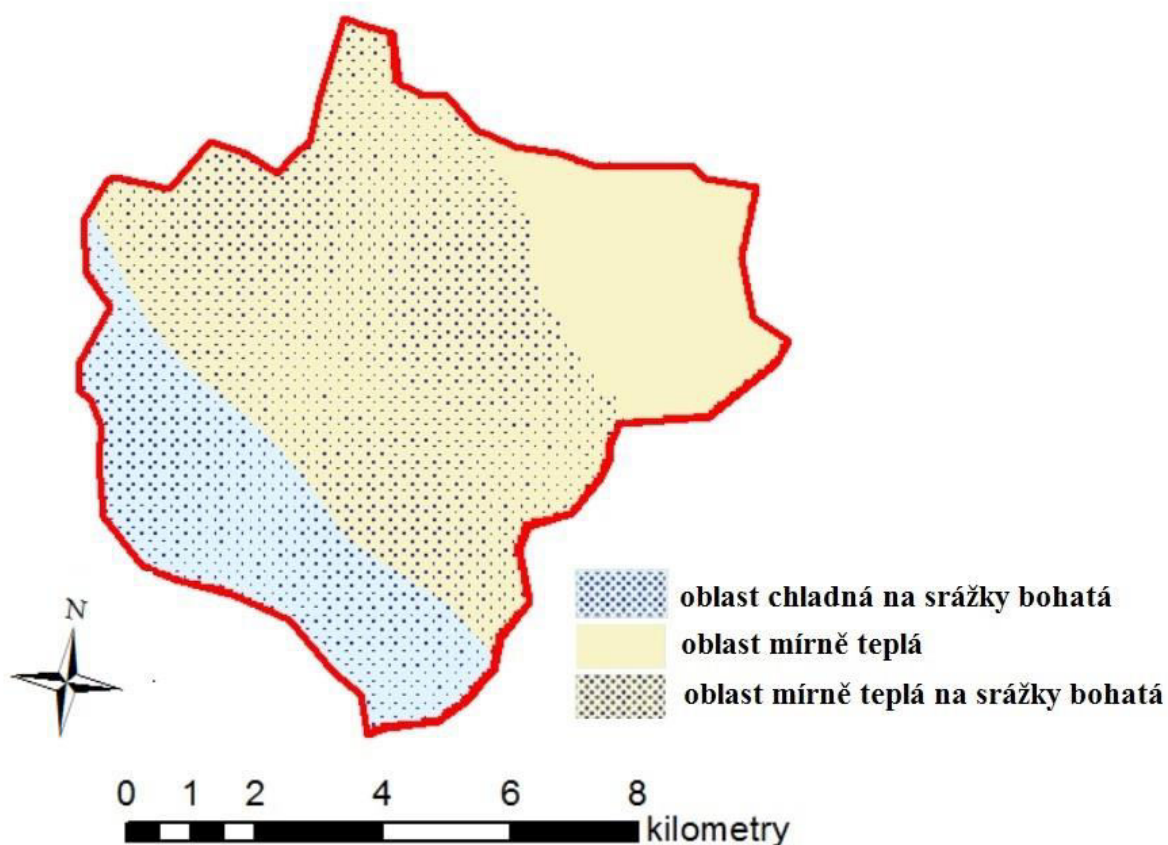
Zima: normálně dlouhá s 50-60 ledovými dny, mírně chladná s průměrnou teplotou -2 až -3 °C, vyššími srážkami > 400 mm, spíše kratším trváním sněhové pokrývky 50-60 dnů

#### Oblast chladná na srážky bohatá

Léto: krátké s 10-20 letními dny, chladné s průměrnou teplotou 12-13 °C, velmi vlhké se srážkami většími než 400 mm, více než 140 dnů se srážkami většími než 1 mm za den

Přechodné období: dlouhé se 160-180 mrazovými dny, chladným jarem s průměrnou teplotou 3-5 °C, chladným podzimem s průměrnou teplotou 4-6 °C

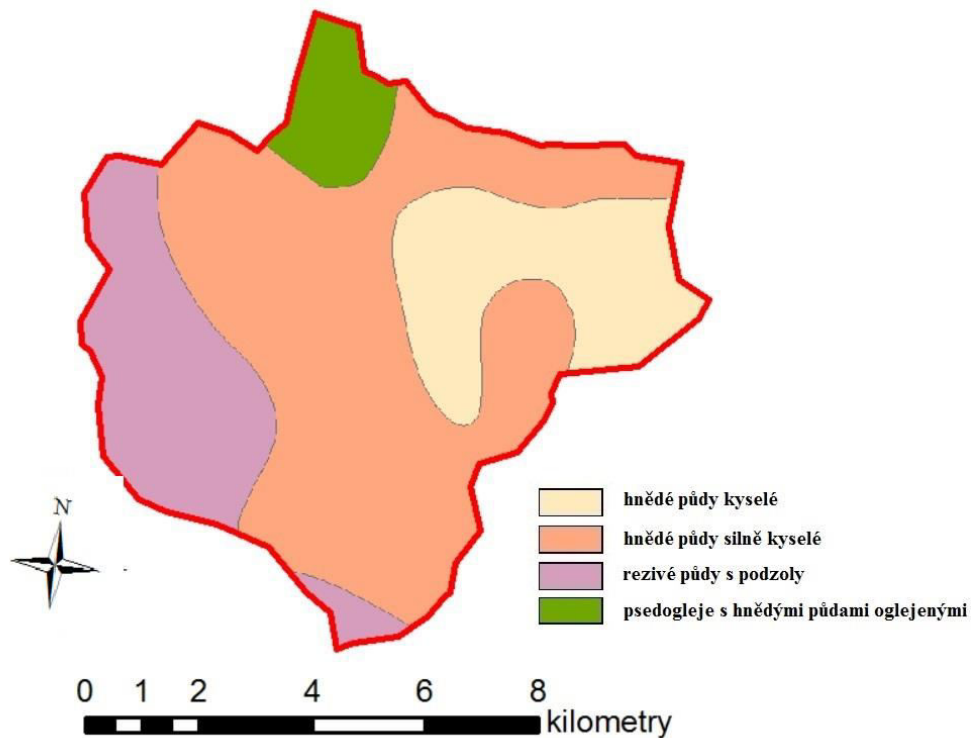
Zima: dlouhá s 60-70 ledovými dny, chladná s průměrnou teplotou -3 až -4 °C, bohatými srážkami většími než 400 mm, dlouhým trváním sněhové pokrývky 80-120 dnů.



Obr. č. 12 - Klimatické oblasti

## Půdní typy

Jak je vidět na obrázku č.13, v povodí Volšovky se nachází několik půdních typů. Na největší části území jsou silně kyselé hnědé půdy. Dále jsou zde rezivé půdy s podzoly a kyselé hnědé půdy. Na malé části území jsou pseudogleje s hnědými půdami oglejenými.



Obr. č. 13 - Typy půd

## Geologie

V této oblasti se vyskytují silně metamorfované horniny (ruly, migmatity s občasnými vložkami jiných hornin jako jsou například vápence, kvarcity atd.), prostoupené místy horninami vyvřelými (granodiority a diority).




## 8 Metody

### 8.1 Příprava srážkových dat

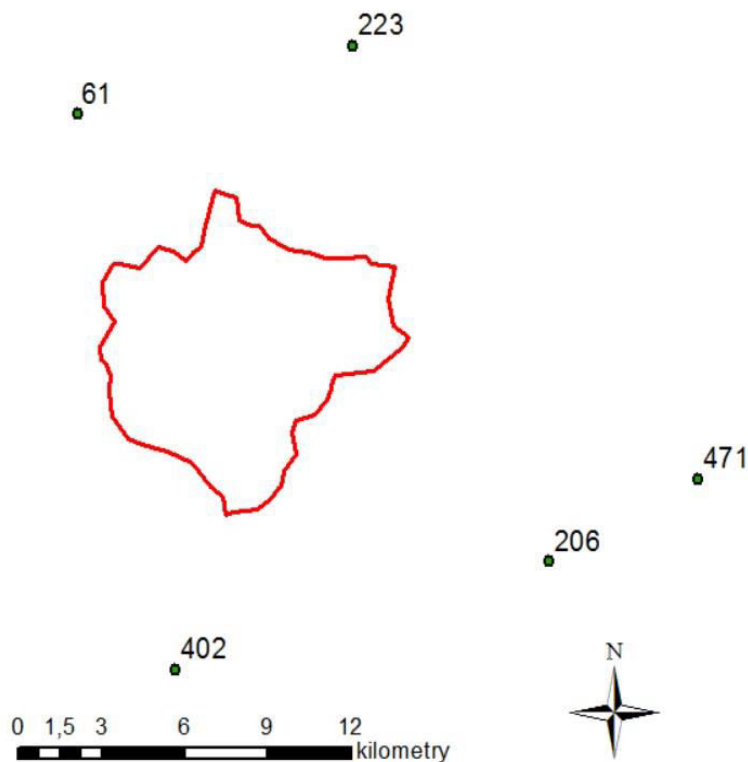
Při vypracovávání této práce byl použit program DES\_RAIN (Vaššová, Kovář, 2011). Program slouží k výpočtu výšek přívalových dešťů různých dob trvání s pravděpodobností opakování jednou za  $N$  let a náhradních intenzit těchto dešťů metodou redukce jednodenních maximálních srážkových úhrnů.

Pro výpočet srážkových úhrnů a jejich intenzit je nutné zvolit nejbližší srážkoměrnou stanici z rozevíracího seznamu (viz obr. 14) a délku časového kroku pro dobu trvání deště pomocí přepínačů (viz obr. 15). Hodnoty maximálních denních úhrnů srážek s pravděpodobností opakování za  $N$  let jsou převzaty z práce Šamaje, Brázdila a Valoviče (1983), jejich hodnoty pro vybranou stanici jsou uvedeny pod rozevíracím seznamem se stanicemi (viz obr. 15).

číslo	90
Stanice	Liberec 
N = 2 roky	43,7
N = 5 let	62,6
N = 10 let	74,8
N = 20 let	87,4
N = 50 let	102,9
N = 100 let	115,1

Obr. č. 14 : Rozbalovací seznam pro výběr nejbližší srážkoměrné stanice a hodnoty maximálních denních úhrnů srážek s pravděpodobností opakování za  $N$  let

Pro potřeby této diplomové práce byly použity stanice č. 61 – Čachrov, č. 206 – Kašperské Hory, č. 223 – Kolínek, č. 471 – Strašín, 402 – Prášíly, viz. Obr. č. 15.



Obr. č. 15 : Rozmístění použitých srážkoměrných stanic vzhledem k povodí Volšovky

Pro interpolaci srážkových dat do prostoru byl použit program ArcGIS. Interpolace byla provedena s pomocí nástroje IDW - Inverse Distance Weighting, v češtině metoda inverzních vzdáleností.

Jak říká Ježek (2015), IDW je jednou z nejjednodušších a přitom často používaných metod prostorové interpolace. Je založena na váženém průměru, jehož váhy jsou nepřímo úměrné nějaké mocnině vzdálenosti mezi interpolovaným bodem a datovými body. Metoda IDW je prototypem interpolačních metod založených na váženém průměru. Je založena na přirozeném předpokladu, že hodnoty, které jsou blíže k interpolovanému bodu, mají na něj mít větší vliv. Při první mocnině (koeficient  $\alpha=1$ ) metoda produkuje špičky v interpolovaných bodech (nemá zde derivaci), při  $\alpha>1$  je průběh hladký. Nejčastěji se volí váhy úměrně druhé mocnině vzdálenosti ( $\alpha=2$ ). Pro vyšší mocniny se stává průběh interpolace v okolí datových bodů stále plošší a uprostřed mezi nimi vznikají strmé přechody. Interpolační plocha vytvořená metodou IDW má lokální minima a maxima v bodech dat a tendenci ke kruhovým strukturám.

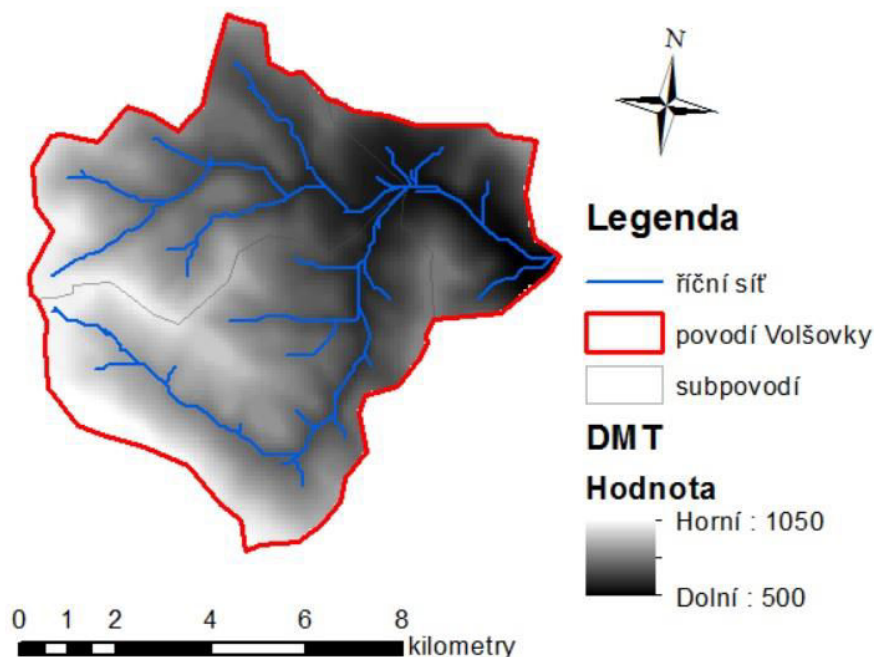
Metoda IDW byla rovněž použita v práci Retenční potenciál a hydrologická bilance horského vrchoviště: Případová studie Rokytecké slatě, povodí horní Otavy, JZ. Česko (Vlček, 2012).

## 8.2 Digitální model terénu

Pro vytvoření digitálního modelu terénu byl použit podklad Arc ČR 500. ArcČR 500 je digitální vektorová geografická databáze České republiky, zpracována na úrovni podrobnosti 1 : 500 000. Navazuje na podobné databáze, zpracované firmou Esri. Obsahem databáze jsou přehledné geografické informace o ČR. Data umožňují široké spektrum prostorových analýz a vizualizace a poskytují možnost propojení na statistická data.

Základní vrstevnice jsou po 50 m, zdůrazněné vrstevnice po 250 m a doplňkové vrstevnice po 25 m.

Dále je potřeba upravit digitální model terénu tak, abychom odstranili bezodtoková místa. Bezodtoková oblast je místo v digitálním modelu terénu, které může vést k chybnému určení směrů či akumulace odtoku. Chyba může vzniknout při vytváření modelu, např. nízkým rozlišením vstupních dat, ale také může jít o přirozené přírodní útvary, např. převisy či jeskyně. Pro odstranění bezodtokových míst byl použit příkaz Fill v programu ArcGIS 10.1, který odstraní deprese a vytvoří hydrologicky korektní digitální model terénu (viz. Obr. č. 16).



Obr. č. 16: Digitální model terénu povodí Volšovky

### 8.3 Metoda čísel odtokových křivek

Metoda čísel odtokových křivek (dále jen CN), odvozena SCS USDA (Služba ochrany půdy Federálního ministerstva zemědělství USA), slouží k určování přímých odtoků z přívalových dešťů v malých nepozorovaných povodích. Je založena na převodu výšky přívalové srážky na přímý odtok na základě tzv. čísel odtokových křivek (CN), charakterizujících hydrologické vlastnosti půd, jejich využití a obhospodařování, vlastnosti povrchu a předchozí vlhkostní podmínky. Zpětný výpočet čísel odtokových křivek (CN) ukazuje na jejich úzkou souvislost s příčinnými srážkovými úhrny (Kovář, 2005).

Její světová popularita je založena především na jednoduchosti, spočívající v reakci odtoku z přívalového deště na čtyři snadno pochopitelné vlastnosti povodí: Půdní hydrologické charakteristiky, využití a obhospodařování půdy, vlastnosti povrchu a předchozí podmínky (Ponce et al., 1989).

Důvodem jejího rozšíření je i snadná aplikovatelnost metody pro nesledovaná malá povodí. Metoda je modelem infiltrační ztráty a byla původně vytvořena jako celkový model (tedy prostorový i časový) pro převod výšky přívalové srážky na objem přímého odtoku. Nedostatkem tohoto modelu je, že nepopisuje prostorové a časové variability a její použitelnost je omezena na modelování ztrát při přívalových deštích. Co se týče teoretické koncepce, je obecně konstatováno, že odtokový vztah metody CN byl vypracován na základě předpokladu, že podíl odtoku k přebytku srážek se rovná podílu vody zadržené při přívalovém dešti k potenciálnímu objemu, který může být zadržen během extrémně dlouhého přívalového deště. Potenciální maximální retence  $S$  závisí na půdě, pokryvu, způsobu obdělávání a předchozích podmínkách vlhkosti půdy (Kovář, 2005).

