

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH  
BUDĚJOVICÍCH  
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

---

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analýza vlivu potenciálně vybudovaného vodního díla  
na odtok vody z vybraného povodí pomocí  
hydrologického modelování

Vedoucí diplomové práce: Ing. Václav Bystřický, Ph.D.  
Autor diplomové práce: Alfred Rezek

---

České Budějovice, 2019

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH  
Zemědělská fakulta  
Akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Alfred REZEK**  
Osobní číslo: **Z17069**  
Studijní program: **N4106 Zemědělská specializace**  
Studijní obor: **Pozemkové úpravy a převody nemovitostí**  
Název tématu: **Analýza vlivu potenciálně vybudovaného vodního díla na odtok vody z vybraného povodí pomocí hydrologického modelování**  
Zadávací katedra: **Katedra krajinného managementu**

### Zásady pro vypracování:

Vybudování malé vodní nádrže (MVN) v povodí může výrazně ovlivnit odtok vody z tohoto povodí při srážko-odtokových epizodách. Cílem této práce je modelové ověření vlivu potenciálně vybudované MVN ve vybraném povodí na odtokové charakteristiky (objem odtoku, kulminační průtok, tvar hydrogramu, aj.) při různých návrhových srážkách.

Rámcový obsah DP:

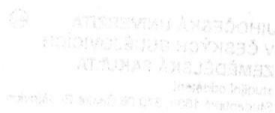
Rešerše na dané téma.

Výběr vhodného povodí a jeho popis.

Výběr vhodného hydrologického modelu a jeho popis.

Vhodná lokalizace potenciálně budované MVN v povodí a určení jejích technických parametrů (objem, hloubka, aj.).

Modelové vyhodnocení vlivu MVN na odtokové charakteristiky při různých návrhových srážkách.



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

Brutsaert, W. Hydrology: An introduction. Cambridge University Press, 2005, 605 s.

Daňhelka, J., Krejčí, J., Šálek, M., Šercl, P., Zezulák, J. Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. ČZU Praha, Praha, 2002, 214 s.

Kovář, P. Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích. ČZU Praha, Praha, 2000, 136 s.

Serrano, E.S. Hydrology for Engineers, Geologists and Environmental Professionals. HydroScience Inc.


Manuály programů pro hydrologické modelování

časopisy: Journal of hydrology, Physics and chemistry of the earth, Water science and technology, Soil and water research, atd.


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

Datum zadání diplomové práce: 19. března 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 15. dubna 2019

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

JIHOČESKÁ UNIVERZITA  
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH  
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA  
studijní oddělení  
Studentská 1868, 370 05 České Budějovice

  
doc. Ing. Pavel Ondr, CSc.  
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 19. března 2018

## **Prohlášení**

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

V Českých Budějovicích dne

.....

Alfred Rezek

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Václavu Bystřickému, Ph.D. za poskytnuté rady a čas, dále za ochotu, shovívavost a trpělivost, a nakonec za veškerou pomoc při vypracování této práce.

# **Abstrakt**

Tato práce se zabývá vlivem vodního díla na odtok z povodí za pomoci hydrologického modelu Hec HMS. Jedná se o přímou aplikaci na konkrétní povodí Bílského potoka.

V literární části jsou řešena všechna témata související s touto problematikou. Především se zaměřuje na bilanci vody v povodí, odtok z povodí a ostatní činitele kterými je ovlivňován, extrémní průtoky a povodňovou aktivitu s návazností na opatření v podobě budování nádrží. V závěru literární části je uvedeno 5 systémů pro tvorbu hydrologických modelů se zaměřením na model Hec HMS.

Praktická část je věnována přípravě dat pro vstup do hydrologického modelu a jeho následné tvorbě. Jsou zde porovnávány jednotlivé průtoky pro jednotlivé N-leté srážky, konkrétně průtoky vyvolané srážkovou činností s dobou opakování 2, 10, 50 a 100 let. Pro možnost porovnání byly vytvořeny 2 hydrologické modely, jeden s povodím ve stavu bez nádrže a druhý s nádrží. Výsledky jsou věnovány sledování průtoků, objemů odtoků a transformaci povodňové vlny v nádrži mezi namodelovanými průtoky z dvou rozdílných modelů povodí.

## **Klíčová slova**

Hydrologické modelování, odtok, povodně, protipovodňové nádrže, transformace povodňové vlny.

# **Abstract**

The object of this dissertation is to describe the influence of water works on the outflow from a watershed through the Hydrologic Modelling System Hec HMS. It is a direct application to the particular watershed of the Bílský Stream.

In the theoretical part about relevant literature, solutions to the topics related to this issue are found. It focuses especially on the water balance in the watershed; the outflow from the watershed and other factors by which the watershed is influenced; extreme flows and flood activity with appropriate security steps such as water basins. At the end of the part on the literature, there are five different systems for creating hydrologic models with the specialisation on the Hec HMS model.

The practical part is about preparing input data for the hydrologic model and its subsequent creation. Particular runoff from different N-year precipitation ( $N = 2, 10, 50$  and  $100$ ) are compared. Two hydrologic models have been created for comparison, one with the watershed without a reservoir and the second one with a reservoir included. The resultant part is about watching flows, volumes of runoffs and the transformation of the flood wave in a reservoir between N-year precipitation and two different models of watershed.

## **Key words**

Hydrologic modelling, outflow, floods, flood protection reservoirs, floods, transformation of the flood wave.

# Obsah

1. Úvod.....	11
2. Literární rešerše.....	12
2.1 Voda .....	12
2.2 Zásoby vody na zemi.....	12
2.3 Oběh vody na zemi.....	12
2.4 Bilance na povodí.....	13
2.4.1 Výpočet bilance.....	14
2.5 Atmosférické srážky.....	15
2.5.1 Měření srážek.....	15
2.5.2 Vertikální srážky.....	16
2.5.3 Horizontální srážky.....	19
2.6 Výpar.....	21
2.6.1 Výpar z vodní hladiny.....	21
2.6.2 Výpar z půdy.....	22
2.6.3 Transpirace.....	22
2.7 Infiltrace.....	22
2.8 Odtok.....	23
2.8.1 Druhy odtoků.....	24
2.8.2 Povrchový odtok.....	24
2.8.3 Činitele povrchového odtoku.....	25
2.8.4 Povodí.....	25
2.8.5 Měření povrchového odtoku.....	25
2.8.6 Měření průtoků.....	26
2.8.7 Kulminační průtok.....	26
2.8.8 Hydrogram.....	26
2.8.9 Extrémy povrchového odtoku.....	27



2.9	Povodně .....	27
2.9.1	Druhy povodní .....	28
2.9.2	Povodňová vlna.....	28
2.9.3	Transformace povodňové vlny.....	29
2.9.4	Protipovodňová ochrana.....	29
2.10	Vodní nádrže.....	30
2.10.1	Rozdělení vodních nádrží.....	31
2.10.2	Malé vodní nádrže.....	31
2.10.3	Ochranné nádrže.....	32
2.10.4	Suché retenční nádrže .....	32
2.10.5	Transformace povodňové vlny v nádrži.....	33
2.10.6	Hydrologické výpočty pro návrh MVN .....	33
2.10.7	Vybudování nádrže .....	34
2.10.8	Umístění nádrže .....	34
2.10.9	Návrh hráze .....	34
2.10.10	Objekty na malých vodních nádržích.....	36
2.11	Hydrologické modelování.....	37
2.11.1	Hydrologický model SCS-CN .....	37
2.11.2	Používané softwary .....	38
2.11.2.1	Hydrologický model DesQ – MAX Q.....	38
2.11.2.2	Hydrologický model HydroCAD.....	39
2.11.2.3	Hydrologický model MIKE-SHE .....	40
2.11.3	Hydrologický model Hec HMS .....	40
2.11.3.1	Nástroje modelu.....	41
2.11.3.2	Simulační metody .....	42
2.11.3.3	Meteorologický model.....	43

3.	Materiál .....	44
3.1	Lokalizace .....	44
3.2	Popis povodí .....	44
3.3	Geomorfologie, geologie a pedologie .....	46
3.4	Klimatické poměry .....	47
3.5	Využití území .....	47
4.	Metodika .....	48
4.1	Srážková data .....	48
4.1.1	Interpolace dat .....	49
4.2	Čísla odtokových křivek CN .....	51
4.2.1	Výpočet čísel odtokových křivek CN .....	51
4.3	Hydrologické výpočty pomocí programu ERCN .....	52
4.4	Hydrologický model Hec HMS .....	53
4.4.1	Basin model .....	53
4.4.2	Meteorologic model .....	56
4.4.3	Control specifications .....	57
4.4.4	Návrh nádrže .....	57
5.	Výsledky .....	61
5.1	Srážka s dobou opakování 2 roky (N2) .....	61
5.2	Srážka s dobou opakování 10 let (N10) .....	65
5.3	Srážka s dobou opakování 50 let (N50) .....	68
5.4	Srážka s dobou opakování 100 let (N100) .....	71
6.	Diskuze .....	74
7.	Závěr .....	75
8.	Zdroje .....	76
9.	Přílohy .....	83

# 1. Úvod

Voda je nedílnou součástí našeho života. Bez vody není života, protože jen lidské tělo se skládá přibližně ze 70 % z vody, stejně tak i veškerá fauna a flora je na vodě životně závislá. Říká se, že je po vodíku jednou z nerozšířenějších látek ve vesmíru. Voda se na naší planetě nachází ve třech základních skupenstvích, kterými jsou pevné, kapalné a plynné skupenství. Největší množství vody je zde ve skupenství kapalném, a to více než 97 %.

Česká republika je absolutně závislá na vodě, která přichází ze srážkové činnosti. Vodnost toků je přiměřená k úhrnu srážek v jejich časovém rozložení během roku, ale i dlouhodobých časových periodách. Bilance je značně ovlivňována retencí krajiny, kterou udávají zejména půdní poměry, protože v České republice zadržuje půda největší množství vody. Dále je bilance ovlivňována zastoupením lesů, trvalých travních porostů, vodních nádrží a způsobem využití území. V minulých desetiletích byly značně přetvořeny hydrologické poměry v důsledku velkoplošného využívání pozemků. To mělo za následek snižování infiltrace a retence povodí, navýšení odtoků a kulminačních průtoků a vyplavování organogenních prvků a kontaminování povrchových i podzemních vod těmito prvky (Dumbrovský, 2004).

Pozornost veřejnosti i odborníků se v posledních letech zaměřila na ochranu před škodlivými účinky povodní. Jedním z prostředků této ochrany jsou připravené nádržní objemy schopné v případě potřeby zadržet části povodňových objemů. Zejména suché nádrže jsou budovány pro ochranu obcí a měst, popřípadě jiných významných objektů. Suché nádrže zajišťují svým transformačním účinkem snižování parametrů povodní na požadovanou úroveň. Jsou to specifická vodní díla zatěžována nahodile při povodňových událostech. Obvykle pro své situování v horních částech toků odpovídají malým vodním nádržím (Říha, 2014).

Cílem práce je vytvoření hydrologického modelu na povodí Bílského potoka pomocí programu Hec HMS, zjištění odtokových poměrů v modelu povodí bez nádrže, následný návrh nádrže a zhodnocení změny odtoků mezi těmito dvěma modely. Práce se tedy zabývá návrhem protipovodňové nádrže v prostředí programu ArcMap a jejím následným posouzením v programu Hec HMS na schopnost transformace povodňové vlny při návrhových srážkách s dobou opakování 2, 10, 50 a 100 let.

## **2. Literární rešerše**

### **2.1 Voda**

Voda je brána jako základní složka životního prostředí a stále se ukazuje, že povrchové i podzemní zdroje vody můžeme brát jako součást přírodního bohatství státu. Nezbytným předpokladem zachování a dalšího rozvoje společnosti je tedy zajištění dostatečného množství kvalitní vody, jelikož je pro člověka nezbytnou surovinou, potravinou a zdrojem energie. Při dostatečných hloubkách vodních toků nabízí i možnost vodní dopravy. Dále toky i přirozené nebo umělé vodní nádrže umožňují provozování vodních sportů a rekreace. Voda tedy dobře slouží, ale může být při jejím nadbytku i nedostatku velmi nebezpečná. Za povodňových situací způsobených velkými dešti nebo táním sněhu je schopna za krátký čas díky dynamickému účinku způsobit velké škody. Naproti tomu nedostatek vody způsobuje také velké škody v důsledku nedostatku vláhy, kterou potřebují zemědělské plodiny pro svůj růst. Z tohoto důvodu vzniká v mnohých oblastech světa hladomor (Kemel, 1996).

### **2.2 Zásoby vody na zemi**

Nejrozšířenější látkou na zemi je tedy voda, pokud mluvíme o ploše, vodní plochy zabírají 361 mil. km<sup>2</sup>, zhruba 71 % z celkové rozlohy země, která činí 510 mil. km<sup>2</sup>. Dle odhadů je v hydrosféře akumulováno necelých 1400 mil. km<sup>3</sup>. Převážná většina ploch je tvořena slanou vodou, a to přibližně 97 % z celkového množství vody v kapalném skupenství, která se z 99,97 % nachází v oceánech a mořích. Méně zastoupená ale pro nás mnohem významnější sladká voda je nejvíce akumulována v pevném skupenství v ledovcích a sněžnících v polárních a horských oblastech světa, a to zhruba 77 %. Dalších 22 % sladké vody je uloženo v kolektorech podzemních vod. Nakonec pouhé 1 % sladké vody se nachází ve sladkovodních jezerech, přehradních nádržích a řekách (Pavelková, Frajer, 2013).

### **2.3 Oběh vody na zemi**

V přírodě je vodní stav vyrovnaný, to znamená, že voda se samovolně neztrácí a ani nikde nevzniká. Velmi malé množství vody je na planetu transportováno s pády vesmírných těles, jedná se ale o tak zanedbatelné množství, že se zde nijak neprojeví. Na naší planetě hovoříme tedy jen o změně skupenství vody. Na zemi se vyskytuje

velký vodní oběh, označován jako globální hydrologický cyklus, který zahrnuje konceptuální model v systému oceán-atmosféra-pevnina. Primárním elementem tohoto cyklu je sluneční záření, které způsobuje vypařování vody. Celkem se jedná o  $577\,600\text{ km}^3$  za rok, z čehož většinu tvoří výpar z oceánů, jelikož oceány zauímají převážnou část povrchu planety Země. Výpar z oceánů tvoří tedy více než 87 % celkového výparu. Vypařená voda se pak dostává v plynném skupenství do atmosféry, kde tato vzdušná vláha neboli vodní pára kondenzuje a padá zpět v kapalném skupenství zpět na zemský povrch. Většina těchto srážek spadne opět na hladinu oceánu, zhruba 79 % a zbytek na pevninu. Při porovnání těchto dvou dějů vychází deficit 8 %, který tvoří zhruba  $47\,000\text{ km}^3$  vody, která se vrací na pevninu ve formě vodní páry díky atmosférickému proudění. Tato voda a vlastně veškerá voda poté může odtéct zpět do oceánu povrchovým či podpovrchovým odtokem, vypařit se z povrchu nebo být využita organismy a poté být vypařena anebo se může uložit ve skupenství kapalném v jezerech, popřípadě v pevném skupenství a vytvořit zásobu sněhu. Tento hydrologický cyklus je vyvážený, jelikož celkový odtok za rok tvoří opět  $47\,000\text{ km}^3$  a to  $45\,000\text{ km}^3$  povrchově a  $2\,000\text{ km}^3$  podpovrchově (Pavelková, Frajer, 2013).

## 2.4 Bilance na povodí

Vzájemné vztahy bilančních prvků a odtokový proces vždy zjišťujeme na základní hydrologickou oblast, což je povodí. Je to území, které je vždy staženo k určitému toku nebo jeho části. Povodí je určeno rozvodnicí, což je pomyslná čára vedena po nejvyšších obvodových místech (hřebenech a sedlech) určena podle vrstevnic. Povodí tedy určuje plochu, ze které spadlá voda, za předpokladu, že se nevypaří nebo nevsákne do půdy, steče do povrchového říčního systému, ze kterého poté odtéká jeho uzávěrovým profilem. Tuto rozvodnici určenou z vrstevnicových map, jinak také vrstevnici orografickou, může ovlivňovat také vrstevnice hydrogeologická, která je dána průběhem nepropustných vrstev v podloží a jeho geologickým složením. Hydrogeologická vrstevnice však zpravidla nejvíce ovlivňuje malá povodí, jelikož by mohlo dojít k velkému zkreslení kvůli velkému nepoměru ploch vázanému na infiltrační oblasti (Kemel, 1996).

### 2.4.1 Výpočet bilance

Koloběh vody může být vyjádřen jednoduchými rovnicemi, které tvoří matematický model bilance. Tyto rovnice mohou se mohou sestavit pro jakékoliv území, avšak ne pro jakýkoliv časový úsek. Sestavují se zejména pro určení bilance jednoho roku nebo pro větší časové řady. V těchto rovnicích jsou zastoupené všechny formy vody vyskytující se na Zemi. Zatímco některé z nich jsou velmi významné, jiné jsou svou absolutní hodnotou nebo prostorovým omezením téměř nepodstatné. Určování jejich objemu může být jak u malých, tak i u velkých povodí značně problematické, a proto je výsledná bilance vždy jen přibližná (Trizna, 2004).

#### Bilanční rovnice pro oběh vody na zemi

V bilanční rovnici nalezneme velkou řadu prvků, které se dají vyjádřit těmito symboly:

**E<sub>o</sub>** – výpar z oceánu,

**E<sub>p</sub>** – výpar z pevniny,

**S<sub>o</sub>** – srážky, které dopadají na hladinu oceánu,

**S<sub>p</sub>** – srážky, které dopadají na povrch pevniny,

**O** – odtok z pevniny,

bilanční rovnice může být podle oběhu vody na Zemi vyjádřena těmito tvary:

**E<sub>o</sub> = S<sub>o</sub> + O** – to znamená, že se výpar z oceánu rovná součtu srážek dopadajících na hladinu oceánu a odtoku z pevniny,

**E<sub>p</sub> = S<sub>p</sub> – O** – zde je výpar z pevniny roven rozdílu srážek, které dopadají na povrch pevniny a odtoku z pevniny,

**E<sub>p</sub> + E<sub>o</sub> = S<sub>o</sub> + S<sub>p</sub>** – poslední tvar vzniklý sjednocením předchozích tvarů vyjadřuje vyváženost oběhu vody mezi pevninou a oceánem (Trizna, 2004).

#### Bilanční rovnice pro povodí

Oběh vody v konkrétním území je vyjádřen touto rovnicí:

**H<sub>z</sub> = H<sub>e</sub> + H<sub>o</sub> ± R**, kde **H<sub>z</sub>** je množství srážek, **H<sub>e</sub>** je množství evapotranspirace, **H<sub>o</sub>** je množství odtoku a **R** změna v zásobách vody v povodí (Trizna, 2004).

## 2.5 Atmosférické srážky

V prvotní fázi mikrostrukturálního vývoje oblaku vzniká velký počet mikroskopických kapiček na kondenzačních jádrech. Jejich velikost je řádově v mikrometrech a počet na krychlový centimetr v desetitisících. Zásoba vodní páry v oblaku ale nepostačuje k vývoji všech těchto kapiček do normálních rozměrů potřebných k překonání odporu vzduchu a vypadnutí z oblaku. To znamená že část těchto kapiček začne postupně narůstat na úkor ostatních (Bednář, 2003).

Jako atmosférické srážky bereme částice, které vznikly kondenzací vodní páry a které se nacházejí v atmosféře, na předmětech v atmosféře, nebo na zemském povrchu v pevné nebo kapalné fázi. Tyto srážky lze rozlišit na vertikální (padající), což je déšť, mrholení, mrznoucí mrholení, sníh, sněhové krupky, sněhová zrna, krupky, zmrzlý déšť, ledové jehličky a kroupy a srážky horizontální (usazené), které se dělí na rosu, jíní (jinovatku), námrazu a ledovku. Existuje ještě jeden druh srážek, které se označují jako virga (srážkové pásy nacházející se pod základnami oblaků) a jsou to srážky které ale po vypadnutí z oblaků nedosáhnou povrchu země. Úhrn srážek (množství dopadené na povrch) se většinou vyjadřuje v milimetrech a vyjadřuje sloupec vody, který by se po dopadu na horizontálním povrchu vytvořil, kdyby nedocházelo k vsakování ani vypařování. S ohledem na hustotu vody znázorňuje tento údaj množství litrů spadlé vody na jeden čtvereční metr (Kopáček, Bednář, 2005).

### 2.5.1 Měření srážek

Měření atmosférických srážek patří v hydrologii k nejdůležitějším měřením. Jelikož je ale srážková činnost značně variabilní v čase a prostoru, není získávání věrohodných dat tak jednoduché. Je to jeden z klíčových prvků pro predikci extrémních hydrologických situací. Dále spolehlivá data umožňují porozumění a monitorování hydrologického cyklu, regionálních vlivů variability, změn klimatu a vytváření hydrologických a klimatických modelů. Předpověď srážkové činnosti je rovněž důležitá v zemědělství. Hydrologická data jsou dnes na našem území zajišťována Českým hydrometeorologickým ústavem ve spolupráci se správami povodí. Tato měření zajišťují velmi cenná data pro vypracování srážkoodtokových modelů pro jednotlivá povodí, jako jsou AquaLog, Hydrog a Mike s moduly Nam. Cílem těchto modelů je zjištění extrémních průtoků v tocích s dostatečným předstihem

a snížení potenciačních povodňových škod. Případně poskytnout možnost varování obyvatelstva (Starý, 2005).

### **Metody měření a měřicí přístroje**

Nejčastěji se srážky určují výškou, které voda dosáhne v případě, že nikam neodteče, nevsákne se, ani se nevypaří. Určuje se ale také objemem. Výška je určována v milimetrech a objemová jednotka je litr na čtvereční metr. Dále se měří doba, tvar a intenzita srážek. Výška srážek se nejčastěji měří staničním srážkoměrem, který má podobu kovové válcovité nádoby se záchytnou plochou nejčastěji 500 cm<sup>2</sup>, která se obvykle umísťuje 1 m nad povrch. Množství zachycené vody se jednou denně měří skleněnou odměrkou. V těžko dostupných podmínkách se množství spadlých srážek měří totalizátorem. Jelikož se zde provádí měření jednou či dvakrát ročně, mají nádoby obsah několik desítek litrů a zachycená voda je různými látkami chráněna proti mrznutí a výparu. Průběh intenzity a množství srážek je zaznamenáváno pomocí ombrografu, kde zachycená voda prochází komorou s plovákem, který pohybuje perem na registrační pásce. Nakonec u sněhové pokrývky je možné určovat její výšku sněhoměrnou latí a její vodní hodnotu objemovým sněhoměrem, který má podobu válce, jímž se ze sněhu vykrojí vzorek a po rozpuštění patřičného objemu je možné zjistit jeho hustotu. A dále váhovým sněhoměrem, kterým je možné určit hustotu přímo zvážením odebraného vzorku sněhu (Horník a kol., 1982).

#### **2.5.2 Vertikální srážky**

Nejčastější podoba těchto srážek je déšť a sníh, což jsou srážky, které mohou být trvalého charakteru a nejčastěji vypadávají z oblaků výstupného klouzání na frontách (Ns – Nimbostratus, As – Altostratus) nebo přeháňkové srážky, které pocházejí z bouřkových mraků (Cb – Cumulonimbus). Mimo těchto je dalším častým jevem mrholení. Vertikální srážky se mohou objevovat v základních tvarech, například dešťová přeháňka nebo i smíšených, jako třeba déšť se sněhem (Vysoudil, 2013).

#### **Déšť**

Tyto srážky padají k zemskému povrchu různou rychlostí. Kapky deště mají obvykle průměr od 0,5 do 5 mm. Větší než 7 mm se při pádu většinou neudrží v celku. Kapky vypadávají ve chvíli, kdy jejich rychlost překoná rychlost výstupného proudu vzduchu, to znamená že, čím je větší kapka, tím větší musí být rychlost výstupného



proudění, aby byly kapky udrženy ještě v oblaku. Nejčastěji se měří úhrn srážek, krom toho se dále hodnotí intenzita deště. Ta vyjadřuje množství spadlých srážek a určitý časový úsek. Například 1 mm srážek za minutu znamená silný liják. Informace o pravděpodobnosti výskytu a o vydatnosti neboli intenzitě srážek jsou velmi důležité pro hydrotechnické výpočty. Tyto hodnoty se uvádějí v časových intervalech a značí jak intenzivní dešť se dostaví průměrně jednou za několik let, například za 5, 10 nebo 20. Dešť bývá většinou dělen do dvou skupin, a to jsou srážky trvalé a přeháňky. Trvalé srážky se vyskytují na rozsáhlejších územích a v menší intenzitě. Srážky trvalé mají dlouhodobý charakter, objevují se na teplé frontě, lépe řečeno před ní v šířce 200 až 400 km a nejčastěji vypadávají z oblaků Ns a As. Přeháňky se objevují často v doprovodu silně nárazového větru, padají na malou část území, s malou intenzitou a po krátkém časovém úseku. Přicházejí vždy v úzkém pruhu, po přechodu studené fronty a vypadávají z mohutných konvekčních a bouřkových mraků Cb. Někdy však po přechodu studené fronty zprvu přeháňky narostou do charakteru trvalých srážek. Podobný charakter mají i srážky sněhové (Uhlíř, 1958).