Klasická metoda CN předpokládá proporcionalitu mezi retencí a odtokem

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P} \text{ [mm]},$$

kde:

$F = P - Q$	aktuální retence
$S$	potenciální maximální retence
$Q$	celková výška přímého odtoku z přívalového deště $P$
$P$	potenciální maximální odtok = celková výška přívalového deště

Jisté množství srážky, tzv. počáteční ztráta ( $I_a$ ) se odečítá jako intercepce, infiltrace a povrchová retence před začátkem odtoku:

$$\frac{(P - I_a - Q)}{S} = \frac{Q}{(P - I_a)}$$

Řešení pro Q za podmínky  $P > I_a$

$$(P - I_a - Q) * (P - I_a) = QS$$

$$(P - I_a)^2 - QP + QI_a = QS$$

$$(P - I_a)^2 = QS + QP - QI_a$$

$$\frac{(P - I_a)^2}{S} + P - I_a = Q$$

### Souhrn

Metoda čísel odtokových křivek CN je používána v mnoha zemích světa, včetně České republiky. V souvislosti s tím se i rozrůstá příslušný okruh literatury shrnující výhody a nevýhody této metody:

### Výhody

- a) Jedná se o jednoduchou předvídatelnou a stabilní metodu pro odhad výšky přímého odtoku, založenou na přívalové srážce a podporovanou empiricky zjišťovanými údaji.
- b) Závisí na jediném parametru - číslu odtokové křivky CN, který se měří jako funkce čtyř hlavních vlastností ovlivňujících odtok:
  - hydrologické skupiny půd: A, B, C, D,
  - třídy využívání a obhospodařování pozemků: zemědělské, pastevní, lesní a zastavěné,
  - hydrologické podmínky povrchu: špatné, uspokojivé, dobré,
  - předchozí vlhkosti, včetně dalších zdrojů variability: I, II, III.

### Nevýhody

- a) Metoda byla vytvořena s použitím regionálních údajů, většinou na středozápadu USA a rozšířena na celé USA a jiné země. Proto se doporučuje jistá obezřetnost při jejím používání v jiných geografických nebo klimatických oblastech.
- b) Pro nižší CN a srážky může být metoda velmi citlivá na CN a předchozí podmínky.
- c) Metoda se nejlépe hodí pro zemědělské lokality, pro které byla původně určena a pro odhady odtoků z přívalových srážek v tocích se zanedbatelným základním odtokem, tj. tam, kde poměr přímého odtoku k celkovému odtoku se blíží jedné.
- d) Předpokládá se, že metoda CN se hodí pro aplikaci v malých a středně velkých povodích. Pro aplikaci ve velkých povodích je třeba jisté opatrnosti.
- e) Podíl počáteční retence  $\lambda = 0,2$  je nutné interpretovat jako regionální parametr reagující na různé geologické a klimatické poměry (Kovář, 2005).

## 8.4 Transformace přímého odtoku – Clarkův jednotkový hydrogram

Volba metody transformace přímého odtoku je klíčovou součástí metodického postupu, neboť přímo určuje tvar vlny, a tím i velikost kulminačního průtoku (Vološ, 2006). Jako jednu z transformačních funkcí povodí používá HEC-HMS jednotkový hydrogram. Obecný princip této metody je popsán např. v Linsley a kol. (1982). Pro tuto práci byl použit jednotkový hydrogram dle Clarka.

Pro výpočet doby koncentrace byl použit vzorec SCS (Soil Conservation Service) pro odvození  $T_{lag}$  (časový posun v hodinách mezi výskytem maxima příčinné srážky a výskytem kulminačního průtoku v závěrovém profilu povodí).

$$T_{lag} = \frac{L^{0.8} \cdot (S + 1)^{0.7}}{1900 \cdot \sqrt{Y}}$$

kde:

$L$  délka údolnice k rozvodnici [feet]

$S$  maximální retence povodí [inches]

$Y$  průměrný sklon povodí [%]

Doba koncentrace  $T_C$  je poté odhadnuta jako  $1,67 \cdot T_{lag}$

Pro výpočet retenční konstanty  $R_c$  byl použit výpočet ve tvaru:

$$R_C = A \cdot L^B \cdot S_{1085}^C, \text{ kde}$$

$L$  - maximální délka toku v povodí v mílich

$S_{1085}$  - průměrný sklon ve ft/mi (stopy na míli) mezi 10% a 85% maximální délky údolnice

$A, B, C$  – koeficienty (na ČHMÚ byly pro Českou republiku stanoveny na hodnoty  $A = 80$ ,  $B = 0,342$ ,  $C = -0,79$ ) (Vološ, 2008).

## 8.5 Komponenty modelu HEC-HMS

### 8.5.1 Basin Model Component

Nejdříve byl vytvořen model povodí, tak že v menu byla vybrána možnost „Components“, dále „Basin Model Manager“, dále byla zvolena možnost „New“ a otevřelo se okno „Create A New Basin Model“. Dále byla vložena podkladová mapa. V menu bylo zvoleno „View“, dále „Background Maps“ a opět se otevřelo okno, kde si byla vybrána podkladová mapa. Poté byl vytvořen model povodí tak, že z hydrologických prvků povodí bylo vytvořeno stromové schéma povodí. Každý prvek byl vytvořen jeho vybráním a následným kliknutím do mapy.

Stromové schéma povodí bylo ještě nutné propojit pomocí „Downstream v „Component editoru“.

### **8.5.2 Meteorologický model**

Kliknutím na příslušný model ve „Watershed Exploreru“ se zobrazí jeho charakteristiky, které je možné editovat. Zde je možné vybrat metodu pro srážky, evapotranspiraci a tání sněhu. Pro tuto práci byla vybrána metoda srážek „Specified Hyetograph“. Dále v záložce „Basins“ je možné zadat propojení meteorologického modelu s modelem povodí. Pro každý meteorologický model je pro každé dílčí povodí zadána časová řada průběhu srážek.

### **8.5.3 Time-Series Data Manager**

Časové řady srážek byly vytvořeny tak, že v menu byla vybrána možnost „Components“, dále „Time-Series Data Manger“ a byla vytvořena nová časová řada. Nově vytvořené řady se zobrazí ve „Watershed Exploreru“. Kliknutím na příslušnou řadu se zobrazí údaje o časové řadě, které je možné editovat. Musí být zadán datum a čas začátku a konce časové řady a dále je možné editovat časový interval.

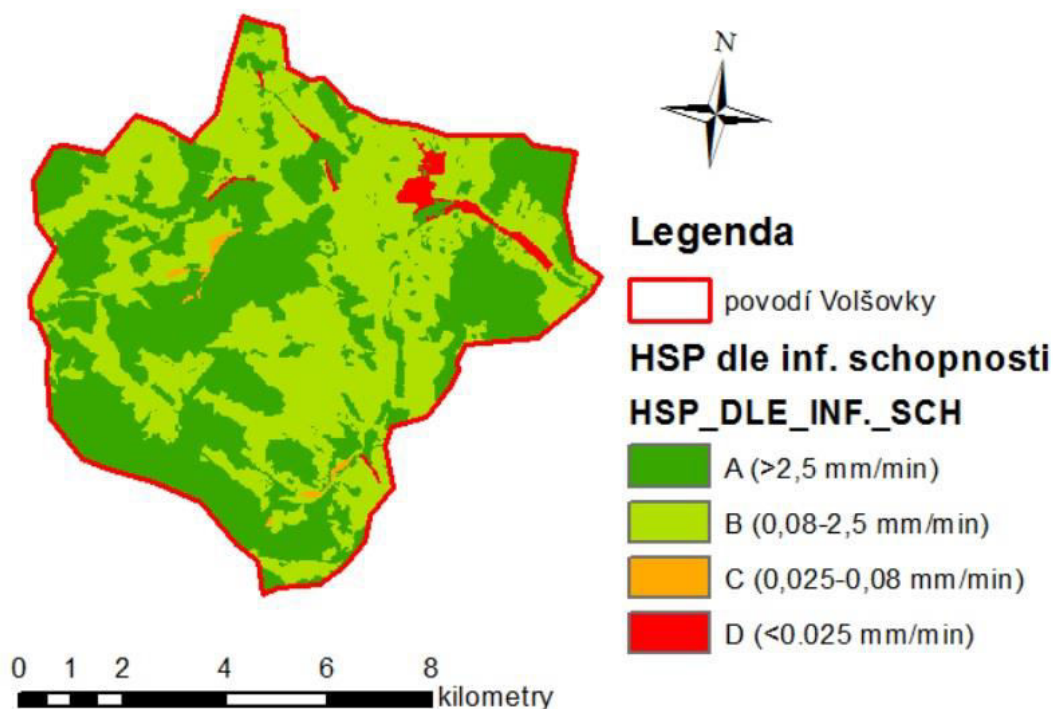
## 9 Výsledky a diskuze

### 9.1 Metoda čísel odtokových křivek CN

Pro výpočet hodnot CN v této diplomové práci bylo využito softwaru ArcGIS 10.1, kdy metoda odtokových křivek CN byla počítána v rastrové formě.

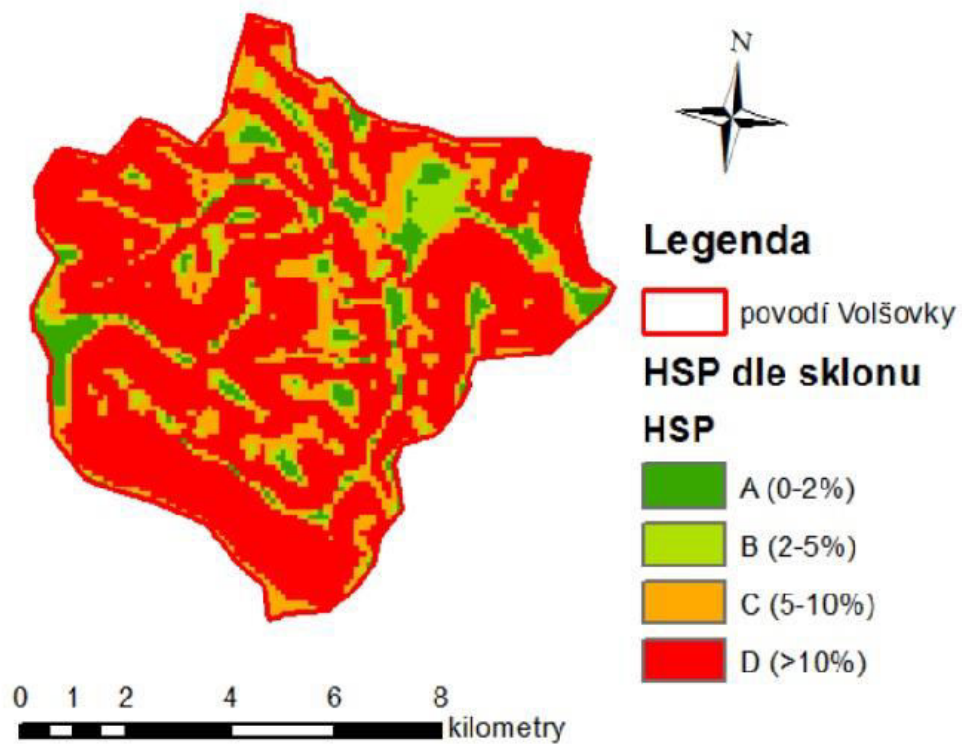
Pro kategorizaci využití půdy bylo použito výsledků projektu Corine Land Cover pro rok 2012 (viz. obr. v kap. Materiál)

Pro zařazení půd do HSP (hydrologické skupiny půd) byla použita metoda popsaná v Šercl (2006), která upravuje metodu CN pro sklonitější plochy. Při rozdělení půd do HSP proto byly vzaty v úvahu nejen infiltrační schopnosti půd, ale také retenční kapacita půd a sklon území, odvozený z digitálního modelu terénu. Data o infiltrační schopnosti a retenční kapacitě byly převzaty z Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půd v Praze, digitální model terénu byl převzat z dat ArcČR500. Na obrázcích č. 17 až 19 jsou ukázány rastry, kde jsou HSP klasifikovány dle infiltrační schopnosti, retence a sklonu a na obrázku č. 20 pak výsledný rastr hodnot CN. Některá předzpracovaná data pro tento výpočet byla poskytnuta vedoucím této diplomové práce a byla již částečně publikována v knižní kapitole Moravcová a kol. (2016).

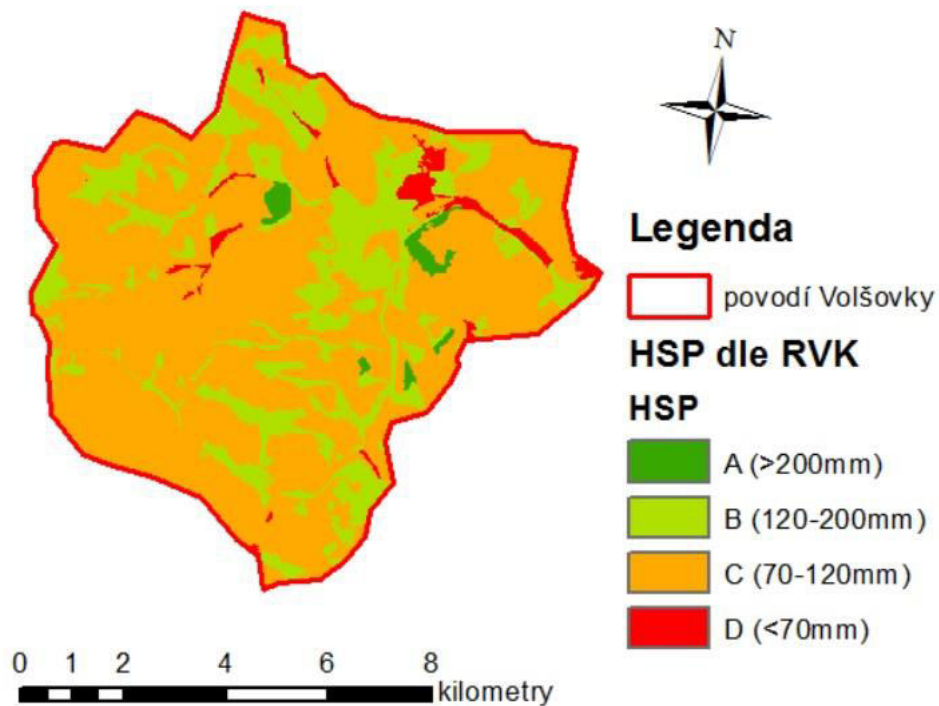


Obr. č. 17 : Hydrologické skupiny půd dle infiltrační schopnosti

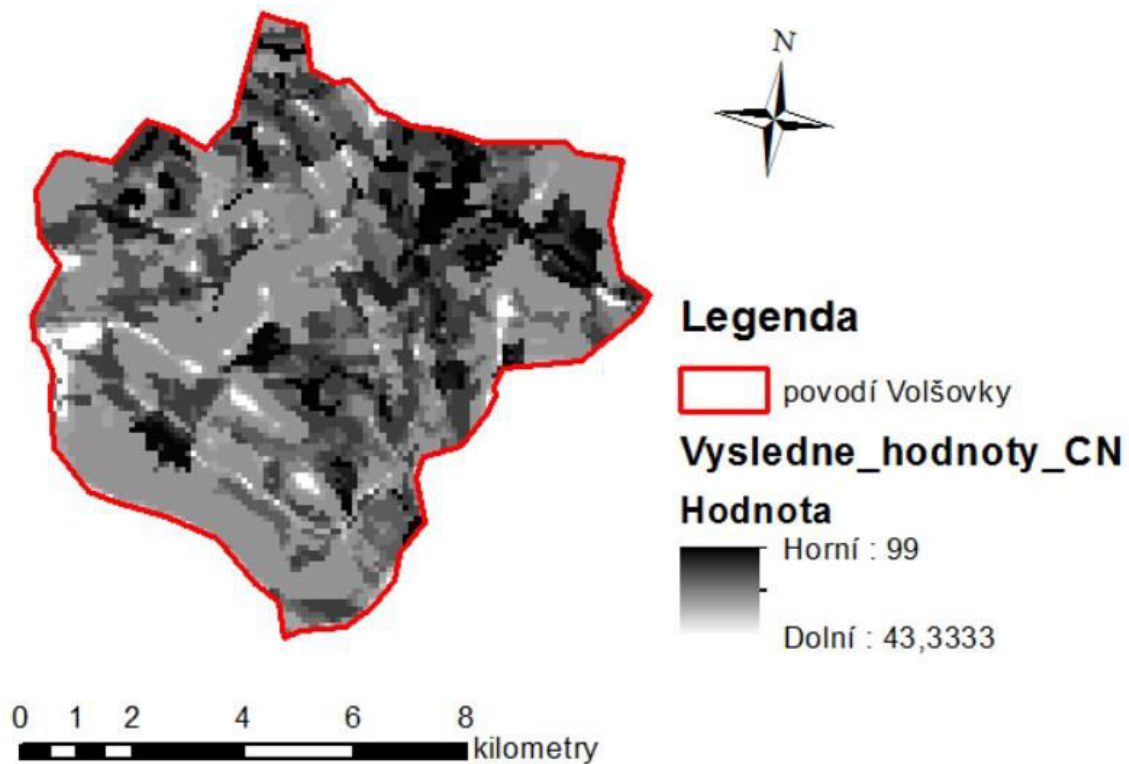




Obr. č. 18 : Hydrologické skupiny půd dle sklonu terénu



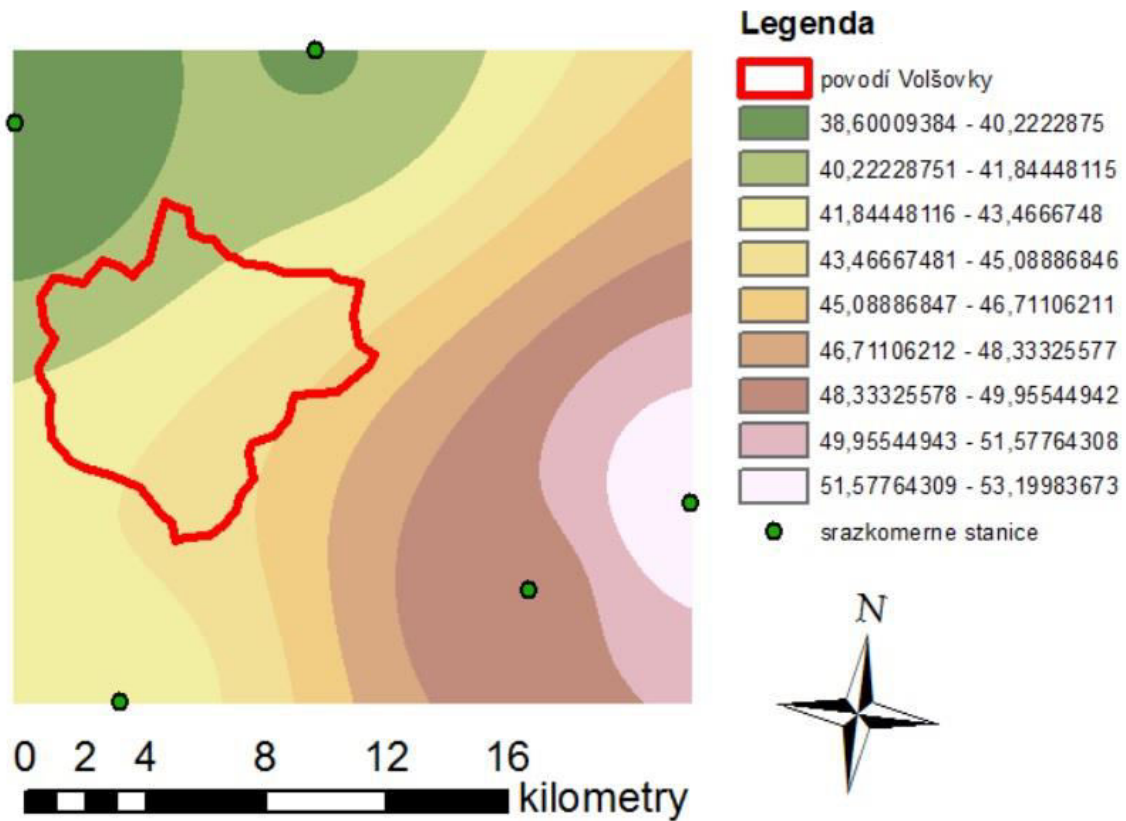
Obr. č. 19: Hydrologické skupiny půd dle retenční vodní kapacity