## **Sníh**

Sníh je nejvýznamnější formou tuhých srážek, který je tvořen v oblacích desublimací vodní páry na pevné skupenství vody při teplotě pod 0 °C na desublimačních jádrech. Tyto základní krystalky vznikají v hexagonální krystalické soustavě, která umožňuje vznik velké škály různých tvarů, které jsou ovlivňovány množstvím páry, teplotou prostředí, dobou krystalizace a množstvím dalších faktorů. Vznik vloček by se dal popsat jako postupné narůstání na rozích a hranách až do tvaru sněhové hvězdice, přičemž podmínkou tohoto jevu je přesycení okolního vzduchu párou vzhledem k teplotě ledu. Tyto vločky neboli sněhové hvězdice jsou tvořeny řádově tisíci ledovými krystalky. Tyto srážky mohou vznikat i v letním období, nachází-li se nad nulovou izotermou, propadáním do teplejšího prostředí se ale už mění na dešťové kapky. V případě že sníh dopadne na povrch a neroztaje se, utvoří sněhovou pokrývku, která se hodnotí dle hustoty a výšky. Hustota pokrývky u čerstvě napadlého sněhu se pohybuje kolem 50 kg/m<sup>3</sup>, u slehlého kolem 700 kg/m<sup>3</sup>. Z hustoty a výšky sněhové pokrývky lze následně vypočítat zásoby vody. Dále má sněhová pokrývka dobré termoizolační vlastnosti, které mají při velkých mrazech velký vliv na hloubku promrzání půdy (Havlíček a kol., 1986).

## **Kroupy**

Jedná se o ledové částice s velmi rozlišným tvarem, s velikostí mezi 5–50 mm, byly ale zaznamenány i větší. Obalením sněhové krupky vrstvou vody vzniká jádro, ledová krupka, která je postupně zvětšována opakovaným přemísťováním. Z hladiny přechlazených kapek, kde ve spodní vrstvě cumulonibu narůstá průsvitná vrstva, až do hladiny ledových jader, kde narůstá vrstva matná. Kroupa z oblaku vypadne ve chvíli, kdy její hmotnost překoná sílu výstupného proudění. Tento děj vyvolává krupobití, které působí velké škody, hlavně v zemědělství (Havlíček a kol., 1986).

## **Mrholení**

Tento druh srážek bývá velmi drobný, jedná se o kapky s průměrem 0,05 až 0,5 mm. Vypadávají z oblaků typu St a Sc, v teplé vzduchové hmotě padající často hodně malou až těžce zaznamenanou rychlostí (Uhlíř, 1958).

## **Sněhové krupky**

Jsou to tuhé srážky, které jsou tvořeny bílými neprůhlednými ledovými částicemi. Tyto srážky padají převážně v zimním období při přeháňkách za teplot kolem bodu mrazu. Mají podobu měkkých kulových zrn s průměrem od 2 do 5 mm. Po dopadu se tříští (Vysoudil, 2013).

## **Sněhová zrna**

Jedná se o tuhé srážky nazývané též jako sněhová krupice. Průměr zrn je menší než u sněhových krupek a pohybuje se zhruba do 1 mm. Při dopadu se netříští. Připomínají mrholení, ale vyskytují se výhradně při teplotách kolem bodu mrazu. Vypadávají z mlhy nebo z oblaků typu St, pouze v malém množství (Vysoudil, 2013).

## **Námrazové krupky**

Opět srážky padající při teplotách kolem bodu mrazu a často doprovázejí déšť. Tyto krupky tvoří sněhová zrna o průměru 5 mm, obalená vrstvou ledu. Po dopadu na tvrdé plochy se tříští a odskakují (Vysoudil, 2013).

## **Zmrzlý déšť**

Vzniká dvěma způsoby. Buď při teplotách pod bodem mrazu mrznou vypadávající dešťové kapky nebo mrznou již dříve značně roztáté sněhové vločky.

Jsou tvořeny průhlednými ledovými zrny o průměru 5 mm, které často obsahují vodu. Po pádu se rozbíjí a mají tvar ledových skořápek (Vysoudil, 2013).

### **Ledové jehličky**

Bývají pozorovány především v polárních oblastech, kdy jsou označovány při ozáření slunečními paprsky jako diamantový prach. Ve středních zeměpisných šířkách se vyskytují pouze za velmi silných mrazů. Jsou to jednoduché drobné ledové krystalky ve tvaru jehlic, které padají velmi malou rychlostí k povrchu země nebo se vznášejí ve vzduchu. Při velmi nízkých teplotách se mohou vyskytovat i za jasné oblohy (Kopáček a Bednář, 2005).

### **2.5.3 Horizontální srážky**

Srážky horizontální vznikají přilehnutím tenké vrstvy vzduchu nasycené vodní parou těsně k chladnému povrchu země nebo povrchům různých předmětů. Tato vrstva se dotykem ochladí o tyto povrchy až na teplotu rosného bodu. Následně přebytečná pára kondenzuje nebo přechází desublimací či depozicí v led usazující se na tomto povrchu (Soukupová, 2009).

### **Rosa**

Vniká při kladných teplotách kondenzací vodní páry z okolního vzduchu na plochách, které jsou horizontálně orientované, na jejich vrchní straně, na povrchu půdy a na vrchní straně rostlinných orgánů. K tomuto jevu dochází za předpokladu, že teplota povrchu těchto ploch klesne pod rosný bod přiléhajícího vzduchu. Ztráta tepla vyzařováním energie vyvolává ochlazení aktivních povrchů a tato míra ochlazení je rozdílná, protože jsou vyzařovací podmínky vždy závislé na vlastnostech povrchu těchto těles. Fyzikální vlastnosti aktivních povrchů se projevují na tvorbě rosy z hlediska nástupu ale i z hlediska celkové intenzity. Na materiálech s malým měrným teplem a malou tepelnou vodivostí se rosa tvoří nejdříve, protože povrch těchto těles chladne vyzařováním mnohem rychleji. Dále na suché a kypré půdě se tvoří rosa mnohem intenzivněji než na půdě vlhké a utužené. Pro tvorbu rosy je také příznivější radiální typ bezoblačné noci, protože zapříčiňuje větším ztrátám tepla z aktivních povrchů. Tvorba rosy je též ovlivněna rychlostí proudění vzduchu, přičemž nejvýhodnější je rychlost okolo 1 m/s, charakterem území, jelikož v inverzních polohách s dobrými podmínkami hromadění chladného vzduchu a větším obsahem vodní páry se tvoří nejintenzivněji. V přírodě má velmi důležitou funkci, ať už jako

zdroj vláhy (0,1 až 0,3 mm/noc), kdy může vydat za rok až 10 % ročního normálu vertikálních srážek, tak i funkci ochrannou, protože uvolňuje skupenské teplo, které při jarních či podzimních mrazech v době vegetace přispívá k ochraně kultur před poškozením (Havlíček a kol., 1986)

### **Jíní a Jinovatka**

Také jíní bývá normálním projevem změny skupenství vody na aktivním povrchu. Vytváří se nejčastěji na vodorovných plochách, střeších a rostlinách. Skládá se z drobných jehliček, které působí jako chmýří. Podmínky pro tvorbu jíní jsou obdobné jako u rosy. Většinou za jasných nocí, kdy je vyzařována energie z aktivního povrchu, čímž dochází k jeho ochlazení. Teplota však musí pro tvorbu jíní klesnout pod 0 °C, proto je tento děj vázán na přechodná období roku. Jinovatka je usazenina vznikající především na hranách předmětu a budov a na větvích stromu. Je kyprá, na slunci se třpytí a je tvořena krystalky jehliček. Především vzniká při mlze či zmrzlé mlze, při mrazu, avšak i při slabém proudění nebo bezvětří. Při rychlejším proudění a nárazech větru na ojíněné předměty jinovatka opadá (Havlíček a kol., 1986).

### **Námraza**

Jedná se o bělavou nebo šedavou vrstvu tvořenou krystalickou ledovou hmotou usazující se na předmětech zejména při vlhké mlze a silnějším větru při mrazech, kdy narůstá proti větru ve skupinách trsů zrnitého nebo vláknitého složení. Svou vahou značně zatěžuje předměty, na kterých se hromadí. V počátečním stádiu je možné námrazu snadno odstranit, později však narůstá tak pevně, že odolává i velmi silnému větru. Na našem území se vyskytuje převážně ve vysokých polohách v zimním období (Uhlíř, 1958).

### **Ledovka**

Tento pojem označuje téměř kompaktní, hladký, průhledný, ledový povlak, který se usazuje jak na horizontálních, tak i vertikálních plochách, především na návětrné straně. Například na větvích, drátech, ale i jiných předmětech, které se za delšího trvání pod její tíhou poškozují. Na zemi se tvoří obvykle velmi kluzká vrstva ledu. Je tvořena přechlazenými dešťovými kapkami nebo kapičkami mrholení, které po dopadu na předměty s teplotou pod bodem mrazu zmrznou (Kopáček a Bednář, 2005).

## **Mlha**

Nashromážděné kapičky či krystalky vzniklé ve spodních a přízemních vrstvách ovzduší kondenzací vodní páry se označují jako mlha. Většinou jsou tvořené malými kapičkami, při nízkých teplotách i přechlazenými, výjimečně ledovými jehličkami. Při mlze není dohlednost větší než 1 km a její barva je převážně bělavá. Při slabším zakalení vzduchu s dohledností přes 1 km má mlha zbarvení spíše do šeda a nazývá se kouřmo. To je tvořeno kapičkami v počátečním stádiu kondenzace, s průměrem menším než půl mikronu a nevyvolává pocit vlhka. Ochlazení vzduchu zapříčiňující kondenzaci páry vzniká na zemském povrchu. Turbulentním prouděním se následně zvedá do výše, především při advekci, protože pouhou molekulární vodivostí by byl vzduch ochlazen pouze do 1 m. Vedle tohoto ochlazování vzduchu je další příčinou vzniku mlhy smíšení dvou vzduchových hmot různé teploty, které jsou blízko nasycení. Pokud dochází k vypařování teplé vody do studeného vzduchu nebo adiabatickému ochlazování při prudkém snižování tlaku, dochází taktéž ke vzniku mlhy. Podle toho se mlhy rozlišují dle příčin vzniku na mlhy vzniklé vypařováním, advekční mlhy a mlhy z promíchávání (Uhlíř, 1958).

## **2.6 Výpar**

Výpar je zapříčiněný neustálým pohybem molekul vody, který se při zvyšování teploty neustále stupňuje. Některé molekuly ale překonávají přitažlivost ostatních a následně přecházejí do ovzduší. Protichůdným procesem tomuto je kondenzace. Vodní páry se dostávají do ovzduší buď difuzí nebo vzdušnými proudy. Výpar je komplikovaný proces závislý na velikosti plochy, jejím tvaru, barvě, vegetaci, zásobě vody teplotě a vlhkosti vzduchu, barometrickém tlaku a síle větru. Výpar se může uskutečnit z volné hladiny, z půdy nebo se může zrealizovat rostlinami a transpirací rostlin (Jandora, 2005).

### **2.6.1 Výpar z vodní hladiny**

Jedná se o nejjednodušší druh výparu a u vodních nádrží je tím nejvýznamnějším elementem úbytku vody. V našich podmínkách se pohybuje mezi 1 a 3 mm za den nebo 200 a 800 mm za rok. Tento děj je závislý především na teplotě a nadmořské výšce, pro jehož odhad je možné použít velké množství vzorců, které jsou závislé na sytostním doplňku. Výpar byl dříve měřen například Wildovým nebo

Rónovým výparoměrem. Dnes se používá Šermerův výparoměr (Jandora, 2005). Nebo spíše jeho novější modifikace.

Hodnotě naměřené na těchto přístrojích se říká výparnost. Tyto přístroje jsou ale zatíženy nedostatky, jako například malá plocha hladiny. Naměřené hodnoty se následně násobí opravnými koeficienty (redukčními součiniteli), čímž se získá skutečná hodnota výparu. Dále se používají výparoměry bazénové o velké ploše nebo výparoměry plovoucí na hladině vodních nádrží. U těchto se oprava neprovádí a naměřená hodnota se považuje za skutečný výpar (Jandora, 2005).

### **2.6.2 Výpar z půdy**

Tento výpar závisí nejvíce na vlastnostech půdy a meteorologických podmínkách. Můžeme říci že čím je větší svrchní vrstva vysušené půdy, a čím pomaleji se vlhkost kapilárně doplňuje ze spodních vrstev, tím menší bude i výpar. Dále je větší výpar u tmavých půd, u povrchů spíše drsných a zvlněných, a hlavně na svazích orientovaných na jihozápad. Velký vliv na výpar má samozřejmě zastínění půdy. Dobrým zastíněním například rostlinami je možné výpar snížit až na 20 %. Při tomto však ale rostlinstvo přispívá k výparu vláhy transpirací. Výpar z půdy se měří pomocí lyzometrů, které se skládají ze 3 válcových nádob s rostlinným vzorkem zapuštěných do země (Jandora, 2005).

### **2.6.3 Transpirace**

Transpirace je nedílnou součástí existence rostlin, které získávají pomocí kořenů vodu z půdy, která se pak částečně vypařuje skrze jejich listy. Část vody, která zůstane potom spolu s živinami, tvoří rostlinnou tkáň, kde na vytvoření 1 g sušiny je zapotřebí tzv. transpiračního součinitele, který se pohybuje mezi 250 až 700 g, přesnější hodnota pro zemědělské kultury je potom 300 až 450 g (Jandora, 2005).

## **2.7 Infiltrace**

Infiltrací neboli vsakem označujeme pronikání srážkové nebo uměle dodávané vody z povrchu do hlubších vrstev půdy. Množství vody, které je vsakováno do půdy za jednotku času je označováno jako rychlost infiltrace nebo intenzita vsaku. Celkové množství vody, která se vsákne do půdy za celou dobu jejího trvání označujeme jako velikost infiltrace. Tento složitý děj závisí na velkém množství faktorů. Vsakování je závislé na intenzitě srážek a půdních poměrech, jako jsou počáteční vlhkost, obsah

vzduchu uzavřeného vsakující vodou do půdy, stabilizace agregátů a množství pseudoagregátů, objem volných pórů a nekapilární vodivost půdy. Voda se při vsakování nejvíce pohybuje v nekapilárních pórech. Dochází také ale k pohybu kapilární vody, která je v půdě obsažena před vsakováním. Především se jedná o vodu obsaženou v semikapilárních pórech. Díky zvýšení vlhkosti v půdě je tedy obecně zmenšována infiltrace. Vzduch uzavřený v pórech je posouván vsakující se vodou a dále proudí do hloubky s menším tlakem. Tlak vzduchu se ale neustále zvětšuje pod vsakujícím čelem a v případě, že nemůže unikát se tak podstatně snižuje rychlost vsaku. Z důvodu toho, že se tak snižuje celkový gradient potenciálu půdní vody o složku pneumatického potenciálu. Vliv vzduchu se tedy uplatňuje při vsakování pod tlakem. Značné množství pseudoagregátů, které jsou v půdě obsaženy se po zvlhčení rozpadá. Při tomto rozpadu je následně uvolněná vysoce disperzní hodnota půdy, která ucpává hrubé póry. Tím se snižuje obsah pórů a rychlost infiltrace. Vsak a jeho rychlost je také ovlivňována potažmo snižována mocností provlhčené půdy. To způsobuje zvětšování délky, v případě, že jsou si rovny rozdíly potenciálu ve zvlhčené a suché vrstvě, a snižování hodnoty gradientu potenciálu. Infiltrace je značně nerovnoměrná. Časem se mění, protože s narůstajícím časem se intenzita vsaku snižuje (Krešl, 2001).

## **2.8 Odtok**

Přenášení vody na Zemi je schematicky celkem jednoduchý jev, ve skutečnosti jde ale o děj složitý, jelikož je celkový odtok tvořen velkým počtem místních oběhů, část vody prodělává dlouhou cestu a často přechází v jiná skupenství. Údaje o odtocích a různé hydrologické mapy pomáhají pochopit odtokové poměry na různých kontinentech a jiných geografických pásmech. V tomto případě se ale nejedná o měřené hodnoty, pouze o hodnoty přibližné. Tyto hodnoty však nejsou neměnné, měnili se dřív a budou se měnit i nadále. Tyto změny mohou být zapříčiněny změnou klimatu, změnou fyzickogeografických vlastností povodí řek vyvolanou člověkem nebo změnou plošného a časového odtoku, způsobenou rozsáhlými hydrotechnickými zásahy a stavbami vodních děl. Odtok vody ovlivňují také změny v souvislosti s intenzivní zemědělskou výrobou a změny v oblastech s prováděním zákroků pro zlepšení povrchového odtoku a odstranění jeho škodlivých účinků (Netopil, 1972).

### **2.8.1 Druhy odtoků**

Odtokem jsou transportovány srážky, které se dostávají do povrchových vod. Odtok se rozděluje dle způsobu, jakým se voda dostává do povrchových toků. Pokud voda po dopadu stéká přímo po povrchu terénu, mluvíme o povrchovém odtoku. V případě, že voda nestéká po povrchu a zároveň není v kontaktu s hladinou podzemní vody, mluvíme o odtoku podpovrchovém neboli hypodermickém. Část tohoto odtoku se do povrchového toku dostává ihned po skončení deště, další část až po určitém čase. Další odtok, který už ale odtéká spolu s podzemní vodou se nazývá podzemní odtok. Odtok se ale nedělí jen podle způsobu, ale i času za který se dostane voda do povrchových toků. Rozděluje se tedy dále na přímý odtok a základní odtok. Přímý odtok, jako část celkového odtoku, nastává během trvání deště nebo ihned po jeho skončení. Obvykle se o tomto mluví jen jako o povrchovém odtoku, který je hlavní příčinou eroze půdy a povodní. Základní odtok tedy představuje tu část, která odtéká až po nějaké době. Dá se říci, že vytváří určitou zásobu a dotuje krajinu v období, kdy se v daném území nevyskytují srážky. Povrchový odtok se nakonec dělí na soustředěný, probíhající v určité hydrologické síti, a odtok plošný (rozptýlený), probíhající v celém povodí neorganizovaně po celých plochách svahu v podobě ronů. Ve chvíli, kdy se tento plošný odtok dostane do recipientu, mění se na soustředěný (Hubačíková, 2002).

### **2.8.2 Povrchový odtok**

Voda, která se na zemský povrch dostala srážkovou činností a nebyla zachycena intercepční nebo se nevsákla infiltrací do půdy, zprvu stéká po povrchu v elementární odtokové plošce jako souvislá vrstva vody. Následně se ale postupně soustřeďuje do stružek a rýh, které zde zůstaly již od předešlého odtoku, nebo které voda nově vytvoří. Tento druh odtoku se nevyskytuje stále, nýbrž nastává po srážkách, či tání sněhu za patřičné intenzity, přesahující infiltrační kapacitu. Tato soustava se v podstatě mění po každém odtoku a nazývá se hydrografická mikrosíť. Z této mikrosítě se voda následně vlévá do koryt potoků a řek. Řeky a potoky se svými stálými koryty vytvářejí hydrografickou síť, která je na rozdíl od již zmíněné mikrosítě stálá a zaznamenává se do map. (Němec, 1965).



### **2.8.3 Činitele povrchového odtoku**

Krajinou v průběhu roku protéká stále se měnící množství vody. Tyto rozdíly jsou udávány režimem toku. Ten vychází ze značného množství činitelů, které ovlivňují povrchový odtok a jsou s povodím toků úzce spjaté. Nejedná se ale jen o vlastnosti povrchu povodí, nýbrž o celé prostředí. To znamená vlastnosti atmosféry, půdních a geologických vrstev pod povrchem povodí. Tyto činitele jsou nejčastěji rozdělovány do dvou skupin. První skupinou jsou fyzikálně-zeměpisné vlivy, které jsou tvořeny mnoha faktory. Například klimatickými a mikroklimatickými podmínkami povodí, půdní charakteristikou povodí, vegetačním krytem a hustotou říční sítě. Druhá skupina je označena jako fyzikálně-geometrické vlastnosti a patří sem rozměry povodí, jeho tvar a reliéf terénu. (Němec, 1965)

### **2.8.4 Povodí**

V hydrologii je základní pracovní jednotkou povodí. To označuje území, kde veškerá voda stéká k jednomu místu na toku, které se označuje jako uzávěrový profil. Povodí tedy označuje sběrnou oblast toku, přičemž zahrnuje veškerý odtok, jak povrchový, tak podzemní. Odtok povrchový většinou nad podzemním převládá. Jsou zde ale rozdíly mezi povrchovým a podzemním povodím. Často se tato dvě povodí liší jen nepatrně. V takovémto ideálním případě potom stačí určit povodí stanovením vyšších míst, vrcholů a sedel, od kterých voda teče k místům nižším podle tvaru a členitosti území. Hranice takto vymezeného území se nazývá rozvodnice. Tato rozvodnice je tvořena uzavřenou čarou a se určuje pomocí topografických map. Takto stanovené povodí je nazýváno povodím orografickým. Není ale vždy možné zanedbat rozdíl mezi plochou orografického a podzemního povodí. Je tedy nutné pracovat se skutečným hydrologickým povodím, protože označuje sběrnou oblast veškerého odtoku vody. Vymezení tohoto povodí může být ale značně problematické, zvláště v oblastech, ve kterých se vyskytují krasové jevy (Starý, 2005).

### **2.8.5 Měření povrchového odtoku**

Množství vody, která povrchově odtéká, je možné přímo měřit jen z malých plošek ve vztahu k jednotlivým činitelům. Za běžných podmínek se odtok stanovuje dle měření průtoků v určitých vodoměrných profilech toku. Při sledování časového průběhu průtoků, ze kterého je pak integrací vypočítán odtok za časový úsek, se vychází ze vztahu mezi výškou vodní hladiny a průtokem v korytě. Tato závislost je

nejčastěji graficky vyjadřována formou konzumní křivky. Pro stanovení určitých průtoků stačí potom měřit jen výšku vodní hladiny a průtoky při různých výškách pro odvození měrné křivky daného profilu. Pro soustavné průběžné sledování úrovní vodních hladin se zřizují vodočetné stanice. Pro měření průtoků se zřizují stanice vodoměrné (Krešl, 2001).

### **2.8.6 Měření průtoků**

Stanovování průtoků v tocích bez ohledu na místo a čas je elementárním úkonem v hydrologii. Pokud známe časové a prostorové kolísání průtoků v říční síti, je možné hodnotit plošný odtok z povodí, zjišťovat příčiny jeho vzniku, srážkoodtokové vztahy a provádět vodní bilanci. Ve většině případů se ale průtoky nedají měřit přímo. V tom případě se následně z hodnot získaných měřeními a sledováními vodních stavů dají odvodit příslušné průtoky. Průtok je definován jako množství vody, které proteče za jednotku času daným průtočným profilem (Hubačíková, 2002).

### **2.8.7 Kulminační průtok**

Určení vrcholového neboli kulminačního průtoků je z hlediska nepřímých hydrologických metod celkem obtížné. Povodí, ve kterém se nacházejí velmi různé hodnoty CN a rozdílné koncentrace povrchového odtoku v důsledku odlišných sklonitostí svahů, různé druhy půd a jejich využití, je nutné takovéto povodí rozdělit na jeho dílčí části, dílčí povodí. Pro výpočet kulminačního průtoků je používáno poměru počáteční akumulace k maximálnímu srážkovému úhrnu. Pro tento poměr se určuje jednotkový kulminační průtok podle doby koncentrace z nomogramu (Janeček a kol., 2012).

### **2.8.8 Hydrogram**

Hydrogram je chronologický záznam průtoků v průtočném profilu. Projevuje se rychlým vzestupem po začátku srážek a následným pozvolným poklesem průtoků po jejich skončení. V případě dlouhodobějšího období bez výskytu srážek se ve vodním toku nachází pouze podzemní voda. Pro separaci základního odtoku z hydrogramu během srážek existuje řada metod. Základní metoda je založena pouze na geometrii hydrogramu. Pro rozdělení odtoků se dnes používají například stopovače. Ty mají za úkol zjistit koncentraci jednotlivých prvků, jako například Si ve vodě. Interpretace je založená na rozdílných hodnotách těchto prvků ve srážkách a

v podzemní vodě. Aplikování těchto stopovačů vedlo ke zjištění, že i během nadměrné srážkové činnosti tvoří podzemní voda přes 60 % celkového odtoku (Šráček, Kuchovský, 2003).