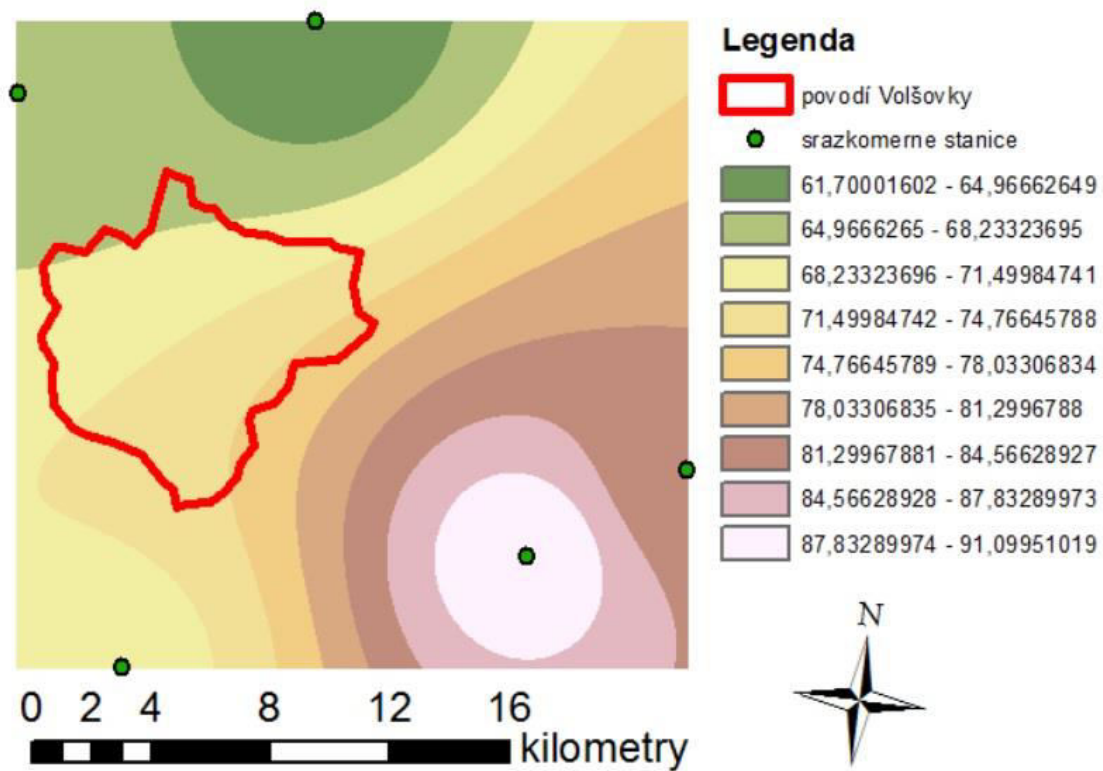
Obr. č. 20: Výsledné hodnoty CN

## 9.2 Interpolace srážkových dat

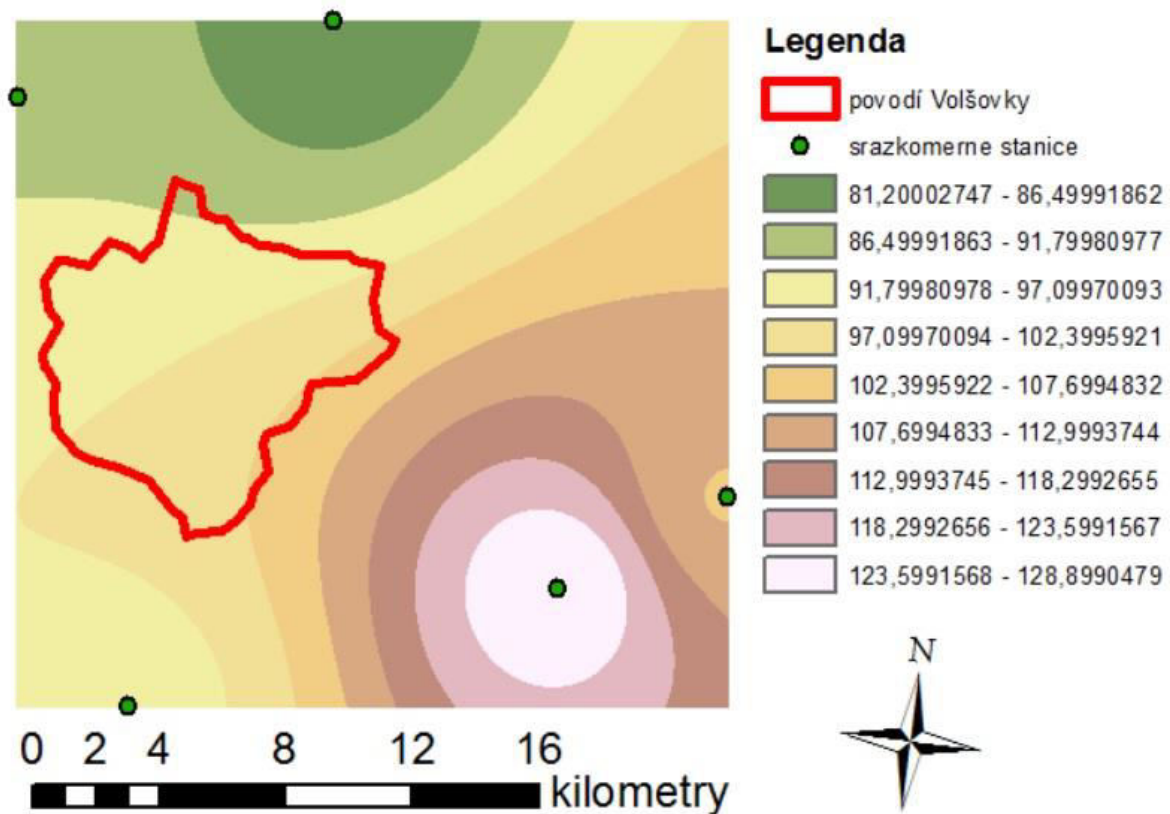
Pro interpolaci srážkových dat do prostoru byl použit program ArcGIS. Nejprve byly ke každé srážkoměrné stanici přiřazeny hodnoty 2-leté, 10-leté, 50-leté a 100-leté srážky, které byly získány z programu DES\_RAIN. Poté byla provedena interpolace s pomocí nástroje IDW - Inverse Distance Weighting, v češtině metoda inverzních vzdáleností. Výsledné rastry jsou zobrazeny na obrázcích č. 21 až 24.



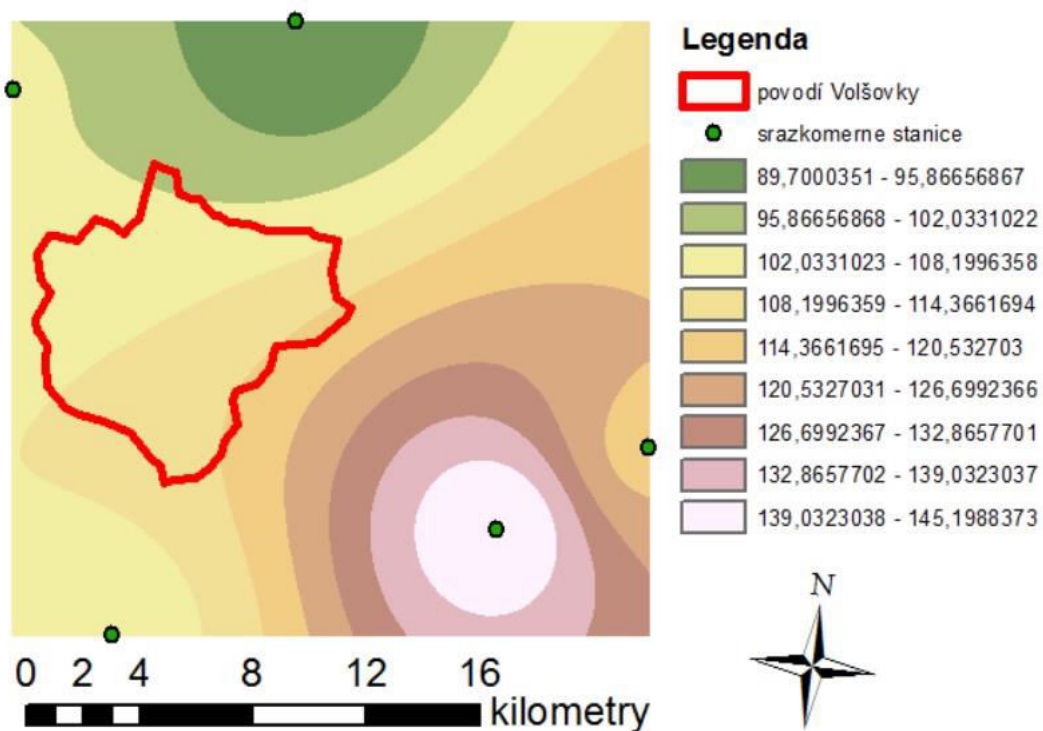
Obr. č. 21 : Hodnoty 2-leté srážky , uvedené v mm



Obr. č. 22 : Hodnoty 10-leté srážky , uvedené v mm



Obr. č. 23 : Hodnoty 50-leté srážky, uvedené v mm

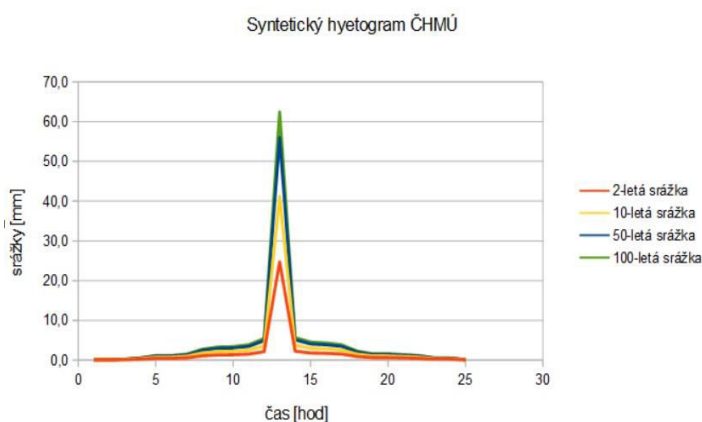


Obr. č. 24 : Hodnoty 100-leté srážky, uvedené v mm

### 9.3 Hyetogramy

V této diplomové práci byl v meteorologickém modelu programu HEC-HMS použit nástroj „Specified Hyetograph“, kam vstupovaly 4 vytvořené (syntetické) návrhové hyetogramy. Použitý návrhový hyetogram je (grafická) reprezentace časového rozložení celkového úhrnu návrhové N-leté maximální srážky do kratších intervalů. Všechny použité hyetogramy reprezentují rozdělení deště do 24 hodin, s časovým krokem dešťového oddílu 1 hodina. Použitý návrhový hyetogram je (grafická) reprezentace časového rozložení celkového úhrnu zejména určená hodnoty maximální intenzity dešťového oddílu v extrémní fázi hyetogramu. V této diplomové práci byly použity 4 návrhové hyetogramy dle metodiky, kterou použil a publikoval Vološ (2006), která je převzatá z metodických postupů ČHMÚ.

První typ hyetogramu (obr. č. 25) byl odvozen v ČHMÚ. Metoda, dle které byl odvozen hyetogram, je založená na zpracování 100-letých hodinových srážek pozorovaných z ombrografických stanic vyhodnocených Truplem (1958), kde byl odvozen poměr 100-letých hodinových srážek ku jednodenním. Na základě těchto poměrů byla určena maximální pořadnice hyetogramu. Ostatní pořadnice mohou být uživatelsky nadefinovány libovolně, ale za podmínky, že žádná z pořadnic hyetogramu určující podíl x-hodinové N-leté srážky by neměla mít delší dobu opakování než daná celková x-hodinová srážka. Co se týče praktického použití této metody v měřítku ČR, byla vytvořena mapa poměrů 100-letých jednohodinových a jednodenních srážek v GIS (podrobněji viz. (Kulasová a kol., 2004)), která umožňuje pro zkoumané povodí odečíst příslušný poměr ( $P_{100} \text{ 1h} / P_{100} \text{ 1den}$ ) a nadefinovat tak maximální intenzitu dešťového oddílu syntetického hyetogramu ve kterémkoliv povodí v ČR.



Obr. č. 25: Syntetický hyetogram ČHMÚ

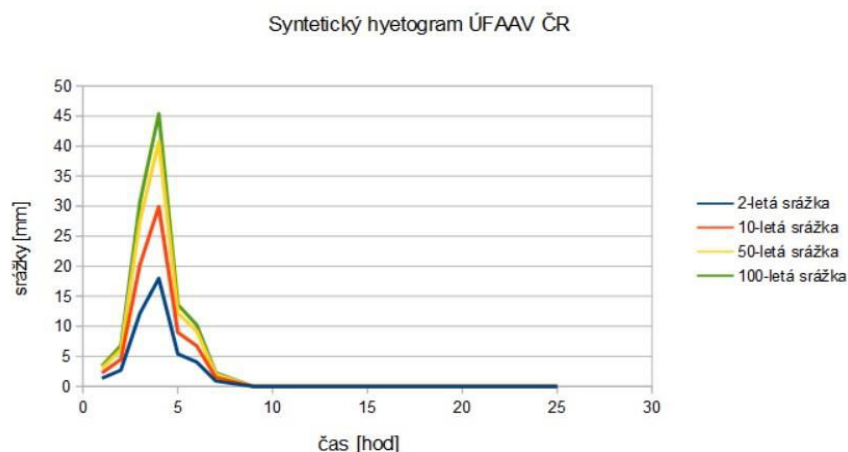
Druhý typ hyetogramu byl odvozen v Ústavu fyziky atmosféry AV ČR. Na základě hodnot denních 100-letých srážkových úhrnů  $P_{100}$ , bylo území ČR rozděleno do tří (resp. čtyř) oblastí. Základem pro toto rozdělení byla hodnota  $P_{100}$ , vazba na orografii a plošná souvislost oblasti. Byly určeny tři oblasti a jedna podoblast, které splňují nesledující podmínky:

Oblast A: zahrnuje místa s úhrnem  $P_{100} \geq 150$  mm

Oblast B: zahrnuje místa s úhrnem  $150 \text{ mm} > P_{100} \geq 90$  mm, kde oblast B byla ještě rozdělena do podoblastí B1 ( $P_{100} \geq 100$  mm) a B2 ( $P_{100} < 100$  mm).

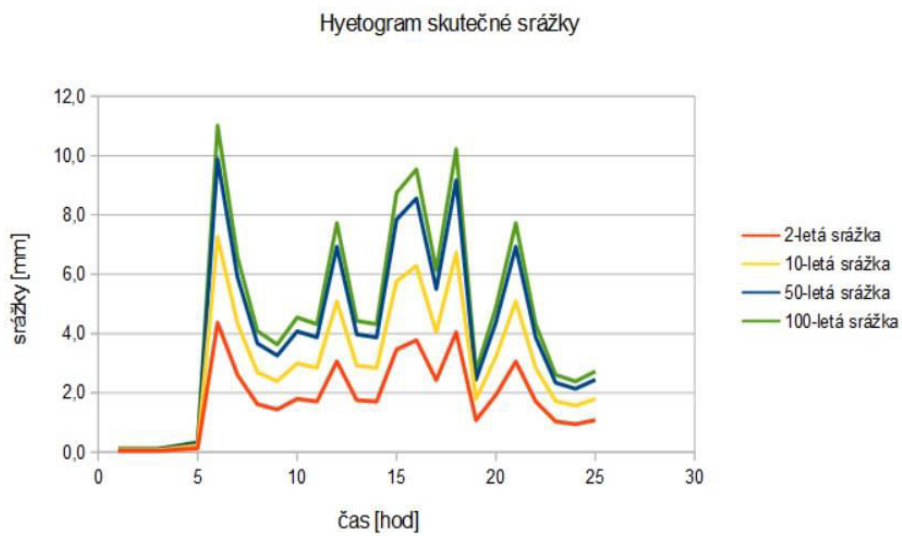
Oblast C: zahrnuje stanice s  $P_{100} < 90$  mm.

Obrázek č. 26 ukazuje druhý typ hyetogramu odvozený pro povodí Volšovky.



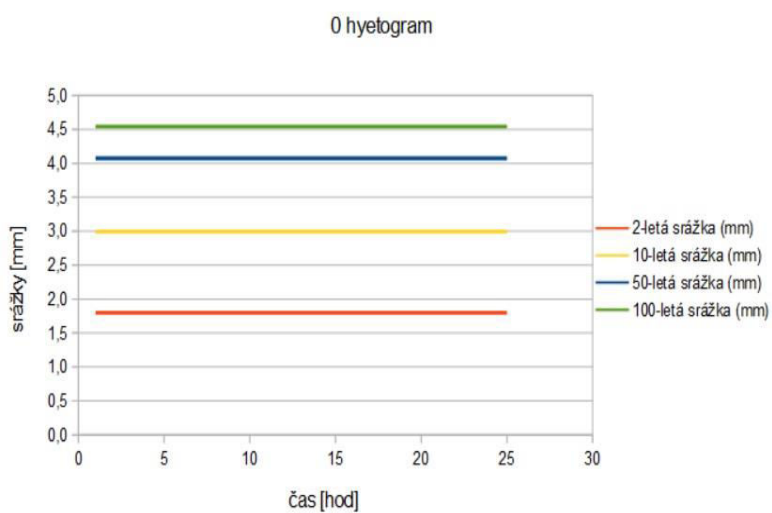
Obr. č. 26: Syntetický hyetogram ÚFAAV ČR

Třetí typ hyetogramu (obr. č. 27) byl sestavený z radarových měření srážek které byly zaznamenány 6-8. srpna a 11-13. srpna 2002. Úhrny srážek získaných za 24 hodin z radarových informací byly upraveny dle pozemních pozorování ze srážkoměrných stanic. Poté byla provedena korekce délky naměřeného hyetogramu tak, že zůstala zachovaná nejdůležitější část hyetogramu a zároveň nepřekročila délku 24 hodin.



Obr. č. 27: Hyetogram skutečné srážky

Čtvrtý typ hyetogramu (obr. č. 28) představuje tzv. „0“ variantou, která charakterizuje konstantní rozdělení intenzit dešťových oddílů během celého deště.



Obr. č. 28: „0“ hyetogram

## 9.4 Model HEC-HMS

Postup při aplikaci modelu HEC-HMS je možné popsat těmito kroky:

- sestavení hydrologického modelu v prostředí HEC-HMS,
- příprava vstupních srážkových dat,
- stanovení parametrů výpočtu přímého odtoku (odtokových ztrát),
- stanovení parametrů jednotkového hydrogramu,
- stanovení parametrů postupu vlny v říčním korytě,
- výpočet a interpretace výsledků.

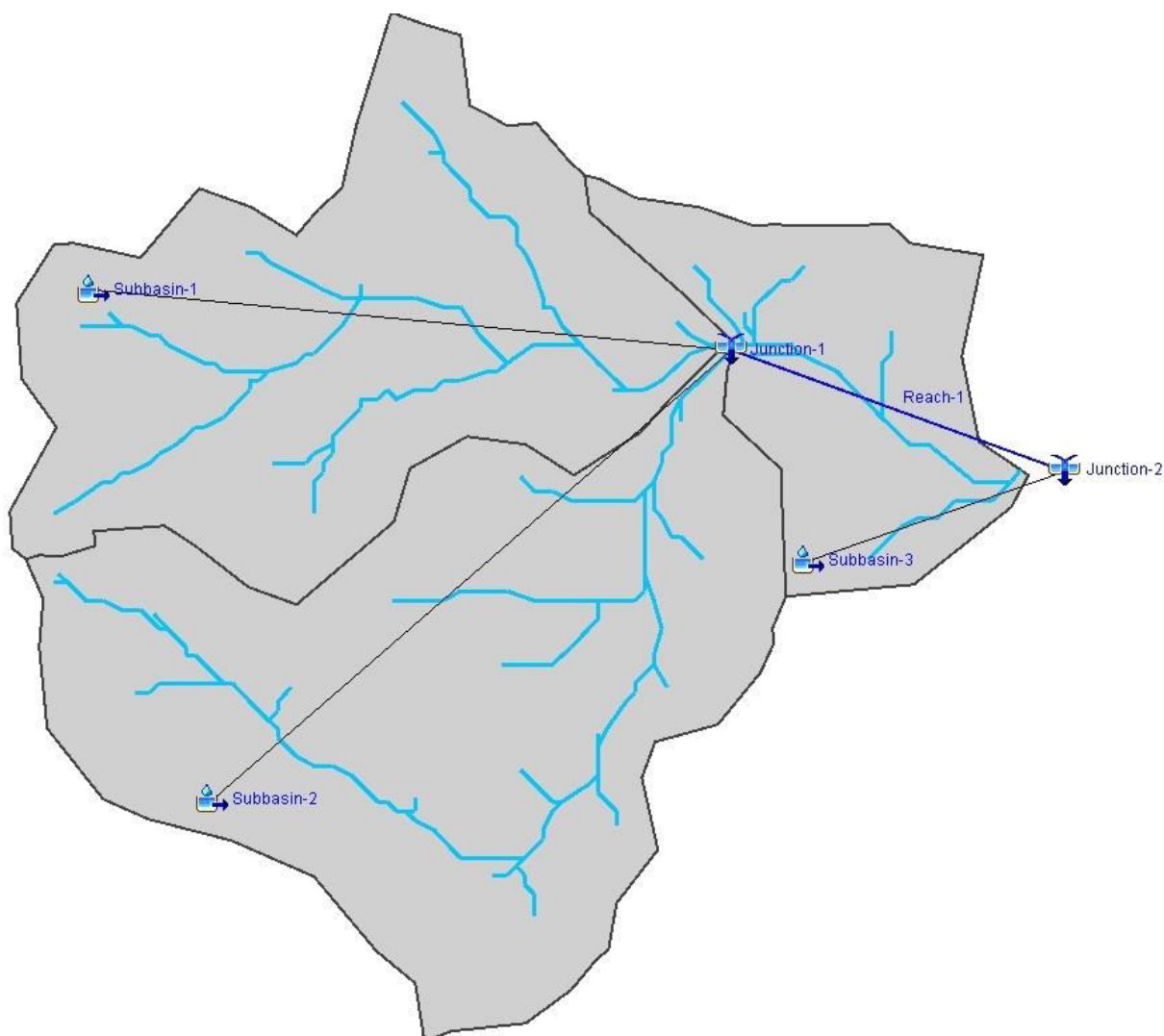
Sestavení hydrologického modelu povodí předchází příprava dat, která byla provedena za pomoci programu ArcGIS 10.0 a jeho extenze pro hydrologické modelování ArcHydro Tool a za pomoci nadstavby HEC-GeoHMS:

- příprava digitálního modelu terénu v rámci řešeného území,
- odvození rozvodnic a říční sítě,
- určení závěrového profilu povodí a dalších uvnitř povodí,
- určení finální podoby modelu povodí a říční sítě,
- výpočet fyzicko-geografických charakteristik povodí,
- výpočet doby koncentrace povodí a dalších charakteristik modelu.

### 9.4.1 Basin model

Basin model je jedním ze základních komponent vytvářeného hydrologického modelu v prostředí HEC-HMS, jehož součástí je grafické vyobrazení modelovaného území (obr. č. 29) a zadávání parametrů a charakteristik pro implementované hydrologické výpočty, resp. metody.





Obr. č. 29: povodí Volšovky v hydrologickém modelu HEC-HMS

Z obrázku č. 29 je patrné, že k vytvoření stromového schématu povodí bylo použito několika hydrologických prvků:

- 1) Subbasin – dílčí povodí (subpovodí) – v této DP byla vytvořena 3 dílčí povodí (Subbasin-1 pro subpovodí Kepelského potoka, Subbasin-2 pro subpovodí Horní Volšovky a Subbasin-3 pro subpovodí Dolní Volšovky)
- 2) Junction – soutok (v této DP byly použity dva soutoky)
- 3) Reach – úsek toku (v této DP byl použit jeden úsek toku)

## Výpočet objemu přímého odtoku

Z nabízených možností programu HEC-HMS byla pro výpočet objemu přímého odtoku zvolena metoda „SCS Curve Number“ (viz. kapitola 8.3 a kap. 9.1), kdy do modelu vstupovaly hodnoty čísel CN a počátečních ztrát (Ia) za každé subpovodí (viz. tab. 1)

Povodí	CN	Ia [mm]	S [mm]
Volšovka dolní	66	26	131
Kepelský potok	64	29	143
Volšovka horní	63	30	149

Tab. č. 1: Hodnoty čísel CN, počátečních ztrát povodí Ia a potenciální retence S v povodí Volšovky

## Transformace přímého odtoku - metoda jednotkového hydrogramu

Jako jednu z transformačních funkcí povodí používá HEC-HMS jednotkový hydrogram a pro tuto práci byl použit jednotkový hydrogram dle Clarka (viz. kapitola 8.4) , kdy do modelu vstupovaly hodnoty doby koncentrace (Tc) a retenční konstanty (Rc) za každé subpovodí (viz. tab. 2).

Povodí	Tc [hod]	Tlag [hod]	Rc [hod]
Volšovka dolní	2,42	1,45	3,04
Kepelský potok	3,76	2,25	2,29
Volšovka horní	4,88	2,92	3,49

Tab. č. 2: Hodnoty  $T_{lag}$ , doby koncentrace  $T_C$  a retenční konstanty  $R_c$

## Postup povodňové vlny v říčním úseku

Za situace, kdy je hydrologický model sestaven z více prvků reprezentující povodí (v této DP jsou tři), vznikají v modelu prvky představující říční úseky. V těchto úsecích je nutné simulovat postup vlny po toku. Z nabízených možností programu HEC-HMS byla pro postup povodňové vlny v říčním úseku zvolena metoda Muskingum. Tato metoda je podrobně popsána např. ve Feldman (2000). Do modelu vstupovaly parametry K (postupová doba v hodinách) pro výpočet prizmatické retence koryta a bezrozměrný parametr X, kterým se vyjadřuje vliv klínové retence v rámci říčního úseku. Oba parametry byly odhadnuty na základě charakteristik a vlastností říčního koryta, resp. byly vypočteny rovnicemi uvedenými ve Feldman (2000) pro odhad parametrů K a X na povodích, kde nejsou měřeny průtoky. Parametr X byl odhadnut ze sklonitosti toku (vypočteno v ArcGIS 10.1), na kterém je závislý a parametr K byl vypočten z následujícího vzorce:

$$K = L / V_w$$

kde: L – délka úseku

V<sub>w</sub> – rychlost povodňové vlny (spočteno jako 1,33 – 1,67 násobek průměrné rychlosti v toku odhadnutém Manningovou rovnicí, případně na základě Seddonova zákona)

Výsledná hodnota parametru X, která vstupovala do modelu, byla 0,18 a výsledná hodnota parametru K byla 0,83 hodin.

#### **9.4.2 Meteorologický model**

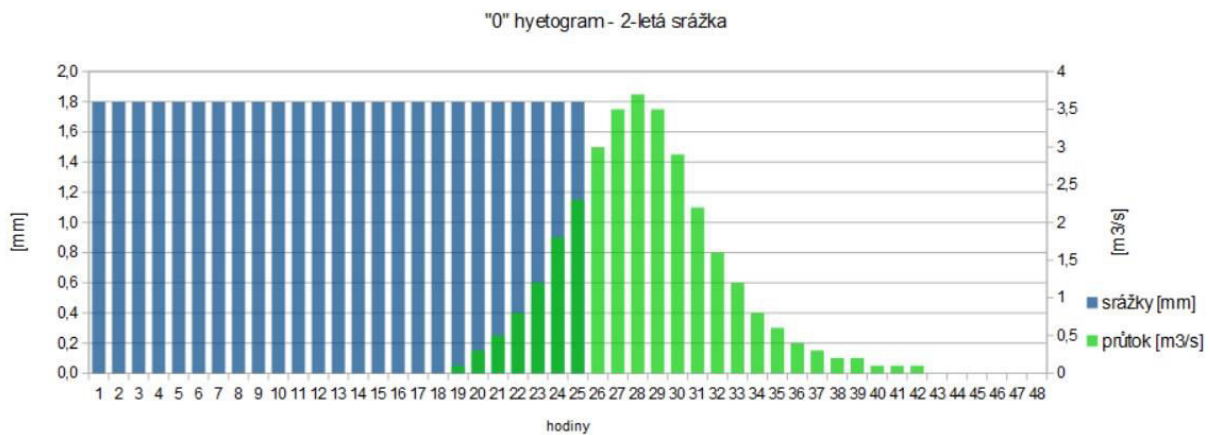
Meteorologický model byl vytvořen a vyplněn v „Meteorologic Model Manager“, čemuž předcházelo založení a vyplnění „Time-Series Data Manager“, do kterého byly zadány 24 hodinové časové řady srážek ze 4 použitých typů hyetogramů a pro srážkové úhrny s různou dobou opakování (N=2, N=10, N=50 a N=100 let). Následně byl tento model časových řad propojen s meteorologickým modelem, kde byly nastaveny metody pro srážky (specified hyetograph), evapotranspiraci (v této DP zanedbávána) a tání sněhu (v této DP vynecháno). Při propojení těchto dvou modelů byla každému meteorologickému modelu přiřazena časová řada průběhu srážek pro každé dílčí povodí (v této DP jsou 3). Výsledkem této části je 16 meteorologických modelů (4 použité hyetogramy krát 4 různé doby opakování), které následně vstupují do modelových simulací popsanych v kap. 9.5.

#### **9.5 Simulace vlivu různých hyetogramů na výstupní hydrogramy**

Na povodí Volšovky byly postupně aplikovány všechny čtyři typy hyetogramu se stejným úhrnem odpovídajícím navrhované N-letosti a výsledky simulací byly hodnoceny z pohledu dosažené hodnoty kulminačních průtoků a času kulminace. Tyto hodnoty jsou pro jednotlivé návrhové hyetogramy a příslušné N-leté srážky zobrazeny v tabulkách č. 3 až 18. Na obrázcích č. 30 až 45 je znázorněno rozložení N-letých srážkových úhrnů a průtok v uzávěrovém profilu povodí.

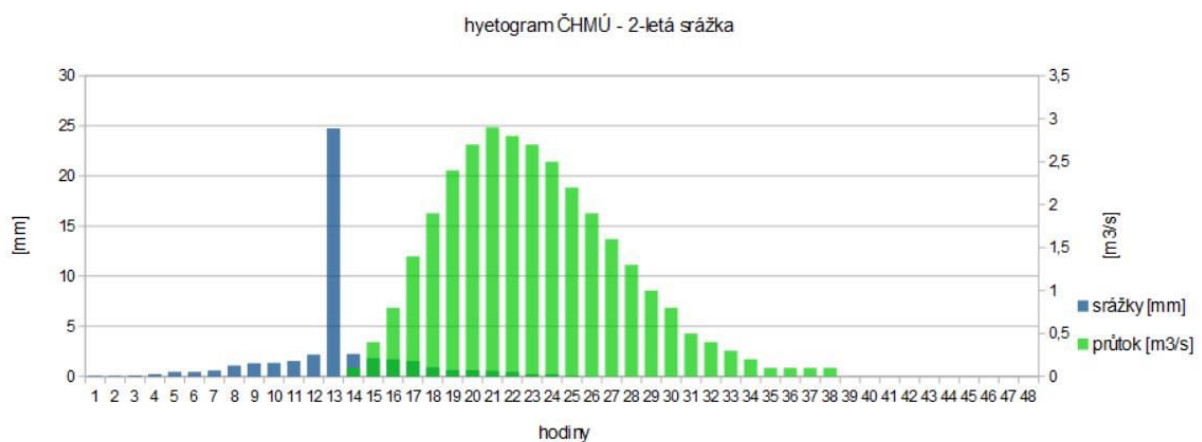
Před samotnými simulacemi byl v programu HEC-HMS vytvořen a vyplněn „Control Specification Manager“, ve kterém se zadávají parametry pro modelované simulace. Tyto parametry byly nastaveny shodně pro všechny následující simulace – časový krok 1 hodina, začátek simulace shodný se začátkem deště a konec simulace 2 dny po začátku deště, resp. 1 den po skončení deště. Simulovány byly průtoky v uzávěrovém profilu Volšovky, ale i v uzávěrech jednotlivých subpovodí, a to pro srážkové úhrny s různou dobou opakování

(N=2, N=10, N=50 a N=100 let) a se čtyřmi různými časovými rozloženími těchto srážek (tj. se čtyřmi typy vstupujících hyetogramů).