### **2.8.9 Extrémy povrchového odtoku**

Povrchový odtok má dva extrémy, maximální a minimální. V hydrologii je věnována pozornost hlavně maximálnímu odtoku neboli velké vodě, protože může způsobit značné škody. V případě maximálního odtoku jde o proces, při kterém je odtok soustředěn do velmi krátkého časového úseku, při kterém se všechny faktory odtoku projevují velmi intenzivně a výrazně. Výsledky povodní neboli extrémních průtoků jsou ze všech hydrologických jevů nejnebezpečnější, a proto je jim věnována taková pozornost. Zatímco druhému extrému neboli minimálnímu průtoku, je věnována podstatně menší pozornost, vzhledem k tomu, že je v podstatě neškodný. Naproti tomu se nedostatek vody jako takové v poslední době dostává do popředí, jelikož tím velmi trpí intenzivní zemědělská výroba. Při odtoku vody z povodí existuje velká řada faktorů, která množství odtékající vody oproti srážce značně snižuje, jako například intercepce, infiltrace nebo výpar. Při maximálním odtoku ale tyto faktory nejsou nijak zvlášť důležité, jelikož při značném objemu a relativně krátkém trvání ztrácí podstatnější význam. Zatímco ale takzvaná hydraulika povrchového odtoku je při procesu stékání vody po povrchu povodí při dlouhodobé bilanci prakticky bezvýznamná, při maximálním průtoku má ale vliv na tvar a velikost povodňové vlny. Na tento proces má tedy vliv většina fyzikálně geometrických vlastností povodí (Němec, 1965).

## **2.9 Povodně**

Pojem povodně může být definovaný různými způsoby. Tento termín zde měl také svůj vývoj. Podle ČSN z roku 1975 byly povodně označovány jako přechodné výrazné zvýšení hladiny toku, způsobené náhlým zvětšením průtoků anebo dočasným zmenšením průtočnosti koryta, například v důsledku ledové zácpy. Dodávalo se též, že zpravidla působí na některých úsecích toku hospodářské škody podle stupně vybudované ochrany. Těchto definic zde byla velká řada. Průběh odtoku je popisován průtokovou vlnou, která dle definice ČSN představuje přechodné zvětšení a následný pokles průtoků a vodních stavů, vyvolaný dešti, táním sněhu nebo umělým zásahem.

Popisuje dále průběh daného jevu v určitém profilu toku nebo v trati toku v daném okamžiku (Brázdil a kol., 2005).

### **2.9.1 Druhy povodní**

Většina povodní je způsobena srážkami a dále v zimním období náhlými otepleními a následným táním sněhové pokrývky. Také tvorba a pohyb ledové masy mohou v tocích vyvolávat povodně. Zvláštní případ, který může vést ke vzniku povodní, je třeba přehrazení vodního toku náhlým sesuvem půdy. Z kombinace pojmenování příčin a sezónního výskytu byla vyvinuta pojmenování jednotlivých typů povodní. Jsou to letní typy povodní následkem krátkodobých přivalových dešťů a letní typ následkem regionálních dešťů, zimní a jarní typy povodní následkem tání sněhu a zimní a jarní typ v důsledku vytváření a pohybu ledové masy v toku. Jako poslední jsou označovány povodně z jiných specifických příčin (Matějček, Hladný, 1999).

### **2.9.2 Povodňová vlna**

Objem povodňové vlny je stanoven množstvím proteklé vody určitým profilem od počátku do konce povodňové vlny. Toto množství se většinou udává v milionech  $m^3$ . Povodňová vlna, která se skutečně na toku vyskytla, je označována jejím objemem a kulminační průtok datem jejího začátku a konce. Jako začátek povodňové vlny je volena chvíle, kdy začne rapidně narůstat průtok. Jako konec povodňové vlny je okamžik, kdy průtok klesá k počátečním hodnotám nebo jinému setrvalému průtoku. Normou je také rozeznávána teoretická zidealizovaná n-letá povodňová vlna, která je používána jako návrhová a kontrolní. Označuje se jako  $PV_n$  a pro daný profil toku je určena maximálním kulminačním průtokem –  $Q_n$  (n-letou vodou), typickým tvarem průtokové čáry a příslušným objemem  $W_{PV_n}$ . Objem n-leté povodňové vlny má zpravidla odlišnou pravděpodobnost překročení než příslušný kulminační průtok  $Q_n$ . Jako začátek návrhové povodňové vlny je označován moment, ve který průtok na vzestupné větvi dosahuje hodnoty  $Q_a$  a jako konec okamžik, kdy průtok na sestupné větvi klesne opět na hodnotu  $Q_a$ . Velmi důležitým parametrem povodňového režimu, zejména pro návrh a provoz vodních nádrží, je objem povodňové vlny. Při stanovování objemů se vyskytují značné problémy při separaci od základního objemu povodňové vlny, a proto je nutné stanovovat objem nad určitým průtokem. Po separaci se stanoví objem povodňové vlny nejčastěji planimetrováním. Získané údaje pak můžeme zpracovat stejně jako kulminační průtoky, tak získáme čáru překročení a z ní pak n-leté objemy povodňových vln (Sommer, 1985).

### 2.9.3 Transformace povodňové vlny

Nádrže s neovladatelným ochranným prostorem zajišťují kromě požadované pravděpodobné doby překročení neškodného průtoku také transformaci povodní. Jelikož se tyto účinky nádrží projevují také snižováním hospodářských škod, posuzuje se mimo návrhu ochranných prostor také posouzení ochranných účinků nádrží u povodní, které překročí hodnoty neškodného průtoku. Je uváděno velké množství způsobů řešení transformací povodňové vlny v nádržích a všechna vycházejí ze základní rovnice retence  $P-O = V$ , kde P je přítok, O odtok a V objem zadržené vody. Jelikož se jedná o obecný průběh chronologické čáry přítoku, jedná se převážně o metody grafické nebo grafickopočetní (Votruba, Broža, 1966).

### 2.9.4 Protipovodňová ochrana

Soubor činností a opatření k předcházení a omezování škod vzniklých povodněmi na životech, majetku a životním prostředí je souhrnně nazýván jako protipovodňová opatření nebo ochrana. Opatření je možné rozdělit na preventivní, což jsou plány, prohlídky, předpovědní a hlásná povodňová služba ČHMÚ. Při povodních jsou potom opatření pro regulaci odtoků pomocí nádrží, hlídková služba, povodňové zabezpečovací a záchranné práce. Za povodně se pak postupuje dle platných povodňových plánů a pokynů povodňových orgánů. Tyto plány jsou každoročně přezkoumávány a v případě potřeby doplňovány a upravovány (Kvítek a kol., 2005).

Protipovodňová ochrana není v dnešní době záležitostí pouze správců vodních toků. Zákon ukládá povinnost dokonce organizacím a občanům, podílet se na ochraně před povodněmi a zabezpečovacích pracích při povodních. Tyto povinnosti přesně definuje zákon o vodách a zákon o státní správě ve vodním hospodářství. I přesto ale mají správci toků zásadní úlohu v zajišťování ochrany před povodněmi (Broža, 1988).

Snižování povrchového odtoku lze docílit několika způsoby. Prvním způsobem je zvyšování retenční a infiltrační schopnosti půdy. Druhým způsobem je omezení povrchového odtoku a vodní eroze. Zvýšení retence a infiltrace půdy lze docílit změnou druhu pozemku, například z orné půdy na louky a pastviny, z luk na lesy. Tímto se mění struktura povrchových horizontů půdy a objemy pórů, které jsou schopné zadržovat vodu. Zhutňování půdy je negativním faktorem, který omezuje pohyb vody v půdě, snižuje infiltraci a způsobuje zvětšení povrchového odtoku a půdní eroze. Při změnách druhů pozemků je třeba dbát na systematickou delimitaci

kultur v krajině z orné půdy na louky a lesy. To platí pro všechny geomorfologické oblasti. Povrchový odtok a vodní erozi lze omezit na orných půdách opatřeními organizačními, agrotechnickými a technickými. Organizačními jsou například delimitace kultur zatravněním, rozmísťování protierozních plodin v osevních postupech, pásové střídání plodin, změna tvaru a velikosti pozemku. Agrotechnická jsou například vrstevnicové obdělávání, meliorace podorničních horizontů, ponechávání organických zbytků, mulčování, výsev do strnišť nebo ochranných plodin, setí do hrubé brázdy, stabilizace povrchu a přerušené brázdování. Nakonec technická mohou být terasy, průlehy, terénní urovnávky, ochranné hrázky, protierozní kanály, příkopy, protierozní nádrže, i polní cesty s protierozním charakterem a sanace strží a úvozů. Posledním bodem je řízená akumulace vody, které je možné docílit výstavbou objektů s účelem retardace vody. Jsou to především předřazené nádrže, suché nádrže neboli poldry sloužící k zachycení nekontrolovatelných rozlivů. Musí to být takové stavby, ve kterých je možné regulovat odtok. Další možností je úprava dimenzí vodních toků. Hlavně pro zvýšení možnosti rozlivu v nezastavěném území, kde může voda postupně zasakovat do půdy (Kvítek, Tipl, 2003).

## **2.10 Vodní nádrže**

Uměle vybudované vodní nádrže mají nejrůznější rozměry. Mohou být charakterizovány hloubkou nádrže, případně hloubkou vody, nádržným objemem nebo zatopenou plochou. Dle těchto parametrů se rozdělují na malé a velké. Velké vodní nádrže mají nejčastěji účel přehradní, často umístěvané do údolí. Tyto nádrže mají hloubku většinou přes 10 metrů, jejich objemy často činí až několik milionů m<sup>3</sup> a tvoří tak hlavní zásoby vody v území. Jejich výstavba ale vyžaduje vhodné geologické, geomorfologické, hydrologické, ekonomické podmínky a mnoho dalších. Tyto podmínky působí ale značně omezujícím způsobem na možnosti výstavby, situačního řešení i využívání těchto nádrží. Malé vodní nádrže těmto omezujícím podmínkám tolik nepodléhají, protože je možné je navrhovat a zřizovat ve velmi malých rozměrech, v různých přírodních poměrech a funkčně i situačně je přizpůsobovat zemědělským, hospodářským ochranným i rekreačním účelům. Malé vodní nádrže jsou vodohospodářsky velmi prospěšné, neboť upravují odtokové poměry v malých povodích zachycováním velkých záplavových či erozně ohrožujících odtoků a vytvářejí zásoby vody v dobách jejího nedostatku (Jůva, Hrabal, Pustějovský, 1980).

### **2.10.1 Rozdělení vodních nádrží**

Vodní nádrže se nejprve rozdělují na přirozené a umělé. Přirozené vznikají či vznikly bez přičinění člověka, jako jezera vytvořena trvalým přehrazením způsobeným sesuvem půdy nebo skalním zřícením a podobně. Umělé nádrže jsou člověkem vybudované k nějakému účelu, jako rybníky, malé nádrže, například požárního charakteru, přehrady, které vznikají na tocích uměle vybudovaným přehrazením. U umělých nádrží je pravidlem jejich ovládání, například napouštění, vypouštění nebo regulace výšky hladiny. Vodní nádrže se dělí dle polohy v krajině, dle výškového umístění v terénu, dle způsobu napájení vodou a dle funkce, kterou zastávají (Pavlica, 1964).

Dle polohy jsou to nádrže návesní, které jsou umístěné v obcích nebo na jejich okrajích, bývají mělké a dobře prohráté díky ochraně, kterou tvoří okolní budovy a stromy, před povětrnostními vlivy. Dále nádrže polní nacházející se v obdělávaných údolích, které se často zanášejí a zarůstají. Stejně tak nádrže luční, které ale tolik nepodléhají zanášením. Lesní nádrže mají chladnou vodu a často přítoky z lesních pramenů. Rybníky rašelinné nemají dobré podmínky pro chov jako předešlé nádrže kvůli kvalitě vody. Dle výškového umístění jsou nádrže děleny na zahloubené, které jsou zapuštěny pod okolní terén jako cihelny, pískovny a podobně, nádrže hrázové, kde je dno nádrže ve stejné úrovni jako okolní terén. Dále údolní, tvořené přehrazením údolí souvislou hrází a podzemní, které se nacházejí v propustných štěrcích podél toků. Mnoho těchto nádrží má kombinovaný charakter. Podle způsobu napájení jsou nádrže děleny na nebeské neboli dešťové, pramenné, které jsou napájeny prameny ve svém dně, průtočné, nacházející se na vodoteči a působí zpomalujícím účinkem na rychlost proudění, a nakonec boční neboli náhonové, které jsou umístěny v blízkosti toku, který je napájí. Podle funkce nebo účelu jemuž především nádrže slouží jsou děleny na rybochovné rybníky, nádrže pro čištění vod, nádrže průmyslové, požární, asanační, meliorační, pro rekreaci, vodárenské, protipovodňové, vyrovnávací a akumulační, plavební, hospodářské pro napájení a mytí hospodářských zvířat, pro chov vodní drůbeže, okrasné a nádrže pro zvláštní účely (Pavlica, 1964).

### **2.10.2 Malé vodní nádrže**

Tímto pojmem jsou obecně označovány nádrže o malé hloubce, menším objemu vody a zátopné ploše, které slouží převážně hospodářským účelům. Jsou zřizovány v příhodných polohách většinou pomocí zemních hrází a budují se tak, aby

bylo možné dobře ovládat výšku vodní hladiny napouštěním a vypouštěním. Základní rozměry malých vodních nádrží určují hlavní technické parametry jako: objem nádrže pod úroveň maximální ovladatelné hladiny může být maximálně 2 miliony m<sup>3</sup>, hloubka vody při maximální hladině v nejnižším místě dna nejvýše 9 m a stoletý průtok v profilu hráze maximálně 60 m<sup>3</sup>/s. Malé vodní nádrže se dále rozlišují podle charakteristických znaků. Těmi jsou například stavební uspořádání, účelové funkce, způsoby zásobení vodou a polohové umístění (Jůva, Hrabal, Pustějovský, 1980).

### **2.10.3 Ochranné nádrže**

Ochranné či retenční nádrže jsou na našem území budovány především za účelem ochrany níže ležícího území, hlavně staveb a intravilánu obce, před účinky velkých vod. V nádržích by měl být následně zachycen celý povodňový průtok včetně splavenin, který by jinak způsobil pod nádrží škody. Pro zachycení celého průtoku či nebezpečné části je využíván ovladatelný a neovladatelný retenční (ochranný) prostor. Požadovaný stupeň ochrany je určován ekonomickým hodnocením nákladů požadovaných na výstavbu a provoz nádrže a potenciálních povodňových škod. Pro stanovování ochranné funkce se používá rovnice  $dV=Q_p dt-Q_o dt$ , přičemž  $V$  je objem retenčního prostoru,  $Q_p$  objem přítoku a  $Q_o$  objem odtoku. Následně se nádrže dělí do tří skupin. Prvním typem jsou nádrže suché ochranné určené k zachycování povodňových průtoků, krátkodobé akumulaci a postupnému vypouštění. Druhým typem jsou nádrže ochranné s přesně definovaným ochranným prostorem, s účelem snížení povodňových průtoků a malým zásobním prostorem. Posledním jsou nádrže rybničního typu, které mají malý retenční prostor automaticky vyprazdňující, jinak řečeno zálohovým prostorem s dalším retenčním prostorem neovladatelným (Šálek, 1987).

### **2.10.4 Suché retenční nádrže**

Zemědělsky využívané suché vodní retenční nádrže, jinak označované jako poldry, jsou budovány jako součást protierozní ochrany nebo jako celkové vodohospodářské opatření v krajině. Jsou například navrhovány v místech, kde stávající nádrže neovládají účinně zadržovat větší průtoky, kde by umístění stále vodní nádrže zabránilo následnému využívání území a v místech kde zastávají ochrannou funkci pro níže položené objekty či intravilány obcí. Tyto nádrže vyžadují neustálou údržbu v podobě kontrolování přírůstku sedimentů a jejich následnému odstraňování v celé ploše. Tyto nádrže vyžadují dobrou úpravu dna s minimálním sklonem 1-2 %



směrem k vypustnému zařízení. Upravené dno je odvodněno pomocí drenáže, která ale nesmí nijak ohrozit filtrační stabilitu podloží hráze. Řešení spodních výpustí je podřízeno možnosti bezobslužného provozu (Gergel, 1992).

### **2.10.5 Transformace povodňové vlny v nádrži**

Pro povodňové řízení odtoků z nádrží mají mimořádný význam objemy povodní. Nádrže zajišťují snížení povodňových průtoků zadržováním objemů povodní. Nestanovují se objemy povodní z hydrologického hlediska, jelikož jejich stanovení je značně obtížné, ale objemy, které mají význam pro regulaci průtoků v nádržích při povodních. V případě, že je zákonem předepsaná hodnota odtoku z nádrže při povodni, která je dodržena při výskytu každé povodně, mohou být objemy povodní, které je třeba zachytit v nádržích, považovány za náhodné veličiny. Zpracování objemů povodní je následně prováděno stejně jako hodnocení maximálních povodňových průtoků. V případě že není možné pozorování na toku, je možné stanovit objemy povodní analogií (Votruba, Broža 1966).

### **2.10.6 Hydrologické výpočty pro návrh MVN**

Údaje pro návrh malé vodní nádrže jsou děleny do dvou druhů, a to údaje pro určení zásobního prostoru, ochranného prostoru a vodoprávně zabezpečeného průtoku. Nádrže umožňují regulaci jednoročního či sezónního odtoku, jelikož dimenzování na víceleté vyrovnání odtoku je značně neekonomické. Toto je ovlivňováno stupněm regulace odtoku, obvykle menším než 0,5. Časový interval pro výpočet objemu zásobního prostoru je jeden měsíc. Z řady měsíčních průtoků, které jsou naměřeny za reprezentativně dlouhou dobu nebo rozděleny z ročního průtoku požadovaných pravděpodobností překročení se tedy určuje tento objem. V některých případech ho lze určit i z čáry překročení průměrných denních průtoků. V případě provádění pozorování a měření průtoků v daném profilu se použije analogie, pro kterou je použit korelační vztah mezi průměrnými měsíčními průtoky sledovaného a srovnávaného. Z naměřených údajů je také sestavována křivka překročení, kde se roční průtoky sestaví do řady a určí se jim pravděpodobnost překročení v %. Z této křivky se následně odečítá průtok požadované pravděpodobnosti 70-90 %. Při tomto je předpokládáno, že je odběr zabezpečen stejně jako přítok. K sestavení je potřeba zjistit také součinitel variace a asymetrie  $C_v$  a  $C_s$ . Vypočteme  $C_v = \alpha/q^\beta + C \log \gamma/F$ ,  $q = Q_w/F$ , kde  $q$  je dlouhodobý průměrný roční specifický odtok,  $Q_w$  průměrný dlouhodobý roční průtok,  $F$  plocha povodí v  $\text{km}^2$  a  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $C$  parametry fyzicko-geografických faktorů

pro jednotlivé oblasti rozdělené do 5 kategorií. Pro navržení ochranného prostoru je nutné znát návrhovou povodňovou vlnu charakterizovanou maximálním průtokem. Tento návrhový průtok pro dimenzování bezpečnostního přepadu má pravděpodobnost překročení 1 %, což je překročení jednou za 100 let (Tlapák, Herynek, 2002).

### **2.10.7 Vybudování nádrže**

Vybudování nových vodních nádrží většinou vyžaduje velké množství investičních nákladů, rozsáhlou stavební činnost a především čas. Vodohospodáři tudíž musejí myslet a plánovat svá díla několik let dopředu, ve stanovených lhůtách a v návaznosti na projekt. V místech s koncentrovanou zástavbou totiž narůstají nároky na vodu, ale v některých i na ochranu, a proto se většinou navrhují jako nádrže víceúčelové (Broža, 1988).

### **2.10.8 Umístění nádrže**

Vhodné místo pro umístění nádrže je závislé na tvaru údolí, poloze vzhledem k vodnímu zdroji, účelu a požadované funkci. Rozhodující pro stavbu hráze je výskyt vhodného stavebního materiálu, a tedy hlavně pedologické, hydrologické a inženýrskogeologické podmínky. Nejvhodnější je vzhledem k akumulaci vody nádrž umisťovat do nejúžších míst v údolí, tak aby krátká čelní hráz tvořila co největší akumulační prostor. Tyto hodnoty jsou charakterizovány objemovým ukazatelem  $\eta = V_A / V_H$ , kde je  $V_A$  objem zásobního prostoru a  $V_H$  objem tělesa hráze. Důležité ale je, aby hodnota  $\eta$  neklesla pod 4 až 5. Optimální hodnota, která charakterizuje dobré poměry je 10 (Synková, Zlatuška, 2003).

### **2.10.9 Návrh hráze**

Před provedením návrhu hráze je nutné provést v blízkosti předpokládané hráze podrobný inženýrskogeologický průzkum a půdně mechanický průzkum zemních materiálů. Rozdělení zemin a využitelnost pro stavbu hráze uvádí normy ČSN 72 12 01, ČSN 73 10 01 a ČSN 75 24 10. Jelikož je snaha pro konstrukce hrází malých vodních nádrží vždy využít místních materiálů, rozdělují se pak dle jejich vlastností na hráze homogenní a hráze nehomogenní s těsnícím jádrem. Druhy hrází potom mohou být nehomogenní s vnitřním těsnícím jádrem, s návodním těsněním, z různorodých materiálů nebo homogenní s těsnícím zámkem nebo těsnící štětovou stěnou. V případě dostatku vhodných materiálů je při výšce hráze do 6 m výhodné

budovat ji jako homogenní. Obecně platí, že na výstavbu těchto hrází jsou nejvhodnější jílovito-písčité zeminy s obsahem 50-70 % písku. V případě nedostatku vhodného materiálu pro výstavbu homogenní hráze je nutné zabránit průsaku vody zbudováním těsnícího jádra. Nejčastěji je tvořeno nepropustnou zeminou, mohou být ale použity i jiné materiály jako beton, železobeton, asfaltobeton, plastové fólie a jiné (Synková, Zlatuška, 2003).

### **Technické parametry**

Dle umístění těsnění jsou rozeznávány hráze s návodním těsněním a hráze s vnitřním těsněním. Šířka vnitřního těsnícího jádra musí být  $0,25Z$  až  $Z$ , přičemž  $Z$  je výška hráze, minimálně pak 1,5 m, z hlediska mechanizace ale spíše 3 m. V případě, že v koruně hráze není vedena trvalá komunikace, je minimální šířka koruny hráze 3,5 m. U hrází vyšších jak 5 metrů nesmí být šířka koruny menší než 3 metry. Sklony svahů jsou dány druhem použité zeminy, které jsou uvedeny v tabulkách pro stanovení orientačních sklonů svahů zemních hrází dle ČSN 75 24 10. V případě že, je těleso hráze i podloží řádně odvodněno, materiál je řádně zhutněn, že je smyková pevnost podloží po nasycení vodou menší než u materiálu hráze a v případě, že je návodní svah vystaven náhlému poklesu hladiny více než 1,5 m za den, je možné použít v tabulce uvedené hodnoty. V případě nejstabilnější zeminy je možné použít pro návodní svah sklon 1:1,75, vzdušní svah 1:1,5 a v nejhorším případě sklon pro návodní svah 1:3,7 a vzdušní 1:2,2 (Synková, Zlatuška, 2003).

### **Opevnění svahů a koruny hráze**

Koruna hráze je zpevňována nejčastěji tělesem komunikace. V tomto případě se asfaltové plochy navrhují s jednostranným sklonem 2 až 3 % směrem ke vzdušnému svahu. Okraj svahu návodního je dle nutnosti opatřován vlnolamem zídka a zábradlím. Svahy zemních hrází jsou zpevňovány minimálně 0,5 m nad stálou hladinou a 0,8 m pod hladinu zásobního prostoru v případě, že nedochází ke kolísání hladiny v nádrži. Opevnění je zavázáno do bočních břehů údolí a opírá se o dostatečně dimenzovanou patku. Pod opevnění je umístěován obrácený filtr. Nejčastěji bývá na opevnění použit kamenný či štěrkový pohoz, kamenná rovinanina, beton a další. Na opevnění vzdušného svahu stačí zatravnění hydroosevem (Šálek, 1999).

## Úprava dna

Úprava dna i břehů vodních nádrží neodmyslitelně patří k jejich výstavbě. Jedná se o odstranění objektů v zátopovém území, urovnání a stabilizace dna, jeho odvodnění a případné snížení jeho propustnosti. Při úpravě se ze dna odstraňuje organická hmota, která by mohla při napouštění nádrže způsobovat hygienické závady. Odvodnění dna spočívá ve vytvoření odvodňovací sítě, která nejen že umožní dokonalé vypouštění, ale i vysušení dna. Toto by měly zajistit odvodňovací příkopy. Snížení propustnosti dna by mělo zamezit úniku vody do spodních vrstev (Vrána a kol., 2009).