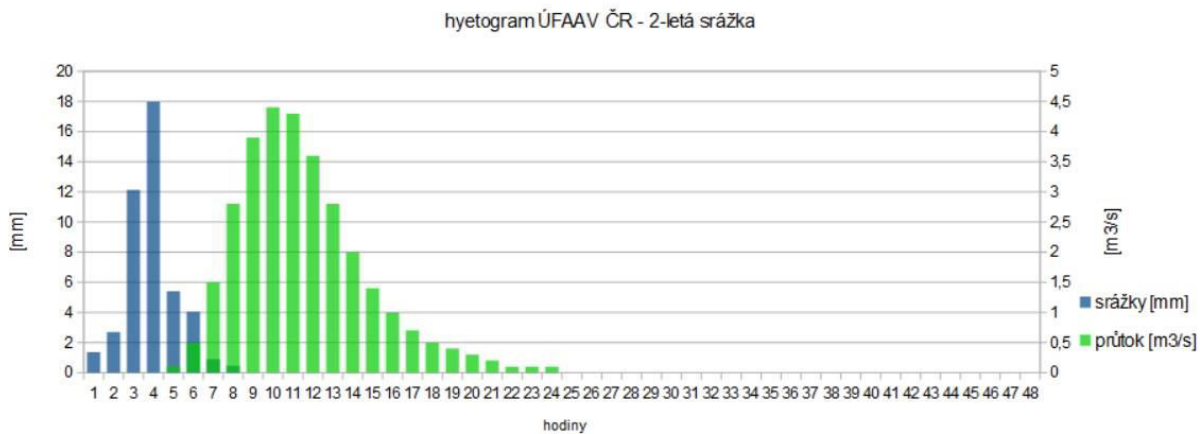
Obr. č. 30: Graf rozložení 2-leté srážky podle „0“ hyetogramu a průtoků v uzávěrovém profilu povodí Volšovky

„0“ hyetogram je charakteristický konstantním rozdělením deště v průběhu 24 hodin. Kulminační průtok nastává až po skončení deště, pro 2 letou srážku 28 hodin po začátku deště.



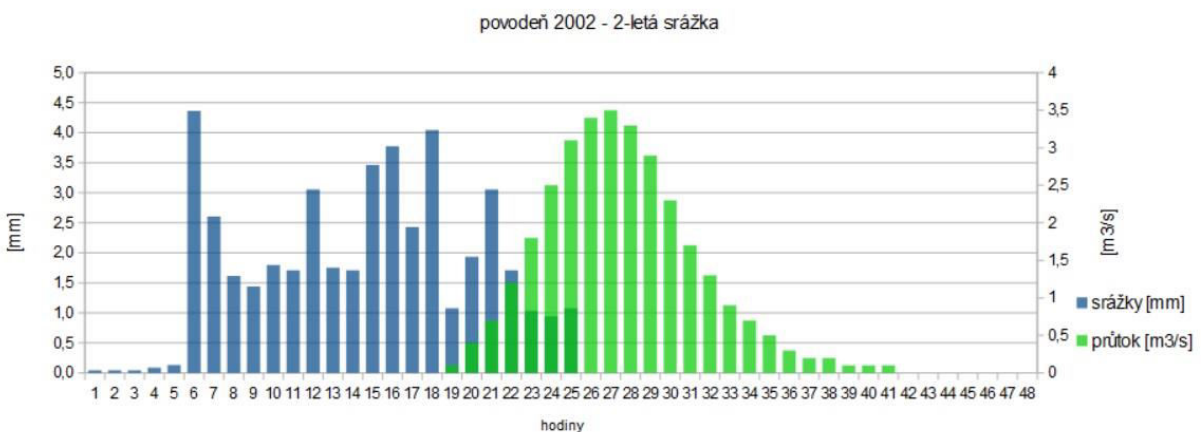
Obr. č. 31: Graf rozložení 2-leté srážky podle hyetogramu ČHMÚ a průtoků v uzávěrovém profilu povodí Volšovky

Návrhový hyetogram ČHMÚ má kulminaci srážky 13 hodin po začátku deště. Kulminační průtok při 2-leté srážce nastane se zpožděním 8 hodin od kulminace srážky, 21 hodin po začátku deště, a dosahuje hodnoty 2,9 m<sup>3</sup>/s



Obr. č. 32: Graf rozložení 2-leté srážky podle hyetogramu ÚFAAV ČR a průtoků v uzavěrovém profilu povodí Volšovky

Pro návrhový hyetogram ÚFAAV ČR a 2-letou srážku nastává kulminace srážky 6 hodin po začátku deště. Průtok dosáhl kulminace se zpožděním 12 hodin od začátku deště a dosáhl hodnoty  $4,4 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Obr. č. 33: Graf rozložení 2-leté srážky podle hyetogramu skutečné srážky a průtoků v uzavěrovém profilu povodí Volšovky

Hyetogram skutečné srážky má kulminaci deště 6 hodin po začátku deště. Kulminační průtok pro 2-letou srážku nastává se zpožděním 27 hodin po začátku deště.

„0“ hyetogram – 2-letá srážka		
Hydrologický prvek	Kulminační průtok (m <sup>3</sup> /s)	Čas kulminace
Subbasin-2	1,5	28 hod
Subbasin-1	1,6	27 hod
Junction-1	3	28 hod
Reach-1	2,9	28 hod
Subbasin-3	0,9	27 hod
Junction-2	3,7	28 hod

Tab. č. 3: Hodnoty kulminačních průtoků a času kulminace od začátku srážky pro jednotlivé hydrologické prvky v povodí

Hyetogram ČHMÚ – 2-letá srážka		
Hydrologický prvek	Kulminační průtok (m <sup>3</sup> /s)	Čas kulminace
Subbasin-2	1,1	22 hod
Subbasin-1	1,2	20 hod
Junction-1	2,3	21 hod
Reach-1	2,2	22 hod
Subbasin-3	0,7	19 hod
Junction-2	2,9	21 hod

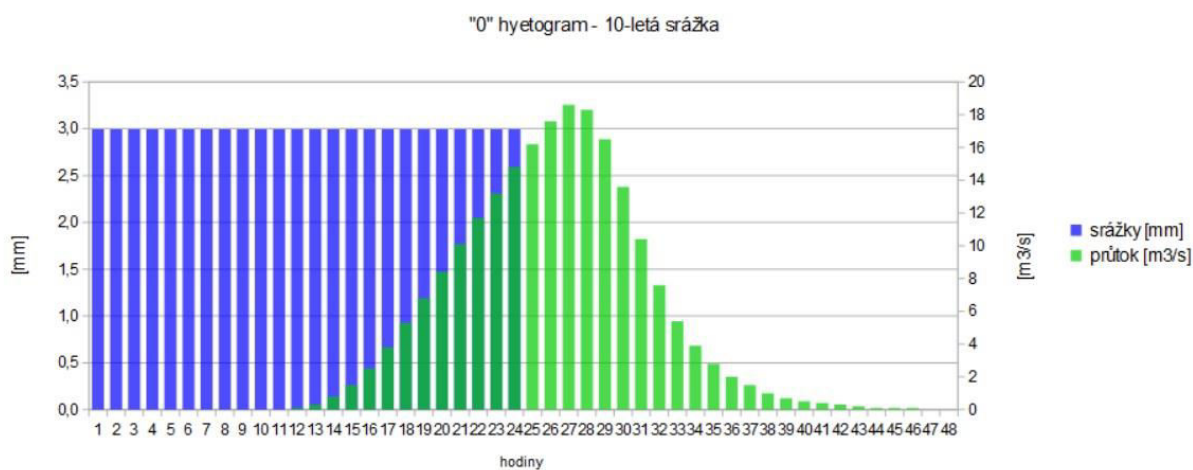
Tab. č. 4: Hodnoty kulminačních průtoků a času kulminace od začátku srážky pro jednotlivé hydrologické prvky v povodí

Hyetogram ÚFAAV ČR – 2-letá srážka		
Hydrologický prvek	Kulminační průtok (m <sup>3</sup> /s)	Čas kulminace
Subbasin-2	1,7	10 hod
Subbasin-1	2,1	9 hod
Junction-1	3,7	10 hod
Reach-1	3,5	11 hod
Subbasin-3	1,2	9 hod
Junction-2	4,4	10 hod

Tab. č. 5: Hodnoty kulminačních průtoků a času kulminace od začátku srážky pro jednotlivé hydrologické prvky v povodí

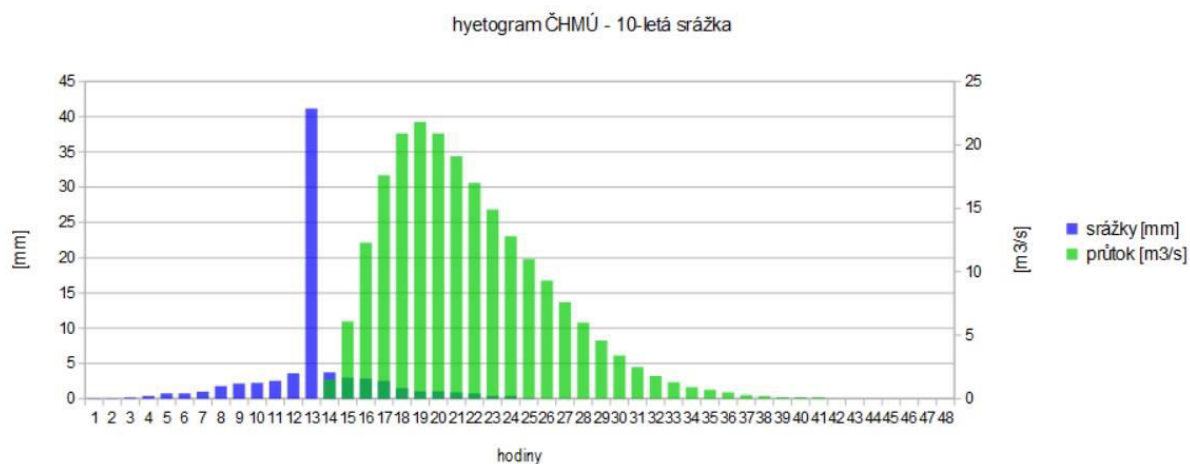
Hyetogram skutečné srážky – 2-letá srážka		
Hydrologický prvek	Kulminační průtok ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Čas kulminace
Subbasin-2	1,4	27 hod
Subbasin-1	1,5	26 hod
Junction-1	2,8	26 hod
Reach-1	2,8	27 hod
Subbasin-3	0,8	24 hod
Junction-2	3,5	27 hod

Tab. č. 6: Hodnoty kulminačních průtoků a času kulminace od začátku srážky pro jednotlivé hydrologické prvky v povodí



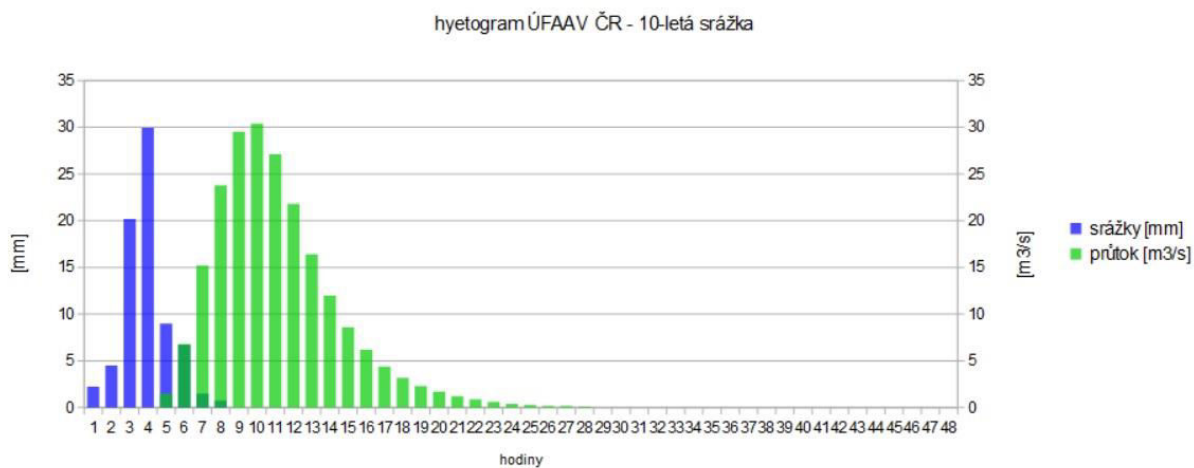
Obr. č. 34: Graf rozložení 10-leté srážky podle „0“ hyetogramu a průtoků v uzávěrovém profilu povodí Volšovky

„0“ hyetogram je charakteristický konstantním rozdělením deště v průběhu 24 hodin. Kulminační průtok nastává až po skončení deště, pro 10 letou srážku 27 hodin po začátku deště.



Obr. č. 35: Graf rozložení 10-leté srážky podle hyetogramu ČHMÚ a průtoků v uzávěrovém profilu povodí Volšovky

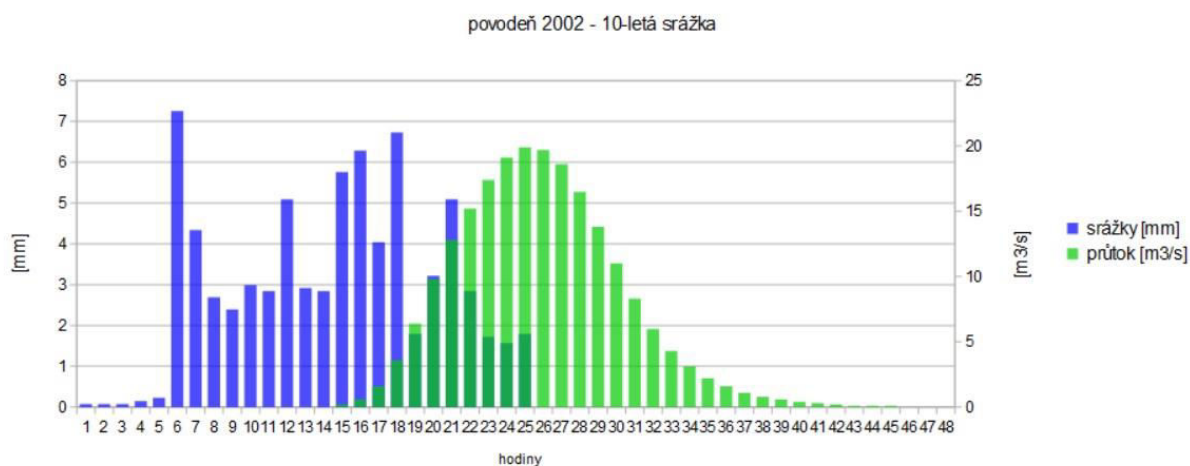
Návrhový hyetogram ČHMÚ má kulminaci srážky 13 hodin po začátku deště. Kulminační průtok při 10-leté srážce nastane se zpožděním 19 hodin od začátku deště a dosahuje hodnoty 21,8 m<sup>3</sup>/s.



Obr. č. 36: Graf rozložení 10-leté srážky podle hyetogramu ÚFAAV ČR a průtoků v uzávěrovém profilu povodí Volšovky

Pro návrhový hyetogram ÚFAAV ČR a 10-letou srážku nastala kulminace srážky 4 hodiny po začátku deště. Průtok dosáhl kulminace se zpožděním 10 hodin od začátku deště a dosáhl hodnoty 30,4 m<sup>3</sup>/s.