### 2.10.10 Objekty na malých vodních nádržích

To, co umožňuje nádržím dobře plnit jejich základní funkce, jsou objekty na vodních nádržích. Jsou to zařízení k vypouštění vody, odběrná zařízení, bezpečností přelivy pro bezpečné převedení velkých vod a zvláštní objekty (Šálek, 1999).

#### Výpustná zařízení

Výpustná zařízení jsou určena k řízenému vypouštění vody. Výpusti musí být uzpůsobeny pro vypouštění vody z nádrže při různých výškách hladiny vody v souladu s požadavky kladenými na funkce nádrží. Jsou umístovány do nejnižších míst v nádrži a minimální průměr spodní výpustě musí být 300 mm. Pro nádrže nad 1 milion m<sup>3</sup> jsou navrhovány dvě výpustní zařízení. Každá výpust musí být opatřena provozním, a navíc jedním provizorním uzávěrem. Před vtokem jsou umístovány česlice o roztečích 30-90 mm. Výpustě se dělí na otevřené (žlabové) a uzavřené (trubní). Uzávěry jsou tvořeny lopatkami a čepy, šoupátky a stavidly, segmenty a požeráky (Šálek, 1999).

#### Odběrná zařízení

Dalšími objekty jsou odběrná zařízení, která jsou určena k přímému odběru vody, například pro závlahy, obyvatelstvo, průmysl a další. Odběry se dělí na gravitační, odběry čerpáním s konstantním nebo proměnným množstvím vody. K nejjednodušším patří věžové odběry, buď samostatné nebo kombinované se základovou výpustí (Šálek, 1999).

## Bezpečnostní přelivy

Průtočné nádrže musí být vždy opatřeny přelivy k bezpečnému odvedení vody v případě povodní. Přelivy musejí být nehrazené, pevné bez pohyblivých částí, aby mohly fungovat bez obsluhy. Hrazené přelivy lze použít v ojedinělých případech, a to u nádrží se stálou obsluhou. Tyto uzávěry ale musejí umožnit pohotovou manipulaci i za zhoršených provozních podmínek. Používání přelivů a odpadů u přelivů, u nichž je možné zahlcení či ucpání při překročení průtoků, pro které jsou dimenzovány se nedoporučuje. Zejména se jedná o přelivy šachtové a přelivy, u kterých je voda odváděna uzavřeným profilem. Pro návrh se používá vzorec  $Q = m \cdot b \cdot \sqrt{2g \cdot h^{3/2}}$ , kde  $Q$  je návrhový kulminační průtok v  $m^3/s$ ,  $m$  součinitel přeřadu,  $b$  je délka přelivné hrany v  $m$  a  $h$  výška přeřadového paprsku při návrhovém průtoku v  $m$ . Bezpečnostní přelivy rozeznáváme jako přímé, které mohou být uspořádány jako jezové konstrukce, přelivné prahy, propustky, žlaby, česlové stěny nebo hrazené bezpečnostní přelivy. Dále boční, které se skládají z vlastního tělesa přelivu, spadiště, vývaru a odpadu do přelivu. Kašnové s půlkruhovým, půleliptickým či kombinovaným tvarem. Šachtové které jsou tvořeny válcovým objektem s hydraulicky tvarovanou plochou. A nakonec nouzové, které bývají na některých nádržích navrhovány jako doplňková zařízení k převedení povodňových špiček (Šedivý, Vrána, 2011).

## 2.11 Hydrologické modelování

### 2.11.1 Hydrologický model SCS-CN

Hydrologický model SCS-CN je používán v kombinaci s jednotkovým hydrogramem a je založen na metodě odtokových CN křivek, které jsou v českých podmínkách jednou z nejrozšířenějších metod pro vypočítání úhrnu efektivních srážek. Tato metoda je také zahrnuta ve velkém počtu dostupných programů, jako jsou například Hec HMS nebo HydroCAD. Touto CN metodou je odvozována výška přímého odtoku ze zákona zachování objemu a z předpokladu, že je poměr odtokové výšky a srážkového úhrnu bez ztát intercepce či povrchovou retencí roven poměru infiltrované části srážky k potenciální retenci. Tento vztah určuje rovnice  $H_0 = (H_s - I_a)^2 / (H_s - I_a + A)$ , kde  $H_0$  je výška přímého odtoku v  $mm$ ,  $H_s$  celkový úhrn srážky v  $mm$ ,  $I_a$  počáteční ztráty v  $mm$  a  $A$  maximální potenciální retence v  $mm$  (Kavka, Müller, 2018).

Metoda CN ale nezohledňuje průběh vstupní srážky. V případě využití vstupního hyetogramu příčinné srážky je možné touto metodou odvodit i efektivní srážku, po výpočtu je ale celková odtoková výška ze srážek se stejným úhrnem, ale odlišným průběhem vždy stejná. Tato metoda ale neodpovídá fyzikálním principům tvorby přímého odtoku z důvodu nemožnosti rozlišení rovnoměrného deště s nízkou intenzitou a přivalovou srážkou. Jednotkový kulminační průtok se zde určuje na základě nomogramů podle CN. Je to poměr počáteční ztráty  $I_a$  k maximálnímu úhrnu deště  $H_s$  po 24 hodin a doby koncentrace povodí. U kulminačního průtoku ale dochází opět k tomu, že kvůli aplikaci na celkový úhrn srážky není brán v úvahu její průběh. Alternativou je transformace hyetogramu efektivní srážky na odtokovou odezvu. Transformace lze provést metodou jednotkového hydrogramu, který představuje rozklad pomocí matematické funkce na každý srážkový impuls do dílčí odtokové vlny. Výsledný hydrogram následně vznikne jejich součtem. Pro větší efektivitu se ale doporučuje použití simulačních nástrojů, jako například Hec-HMS (Kavka, Müller, 2018).

## **2.11.2 Používané softwary**

### **2.11.2.1 Hydrologický model DesQ – MAX Q**

Tento hydrologický model byl odvozen z hydrologicko-hydraulických závislostí procesu svahového odtoku a metodiky řešení maximálního odtoku v údolnici. První programová dokumentace modelu zhotovena ve spolupráci se společností Aqualogic, Software Development and Consulting Praha v roce 1997. Novou programovou dokumentaci modelu DesQ – MAX Q s ohledem na připomínky uživatelů k modelu DesQ verze 4.1. vypracoval Hrádek F., Kuřík P. a Kuřík V. v roce 2000 (Hrádek, Kuřík, 2001).

Tento model je možné použít pro výpočet maximálních průtoků v povodí. Tyto průtoky je možné schematizovat jednou plochou, což znamená konkrétní svah, nebo modelovým povodím, které může mít například tvar otevřené knihy. Obě možnosti lze aplikovat bez ohledu na rozvinuté hydrografické sítě v povodí. V případě rozvinutější hydrografické sítě lze povodí schematizovat více modelovými podmínkami. Maximální průtok v povodí je odvozován pomocí modelu DesQ – MAX Q v kombinaci s hydraulickými modely neustálého proudění v říční síti, jako je například model HEC – RAS (Hrádek, Kuřík, 2001).

Model DesQ-MAX Q umožňuje výpočet maximálních N-letých návrhových průtoků a objemů povodňových vln, které jsou vyvolány přívalovými dešti s kritickou dobou trvání, dále maximálních průtoků a objemů povodňových vln vyvolaných přívalovými dešti se zadanou dobou trvání a náhradní příslušnou intenzitou, maximálních průtoků a objemů povodňových vln vyvolaných přívalovými dešti se zadanou dobou trvání a zadanou intenzitou, odvození tvaru povodňových vln, časových řad a výpočet charakteristik hydrogramů, které jsou ovlivněny antropogenní činností v povodí (Hrádek, Kuřík, 2001).

### **2.11.2.2 Hydrologický model HydroCAD**

HydroCAD je model hydrologicko-hydraulický. Používá se pro vytváření simulací významných srážkoodtokových epizod v malých povodích, následně z těchto simulací vytváří také hydrogramy. Uživatel pomocí tohoto modelu může ověřovat dostatečnost kapacit odtokových systémů povodí, předpovídat výskyt povodňových vln, v souvislosti s tím i erozních událostí, vyhodnocovat návrhy a řešení hydraulických objektů, zejména jako např. protipovodňových opatření. Díky tomuto je následně možné vybrat, z hlediska bezpečnosti, ochrany životního prostředí a finanční náročnosti, nejvhodnější opatření (Janeček a kol., 2007).

Řešené povodí je transformováno na jednotlivé komponenty. Těmi jsou subpovodí, nádrže, toky, spojky a uzle. Subpovodí je relativně homogenní část území, která je odvodňována do určitého toku nebo nádrže. Z každého subpovodí je vytvářen hydrogram odtoku. Může být také využit k zahrnutí srážky dopadající na hladinu nádrže. Nemůže se ale použít pro stanovení přítokového hydrografu. Alternativou je použití pro výpočet odtoku a jeho transformace korytem. Nádrže se většinou plní z jednoho či více zdrojů a jsou odvodňovány přepadovým či výpustním zařízením. Odtok z nádrže je stanoven transformací hydrogramu výpočtem, kterým je zmenšován a zpožděn kulminační průtok. Vyprazdňování nádrže může probíhat do jiné nádrže nebo do toku, sekundární odtok může být následně použit pro odvod odtoku výpustí a je možné jej stanovit zvlášť. Tok je stálá vodoteč, kterou je vedena voda z jednoho bodu do druhého na základě proudění vody. Spojka se používá k importu vstupních hydrogramů z externích dat nebo pro spojení vstupních hydrogramů z operačních diagramů. Poslední uzel je místo, pro které se zobrazují výsledky, je vypočítán automaticky podle pořadí, které je určeno směrem proudění. Vypočtené výsledky je možné zobrazit ve formě hydrogramu a tabulek pro všechny uzly odtokového

schématu. Export výsledků se provádí ve formátech TXT, CSV, EMF a JPG (Janeček a kol., 2007).

### **2.11.2.3 Hydrologický model MIKE-SHE**

MIKE-SHE je nástroj pro zpracování bilance vody, který slouží k účelům jako porovnávání změn průtoků a retence vody v celém modelu, nebo i jeho jednotlivých komponentech, nebo k analýze chyb vstupních dat, nebo číselné variability pomocí modelu. Nástroj umožňuje uživateli prezentovat výsledky celého zájmového území, nebo jen dílčích povodí. Výpočet se skládá z provádění „hrubé“ vodní bilance zájmového území a dodatečného dopracování vodní bilance na základě přesně definovaných údajů (DHI Software, 2000).

Hydrologický model MIKE-SHE má širokou škálu možných využití. Společnost DHI vytvořila nástroj pro analýzu, plánování a návrh řešení problémů s povrchovou a podzemní vodou a vodních zdrojů. Obecně se zabývá možnostmi plánování povodí, návrhem, správou a optimalizací dodávek vody, odvodněním i závlahami, hospodařením s půdní vodou a doplňováním zdrojů podzemních vod, konstruktivní využití podzemních a povrchových vod a mnoho dalšími (DHI Software, 2017).

Tento nástroj pracuje s velkým množstvím možností pohybů vody. Obsahuje velké množství metod používaných pro simulaci těchto dějů, jako například pro Evapotranspiraci metodu Kristensen a Jensen a metodu The 2-Layer Water Balance, metody pro tání sněhu, pro podpovrchový metoda Finite Difference, Ponged Drainage a Simplified Overland Flow Routing, dále metody pro soustředěný odtok, nenasycené a nasycené zóny a jiné (DHI Software, 2017).

### **2.11.3 Hydrologický model Hec HMS**

Hec HMS je navržený pro simulování procesu srážkového odtoku větvičích se systémů v povodí. Model je navržen tak, aby bylo možné jeho použití v širokém rozsahu. To zahrnuje zásobování vodních toků, povodňovou hydrologii a odtok z povodí. Hydrogramy vytvořené modelem mohou být ve spojení s jinými softwary používány pro studium vodní dostupnosti, předpovídání možných průtoků, možných důsledků způsobených velkými průtoky, navrhování nádrží pro snížení průtoků a možných povodňových škod, pro regulaci záplavového území a jiných systematických operací. Jedná se o generalizovaný modelující systém schopný reprezentovat mnoho



odlišných povodí. Model je konstruován z jednotlivých ovladatelných hydrologických částí. Jakýkoliv odtok nebo průtok v zájmovém území lze vyjádřit matematickým modelem. Takovýchto matematických modelů poskytuje program několik, proto je nutné zvolit vhodný model podle prostředí a podmínek v zájmovém území. Program také zahrnuje jednotné pracovní prostředí včetně databáze nástrojů pro zpracovávání dat (US Army Corps of Engineers, 2013).

Příchod technologie Zeměpisného Informačního Systému (GIS) vytvořila příležitosti ke zlepšení modelujících technik srážkového odtoku a tím zlepšila spolehlivost předpovědi odtoku a zvýšila varovnou dobu před povodní. Hec HMS slouží jako významný komponent programu povodňové ochrany a připravenosti, protože modely odtoku pomáhají identifikovat oblasti s ohrožením bleskovými záplavami a charakter a druh záplav (Dotson, 2001).

#### 2.11.3.1 Nástroje modelu

Flaming (2004) uvádí rozdělení nástrojů modelu jako:

**Subbasin (Subpovodí)** – je prvek, který obvykle nemá přítok, ale pouze jeden odtok. Tato součást je jedním ze dvou možných způsobů, jak vytvořit odtok v modelu povodí. Odtok se počítá z meteorologických dat odečtem ztrát, přeměnou nadbytku srážek, a přidáním základního odtoku.

**Reach (Tok)** – je prvek s jedním nebo více přítoky, ale s jedním odtokem. Přítok přichází z ostatních prvků v modelu povodí. Pokud je zde více než jeden přítok, všechny přítoky jsou sečtené dohromady před výpočtem odtoku.

**Reservoir (Nádrž)** – je prvek s jedním nebo více přítoky a s jedním vypočítaným odtokem. Přítok přichází z ostatních prvků v modelu povodí. Pokud je zde více než jeden přítok, všechny přítoky jsou sečteny dohromady před výpočtem odtoku. Za předpokladu, že vodní povrch je rovný, se odtok počítá ze vztahu zásoba-odtok nebo v opačném případě vztahem mezi odpadní konstrukcí a výškou hladiny v nádrži.

**Juction (Soutok)** – Soutok je element s více než jedním přítokem, ale pouze s jedním odtokem. Všechny přítoky jsou sečteny dohromady k vytvoření odtoku za předpokladu nulového zadržování vody před soutokem. Obvykle se používá k zastoupení říčního soutoku či soutoku potoka.

**Diversion (Rozdělení)** – je element se dvěma odtoky, hlavním a odkloněným a s jedním či více vedlejších. Přítok přichází od ostatních elementů v modelu povodí. Pokud je zde více než jeden přítok, všechny přítoky jsou sečteny dohromady před výpočtem odtoků. Množství odkloněného odtoku se počítá ze vztahu přítok-odklonění. Odkloněný odtok může být napojen na element, který je výpočetně po proudu.

**Source (Pramen)** – je element bez přítoků, s jedním odtokem, a je jedním ze dvou způsobů, jak vytvořit tok v modelu povodí. Pramen může být použit k zastoupení mezních podmínek pro model nádrže jako například změřené odtoky z rezervoárů nebo nevymodelované oblasti hlavních zdrojů.

**Sink (Stoka)** – je element s jedním nebo více přítoky, ale bez odtoku. Více přítoků je sečteno dohromady ke stanovení celkového množství vody vstupující do elementu. Stoky mohou být použity k zastoupení nejnižšího bodu vnitřního drenážního prostoru vnitřní drenážní oblasti nebo odtoku modelu nádrže.

Někdy je model pouze dobrým odhadem původního fyzického procesu nad omezený rozsah environmentálních podmínek životního prostředí.

### 2.11.3.2 Simulační metody

#### Přímý odtok (Direct-runoff)

Metoda přímého odtoku může zahrnovat několik modelů, například metoda jednotkového hydrogramu SCS NS křivek, která je kompatibilní s jinými metodami. Tato metoda se používá pro výpočet objemu odtoku, korelaci srážek a odtoku v závislosti na charakteristice povodí, klimatologické charakteristice a hydrologických vlastnostech půdy, jako hydraulické vodivosti (Saleh a spol., 2011).

#### Podzemní odtok (Baseflow)

Základní podzemní odtok je trvalý a tvoří ho odtok vody, která byla dočasně uložena pod povrchem z předešlých srážek a opožděný podpovrchový odtok ze současných srážek. Některé konceptuální modely procesů v povodí však nejsou pro modelování podpovrchových pohybů příliš vhodné. Program však nabízí tři alternativní modely: Constant, monthly-varying value, Exponential recession model, Linear-reservoir volume accounting model (US Army Corps of Engineers, 2000).

## **Korytový odtok (Hydrologic routing)**

V této metodě má uživatel možnost simulovat odtok podle více modelů. Muskingum-Cunge, Lag model, model kinematické vlny, nebo jejich modifikace. Tyto metody simulují průtok v uzávěrovém profilu, vstupem je průtok horního profilu. Tyto modely vychází ze základních rovnic proudění vody v korytě, rovnice kontinuity a momentové rovnice (Jeníček, 2005).

### **2.11.3.3 Meteorologický model**

V uživatelské příručce modelu Hec HMS uvádí US Army Corps of Engineers (2006) rozdělení meteorologických modelů takto:

**Frequency Storm** – tato metoda je používána pro vytvoření srážkové události, kdy má míra srážkové události rozdílné trvání a rozdílnou vydatnost.

**Gage Weights** – metoda aplikuje uživatelem zadanou míru předem definované srážky.

**Gridded Precipitation** – metoda umožňuje použití síťových měřících přístrojů, srážkových radarů.

**Inverse Distance** – metoda vypočítává průměrné srážky v povodí použitím inverzního vážení vzdálenosti na uživatelem definované srážkové úhrny.

**SCS Storm** – metoda aplikuje uživatelem specifikovanou SCS časovou intenzitu distribuce srážek 24 hodinové bouřky.

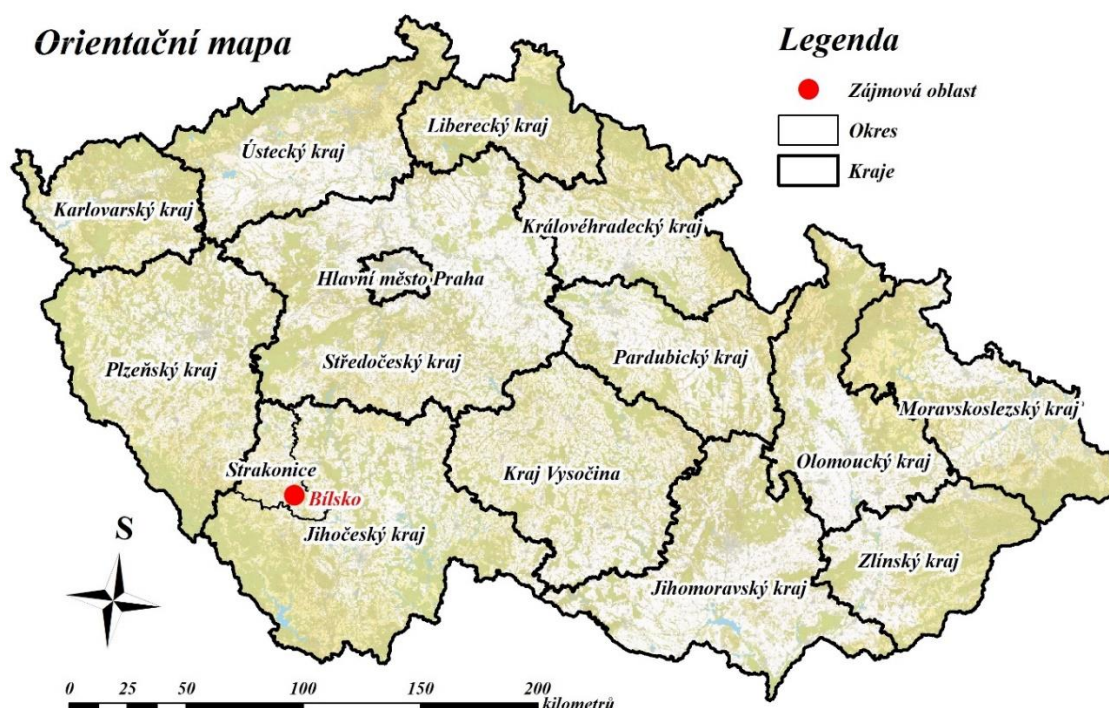
**Specified Hyetograph** – metoda aplikuje uživatelem definovaný hyetogram na specifickou událost v povodí.

**Standard Project Storm** – metoda aplikuje časovou distribuci na index srážkové události.

## 3. Materiál

### 3.1 Lokalizace

Pro zpracování analýzy vlivu vodního díla na odtok z povodí pomocí hydrologického modelu Hec HMS bylo zvoleno povodí Bílského potoka, který protéká obcí Bílsko, v jejímž intravilánu byl volen i uzávěrový profil tohoto povodí. Obec Bílsko se nachází v Jihočeském kraji v okrese Strakonice zhruba 4 km severně od obce Bavorov a 8 km západně od obce Vodňany (viz obr. č. 1).



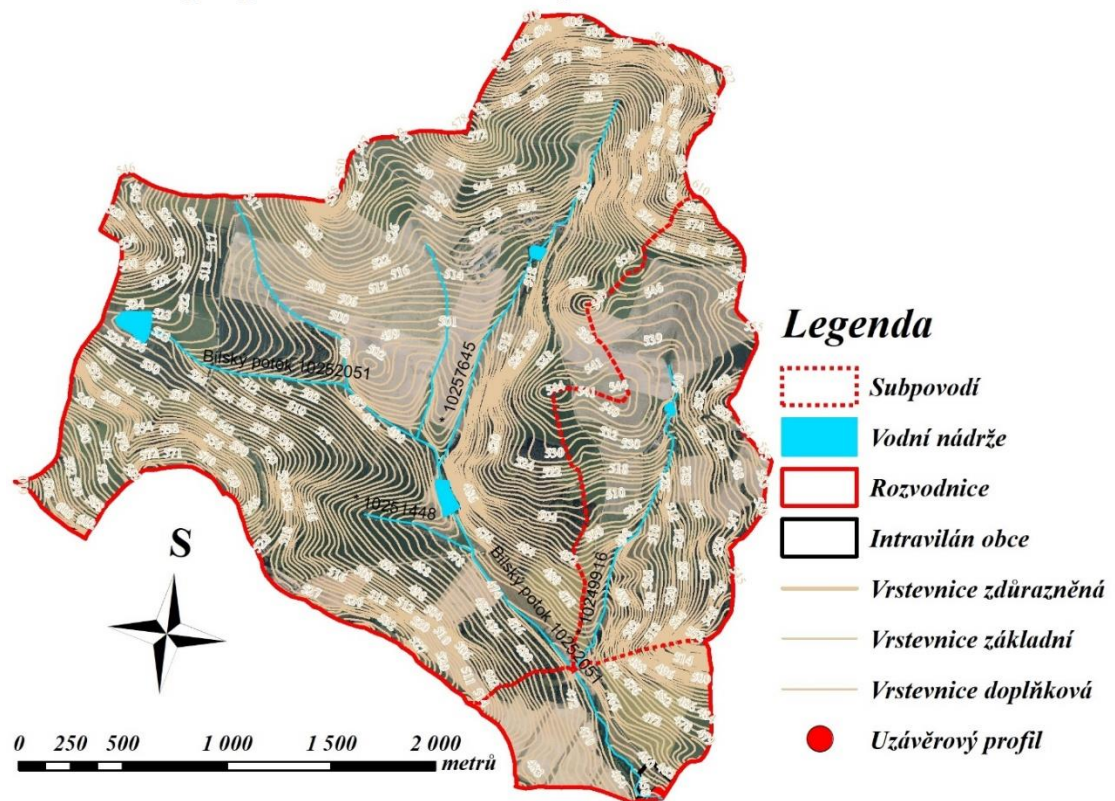
Obr. č. 1 Orientační mapa

### 3.2 Popis povodí

Vybrané povodí Bílského potoka má rozlohu 7,87 km<sup>2</sup>. Číslo hydrologického pořadí Bílského potoka je 1-08-03-064. Pramení v západní části povodí s místním názvem Lopaty, celková délka toku v povodí je 3657,64 m. Pro definování povodí a vykreslení rozvodnice byl zvolen uzávěrový profil u přítoku Měkyneckého potoka v intravilánu obce Bílsko [550833], a to propustek pod místní komunikací nacházející se na parcele č. 626/1, druhu pozemku vodní plocha, ve vlastnictví České republiky s právem hospodaření státního podniku povodí Vltavy, dále navazující na parcelách č. 587/9 a č. 589/4, druhu pozemku ostatní plocha, ve vlastnictví obce Bílsko. Bílský potok má v zájmovém území několik přítoků, které byly označeny pomocí centrální

evidence vodních toků. První přítok po toku je levobřežný přítok Bílského potoka v podobě melioračního kanálu s identifikačním číslem IDVT, dále jen: LBP Bílský p. mel. kanál 10271697, druhý přítok tvoří LBP Bílský p. mel. kanál 10275817, třetí, opět levobřežný přítok, tvoří potok s IDVT 10257645 s místním názvem Netonický potok, čtvrtým je pravobřežný přítok s IDVT 10251448 a jako poslední levobřežný přítok s IDVT 10249916 (viz obr. č. 2). Povodí se nachází v hydrogeologickém rajonu ID 6310, krystaliniku v povodí Horní Vltavy a Úhlavy s plochou 5859,74 km<sup>2</sup>. Celé zájmové území se nachází v citlivé oblasti, dále část území při uzávěrovém profilu podléhá ochranným pásmům vodních zdrojů. Dle Zákona o vodách (platného od 1.1.2019 a jeho předpisu č. 254/2001 Sb.) slouží ochranná pásma k ochraně vydatnosti, jakosti a nezávadnosti zdrojů povrchových nebo podzemních vod užívaných nebo využitelných pro zásobování vodou. Stanovení těchto pásem je vždy ve veřejném zájmu. V zájmovém území se dále vyskytují 4 vodní nádrže, dle evidence vodních nádrží nespecifikované. Povodí bylo pro následné modelování odtoků rozčleněno do 3 subpovodí. Subpovodí Bílského potoka nad přítokem, subpovodí vodní linie s IDVT 10249916 a subpovodí Bílského potoka pod přítokem.

### *Mapa povodí Bílského potoka*

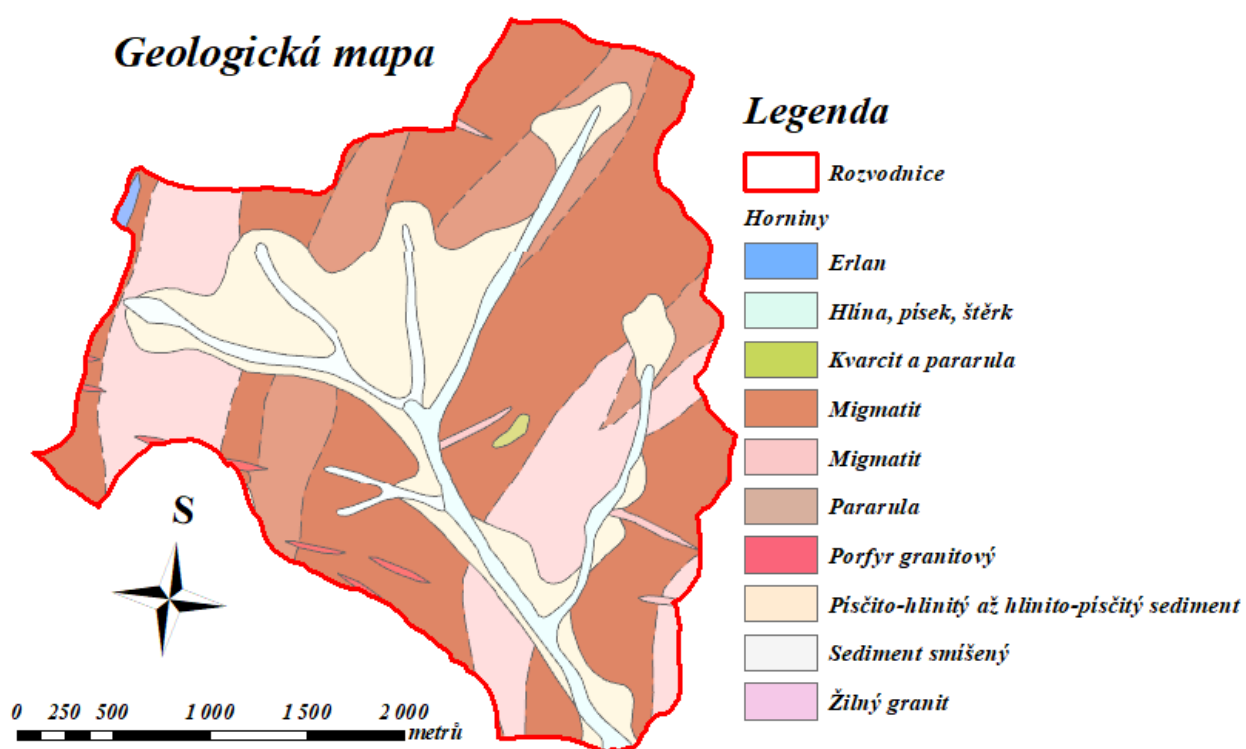


Obr. č. 2 Mapa povodí Bílského potoka

### 3.3 Geomorfologie, geologie a pedologie

Z geomorfologického hlediska se zájmová oblast nachází v Hercynském systému, Hercynském pohoří, České vysočině, Šumavské subprovincii, Šumavské hornatině, Šumavském podhůří, Bavorovské vrchovině, Netonické vrchovině, na rozmezí Krajinčské a Drahonické vrchoviny. Toto členění bylo získáno z mapy geomorfologických jednotek ČR z roku 1998 (viz příloha č. 1). Netonická vrchovina je rovná až mírně členitá, má tektonicky vyvýšený reliéf s výraznými širokými hřbety. Většina těchto hřbetů je zalesněna.

V zájmovém území se nacházejí převážně přeměněné horniny, metamorfní jednotky v moldanubiku. Pochází ze soustavy Českého masivu, krystalinika a prevariského paleozoika. Je to hlavně migmatit a pararula. V malém množství potom kvarcit a erlan. Jako vyvěřelé horniny, magmatity v moldanubiku ze stejné soustavy jako horniny metamorfované, se zde nachází žilný granit a porfyr granitový, ale pouze ve velmi malém množství. Jako poslední zastoupená složka je zde soustava Českého masivu, tvořená pokryvnými útvary a postvariskými magmatity. Nejčastěji se jedná o písčito-hlinitý až hlinito-písčitý sediment, dále sediment smíšený, a nakonec jsou zde zastoupeny hlíny, písky a štěrky (viz obr. č. 3).



Obr. č. 3 Geologická mapa

Všechny ostatní výstupy jsou uvedeny v přílohách č. 1 a 2 na konci práce.

V celém zájmovém území se dle půdní mapy 1: 1 000 000, dostupné u České geologické služby, nacházejí pouze Kambizemně kyselé (viz příloha č. 2). Jedná se o kambizem typickou, která je pro zemědělství a lesnictví poměrně dobrá. Dle mapy BPEJ se zde nachází v největším zastoupení Kambizemě modální, dále Kambizemě litické, Pseudogleje modální, Kambizemě oglejené a na posledním místě Gleje modální.

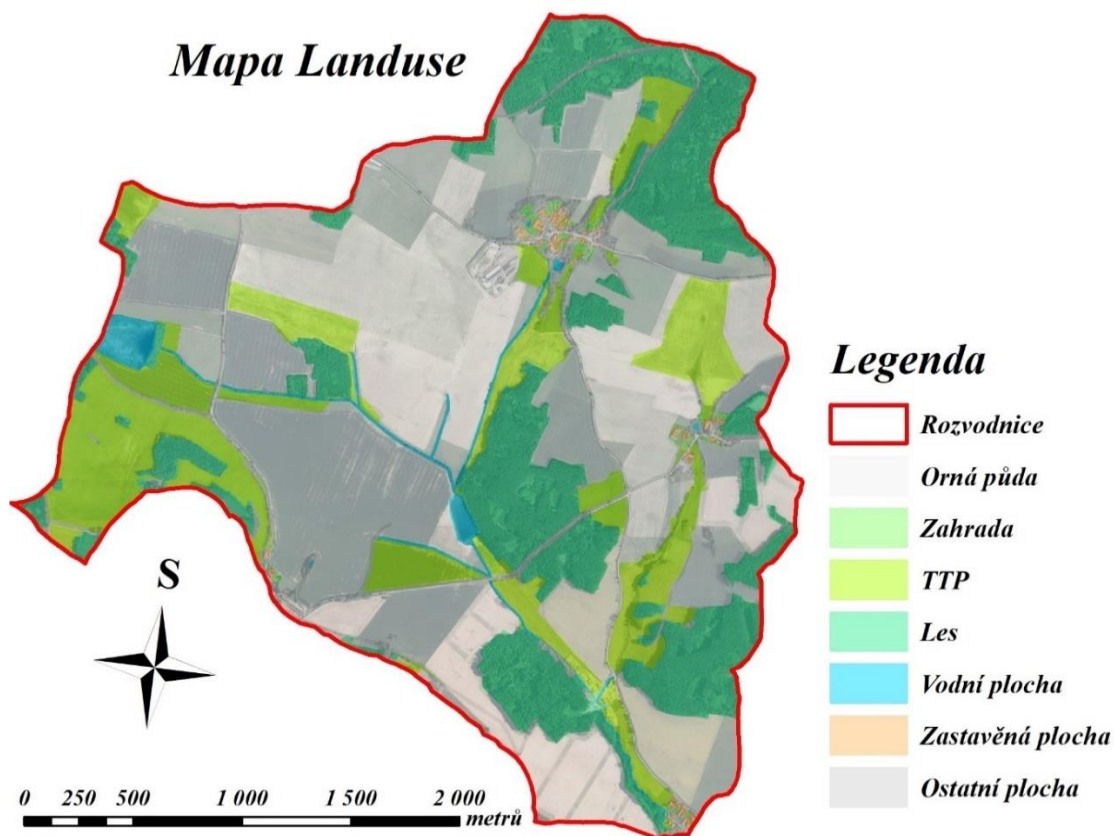
### **3.4 Klimatické poměry**

Dle klimatické mapy ČR volně dostupné na webu CENIA bylo dotčené území zařazeno do klimatické oblasti mírně teplé, MT-ID6. Dále byla tato oblast charakterizována dle Quittovy klasifikace podnebí. Tato klimatická oblast na našem území převažuje. Vyskytuje se převážně ve středních polohách našeho území. Jaro krátké a mírné, léto mírné, mírně suché, normálně dlouhé, podzim krátký, mírně teplý a zima mírně chladná, suchá až mírně suchá, normálně dlouhá. Počet letních dní 30-40, počet dní s průměrnou teplotou 10°C a více 140-160, počet dní s mrazem 110-130, počet ledových dní 40-50, průměrná lednová teplota -2 až -3°C, průměrná červencová teplota 16-17°C, průměrná dubnová teplota 6-7°C, průměrná říjnová teplota 7-8°C, průměrný počet dní se srážkami 1 mm a více 100-120, suma srážek ve vegetačním období 400-450 mm, suma srážek v zimním období 250-300 mm, suma srážek celkem 650-750 mm, počet dní se sněhovou pokrývkou 60-80, počet zatažených dní 120-150 a počet jasných dní 40-50.

### **3.5 Využití území**

Povodí Bílského potoka tvoří 4,31 km<sup>2</sup> orné půdy, což je skoro 55 % celkové výměry. Toto rozložení je dobře viditelné na obrázku č. 4. Jedná se o obilnářskou výrobní oblast. Nejvíce zastoupené plodiny jsou pšenice potravinářská i krmná, sladovnický ječmen, krmný ječmen, brambory, řepka olejka, mák, olejný len, hrách, jetel, vojtěška, silážní kukuřice a brukvovitá zelenina. Půdní bloky jsou dle veřejného registru půdy LPIS kultury standardní orná půda s konvenčním hospodařením. Lesy jsou zde převážně borové. Jedná se o lesy jehličnaté nebo smíšené, přirozené i kulturní. Dle geoportálu ÚHUL jsou zde nejvíce zastoupené čisté borovicové lesy, borovice s příměsí smrku, dominantní smrk s příměsí borovice a dále borovice a smrk s příměsí listnatých, dub, jilm, lípa a jiné.





Obr. č. 4 Mapa Landuse

## 4. Metodika

### 4.1 Srážková data

Data o srážkách byla převzata z programu DES\_RAIN, který je volně dostupný na webu Fakulty životního prostředí České zemědělské univerzity v Praze [www.fzp.czu.cz](http://www.fzp.czu.cz).

Software DES\_RAIN slouží k výpočtu množství dešťů o různých dobách trvání s N-letou pravděpodobností opakování a jejich náhradní intenzitou určenou redukcí jednodenních maximálních srážkových úhrnů. Program běží v prostředí Microsoft Office Excel. Na prvním listu se nachází výpočet srážkových dat a databáze srážkoměrných stanic (obr. č. 5). Pro výpočet je nutné zvolit nejbližší stanici ze seznamu, pod kterým se následně objeví tabulka s hodnotami maximálních denních N-letých úhrnů srážek v mm (Kovář, Sůva, Bačínová, 2015).



Číslo	264
Stanice	Libějovice
N = 2 roky	37,2
N = 5 let	50,3
N = 10 let	58,7
N = 20 let	67,5
N = 50 let	78,3
N = 100 let	86,8

Obr. č. 5 Databáze softwaru DES\_RAIN

#### 4.1.1 Interpolace dat

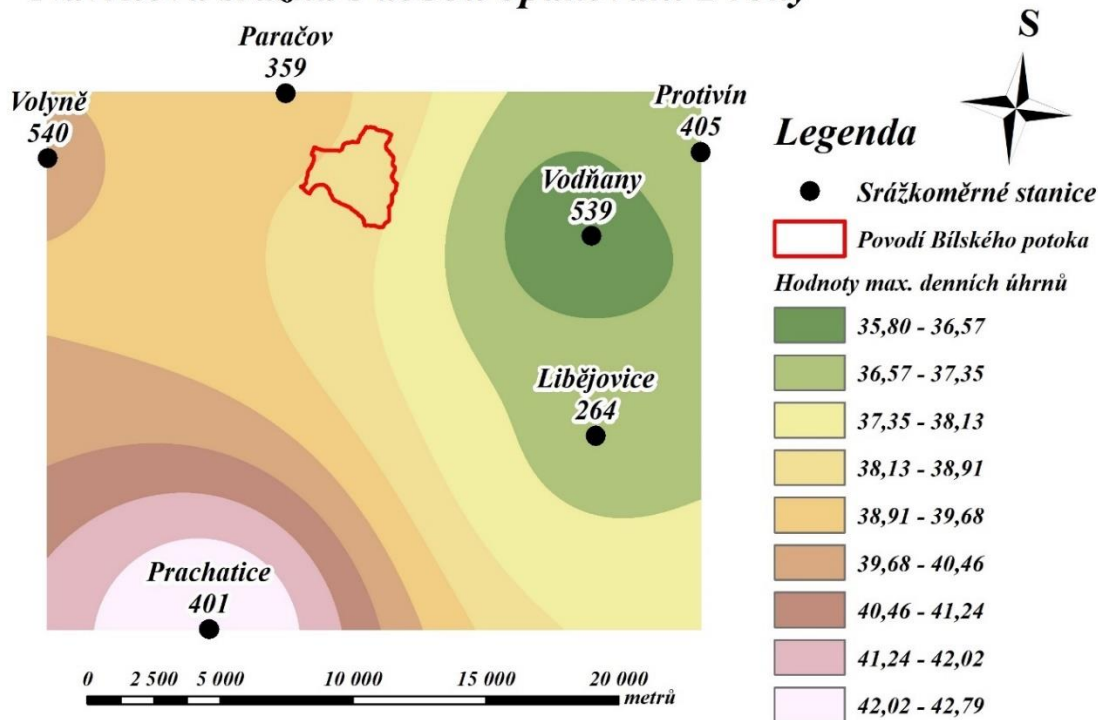
Jelikož ve vybraném území nebylo prováděno přesné měření srážkových úhrnů, bylo nutné vybrat nejbližší stanice a získat tato data pomocí prostorové interpolace. K tomuto úkolu byla vybrána metoda IDW, Inverse Distance Weighting neboli metoda inverzních vzdáleností a byla zpracována v programu ArcMap. Tato metoda je nejpoužívanější a nejjednodušší, jelikož je založena na váženém průměru, kde je váha bodu nepřímo úměrná mocnině vzdáleností, mezi ostatními interpolovanými body. Přestože metoda IDW není příliš spolehlivá pro interpolaci prostorových dat, pro naši potřebu interpolace plošných dat je maximálně využitelná (Ježek, 2015).

Po georeferencování mapy stanic použitých v programu DES\_RAIN přiložených v uživatelské příručce bylo vybráno 6 nejbližších (viz tab. č. 1), pro které byla vytvořena tabulka.xls s přepočítanými souřadnicemi ze systému WGS84 na Systém JTSK. Po tomto kroku byly vytvořeny body s přesnou polohou a daty srážkových úhrnů s dobou opakování N2, N10, N50 a N100. Po tomto kroku byla provedena interpolace pro všechny uvedené N-leté srážky (viz obr. č. 6).

Č.	Název	N2	N10	N50	N100	X	Y	Z	ZS	ZD
264	Libějovice	37,2	58,7	78,3	86,8	-774988	-1149412	468	49°06'	14°11'
359	Paračov	39,1	64,2	87	96,8	-786665	-1136520	487	49°12'	14°00'
401	Prachatice	42,8	66,8	88,6	98	-789557	-1156703	642	49°01'	14°00'
405	Protivín	37,2	56,4	73,9	81,4	-771032	-1138737	388	49°12'	14°13'
539	Vodňany	35,8	57	76,3	84,6	-775158	-1141900	402	49°10'	14°10'
540	Volyně	39,8	78,6	113,37	128,9	-795612	-1138976	470	49°10'	13°53'

Tab. č. 1 Vybrané srážkoměrné stanice

## Návrhová srážka s dobou opakování 2 roky



Obr. č. 6 Interpolace srážky s dobou opakování 2 roky

Ostatní mapy pro další návrhové srážky s dobou opakování 10, 50 a 100 let jsou k nahlédnutí v přílohách č. 4, 5 a 6 na konci práce.

Na výše přiložené mapce je vidět, že se zájmové území nachází v přesném rozmezí hodnot maximálních denních úhrnů srážek 38,13 – 39,68. Průměrná hodnota denního úhrnu srážek byla proto stanovena pro dobu opakování 2 roky na 38,39 mm. Pro tyto hodnoty byly upraveny všechny rastry pro všechna již výše zmíněná území. Všechny hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 2.

	N2	N10	N50	N100
Sbp1	38,58	63,51	86,23	96,07
Sbp2	38,33	62,86	85,12	94,74
Sbp3	38,27	62,81	85,09	94,72
Povodí	38,39	63,06	85,48	95,18

Tab. č. 2 Hodnoty N-letých denních srážkových úhrnů

## 4.2 Čísla odtokových křivek CN

Metoda odtokových křivek CN vychází z předpokladu, že se poměr objemu odtoku k úhrnu srážky rovná objemu zadržené vody k objemu, který může být potenciálně zadržen. Tento odtok začíná až po určité akumulaci nebo po jisté počáteční ztrátě udané součtem intercepce, infiltrace a povrchové akumulace a je stanoven na 20 %. Čísla křivek jsou určena na základě hydrologických vlastností půd, které jsou děleny do skupin A, B, C a D podle minimální rychlosti infiltrace, vlhkosti půdy a využití půdy (Kovář a spol., 2015).

### 4.2.1 Výpočet čísel odtokových křivek CN

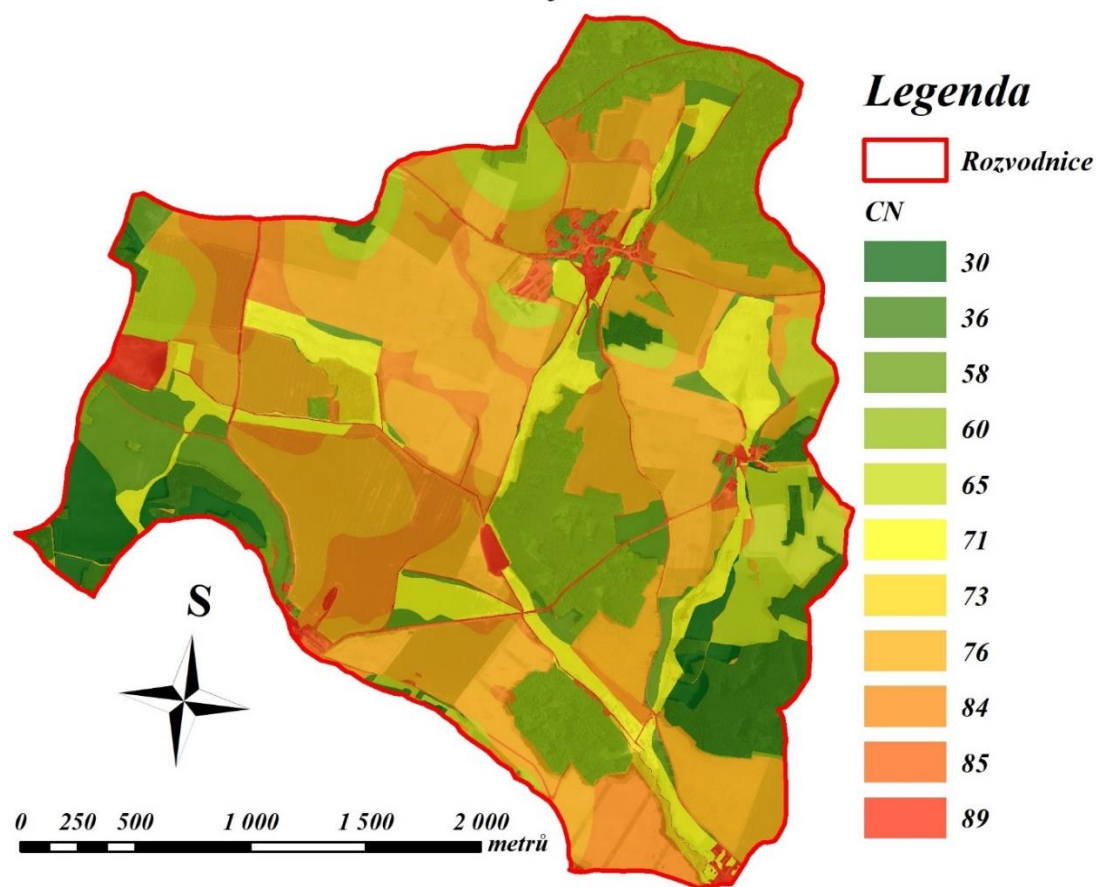
Jelikož toto území patří do obilnářské výrobní oblasti bylo pro ornou půdu voleno využití pro Úzkořádkové plodiny (obilniny), což se s realitou většinově shoduje. Pro způsob obdělávání orné půdy bylo voleno obdělávání přímými řádky bez ohledu na sklon pozemku a hydrologické podmínky zvolené špatné, což představuje čísla CN odtokových křivek podle hydrologických skupin půd 65, 76, 84 a 88. Pro TTP a zahrady čísla odtokových CN křivek podle hydrologických skupin půd 30, 58, 71 a 78. Pro lesy byly voleny střední hydrologické podmínky, a tedy čísla odtokových CN křivek podle hydrologických skupin půd 36, 60, 73 a 79. Pro ostatní plochy, převážně způsobu využití komunikace byly voleny střední hodnoty a číslo CN odtokových křivek podle hydrologických skupin půd 76, 85, 89 a 91. Pro vodní plochy a zastavěné plochy byla zvolena pro všechny hydrologické skupiny hodnota 98. Tyto zadané hodnoty jsou dobře vidět na obrázku č. 7. Výpočet i výsledné hodnoty odtokových křivek CN jsou uvedeny v tabulce č. 3.

CN	Povodí	Sbp1	Sbp2	Sbp3
30	246091	185663	60428	
36	445544	141998	233087	70460
58	543070	440641	93596	8833
60	1143195	1042467	58123	42605
65	634731	310975	320941	2815
71	695296	442499	202028	50770
73	85566	60697	1115	23755
76	2876402	2178807	459499	238097

84	824864	653231	22318	149314
85	184836	146563	30168	8105
89	186530	157734	13962	14834
Vážený průměr	69	70	64	72
Σ Výměr	7866126	5761274	1495266	609586

Tab. č. 3 Hodnoty čísel odtokových křivek CN

### *Průměrná čísla odtokových křivek CN*



Obr. č. 7 Mapa čísel odtokových křivek CN

Ostatní mapové výstupy pro výpočet čísel odtokových CN křivek jsou k nahlédnutí v přílohách na konci práce.