Obr. č. 37: Graf rozložení 10-leté srážky podle hyetogramu skutečné srážky a průtoků v uzavěrovém profilu povodí Volšovky

Hyetogram skutečné srážky má kulminaci deště 6 hodin po začátku deště. Kulminační průtok pro 10-letu srážku nastává se zpožděním 25 hodin od začátku deště

„0“ hyetogram – 10-letá srážka		
Hydrologický prvek	Kulminační průtok ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Čas kulminace
Subbasin-2	8,1	27 hod
Subbasin-1	7,5	27 hod
Junction-1	15,7	27 hod
Reach-1	15,4	28 hod
Subbasin-3	3,5	26 hod
Junction-2	18,6	27 hod

Tab. č. 7: Hodnoty kulminačních průtoků a času kulminace od začátku srážky pro jednotlivé hydrologické prvky v povodí

Hyetogram ČHMÚ – 10-letá srážka		
Hydrologický prvek	Kulminační průtok ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Čas kulminace
Subbasin-2	9,2	19 hod
Subbasin-1	9,6	17 hod
Junction-1	18,3	18 hod
Reach-1	17,9	19 hod
Subbasin-3	4,6	16 hod
Junction-2	21,8	20 hod

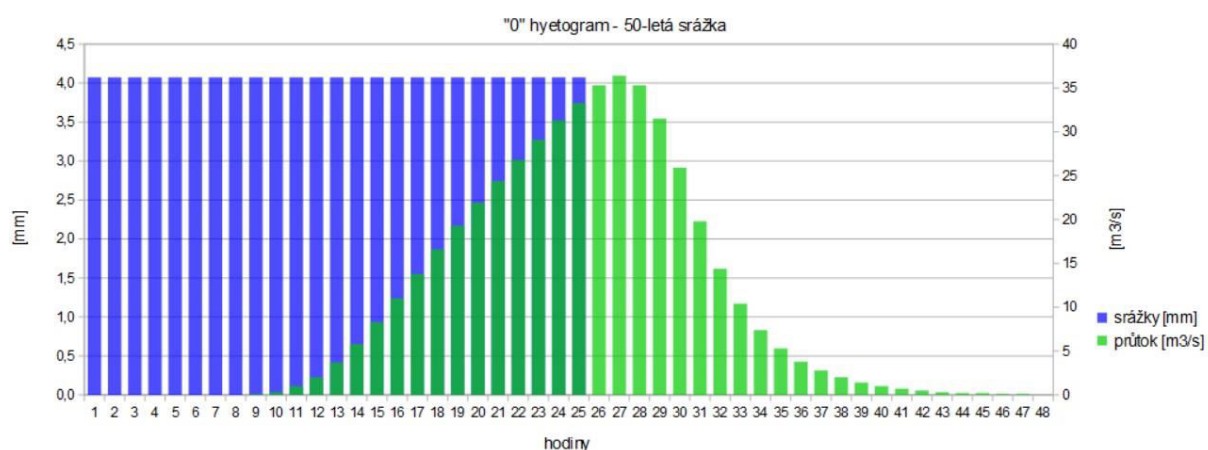
Tab. č. 8: Hodnoty kulminačních průtoků a času kulminace od začátku srážky pro jednotlivé hydrologické prvky v povodí

Hyetogram ÚFAAV ČR – 10-letá srážka		
Hydrologický prvek	Kulminační průtok ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Čas kulminace
Subbasin-2	13	10 hod
Subbasin-1	14,1	9 hod
Junction-1	26,6	9 hod
Reach-1	25,6	10 hod
Subbasin-3	6,7	8 hod
Junction-2	30,4	10 hod

Tab. č. 9: Hodnoty kulminačních průtoků a času kulminace od začátku srážky pro jednotlivé hydrologické prvky v povodí

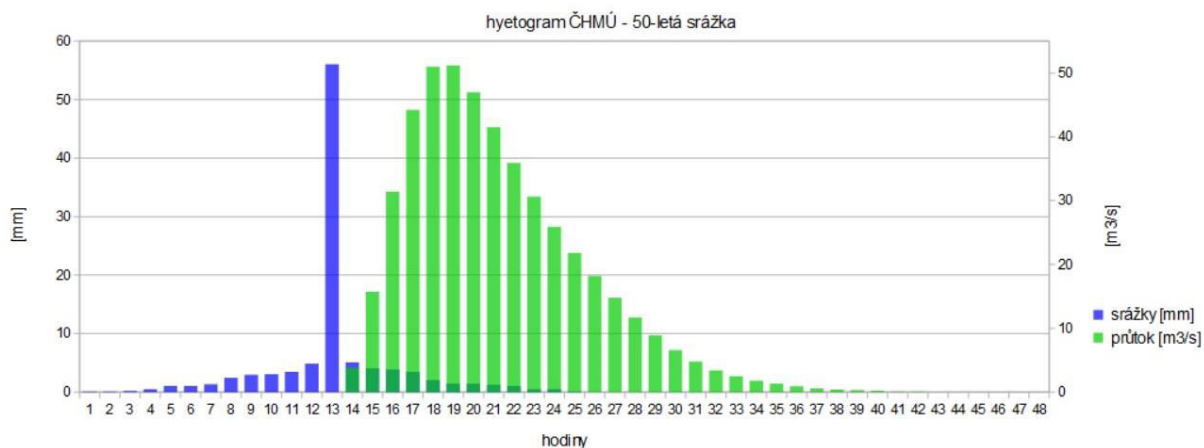
Hyetogram skutečné srážky – 10-letá srážka		
Hydrologický prvek	Kulminační průtok ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Čas kulminace
Subbasin-2	8,6	26 hod
Subbasin-1	8,1	24 hod
Junction-1	16,7	25 hod
Reach-1	16,4	26 hod
Subbasin-3	3,9	24 hod
Junction-2	19,9	25 hod

Tab. č. 10: Hodnoty kulminačních průtoků a času kulminace od začátku srážky pro jednotlivé hydrologické prvky v povodí



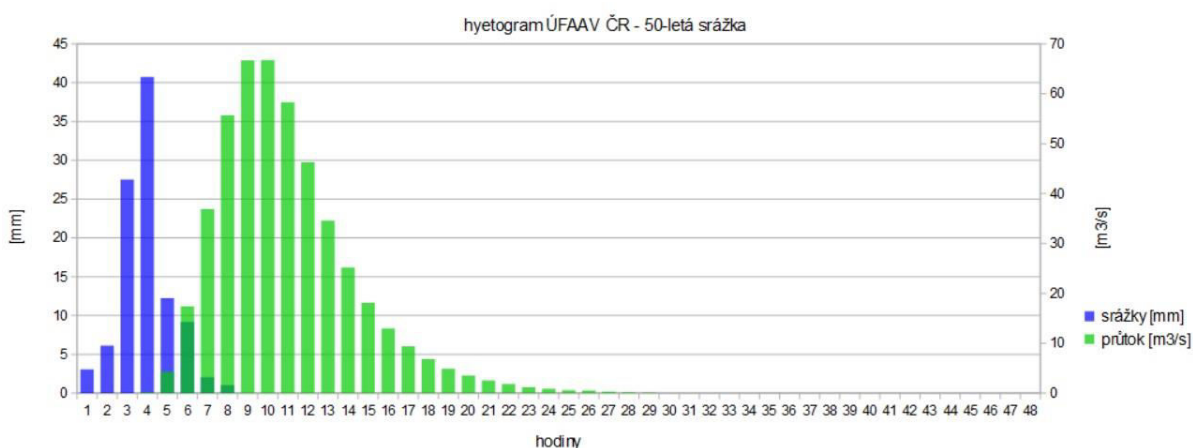
Obr. č. 38: Graf rozložení 50-leté srážky podle „0“ hyetogramu a průtoků v uzávěrovém profilu povodí Volšovky

„0“ hyetogram je charakteristický konstantním rozdělením deště v průběhu 24 hodin. Kulminační průtok nastává až po skončení deště, pro 50-letou srážku 27 hodin po začátku deště.



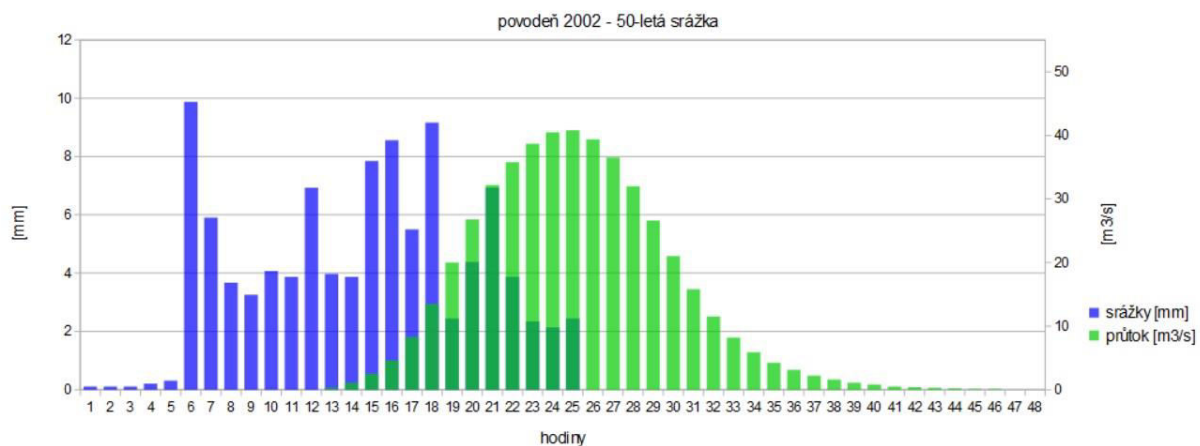
Obr. č. 39: Graf rozložení 50-leté srážky podle hyetogramu ČHMÚ a průtoků v uzávěrovém profilu povodí Volšovky

Návrhový hyetogram ČHMÚ má kulminaci srážky 13 hodin po začátku deště. Kulminační průtok při 50-leté srážce nastane 19 hodin po začátku deště a dosahuje hodnoty  $51,2 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Obr. č. 40: Graf rozložení 50-leté srážky podle hyetogramu ÚFAAV ČR a průtoků v uzávěrovém profilu povodí Volšovky

Pro návrhový hyetogram ÚFAAV ČR a 50-letou srážku nastala kulminace srážky 4 hodiny po začátku deště. Průtok dosáhl kulminace se zpožděním 9 hodin od začátku deště a dosáhl hodnoty  $66,8 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Obr. č. 41: Graf rozložení 50-leté srážky podle hyetogramu skutečné srážky a průtoků v uzavěrovém profilu povodí Volšovky

Hyetogram skutečné srážky má kulminaci deště 6 hodin po začátku deště. Kulminační průtok pro 50-letu srážku nastává se zpožděním 25 hodin po začátku deště.

„0“ hyetogram – 50-letá srážka		
Hydrologický prvek	Kulminační průtok ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Čas kulminace
Subbasin-2	16,3	27 hod
Subbasin-1	14,3	27 hod
Junction-1	30,6	27 hod
Reach-1	30	27 hod
Subbasin-3	6,5	26 hod
Junction-2	36,4	27 hod

Tab. č. 11: Hodnoty kulminačních průtoků a času kulminace od začátku srážky pro jednotlivé hydrologické prvky v povodí

Hyetogram ČHMÚ – 50-letá srážka		
Hydrologický prvek	Kulminační průtok ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Čas kulminace
Subbasin-2	22,1	18 hod
Subbasin-1	23,8	17 hod
Junction-1	44,4	18 hod
Reach-1	43	19 hod
Subbasin-3	10,7	16 hod
Junction-2	51,2	18 hod

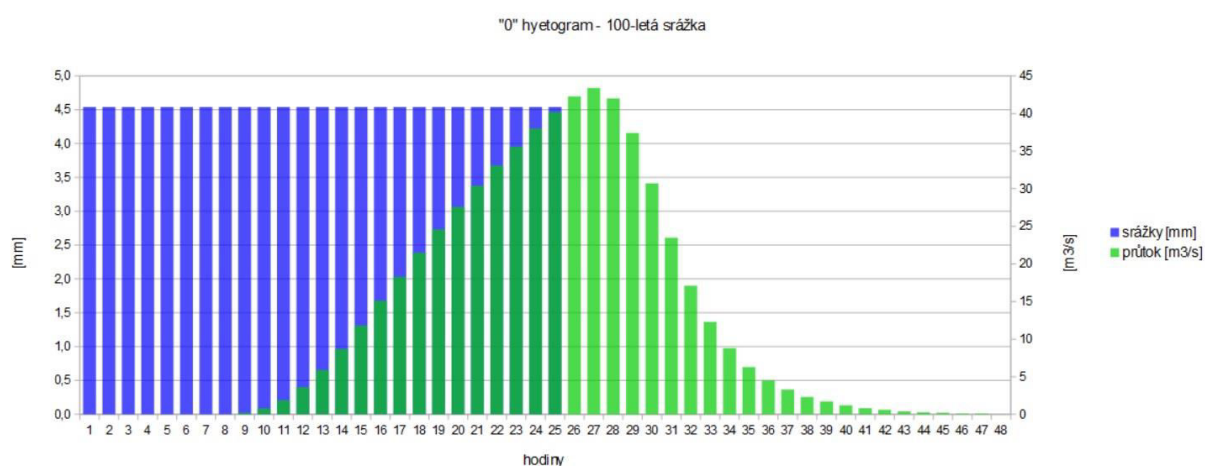
Tab. č. 12: Hodnoty kulminačních průtoků a času kulminace od začátku srážky pro jednotlivé hydrologické prvky v povodí

Hyetogram ÚFAAV ČR – 50-letá srážka		
Hydrologický prvek	Kulminační průtok ( $m^3/s$ )	Čas kulminace
Subbasin-2	29,1	9 hod
Subbasin-1	31,2	8 hod
Junction-1	59,7	9 hod
Reach-1	57,2	10 hod
Subbasin-3	14	8 hod
Junction-2	66,8	10 hod

Tab. č. 13: Hodnoty kulminačních průtoků a času kulminace od začátku srážky pro jednotlivé hydrologické prvky v povodí

Hyetogram skutečné srážky – 50-letá srážka		
Hydrologický prvek	Kulminační průtok ( $m^3/s$ )	Čas kulminace
Subbasin-2	18,1	25 hod
Subbasin-1	16,4	24 hod
Junction-1	34,2	24 hod
Reach-1	33,9	25 hod
Subbasin-3	7,5	24 hod
Junction-2	40,8	24 hod

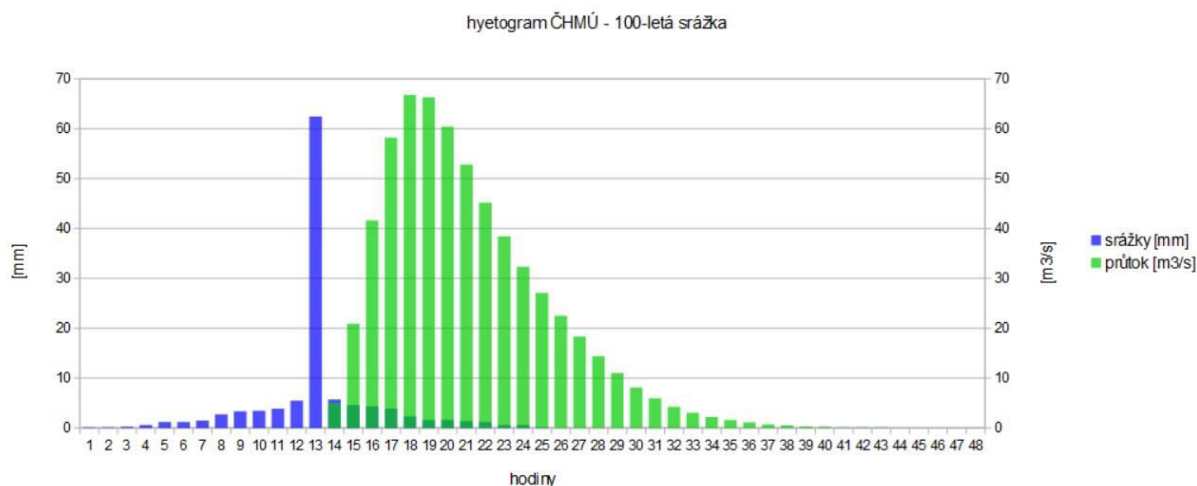
Tab. č. 14: Hodnoty kulminačních průtoků a času kulminace od začátku srážky pro jednotlivé



hydrologické prvky v povodí

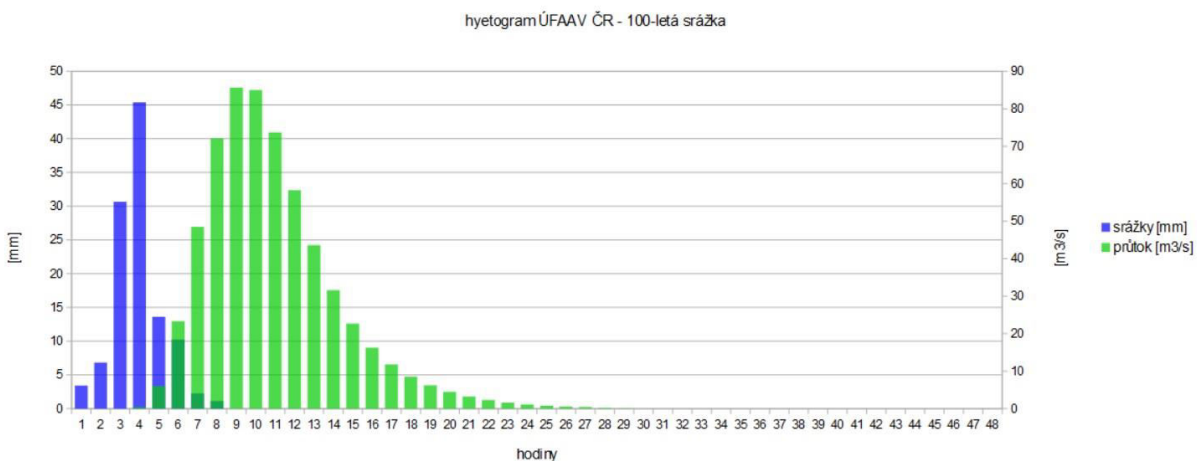
Obr. č. 42: Graf rozložení 100-leté srážky podle „0“ hyetogramu a průtoků v uzávěrovém profilu povodí Volšovky

„0“ hyetogram je charakteristický konstantním rozdělením deště v průběhu 24 hodin. Kulminační průtok nastává až po skončení deště, pro 100-letou srážku 27 hodin po začátku deště.