### **4.3 Hydrologické výpočty pomocí programu ERCN**

Pro potřeby modelování bylo nutné vypočítat  $T_c$  dobu koncentrace. Pro tento výpočet byl zvolen program ERCN od Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy (VÚMOP). Plochy subpovodí byly vypočteny v programu ArcMap, průměrné hodnoty

CN byly použity z předchozího výpočtu, stejně tak maximální srážkové úhrny. Délky a sklony byly převzaty také z programu ArcMap. Pro drsnost  $n$  v plošném povrchovém odtoku byla zvolena hodnota 0,6 pro obdělávanou půdu s posklizňovými zbytky do 20 % povrchu a 0,5 pro úhor bez posklizňových zbytků. Nakonec pro soustředěný odtok v otevřeném korytě byl vypočítán omočený obvod  $O$  3,84 m a plocha příčného profilu  $2 \text{ m}^2$  v Subpovodích 1 a 2 a omočený obvod  $O$  5,4 m a plocha příčného profilu  $4,125 \text{ m}^2$  v Subpovodí 3. Po součtu jednotlivých dob doběhů  $T_{ta}$ ,  $T_{tb}$  a  $T_{tc}$  byla vypočtena celková doba koncentrace  $T_c$  v hodinách, která je uvedena v tabulce č. 4.

	Sbp1	Sbp2	Sbp3
$T_c$	0,883	0,711	0,596

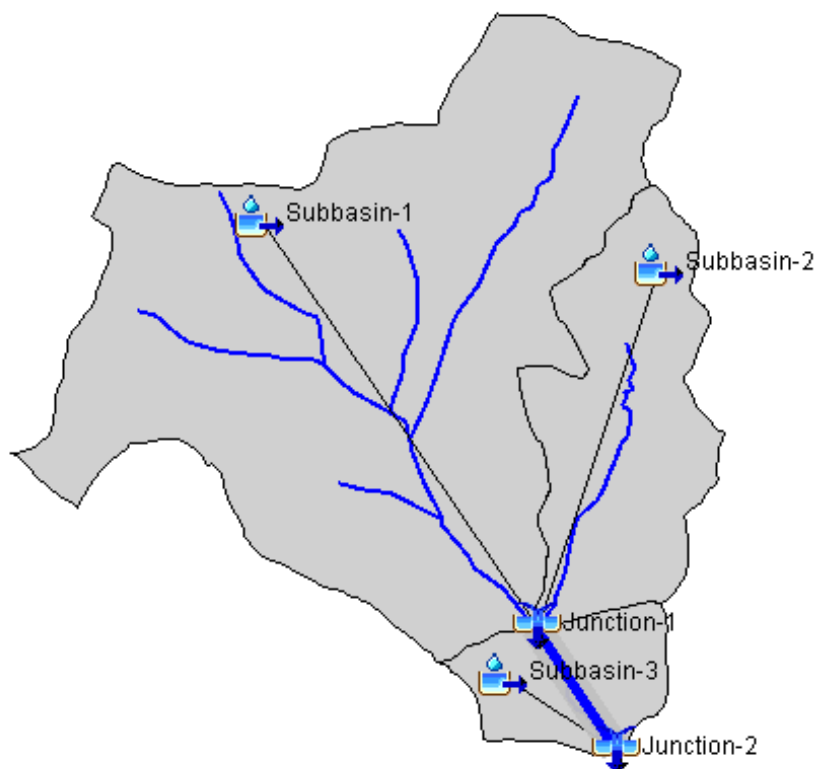
Tab. č. 4 Hodnoty doby doběhu

Ukázky výpočtu jsou k nahlédnutí v přílohách na konci práce.

## 4.4 Hydrologický model Hec HMS

### 4.4.1 Basin model

Prvním krokem byl při vytváření basin modelu import vrstev připravených v programu ArcMap do Mapového prostředí basin modelu v programu Hec HMS. Dalším krokem bylo definování elementů v povodí pomocí nástrojů (viz obr. č. 8). V začátku byla použitím nástroje Subbasin definována již předem vytvořená subpovodí. Tato subpovodí bylo následně nutno nadefinovat reálnými hodnotami a zvolit Loss method (metodu ztrát) a Transform method (metodu transformace).



Obr. č. 8 Mapa basin modelu

### Subbasin – Loss

Jako Loss method byla použita metoda SCS Curve Number, do které vstupují průměrná čísla odtokových křivek CN pro každé subpovodí. Tyto hodnoty jsou vypočteny v kapitole 4.2.1. Do prvního řádku této metody se doplňuje Initial Abstraction v mm, jedná se o odhad počáteční ztráty na základě 20 % potenciální retence, dle Janečka (2012) vypočtený jako:  $I_a = 0,2 A$ , přičemž A potenciální retence v mm vyjádřená pomocí CN křivek se vypočte  $A = 25,4 (1000/CN - 10)$ . Do druhého řádku Curve Number se zapíše již zmiňovaná čísla odtokových křivek CN a do posledního řádku vstupují hodnoty Impervious (nepropustnosti) v % odvozené od výměr nepropustných ploch v povodí pomocí mapy Landuse v programu ArcMap. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 5.

	IA	CN	I
Sbp1	21	70	2,7
Sbp2	28	64	0,9
Sbp3	19	72	2,4

Tab. č. 5 Hodnoty parametrů pro Loss method

## Subbasin – Transform

Za Transform method byla zvolena metoda Clark Unit Hydrograph neboli metoda Clarkova jednotkového hydrogramu. Sem vstupují hodnoty Time of Concentration (doba koncentrace  $T_c$ ) v hodinách a Storage Coefficient (retenční koeficient  $R$ ) také v hodinách (viz tab. č. 6). Doba koncentrace  $T_c$  byla vypočtena v programu ERCN (viz kapitola 4.3). Pro výpočet nebo odvození retenčního koeficientu  $R$  je udáváno jen velmi malé množství vzorců, které se od sebe značně liší. Vološ (2004) tvrdí, že  $R$  je transformační faktor povodí v hodinách, simulující dobu zdržení vody v povodí. Pro přesnější definování byl použit vzorec ve znění:  $R = A L^B S^{C_{1085}}$ , kde  $L$  je délka toku v mílich,  $S_{1085}$  je průměrný sklon ve stopách na míli v úseku mezi 10–85 % délky a  $A$ ,  $B$  a  $C$  jsou hodnoty, které jsou pro ČR upraveny na  $A = 80$ ,  $B = 0,342$  a  $C = -0,79$  (Vološ, 2004). Mays (2019) uvádí také vzorec  $R = 0,37 T_c^{1,11} A^{-0,57} L^{0,8}$ , přičemž  $A$  je plocha povodí ve čtverečních mílich a  $L$  délka toku v mílich. Pro určení hodnoty Storage Coefficientu byl použit vzorec uváděný Vološem.

	$T_c$	$R$
Sbp1	0,883	2,102
Sbp2	0,711	1,013
Sbp3	0,596	4,109

Tab. č. 6 Hodnoty parametrů pro Transform method

## Junction

Dalším krokem bylo nadefinování elementu Junction (soutok). Pro tyto soutoky byl volen jen směr proudu odtoku. To znamená, že ze subpovodí 1 a 2 byl definován odtok do soutoku 1 a následně ze subpovodí 3 a soutoku 1 do soutoku 2, který je umístěn při uzávěrovém profilu povodí Bílského potoka.

## Reach – Routing

Posledním krokem při tvorbě basin modelu bylo definování elementu Reach (tok) pro možnost sledování postupu potenciální povodňové vlny. Jako Routing method neboli metoda soustředěného odtoku v korytě, byla vybrána metoda Muskingum. Tato metoda vyžaduje zadání dvou hodnot, přičemž hodnota první je Muskingum  $K$  v hodinách a druhá Muskingum  $X$ . Linsey (1975) definuje tyto pojmy jako proměnné, které definují velikost a rychlost vzestupu povodňové vlny při

průchodu říčním korytem. Hodnota  $K$  je udávána v hodinách a je to v podstatě čas průtoku korytem, je odhadován ze znalosti jednotlivých úseků toku, povrchu a proudění. Pro výpočet  $K$  uvádí Feldman (2000) rovnici ve znění:  $K = L / V_w$ , kde  $L$  je délka definovaného koryta a  $V_w$  je rychlost povodňové vlny. Pro odhadnutí rychlosti povodňové vlny lze použít  $n$  násobek průměrné rychlosti zjištěné Chézyho rovnicí, přičemž  $n$  je v rozmezí 1,33-1,67. Muskingum  $X$  je bezrozměrné číslo, nebo také transformační faktor, který se pohybuje v rozpětí 0 – 0,5. V praktické aplikaci je hodnota 0 výsledek v maximálním útlumu a při hodnotě 0,5 je výsledek bez útlumu. Zpravidla se volí hodnota 0,2, přičemž toto tvrzení potvrzuje i Vološ (2004).

Chézyho rovnice pro výpočet rychlosti proudění v otevřeném korytě je  $v = C \sqrt{Ri}$ . Byl proveden výpočet Chézyho rychlostního součinitele podle Manninga, ve znění:  $C = (1/n) R^{1/6}$ , kde  $n$  vyjadřuje Manningův drsnostní součinitel a  $R$  hydraulický poloměr. Po odhadnutí Manningova drsnostního součinitele  $n = 0,1$  a zadání již dříve spočteného omočeného obvodu  $R = 0,764$  m byl vypočten Chézyho rychlostní součinitel  $C = 9,56$ . Po dosazení do Chézyho rovnice získáme rychlost zhruba 0,6 m/s, která je následně přenásobena koeficientem 1,5 pro dosažení rychlosti povodňové vlny. Výsledné koeficienty jsou uvedeny v tabulce č. 7.

K	0,275
X	0,2

Tab. č. 7 Parametry pro metodu Muskingum

#### 4.4.2 Meteorologic model

Pod basin modelem byl vytvořen meteorologický model. Byly vytvořeny 4 modely, každý pro reprezentování různé srážkové události z již zmíněných 2,10,50 a 100letých událostí. Pro tyto modely byla zvolena metoda Hypothetical storm. Jako další byl zvolen vzorec časového rozložení srážky typu SCS Type 2. V User's Manualu Hec-HMS pro verzi 4.3 od US Army Corps of Engineers (2018) je metoda Hypothetical storm popsána jako simulace hypotetické srážkové situace se zadáním její velikosti. V tomto případě je dále možné použít již předdefinované časové vzorce pro distribuci srážky rozloženou v čase 24 hodin. Jsou zde uvedeny typy 1, 1a, 2 a typ 3. Pro vzorce musí mít zadaná simulace délku trvání 24 hodin a více. Tyto vzorce stanovila americká služba ochrany přírodních zdrojů a ve své příručce TR – 55 uvádí



mapu USA s rozčleněním do různých oblastí podle těchto vzorců, přičemž pouze vzorec typu 2 se vztahuje na vnitrozemské oblasti.

Pro každý model označený písmenem N a dobou opakování byla vložena hodnota srážky, zastupující celé povodí, vypočtená v kapitole 4.1.1.

#### **4.4.3 Control specifications**

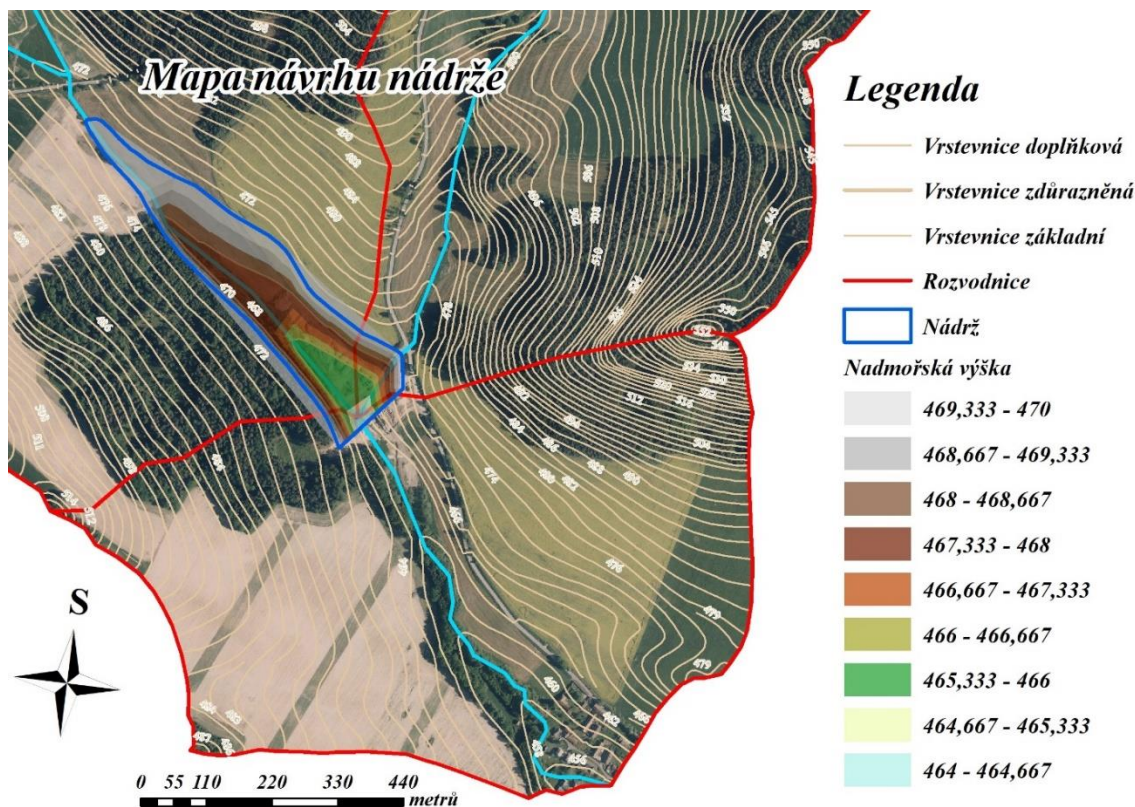
Jako poslední vstupovala pod meteorologický model komponenta Control Specifications, pomocí které se kombinací basin modelu a meteorologického modelu vytvořila simulace s reálnými výsledky. Tyto výsledky jsou po provedení obdobné simulace se započtením vytvořené nádrže porovnány v kapitole 5.

#### **4.4.4 Návrh nádrže**

V tomto kroku bylo nutné nadefinovat parametry nádrže pro transformaci povodňové vlny. Prvním krokem bylo odhadnutí polohy hráze a určení její maximální nadmořské výšky. Maximální zátopná výška byla dle vrstevnic jako 470 m Bpv, pro odhadovanou optimální velikost. Poloha hráze byla určena orientačně 20 metrů od přítoku s IDVT 10249916 do Bílského potoka, za účelem využití nejužšího místa v údolnici. V této podobě zátopa neohrožuje přilehlou místní účelovou komunikaci ani jiné prvky v krajině. Zároveň by v této pozici a vzdálenosti od obce hráz nenarušovala do velké míry krajinný ráz a vizuální a výhledové poměry. Pro tuto maximální hladinu zátopy byla odhadnuta plocha na 7,02 ha a maximální objem na 145 tis. m<sup>3</sup>. Tyto údaje byly pro vstup do modelu Hec HMS přepočteny pomocí programu ArcMap.

#### **Výpočet parametrů nádrže**

Pro potřebu odhadu objemu nádrže pomocí nepřímé metody bez terénního zaměření Kubinský (2019) uvádí metodu Polygon volume pro výpočet objemu v prostředí ArcGis. Jedná se tedy o nepřímou metodu určení objemu a plochy, pro kterou jsou zapotřebí pouze dva vstupy, a to buď vrstevnice nebo TIN model území a polygon nádrže. V našem případě byl z vrstevnic vytvořen TIN model z oříznutých vrstevnic podle předem nadefinovaného polygonu nádrže. Tento model vstupoval do nástroje Polygon Volume společně s polygonem nádrže, do kterého byly následně vypočítány potřebné údaje (viz tab. č. 8). Vytvořený model je vyobrazen na obrázku č. 9.



Obr. č. 9 Mapa návrhu nádrže

Maximální výška zátopy	470 m.n.m.
Maximální zatopená plocha	6,42 ha
Objem nádrže	129 tis m <sup>3</sup>

Tab. č. 8 Parametry nádrže

### Návrh výpustního zařízení

Dalším potřebným parametrem byla hodnota odtoku z nádrže. V tomto případě musí být z nádrže vypouštěn takový objem vody, který se vejde do koryta toku pod nádrží a bude bezpečně proveden obcí Bílsko. Pro tento odtok byly použity již spočtené hodnoty z kapitoly 4.4.1, kde byl řešen totožný úsek Bílského potoka. Je tedy nutné spočítat objemový průtok vody profilem vodního toku, na který je následně navrženo výpustní zařízení. Tato nádrž je vybavena spodní výpustí, jelikož se jedná o nádrž suchou průtočnou, je následně nutné zajistit nepřetržitý průtok pouze v době, kdy nádrž neplní retenční funkci. Technická norma vodního hospodářství TNV 75 2415 z ledna roku 2013 také říká, že je nutné tímto zajistit migraci vodních živočichů, dále převádět běžné průtoky pod hrází bez vzdouvání vody v prostoru nádrže a

převádět do území pod nádrží nejvýše neškodný odtok až do dosažení maximální hladiny v nádrži na hraně bezpečnostního přelivu.

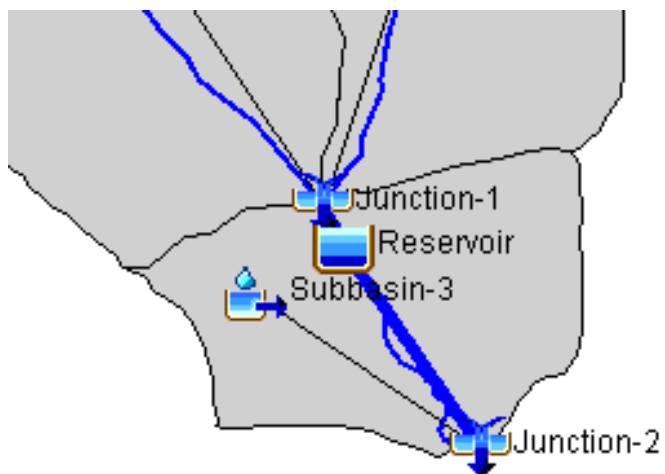
Výpočet objemového průtoku vody je spočten jako součin průřezové plochy  $S$  a střední průřezové rychlosti proudění neboli  $Q = S v$ . Rychlost proudění byla vypočtena v hodnotě 0,6 m/s (viz kapitola 4.3) a střední průřezová plocha v hodnotě 4,125 m<sup>2</sup> (viz kapitola 4.3). Od tohoto průtoku (2,4 m<sup>3</sup>/s) je ale nutné ještě odečíst maximální průtok ze subpovodí pod nádrží (Sbp3), kde při srážce „N100“ s dobou opakování 100 let vypočetl program Hec HMS maximální průtok s vrcholem 0,6 m<sup>3</sup>/s. Na tento průtok 1,8 m<sup>3</sup>/s je následně nutné nadefinovat profil výpustního zařízení, přičemž jak říká Šálek (1999), musí být minimální průměr výpustního zařízení 300 mm.

### **Reservoir element**

Pro model zahrnující element Reservoir neboli nádrž, byl vytvořen totožný basin model, do kterého byl element Reservoir vložen mezi elementy Junction 1 a Reach (viz obr. č. 10). Bylo zde nutné zvolit metodu pro další definování tohoto prvku. Onou metodou byla metoda Outflow Curve (křivka odtoku), která je manuálem US Army Corps of Engineers (2018) definována jako zastoupení nádrže se zadaným vztahem mezi kapacitou a odtokem.

Další podmínkou byla volba Storage method, která nabízela opět řadu možností. Vybrána byla metoda Storage-Discharge. Pro tuto metodu bylo nutné vložit funkci definující prvky tohoto elementu. Funkce byla vytvořena pomocí komponenty Paired Data Manager. Pro tuto funkci bylo nutné zvolit manuální vložení dat. Do tabulky byla následně vložena data počínající nulovými hodnotami v prvním řádku. Na konec byly vloženy hodnoty nadefinované nádrže.

Jako poslední bylo nutné zvolit Initial Condition. US Army Corps of Engineers (2018) popisuje tuto podmínku jako stanovení kapacity nádrže v průběhu simulace. Nejlepší volbou je s ohledem na předešlé metody Inflow = Outflow. Používá křivku „skladování – vypouštění“, kdy je přítok zadržován v nádrži a současně konstantně odtéká již předem stanovené množství vody.



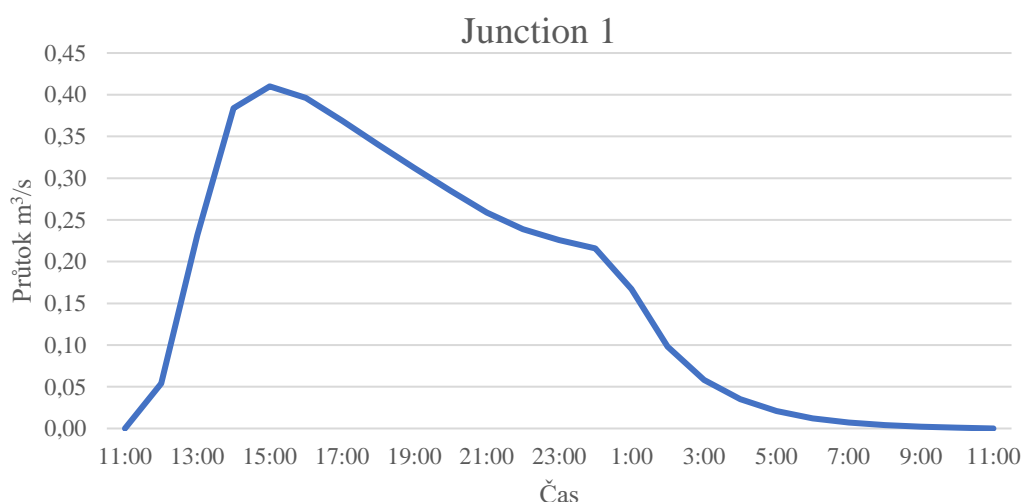
Obr. č. 10 Mapa basin modelu s elementem Reservoir

## 5. Výsledky

Výsledky byly získány ve dvou formách, formou tabulkovou a formou grafů. Jsou zde porovnávány jednotlivé nasimulované průtoky pro jednotlivé N-leté srážky mezi povodím ve stavu bez nádrže a s nádrží, sledování průtoků a objemů odtoků v jednotlivých úsecích rozložených v čase a shrnutí transformace povodňové vlny v nádrži. Simulace byla prováděna v čase od 0:00:01 prvního dne do 23:59:59 následujícího dne. Tedy celkem cca 48 hodin.

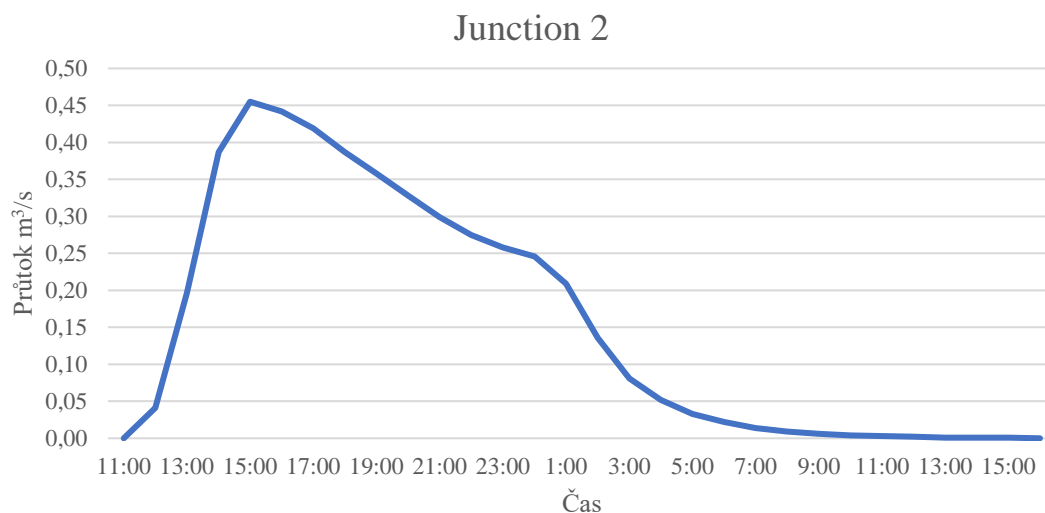
### 5.1 Srážka s dobou opakování 2 roky (N2)

Prvním sledovaným místem byl soutok horní části Bílského potoka a toku s IDVT 10249916, Junction – 1. Toto místo je klíčové, jelikož zde dochází při velkých povodňových srážkách ke značně velkým průtokům vody. Druhé sledované místo tvoří uzávěrový profil tohoto povodí, který zastupuje element Junction – 2.