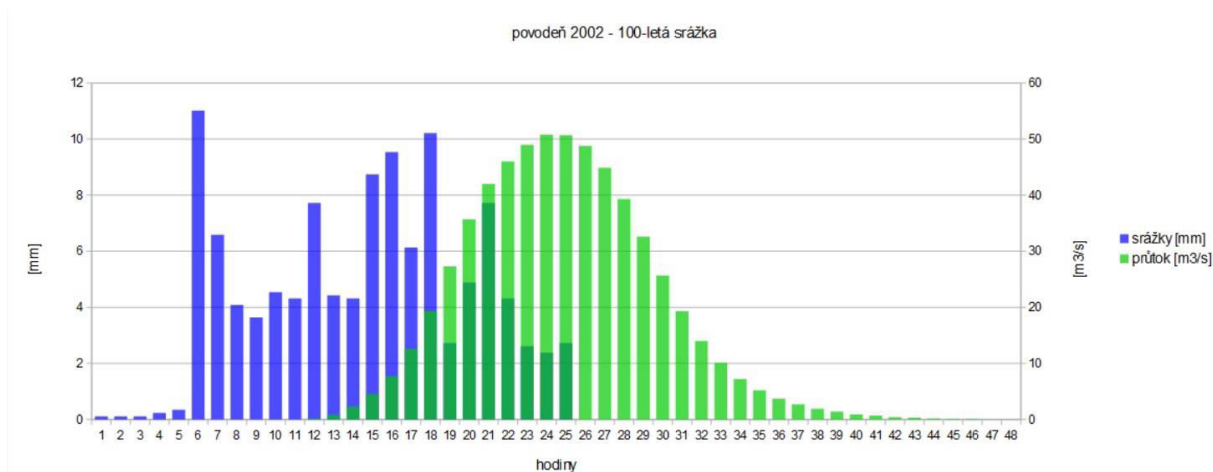
Obr. č. 43: Graf rozložení 100-leté srážky podle hyetogramu ČHMÚ a průtoků v uzávěrovém profilu povodí Volšovky

Návrhový hyetogram ČHMÚ má kulminaci srážky 13 hodin po začátku deště. Kulminační průtok při 10-leté srážce nastane 18 hodin po začátku deště a dosahuje hodnoty  $66,8 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Obr. č. 44: Graf rozložení 100-leté srážky podle hyetogramu ÚFAAV ČR a průtoků v uzávěrovém profilu povodí Volšovky

Pro návrhový hyetogram ÚFAAV ČR a 100-letou srážku nastala kulminace srážky 4 hodiny po začátku deště. Průtok dosáhl kulminace se zpožděním 9 hodin od začátku deště a dosáhl hodnoty  $85,6 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Obr. č. 45: Graf rozložení 100-leté srážky podle hyetogramu skutečné srážky a průtoků v uzavěrovém profilu povodí Volšovky

Hyetogram skutečné srážky má kulminaci deště 6 hodin po začátku deště. Kulminační průtok pro 100-letu srážku nastává se zpožděním 24 hodin po začátku deště.

„0“ hyetogram – 100-letá srážka		
Hydrologický prvek	Kulminační průtok ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Čas kulminace
Subbasin-2	19,6	27 hod
Subbasin-1	17	26 hod
Junction-1	36,5	27 hod
Reach-1	35,9	27 hod
Subbasin-3	7,7	26 hod
Junction-2	43,4	27 hod

Tab. č. 15: Hodnoty kulminačních průtoků a času kulminace od začátku srážky pro jednotlivé hydrologické prvky v povodí

Hyetogram ČHMÚ – 100-letá srážka		
Hydrologický prvek	Kulminační průtok ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Čas kulminace
Subbasin-2	29,2	18 hod
Subbasin-1	31,3	17 hod
Junction-1	58	18 hod
Reach-1	56,1	19 hod
Subbasin-3	13,9	16 hod
Junction-2	66,8	18 hod

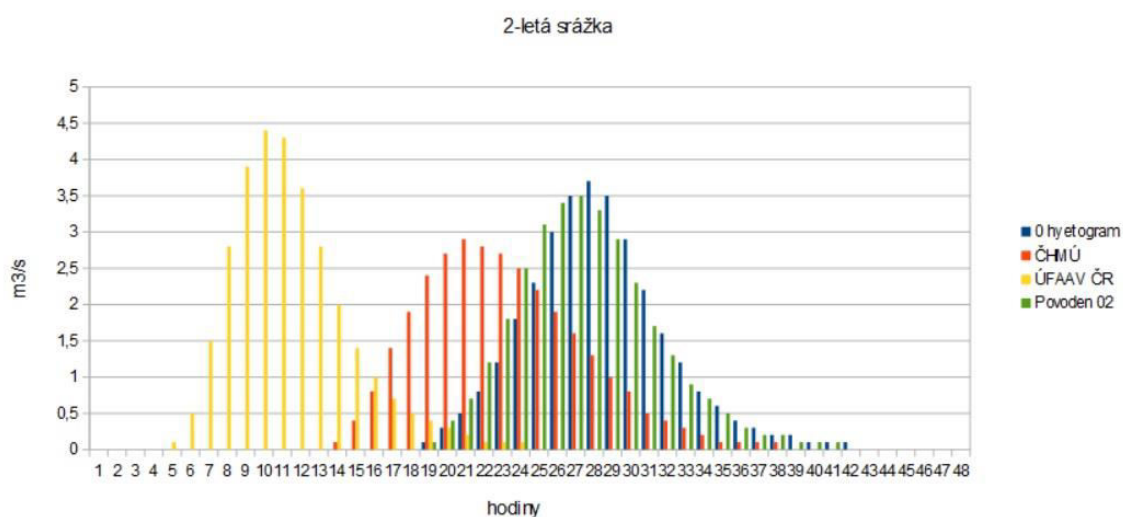
Tab. č. 16: Hodnoty kulminačních průtoků a času kulminace od začátku srážky pro jednotlivé hydrologické prvky v povodí

Hyetogram ÚFAAV ČR – 100-letá srážka		
Hydrologický prvek	Kulminační průtok (m <sup>3</sup> /s)	Čas kulminace
Subbasin-2	37,5	9 hod
Subbasin-1	40,2	8 hod
Junction-1	76,3	9 hod
Reach-1	73	10 hod
Subbasin-3	17,5	8 hod
Junction-2	85,6	9 hod

Tab. č. 17: Hodnoty kulminačních průtoků a času kulminace od začátku srážky pro jednotlivé hydrologické prvky v povodí

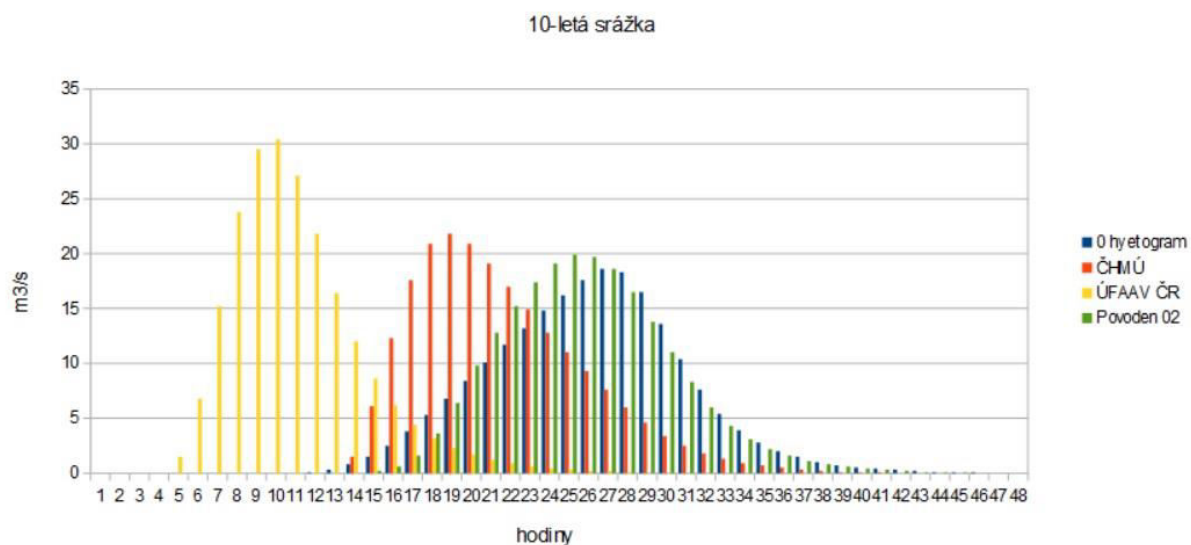
Hyetogram skutečné srážky – 100-letá srážka		
Hydrologický prvek	Kulminační průtok (m <sup>3</sup> /s)	Čas kulminace
Subbasin-2	22,6	25 hod
Subbasin-1	20,3	24 hod
Junction-1	42,7	24 hod
Reach-1	42,4	25 hod
Subbasin-3	9,1	24 hod
Junction-2	50,8	24 hod

Tab. č. 18: Hodnoty kulminačních průtoků a času kulminace od začátku srážky pro jednotlivé hydrologické prvky v povodí

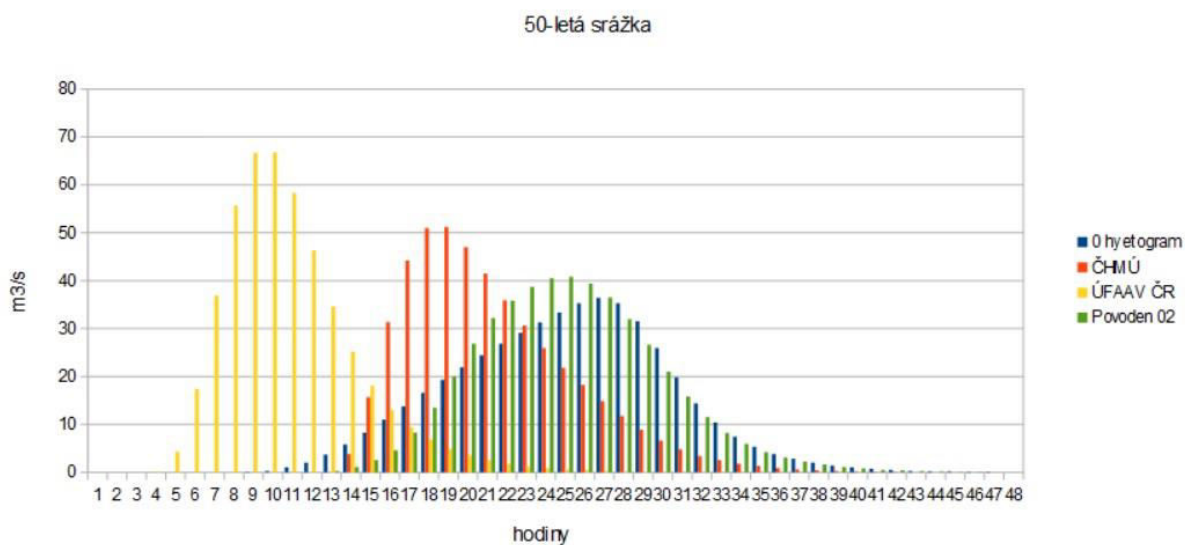


Obr. č. 46: Graf znázorňující průtoky v uzávěrovém profilu pro jednotlivé návrhové hyetogramy pro 2-letou srážku

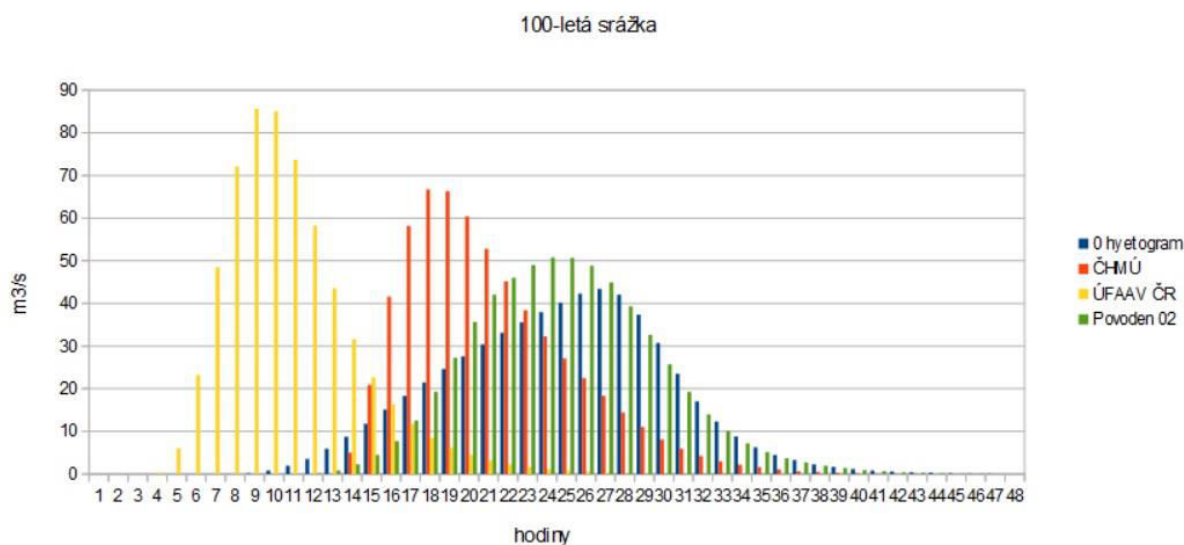




Obr. č. 47: Graf znázorňující průtoky v uzávěrovém profilu pro jednotlivé návrhové hyetogramy pro 10-letou srážku



Obr. č. 48: Graf znázorňující průtoky v uzávěrovém profilu pro jednotlivé návrhové hyetogramy pro 50-letou srážku



Obr. č. 49: Graf znázorňující průtoky v uzávěrovém profilu pro jednotlivé návrhové hyetogramy pro 100-letou srážku

Jak je vidět z obrázků č. 46 - 49 volba návrhového hyetogramu má výrazný vliv na velikosti průtoků. Z uvedených grafů jsou jasně patrné rozdíly v časovém rozložení průtoků i velikost kulminačních průtoků. U 2-leté srážky nejsou rozdíly v kulminačních průtocích tak výrazné. Hodnoty kulminačních průtoků se pohybují v rozmezí 2,9 až 4,4 m<sup>3</sup>/s, přičemž nejnižší hodnoty dosahuje návrhový hyetogram ČHMÚ. Pro 10-letou srážku se kulminační průtoky výrazně neliší u „0“ hyetogramu, hyetogramu ČHMÚ a hyetogramu skutečné srážky, pro tyto hyetogramy se hodnoty kulminačních průtoků pohybují mezi 18,6 a 21,8 m<sup>3</sup>/s. Výrazný rozdíl ve velikosti kulminačního průtoku je u hyetogramu ÚFAAV ČR, který dosahuje 30,4 m<sup>3</sup>/s. Větší rozdíly v kulminačních průtocích jsou u 50-leté srážky. Nejnižší hodnotu má „0“ hyetogram, a to 36,4 m<sup>3</sup>/s. Pro hyetogram skutečné srážky dosahuje kulminační průtok hodnoty 40,8 m<sup>3</sup>/s a pro hyetogram ČHMÚ 51,2 m<sup>3</sup>/s. Nejvyšší hodnotu má kulminační průtok opět pro hyetogram ÚFAAV ČR a to 66,8 m<sup>3</sup>/s. Pro 100-letou srážku má nejnižší kulminační průtok „0“ hyetogram s hodnotou 43,4 m<sup>3</sup>/s. Nejvyšší hodnotu má kulminační průtok u hyetogramu ÚFAAV ČR a to téměř dvojnásobnou, přesně 85,6 m<sup>3</sup>/s. Návrhový hyetogram ÚFAAV ČR dosahuje nejvyšších hodnot kulminačních průtoků pro všechny zkoumané srážkové úhrny (s dobou opakování N=2, N=10, N=50 a N=100 let).

Jak říká Vološ (2006), ze zkušeností můžeme pro stanovování návrhových parametrů průtokových vln v malých povodích doporučit využití varianty zátěžového hyetogramu dle ÚFAAV ČR, případně v kombinaci s hyetogramem ČHMÚ. To znamená, že časové přerozdělení dešťových oddílů zpracujeme dle ÚFA a max. intenzitu jednoho dešťového

oddílu budeme uvažovat ze stoletých hodinových intenzit zpracovaných Truplem. Vedou nás k tomu zejména to, že tvar syntetického hyetogramu dle ÚFA popisuje nejpravděpodobněji průběhy zaznamenaných konvekčních srážek které se vyskytly v posledních letech v ČR a způsobily značné materiální škody a ztráty na životech. Všechny konvekční srážky měly podobný průběh přerozdělení v čase, kde přibližně do 6 hodin spadla celá srážka a její významná část vypadla v průběhu 3 hodin.

Podle Doleželové (2013) analýza trendu provedená dynamickým způsobem ukazuje, že množství atmosférických srážek v posledních letech vykazuje spíše rostoucí tendenci. Zejména v letní sezoně roste význam extrémních srážkových událostí, které se stále větší měrou podílejí na celkovém srážkovém úhrnu.

Jak říká Máca (2003), srážka je důležitou vstupní veličinou hydrologického systému. Svým časovým a plošným rozdělením výrazně ovlivňuje odtok z povodí.

Dle Vološe (2006) je důležitým vstupem při řešení návrhové povodně tzv. návrhový hyetogram, což je způsob časového rozložení celkového úhrnu návrhové  $N$ -leté maximální srážky do kratších intervalů. Klíčové je zejména určení hodnoty maximální intenzity dešťového oddílu v extrémní fázi hyetogramu.

## 10 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala vlivem časového rozložení srážkového úhrnu na hydrologické charakteristiky odtoku vody z povodí. Praktická část práce byla řešena na povodí toku Volšovka. Na povodí Volšovky bylo provedeno modelování průtoků za použití návrhových N-letých srážek, zjištěných z programu DES\_RAIN. Použity byly srážkové úhrny s dobou opakování  $N=2$ ,  $N=10$ ,  $N=50$  a  $N=100$  let. Pro simulace byly použity čtyři různé návrhové hyetogramy. Bylo provedeno celkem 16 modelových simulací.

Jak je vidět z grafů uvedených v kapitole 9.5., pro provedené simulace byl zvolen začátek srážkové události na 1.6.2017 v 00:00 hodin. Navržené hyetogramy mají délku trvání 24 hodin a časový krok 1 hodina.

Návrhový hyetogram ČHMÚ má, pro všechny doby opakování N-leté srážky, kulminaci deště 13 hodin po začátku deště. Čas kulminačního průtoku se ale liší. Návrhová 2-letá srážka kulminuje 21 hodin po začátku deště a dosahuje hodnoty  $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$ . 10-letá srážka má čas kulminačního průtoku o 2 hodiny dříve a průtok je  $21,8 \text{ m}^3$ . Ve stejný čas kulminuje i 50-letá srážka, u které je kulminační průtok  $51,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . 100-letá srážka má hodnotu kulminačního průtoku  $66,8 \text{ m}^3/\text{s}$  a nastává se zpožděním 18 hodin od začátku deště. Návrhový hyetogram ČHMÚ má pro 2-letou srážku nejnižší průtok ze 4 použitých hyetogramů.

U návrhového hyetogramu ÚFAAV ČR nastává kulminace deště 4 hodiny po začátku deště. Pro 2-letou, 10-letou i 50-letou srážku nastává kulminační průtok 6 hodin po kulminaci deště. U 100-leté srážky je to ještě o hodinu dříve. Hodnoty kulminačních průtoků jsou vyšší než u návrhového hyetogramu ČHMÚ. Kulminační průtok pro 2-letou srážku je  $4,4 \text{ m}^3/\text{s}$ , pro 10-letou srážku  $30,4 \text{ m}^3/\text{s}$ , pro 50-letou srážku  $66,8 \text{ m}^3/\text{s}$  a pro 100-letou srážku  $85,6 \text{ m}^3/\text{s}$ .

„0“ hyetogram má nejnižší hodnoty kulminačních průtoků ze 4 použitých hyetogramů pro 10-letou, 50-letou a 100-letou srážku. Tento hyetogram má konstantní rozdělení deště v průběhu 24 hodin. Pro 10-letou srážku je to hodnota  $18,6 \text{ m}^3/\text{s}$ , pro 50-letou srážku  $36,4 \text{ m}^3/\text{s}$  a 100-letou  $43,4 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tyto kulminační průtoky nastávají 27 hodin po začátku deště. Pouze u 2-leté srážky nastává kulminační průtok 28 hodin po začátku deště a má hodnotu  $3,7 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Poslední typ hyetogramu byl vytvořen ze srážek měřených v roce 2002. Déšť kulminuje 6 hodin po začátku deště. Kulminační průtok pro 2-letou srážku nastává 27 hodin po začátku deště a má hodnotu  $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . 10-letá srážka kulminuje 25 hodin po začátku deště. stejně jako 50-letá srážka. Hodnota kulminačního průtoku 10-leté srážky je  $19,9 \text{ m}^3/\text{s}$  a 50-leté srážky  $40,8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Čas kulminace 100-leté srážky je 24 hodin po začátku deště a kulminační průtok dosahuje  $50,8 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Z výše uvedených hodnot je vidět, že při odvozování kulminačního průtoku je velmi důležitá volba návrhového hyetogramu. Z uvedených hodnot jsou jasně patrné rozdíly v časovém rozložení průtoků i velikost kulminačních průtoků.

## 11 Seznam použité literatury

- ALFIERY, L. LAIO, F., CLAPS, P. (2008): A simulation experiment for optimal design hyetograph selection. In: Hydrological Processes 22 (6), s. 813 – 820.
- BEDIENT P. B., HUBER W. C. (1988): Hydrology and Floodplain Analysis. Reading, Addison-Wesley Publishing Company. 649 s. ISBN: 0-201-12056-9
- BEDNÁŘ J. (2005): Jak vzniká počasí. Praha, Karolinum. 226 s. ISBN: 80-246-1002-7.
- BEDNÁŘ J. (2003): Meteorologie. Praha, Portál. 224 s. ISBN: 80-7178-653-5.
- CUDLÍN, P. (1999): Příčiny snížení vodohospodářské funkce lesa v krajině. Ústav ekologie krajiny AV ČR. Závěrečná zpráva úkolu VaV 610/2/98 : DÚ 01/07. České Budějovice : Ústav ekologie krajiny AV ČR, s. 84.
- ČSN 73 6530. Vodní hospodářství. Názvosloví hydrologie. Praha: Nakladatelství úřadu pro normalizaci a měření, 1983.
- DINGMAN, L. S. (2002): Physical hydrology. Prentice Hall, 646 s.
- DOLEŽELOVÁ, M. (2013): Srážky na jižní Moravě v období 2010–2012. Hraje roli celkové množství srážek nebo jejich rozložení v čase? In: ROŽNOVSKÝ, J., LITSCHMANN, T., STŘEDOVÁ, H., STŘEDA, T. (eds.): Voda, půda a rostliny. Sborník abstraktů a CD s příspěvky z mezinárodní konference. Křtiny 29. – 30. května 2013. s. 9. ISBN 978-80-87577-17-2.
- DUMBROVSKÝ, M. (2004): Optimalizační model pro navrhování integrované ochrany povodí. Praha
- DUFKOVÁ, J. (2009): Závlahy a odvodnění: teoretické základy a praktická cvičení. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2009, 114 s.
- FELDMAN, A.D. (Ed.) (2000): Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual. USACE, Davis, 155 s.
- FELTL, J. (2011): Výběr kritické srážky v malém povodí se zaměřením na generování povrchového odtoku. In: JUNIORSTAV 2011: 13. odborná konference doktorského studia Fakulty stavební VUT v Brně. Brno: Vysoké učení technické, s. 8. Dostupné z:  
[http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2011/pdf/3/Feltl\\_Jakub\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2011/pdf/3/Feltl_Jakub_CL.pdf)
- HAVLÍČEK a kol. (1986): Agrometeorologie. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.

- HEJLOVÁ, V., PECHANEC V., MIŘJOVSKÝ J. (2013): Monitoring a modelování povrchového odtoku s využitím GIS. In: GIS Ostrava 2013: Geoinformatika pro společnost. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013, s. 11.
- HRÁDEK, F., KUŘÍK, P. (2002): Hydrologie. 1.vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita Lesnická fakulta. Katedra vodního hospodářství, 271 s. ISBN 80-213-0950-4.
- HUBAČÍKOVÁ, V. (2002): Hydrologie. 1.vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 43 s. ISBN 80-7157-638-7.
- HUFF, F., A. (1967): Time distribution of rainfall in heavy storms. In: Water Resources Research 3 (4), s. 1007 – 1019.
- HUFF, F., A. (1990): Time Distributions of Heavy Rainstorms in Illinois, Illinois State Water Research Campaign, State Illinois Department of Energy and Natural Resources, 20 s.
- HRABĚ, F., BUCHGRABER, K. (2004): Pícninářství: travní porosty. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 149 s. ISBN 80-7157-816-9.
- HRÁDEK, F., KUŘÍK, P. (2002): Hydrologie. Praha: Skriptum FLE ČZU Praha, 280 s.
- JANEČEK M. a kol. (2002): Ochrana zemědělské půdy před erozí. ISV
- JANEČEK, M. (2012): Ochrana zemědělské půdy před erozí: metodika. 1. vyd. Praha: Powerprint, 113 s. ISBN 978-80-87415-42-9.
- JANEČEK, M., KOVÁŘ P. (2010): Aktuálnost „Metody čísel odtokových křivek – CN“ k určování přímého odtoku z malého povodí. Vodní hospodářství. 2010, č. 7, s. 187-189.
- JENÍČEK M. (2005): Možnosti využití srážko-odtokových modelů na malých a středně velkých povodích. In Langhamer, J (ed.) Vliv změn přírodního prostředí povodí a údolní nivy na povodňové riziko. PřF UK, Praha. s. 122-126 [online] [cit. 23. října 2016] Dostupné na Internetu:  
<http://hydro.natur.cuni.cz/jenicek/profil.php?akce=publikace&lang=cze>
- JENÍČEK, M. (2007): Modelování vlivu krajinného pokryvu na srážko-odtokové procesy metodou CN křivek. In: Změny v krajině a povodňové riziko: sborník příspěvků ze semináře Povodně a změny v krajině: PřF UK, Praha, 5.6.2007.

Praha: Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, s. 41-50. ISBN 978-80-86561-87-5.

- JENIFFER K., SU Z., WOLDAI T., MAATHUIS B., (2010): Estimation of spatial – temporal rainfall distribution using remote sensing techniques: A case study of Makanya catchment, Tanzania. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12: 99-99.
- JŮVA K., HRABAL A., TLAPÁK V. (1984): *Malé vodní toky*, SZN, Praha
- KEIFER, J., C., CHU, H., H. (1957): Synthetic Storm Pattern for Drainage Design. In: *Journal of Hydraulics Division* 83 (4), s. 1 – 25.
- KLEMENTOVÁ, E., JURÁKOVÁ, M. (2004): Životné prostredie: Mokradě v systéme protipovedňovej ochrany [online]. SAV Bratislava: Ústav krajinné ekologie, [cit. 2016-02-18]. ISSN 0044-4863. Dostupné z WWW: <<http://www.seps.sk/zp/casopisy/zp/2003/zp4/klementova.htm>>.
- KREŠL J. (2001): *Hydrologie*. Brno, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. 128 s. ISBN: 80-7157-513-5.
- KRAVKA, M. (2009) *Základy lesnické a krajinářské hydrologie a hydrauliky*. Brno : Mendelova univerzita v Brně. 114 s. ISBN 978-80-7375-338-2.
- KRÍŽ V., JIČÍNSKÝ K., KNĚŽEK M., KOLÁŘ M., KOLÁŘ V., MRKVA M., SOCHOREC R. (1988): *Hydrometrie*. Praha, Státní pedagogické nakladatelství, n.p. 176 s.
- KOUTSOYIANNIS, D., DEMOSTHENES, K., ALEXANDROS, M. (1998): A mathematical framework for studying rainfall intensity – duration - frequency - relationship, In: *Journal of Hydrology* 206, s. 118 – 135.
- KOPÁČEK, J., BEDNÁŘ, J. (2005): *Jak vzniká počasí*. Praha Karolinum, ISBN: 80-2461-002-7, 268 s.
- KOVÁŘ et al. (2015): *Certifikovaná metodika optimalizace vodního režimu krajiny ke snižování dopadů hydrologických extrémů*, 235 s.
- KULASOVÁ, B.; ŠERCL, P.; BOHÁČ, M. (2004): *Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní*. Závěrečná zpráva projektu QD 1368, Praha, ČHMÚ červen 2004, 127 s.
- KULHAVÝ, Z., KOVÁŘ P. (2000): *Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí*. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy Praha. 123 s. ISSN 1211-3972.



- KEMEL M. (1996): Klimatologie, meteorologie, hydrologie. Praha, ČVUT. 289 s. ISBN: 80-01-01456-8.
- KENDER J. (2002): Krajina a voda. Praha: Consult; ISBN: 80-902132-3-5
- KVÍTEK, T. a kol. (2006): Zemědělské meliorace. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích Zemědělská fakulta, České Budějovice, 164 s.
- LINSLEY, R.K. a kol. (1982): Hydrology for Engineers. New York, 512 s.
- MÁČA P. (2003): Pohyb dešťových událostí v pražské oblasti. Vodohosp. Čas., 51, 2003, 2.
- MATOUŠEK, V. (2010): Poznávání odtokových vlastností malých povodí za regionálních dešťů. 1. vyd. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, 103 s., ISBN 978-80-87402-08-5.
- MICHÁLEK, J., FUSEK, M., HELLEBRAND, R. (2012): Srovnání statistických metod odhadů IDF křivek. In: Workshop Adolfa Patery 2012 - Extrémní hydrologické jevy v povodích, VUT, Brno, s. 162 – 169.
- MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ (2008): Metodika ministerstva životního prostředí k navrhování protipovodňových opatření v ploše povodí, které současně řeší obnovu vodního režimu a snižování vodní eroze. 2008, 131 s. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/pracovni\\_postupy\\_podklady/\\$FILE/OV-Pracovni\\_postup\\_k\\_Metodice\\_OOV-20101122.zip](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/pracovni_postupy_podklady/$FILE/OV-Pracovni_postup_k_Metodice_OOV-20101122.zip)
- MORAVCOVÁ J., BYSTRICKÝ V., PEČENKA J., POLENSKÝ J., PAVLÍČEK T., NOVÁKOVÁ N., ONDR P. (2016) River Basin Management in the Past and at Present and its Impact on Extreme Hydrological Events, River Basin Management, Prof. Daniel Bucur (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/63398. Available from: <http://www.intechopen.com/books/river-basin-management/river-basin-management-in-the-past-and-at-present-and-its-impact-on-extreme-hydrological-events>
- NĚMEC J. (1965): Hydrologie. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.
- NYPL V. (1986): Hydrologie, Meteorologie, Pedologie II. Praha, SNTL – Nakladatelství technické literatury. 96 s.
- POKORNÁ, D., ZÁBRANSKÁ, J. (2008): Hydrologie a hydroopedologie. Praha, Vydavatelství VŠCHT, 218 s. ISBN 978-80-7080-707-1

- PONCE, V. M. (2010): Principles and Practices, Englewood Cliffs, N.Y. Engineering Hydrology. Prentice-Hall, s. 640. In: Matoušek, V. (2010): Poznávání odtokových vlastností malých povodí za regionálních dešťů. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha, 1989, 296 s.
- PRODANOVIC, P., SIMONOVIC, P., S. (2004): Generation of synthetic design storms for the upper Thames River Basin, CFCAS Project: assessment of water resources risk and vulnerability to changing climatic conditions. Project Report V, 1–19. Water Resources Risk and Vulnerability to Changing Climatic Condition, Project Report V, 20 s.
- SALA, A. (2006): Vliv nepříznivých účinků povrchového odtoku na zrnitostní složení půd k.ú Šardice. In: Sborník z mezinárodní mezioborové konference Venkovská krajina. 12. - 14. května 2006, Slavičín u Hoštětín. ZO ČSOP Veronica, Brno, ISBN 80-239-7166-2, s. 169- 172.
- SIVAPALAN, M., BLÖSCHL, G. (1998): Transformation of point rainfall to areal rainfall: Intensity- duration – frequency curves. In: Journal of Hydrology 204, s. 150 – 167.
- SHAW, E. M. (1994): Hydrology in Practice. 3. ed. London: Spon Press, 569 s. ISBN 04124 82908.
- SOMMER M. (1985): Hydrologie. Praha, ČVUT. 205 s.
- SOUKUP, M., HRÁDEK, F. (1999): Instrukce pro optimální regulaci povrchového odtoku z povodí. Praha: VÚMOP Praha, 55 s.
- SOBÍŠEK B., a kol. (1993): Meteorologický slovník výkladový terminologický. Academia, Praha
- SOUKUPOVÁ J. (2007): Atmosférické procesy (základy meteorologie a klimatologie). Skriptum ČZU.
- ŠAMAJ, F., VALOVIC, J., BRÁZDIL, R. (1983): Denné úhrny zrážok s mimoriadnou vydatnosťou v CSSR v období 1901–1980. Sbor. prác SHMÚ, Alfa, Bratislava.
- ŠILAR, J. (1996): Hydrologie v životním prostředí, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 136 s.
- ŠTAMBEROVÁ, M., MICHALOVÁ, M., MIKŠOVSKY J., PRCHALOVÁ, H. (1998): Vodní zdroje v České Republice. Brno: Výzkumný úřad vodohospodářský TGM Brno, 89 s.

- TRUPL, J. (1958): Intenzity krátkodobých dešťů v povodí Labe, Odry a Moravy. VÚVH, Práce a studie, sešit 97, 75 s.
- TUŽINSKÝ, L. (2004): Vodný režim lesných pôd. 1. Vyd. Technická univerzita vo Zvolene, Vydavateľstvo TU vo Zvolene. 102 s. ISBN- 80-228-1380-X.
- UHLÍŘ P. (1961): Meteorologie a klimatologie v zemědělství. Praha, Státní nakladatelství, Praha 2002.
- UNUCKA, J. (2010): Možnosti propojení GIS a environmentálních modelů pro potřeby krizového řízení a ochrany přírody. Habilitační práce. VŠB-TU Ostrava, 241 s.
- UNUCKA, J., HORÁK, J., ŽIDEK, D., RAPANTOVÁ, N., HELLER, R. (2008): Modelování srážkoodtokových vztahů s využitím GIS. Vysoká škola báňská – Technická univerzita v Ostravě, 307 s.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS (2000): Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual. Davis, CA USA, 149 s. Dostupný z [www: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS\\_Technical%20Reference%20Manual\\_\(CPD-74B\).pdf>](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_(CPD-74B).pdf)
- US Army Corps of Engineers (2006): Hydrologic Modeling System HEC-HMS – User's Manual, Version 4.2, 614 s.
- YEN, B., C., CHOW, V., T. (1980): Design hyetographs for small drainage structures. In: Journal of the Hydraulics Division 106, s. 1055 – 1076.
- VAŠŠOVÁ, D., KOVÁŘ, P. (2011): Program DES\_RAIN. Česká zemědělská univerzita v Praze. Dostupný z: <http://fzp.czu.cz/vyzkum/software.html>
- VOLOŠ, B. (2006): Nejistoty při odvodzování extrémních povodňových vln. Workshop Adolfa Patery 2006 - Extrémní hydrologické jevy v povodích, Praha, ISBN 80-01-03603-0, s. 209-212.
- HEC-HMS software, [online]. Dostupný z [www: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/)