Graf č. 1 Průtok soutokem při návrhové srážce N2 v modelu bez nádrže

Na tomto grafu (graf č. 1) je dobře vidět, jakým způsobem je průtok rozložen v čase, přičemž nárůst průtoků je zde až po 11 hodinách. Tento jev je odvozen primárně od rozložení srážky v čase. V čase 15:00, což je přibližně po 4 hodinách od začátku projevu odtoku v bodě soutoku, se vyskytuje kulminační průtok o hodnotě 0,41 m<sup>3</sup>/s.



Graf č. 2 Průtok uzávěrovým profilem při návrhové srážce N2 v modelu bez nádrže

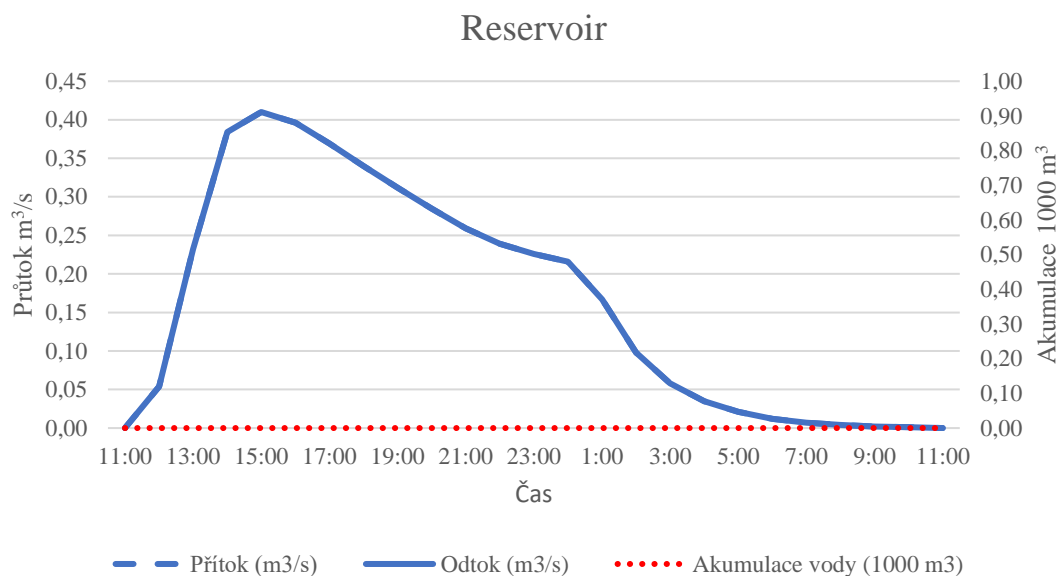
Na první pohled zde došlo jen k nepatrným změnám, ty jsou způsobeny odtokem v korytě spodní části Bílského potoka v zájmovém území a odtokem ze subpovodí číslo 3. Celkově dochází k posunutí kulminačního průtoku v čase a samozřejmě k navýšení průtoku tímto místem. Pokles průtoku k nulové hodnotě nastává až po 16 hodinách a kulminačnímu průtoku zde dochází opět zhruba po 4 hodinách. Tento kulminační průtok nabývá hodnot 0,46 m<sup>3</sup>/s (viz graf č. 2).

Element	Plocha (km <sup>2</sup> )	Kulminační průtok (m <sup>3</sup> /s)	Objem (1000 m <sup>3</sup> )
Subbasin-1	5,76	0,39	13,80
Subbasin-2	1,5	0,03	1,05
Junction-1	7,26	0,41	14,85
Subbasin-3	0,61	0,04	1,94
Reach-1	7,26	0,41	14,85
Junction-2	7,87	0,46	16,80

Tab. č. 9 Hodnoty modelu bez nádrže při návrhové srážce N2

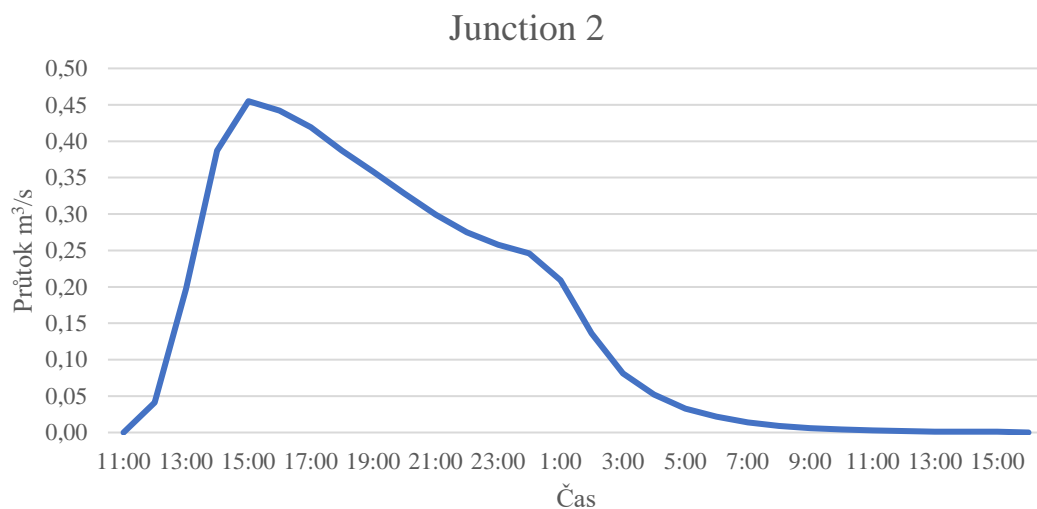
V tabulce č. 9 jsou vyobrazeny hodnoty pro elementy zastoupené v modelu povodí. Plocha se vztahuje k jednotlivým subpovodím, v případě soutoku (Junction) dochází k součtu těchto elementů. V případě elementu Junction 2 se jedná o součet ploch všech subpovodí zastoupených v modelu. Stejným způsobem jsou v tabulce vyobrazeny i hodnoty odtoku, kdy je zaznamenán vždy největší průtok vyskytující se

v daném elementu. V posledním sloupci nalezneme objem odtoku, který je vyjádřen v tisících m<sup>3</sup>.



Graf č. 3 Transformace povodňové vlny v nádrži při návrhové srážce N2

Graf č. 3 pro transformaci povodňové vlny v nádrži (Reservoir), vyobrazuje vždy kulminační průtok v místě přítoku do nádrže, který je shodný se soutokem Junction 1, dále kulminační průtok v místě odtoku z nádrže, který představuje výpustní zařízení nádrže a akumulaci vody v nádrži. Při srážce s dobou opakování 2 roky je průtok nádrži tak malý, že nedochází k žádné akumulaci vody v nádrži, nýbrž jak si můžeme všimnout na grafu, křivka přítoku kopíruje křivku odtoku.



Graf č. 4 Průtok uzávěrovým profilem při návrhové srážce N2 v modelu s nádrží

V grafu elementu Junction 2 zastupující uzávěrový profil povodí můžeme sledovat opět mírné navýšení průtoku, které ale zcela koresponduje s průtokem v modelu bez nádrže. Odtok se ani zdaleka neblíží mezní hodnotě 2,475 m<sup>3</sup>/s.

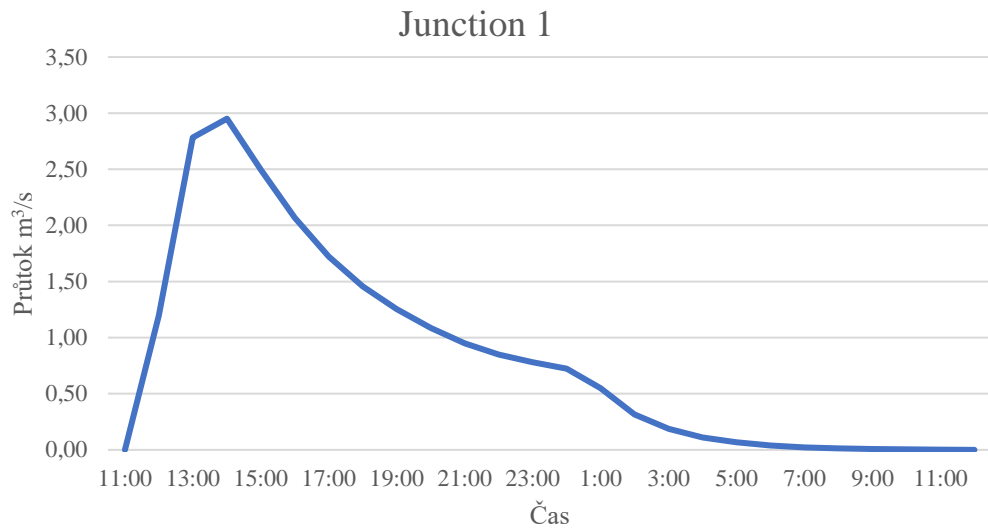
Element	Kulminační průtok (m <sup>3</sup> /s)
Subbasin-1	0,39
Subbasin-2	0,03
Junction-1	0,41
Reservoir	0,41
Subbasin-3	0,41
Reach-1	0,04
Junction-2	0,46

Tab. č. 10 Hodnoty modelu s nádrží při návrhové srážce N2

Tabulka č. 10 vyobrazuje pouze hodnoty průtoku, jelikož hodnoty plochy a objemu odtoku se nemění. Na první pohled je patrné, že hodnoty kulminačních průtoků jsou naprosto shodné s hodnotami kulminačních průtoků v modelu bez nádrže, tudíž je možné říci, že při srážce s dobou opakování 2 roky (N2) nemá nádrž na odtok z povodí žádný vliv.

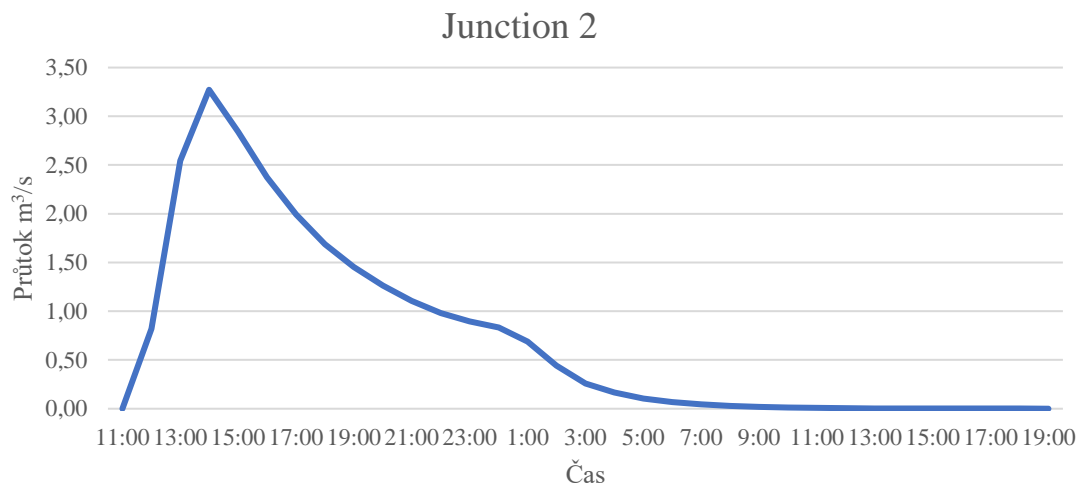


## 5.2 Srážka s dobou opakování 10 let (N10)



Graf č. 5 Průtok soutokem při návrhové srážce N10 v modelu bez nádrže

Tento graf (graf č. 5) opět vyobrazuje průtok elementem Junction 1, ale při srážce s dobou opakování 10 let. Je patrné, že průběh v čase je celkem shodný s předchozím modelem akorát průtok nabývá značně větších hodnot. Tento kulminační průtok se nachází v čase 14:00 a nabývá hodnoty 2,95 m<sup>3</sup>/s.



Graf č. 6 Průtok uzávěrovým profilem při návrhové srážce N10 v modelu bez nádrže

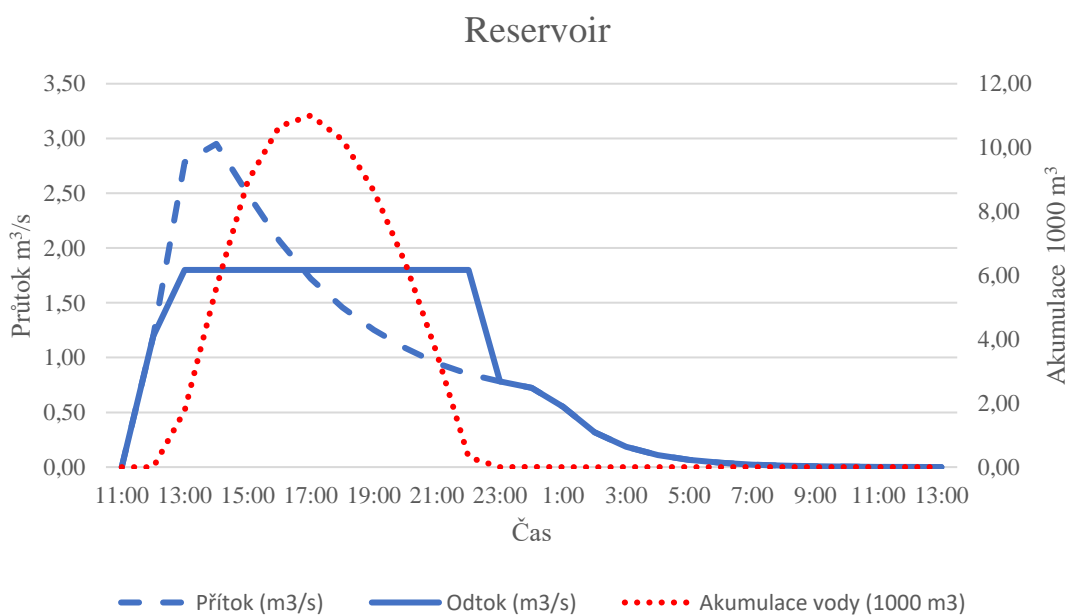
Zde je vidět (graf č. 6), jak se kvůli odtoku ze subpovodí číslo 3 zvýšil kulminační průtok. Kulminační průtok v tomto bodě dosahuje hodnoty 3,27 m<sup>3</sup>/s, což

je hodnota přesahující maximální kapacitu koryta s možností ohrožení intravilánu obce Bílsko.

Element	Plocha (km <sup>2</sup> )	Kulminační průtok (m <sup>3</sup> /s)	Objem (1000 m <sup>3</sup> )
Subbasin-1	5,76	2,51	67,53
Subbasin-2	1,5	0,44	10,33
Junction-1	7,26	2,95	77,86
Subbasin-3	0,61	0,22	8,29
Reach-1	7,26	3,05	77,86
Junction-2	7,87	3,27	86,15

Tab. č. 11 Hodnoty modelu bez nádrže při návrhové srážce N10

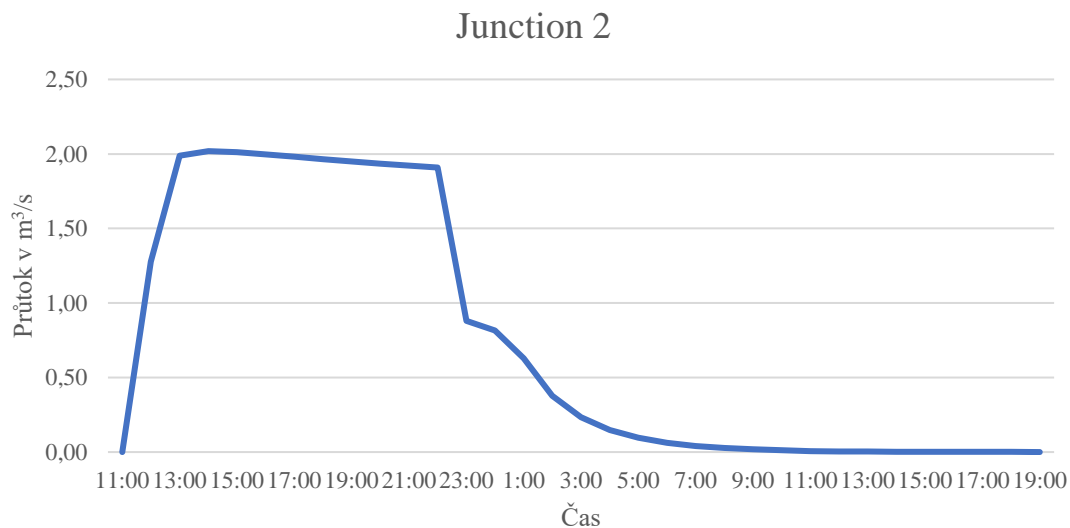
V tomto případě, kdy kulminační průtok v místě soutoku dosahuje kulminační průtok hodnoty 2,95 m<sup>3</sup>/s (viz tab. č. 11), je jasné že už bude docházet k transformaci povodňové vlny v nádrži v druhém modelu pro docílení snížení průtoku v místě uzávěrového profilu.



Graf č. 7 Transformace povodňové vlny v nádrži při návrhové srážce N10

Jak je vidět na grafu č. 7, modelová nádrž již při tomto průtoku vykonává úlohu transformace povodňové vlny. Odtok z nádrže. V době 12. hodiny se dostává odtok do maxima, což je 1,8 m<sup>3</sup>/s. V tu samou dobu začíná nádrž akumulovat vodu. Objem vody v nádrži dosáhne hodnoty 11 000 m<sup>3</sup> v 17:00 a následně kvůli nepřetržitému odtoku

klesá k nulové hodnotě v čase 23:00, kdy následkem vyprázdnění nádrže klesne průtok na hodnotu přítoku, který se nachází pod hodnotou maximálního odtoku z nádrže.



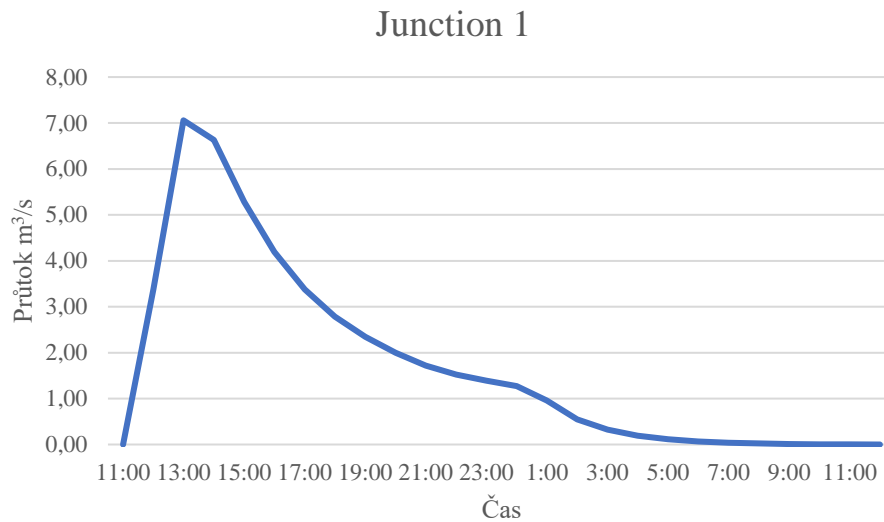
Graf č. 8 Průtok uzávěrovým profilem při návrhové srážce N10 v modelu s nádrží

Při uzávěrovém profilu se hodnota kulminačního průtoku nachází lehce nad hodnotou 2 m<sup>3</sup>/s (viz tab. č. 12), což znamená že byl kulminační průtok pomocí nádrže snížen o 37 %. V době 9:00 (po 22 hodinách) se průtok nachází blízko nulové hodnotě a v 19:00 končí (viz graf č. 8). Celkové trvání je tedy zhruba 32 hodin.

Element	Kulminační průtok (m <sup>3</sup> /s)
Subbasin-1	2,51
Subbasin-2	0,44
Junction-1	2,95
Reservoir	1,80
Subbasin-3	0,22
Reach-1	1,86
Junction-2	2,07

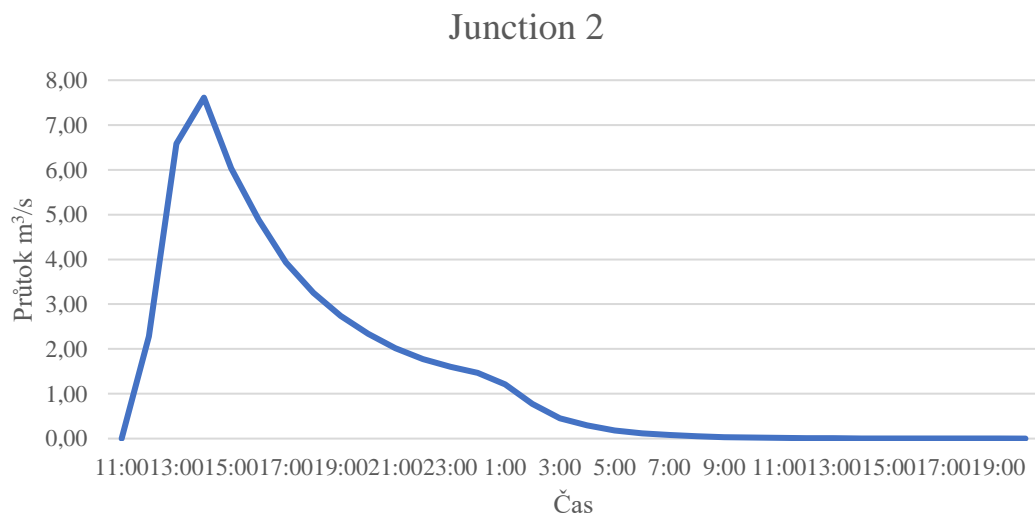
Tab. 12 Hodnoty modelu s nádrží při návrhové srážce N10

### 5.3 Srážka s dobou opakování 50 let (N50)



Graf č. 9 Průtok soutokem při návrhové srážce N50 v modelu bez nádrže

Při srážce s dobou opakování 50 let sledujeme kulminaci průtoku v čase 13:00. To je v porovnání s předchozími modely opět posunutí v čase vpřed. Tento jev je zapříčiněn stále se stupňujícím množstvím vody. Kulminační průtok pro tento element nabývá hodnoty 7,06 m<sup>3</sup>/s (viz graf č. 9).



Graf č. 10 Průtok uzávěrovým profilem při návrhové srážce N50 v modelu bez nádrže

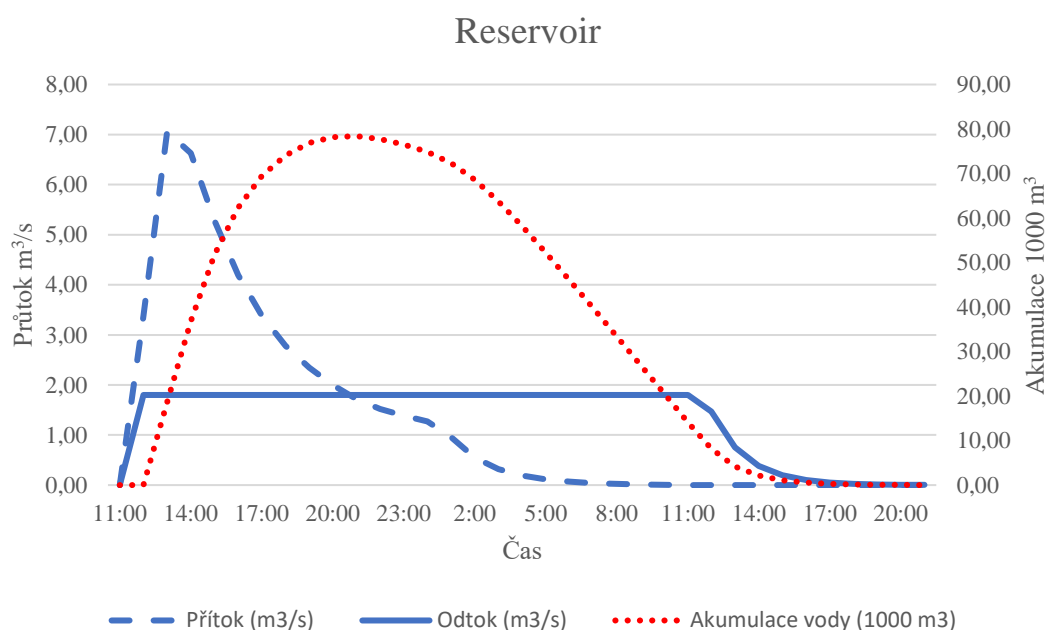
Na hydrogramu (graf č. 10) je při uzávěrovém profilu vidět zvětšení a posun kulminačního průtoku v čase směrem dozadu. Tento jev je zapříčiněn odtokem vody ze subpovodí číslo 3, jelikož průtok korytem toku je značně rychlejší, než doběh vody

z plochy Subbasin 3. Tento kulminační průtok se nachází v čase 14:00 a nabývá hodnoty 7,61 m<sup>3</sup>/s.

Element	Plocha (km <sup>2</sup> )	Kulminační průtok (m <sup>3</sup> /s)	Objem (1000 m <sup>3</sup> )
Subbasin-1	5,76	5,74	138,19
Subbasin-2	1,5	1,32	24,65
Junction-1	7,26	7,06	162,84
Subbasin-3	0,61	0,47	16,31
Reach-1	7,26	7,15	162,85
Junction-2	7,87	7,61	179,16

Tab. č. 13 Hodnoty modelu bez nádrže při návrhové srážce N50

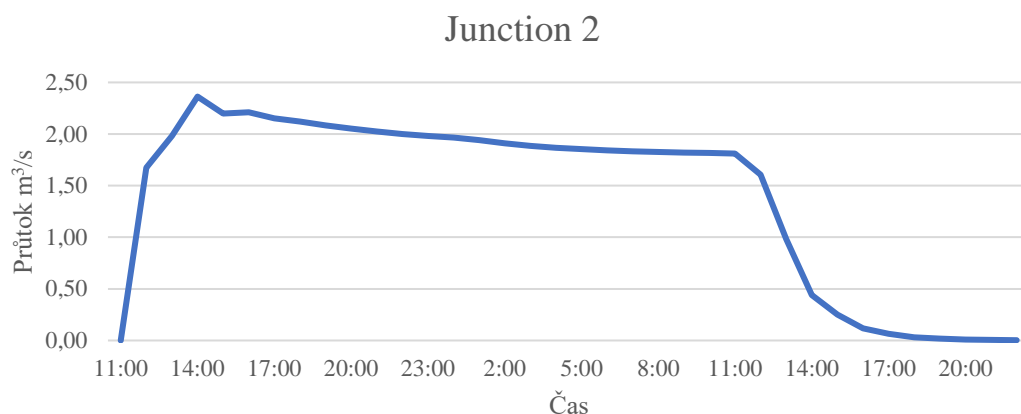
Objem vody proteklé uzávěrovým profilem je více než 2x větší než u modelu srážky s dobou opakování 10 let (viz tab. č. 13). Stejně tvrzení lze použít i na kulminační průtok.



Graf č. 11 Transformace povodňové vlny v nádrži při návrhové srážce N50

Transformace povodňové vlny v modelu nádrže při srážce s dobou opakování 50 let už vytváří zajímavé poměry mezi přítokem, odtokem a akumulací vody (viz graf. č 11). V době 13:00 kulminuje přítok (zhruba po 2 hodinách od zvýšeného průtoku). Ve 12:00 už hodnota odtoku nabývá maximální přípustné hodnoty (1,8 m<sup>3</sup>/s) a zároveň začíná akumulace vody. V čase 21:00 se v nádrži nachází maximální

množství vody při srážce N50, a to zhruba 78 400 m<sup>3</sup>. Tento vrchol se nachází v bodě, kde se hodnota přítoku rovná hodnotě odtoku. Následně objem vody v nádrži klesá, až do skončení odtoku, které nastává po 34 hodinách.



Graf č. 12 Průtok uzávěrovým profilem při návrhové srážce N50 v modelu s nádrží

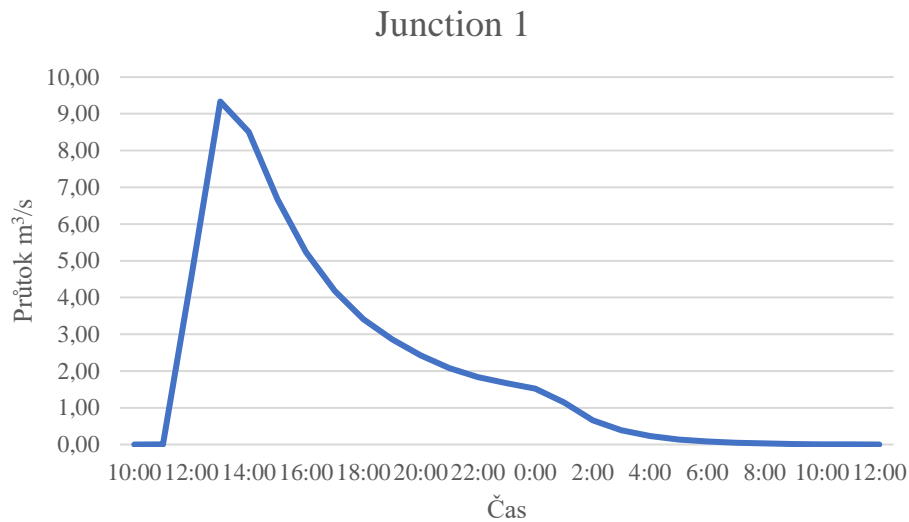
Kulminační průtok při uzávěrovém profilu dosahuje v čase 14:00 hodnoty 2,36 m<sup>3</sup>/s. Pod hodnotu 1,8 klesá v závislosti na odtok z nádrže v čase 12:00, po 22 hodinách (viz graf č. 12).

Element	Kulminační průtok (m <sup>3</sup> /s)
Subbasin-1	5,74
Subbasin-2	1,32
Junction-1	7,06
Reservoir	1,80
Reach-1	1,90
Subbasin-3	0,47
Junction-2	2,36

Tab. č. 14 Hodnoty modelu s nádrží při návrhové srážce N50

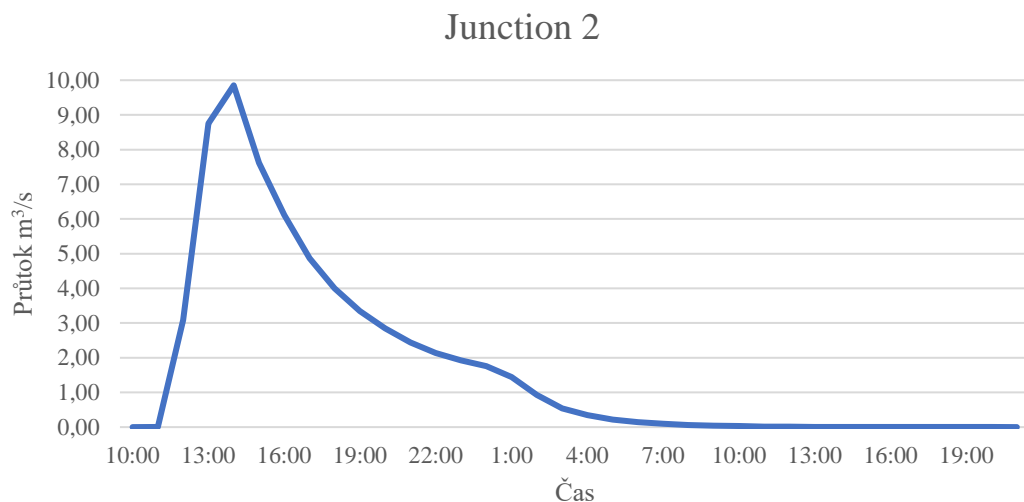
Odtok z povodí se značně blíží mezní hodnotě 2,475 m<sup>3</sup>/s, avšak tuto hodnotu nepřekročí. Ohrožení z důvodu vybřežení koryta Bílského potoka tudíž nehrozí. V tomto případě byl kulminační průtok snížen o necelých 69 % (viz tabulka č. 14).

## 5.4 Srážka s dobou opakování 100 let (N100)



Graf č. 13 Průtok soutokem při návrhové srážce N100 v modelu bez nádrže

Průběh tohoto modelu (graf č. 13) je celkem podobný s průběhem odtoku při srážce s dobou opakování 50 let. Zde ale nabývá kulminační průtok ještě větších hodnot, a to 9,33 m<sup>3</sup>/s. Tento průtok kulminuje v čase 13:00, stejně jako u předešlého modelu.



Graf č. 14 Průtok uzávěrovým profilem při návrhové srážce N100 v modelu bez nádrže

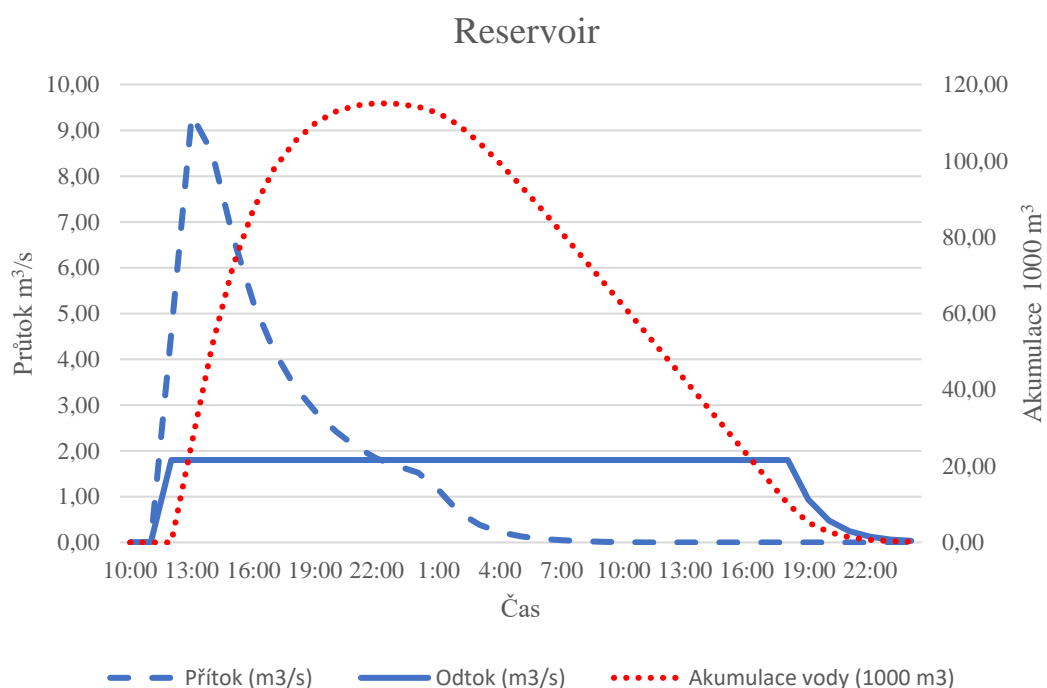
Element Junction 2 zastupující uzávěrový profil povodí Bílského potoka prezentuje kulminaci průtoku v čase 14:00 s hodnotou 9,85 m<sup>3</sup>/s. Konec tohoto odtoku nastává v čase 21:00. Jedná se o značně veliký průtok, který několikanásobně

překračuje kapacitu koryta Bílského potoka s jistě značnou ničivou schopností (viz graf č. 14).

Element	Plocha (km <sup>2</sup> )	Kulminační průtok (m <sup>3</sup> /s)	Objem (1000 m <sup>3</sup> )
Subbasin-1	5,76	7,50	173,20
Subbasin-2	1,5	1,84	32,12
Junction-1	7,26	9,33	205,32
Subbasin-3	0,61	0,59	20,23
Reach-1	7,26	9,26	205,33
Junction-2	7,87	9,85	225,56

Tab. č. 15 Hodnoty modelu bez nádrže při návrhové srážce N100

Zde se jedná už o značně velký průtok blížící se k hodnotě 10 m<sup>3</sup>/s. Objem vody, která odečte uzávěrovým profilem z povodí Bílského potoka je potom 225 560 m<sup>3</sup>.

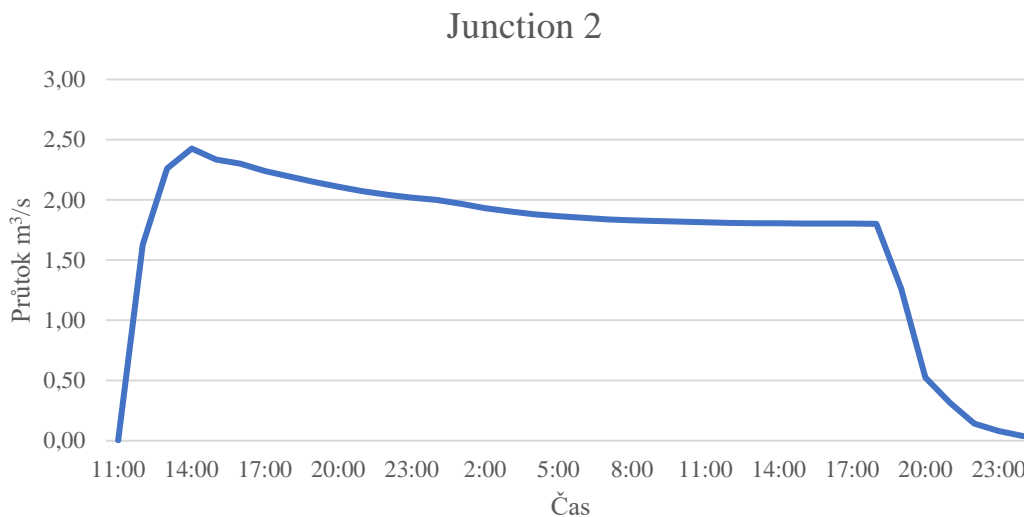


Graf č. 15 Transformace povodňové vlny v nádrži při návrhové srážce N100

Na tomto grafu (graf č. 15) je dobře vidět transformace povodňové vlny v nádrži při velkém průtoku. V čase 12:00, kdy je přítok na skoro polovině svého maxima (4,6 m<sup>3</sup>/s) začíná odtok s maximální hodnotou 1,8 m<sup>3</sup>/s a začíná také akumulace vody. Vrchol akumulace se nachází v čase 22:00 a její maximální dosažená



hodnota je 115 110 m<sup>3</sup> vody. Námi navržená nádrž má kapacitu 129 tisíc m<sup>3</sup>, a to znamená že při modelové srážce s dobou opakování 100 let (N100) dosáhla naplnění z 89 % vlastní kapacity. Ukončení odtoku nastává v čase 0:00, po 38 hodinách.



Graf č. 16 Průtok uzávěrovým profilem při návrhové srážce N100 v modelu s nádrží

Průtok uzávěrovým profilem kulminoval v čase 14:00 v hodnotě 2,43 m<sup>3</sup>/s.

Element	Kulminační průtok (m <sup>3</sup> /s)
Subbasin-1	7,50
Subbasin-2	1,84
Junction-1	9,33
Reservoir	1,80
Subbasin-3	0,59
Reach-1	1,84
Junction-2	2,43

Tab. č. 16 Hodnoty modelu s nádrží při návrhové srážce N100

Kulminační průtok uzávěrovým profilem se značně přiblížil hodnotě maximálního průtoku korytem tok Bílského potoka v blízkosti intravilánu obce Bílsko. V tomto případě ještě převede vodu bez vybřežení.

V tomto případě byl kulminační průtok vlivem vybudování nádrže snížen o více než 75 %.

## 6. Diskuze

Jelikož je většina vstupních dat získána pouze z prostředí počítačových programů, nemáme žádnou kontrolu z měření v zájmovém území. Pro zajištění reálných výsledků je nutné ověření vstupních údajů a následná kalibrace výsledných hodnot. S.-C. Yang a T.-H. Yang (2014) uvádí, že procesy kalibrace a validace minimalizují nejistotu při modelování reálných situací. Porovnání různých události indikuje, že sady parametrů použitelné pro různé extrémní události nemusejí být vždy stejné. Kalibrovaný model HEC-HMS poskytuje spolehlivé odhady načasování a hodnot kulminačních průtoku a akumulace vody v nádrži.

Jeníček (2011) říká, že využití hydrologických modelů pro modelování srážek a odtoků vyvolává mnoho nejistot, problémů a pochybností. Tyto pochybnosti se vztahují k výběru vhodného modelu, kvalitě vstupních dat, volbě časového rozlišení, odhadu počátečních podmínek srážkoodtokového procesu a kalibraci modelu. I samotná kalibrace musí být provedena dobře, aby nedocházelo ke zkreslování výsledků.

Porovnat snížení kulminace s jinými pracemi není tak úplně možné, jelikož každý model se od sebe značně liší. Navíc se liší i každá návrhová situace. Jeníček (2011) při porovnání výsledků změny odtoku vody z povodí na různých uzavěrových profilech došel k hodnotám snížení kulminačního průtoku při 100leté srážce na různě dimenzovaných suchých nádržích cca od 20 do 60 %. V našem případě u srážky s dobou opakování 100 let se ale jedná dokonce o více než 75 % snížení průtoku.

Rozdílné výstupní hodnoty vychází většinou z rozdílných dimenzí nádrží. Jakákoliv vybudovaná nádrž, která má retenční prostor slouží k retenci vody. Vrána (2008) uvádí, že dříve byly vodní nádrže budovány převážně za účelem akumulace vody. V současné době jsou budovány a rekonstruovány nádrže převážně za účelem zadržení vody v krajině, zpomalení odtoku vody a vyrovnávání průtoků v průběhu roku. Lze konstatovat, že malé vodní nádrže se převážně budují jako víceúčelové, přičemž mohou plnit retenční funkci, i když byla nádrž prioritně vybudována za jiným účelem.

## 7. Závěr

Tato práce byla věnována analýze vlivu vodní nádrže na odtok vody z povodí Bílského potoka za použití hydrologického modelu Hec HMS. V literární části byla shrnuta témata týkající se této problematiky a v části praktické podrobně uvedena příprava vstupních dat s následnou aplikací do hydrologického modelu.

Při 2leté návrhové srážce došlo ke kulminaci průtoku zhruba po 4 hodinách od počátku zvýšeného průtoku vlivem návrhové srážky s celkovou hodnotou  $0,46 \text{ m}^3/\text{s}$  a objem odtoku nabyl hodnoty  $16\,800 \text{ m}^3$ . V tomto případě byl průtok bezpečně převeden a nádrž neměla žádný transformační účinek. V případě 10leté srážky měl kulminační průtok hodnotu  $3,27 \text{ m}^3/\text{s}$ , přičemž této hodnoty dosáhl po 3 hodinách od počátku zvýšeného průtoku vlivem návrhové srážky. Při této události proběhla transformace na hodnotu kulminačního průtoku o velikosti  $2,07 \text{ m}^3/\text{s}$ . Celkový objem odtoku byl  $86\,150 \text{ m}^3$ , přičemž největší hodnota akumulace vody v nádrži dosáhla  $11\,000 \text{ m}^3$ . Průtoky vyvolané 50letou a 100letou srážkou mají velmi podobný průběh i následný průběh transformace v nádrži. Kulminace průtoku se objevila už po 2 hodinách od počátku zvýšeného průtoku vlivem návrhové srážky a měla hodnoty  $7,61$  a  $9,85 \text{ m}^3/\text{s}$ . Objem odtoku při 50leté srážce měl hodnotu  $179\,160 \text{ m}^3$  a maximální akumulace vody dosáhla hodnoty  $78\,400 \text{ m}^3$ . Při 100leté srážce činil objem odtoku až  $225\,560 \text{ m}^3$  a v nádrži bylo akumulováno  $115\,110 \text{ m}^3$ . Kulminační průtoky byly transformovány na hodnoty  $2,36$  a  $2,43 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Výsledky ukazují, že námi navržená suchá nádrž dokáže bezpečně přetransformovat veliké a nebezpečné povodňové vlny, v nejextrémnějším případě až o 75 % snížit kulminační průtok ohrožující intravilán obce. S ohledem na různé nejistoty v modelu by bylo vhodné při realizaci využít větších dimenzí za účelem jistoty a maximální účelnosti navržených opatření. Dále by stálo za úvahu řešit nádrž jako víceúčelovou, hlavně pro akumulaci vody v době sucha, jelikož sucho je v dnešní době také velmi diskutovaným tématem.

## 8. Zdroje

*BEDNÁŘ, Jan. Meteorologie: [úvod do studia dějů v zemské atmosféře]. Praha: Portál, 2003. ISBN 80-7178-653-5.*

*BRÁZDIL, Rudolf. Historie počasí a podnebí v Českých zemích. Brno: Masarykova univerzita v Brně, 2005. ISBN 80-210-3864-0.*

*BROŽA, Vojtěch. Vodní hospodářství a vodní stavby. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1988.*

*DHI SOFTWARE. MIKE SHE PP – User Manual: Water Balance Utiliti. Hørsholm, Denmark, 2000.*

*DHI SOFTWARE. MIKE SHE: Volume1: User Guide. Hørsholm, Denmark, 2017.*

*DHI SOFTWARE. MIKE SHE: Volume2: Reference Guide. Hørsholm, Denmark, 2000.*

*DOTSON, Harry W. Watershed Modeling With HEC-HMS (Hydrologic Engineering Centers-Hydrologic Modeling System) Using Spatially Distributed Rainfall. Coping With Flash Floods: NATO Science Series. Springer, Dordrecht, 2001, Series 2. Environmental Security (77), 219-230.*

*DUMBROVSKÝ, Miroslav. Pozemkové úpravy. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 8021426683.*

*FELDMAN, A.D. (Ed.), Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual. USACE, Davis, 2000.*

*FLAMING, Matt. Description of the Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) and Application to Watershed Studies. SMART. ERDC/TN, 2004, 4(3), 1-17*

GERGEL, Jiří. *Ochrana krajinného prostředí pomocí malých vodních nádrží: Metodika*. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 1992.

HAVLÍČEK, Vladimír. *Agrometeorologie: celostátní vysokoškolská učebnice pro vysoké školy zemědělské*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1986. Rostlinná výroba (Státní zemědělské nakladatelství).

HUBAČÍKOVÁ, Věra. *Hydrologie*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2002. ISBN 80-7157-638-7

HORNÍK, Stanislav. *Základy fyzické geografie*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1982. Učebnice pro vysoké školy (Státní pedagogické nakladatelství).

HRÁDEK, František a Karel KUŘÍK. *Maximální odtok z povodí: teorie svahového odtoku a hydrologický model DesQ-MAX Q*. Praha: Credit, [2001]. ISBN 80-213-0782-X.

JANEČEK, Miloslav. *Ochrana zemědělské půdy před erozí: metodika*. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 2007. ISBN 978-80-254-0973-2.

JANEČEK, Miloslav. *Ochrana zemědělské půdy před erozí: metodika*. Praha: Powerprint, 2012. ISBN 978-80-87415-42-9.

JANDORA, Jan. *Hydraulika a hydrologie*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005.

JENÍČEK, Michal. *Možnosti využití srážko-odtokových modelů na malých a středně velkých povodích*. In Langhammer, J. (ed): *Vliv změn přírodního prostředí povodí a údolní nivy na povodňové riziko*. Praha: PřF UK, s. 112-126.

JENÍČEK, Michal a Alice TAUFMANNOVA. *Impact of polder system on flooding in the Rolava River basin*. 2011.

*JEŽEK, Josef. Geostatistika a prostorová interpolace. Univerzita Karlova v Praze: Karolinum, 2015. ISBN 978-80-246-3104-2.*

*JŮVA, Karel. Malé vodní nádrže. Praha, 1980.*

*KAVKA, Petr, Miloslav MÜLLER, Luděk STROUHAL, et al. Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině: metodika. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2018. ISBN 978-80-01-06363-7.*

*KEMEL, Miroslav. Klimatologie, meteorologie, hydrologie. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01456-8.*

*KOPÁČEK, Jaroslav a Jan BEDNÁŘ. Jak vzniká počasí. V Praze: Karolinum, 2005. ISBN 80-246-1002-7.*

*KOVÁŘ, P, M JANEČEK, M HRABALÍKOVÁ a H BAČINOVÁ. Manuální metody čísel odtokových křivek – CN: Upravená metodika 2015 TAČR TA02020402, Základní postup práce v prostředí GIS. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra biotechnických úprav krajiny, Fakulta životního prostředí, 2015.*

*KOVÁŘ, P, M SŮVA a H BAČINOVÁ. Identifikace ohroženosti povodí N-letými návrhovými dešti "DES\_RAIN": DES\_RAIN\_Constant a DES\_RAIN\_Variable. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra biotechnických úprav krajiny, Fakulta životního prostředí, 2015.*

*KREŠL, Jiří. Hydrologie. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2001. ISBN 80-7157-513-5.*

*KUBINSKÝ, Daniel. Nepriamy výpočet objemu a plochy vodnej nádrže v prostredí ArcGis. Daniel Kubinský osobná stránka [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z:*

<https://www.dkubinsky.sk/blog/gis/nepriamy-vypocet-objemu-a-plochy-vodnej-nadrze-v-prostredi-arcgis>

*KVÍTEK, Tomáš a Martin TIPPL. Ochrana povrchových vod před dusičnany z vodní eroze a hlavní zásady protierozní ochrany v krajině. Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací, c2003. Zemědělské informace. ISBN 80-7271-140-7.*

*KVÍTEK, Tomáš, Jiří GERGEL a Gabriela KVÍTKOVÁ. Využití a ochrana vodních zdrojů. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta, 2005. ISBN 8070407735.*

*LINSLEY, Ray K., Max Adam KOHLER a Joseph L. H. PAULHUS. Hydrology for engineers. 2d ed. New York: McGraw-Hill, 1975. ISBN 0070379673.*

*MATĚJÍČEK, Josef a Josef HLADNÝ. Povodňová katastrofa 20. století na území České republiky. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 1999. ISBN 80-7212-130-8.*

*MAYS, Larry W. Water resources engineering. Third edition. Hoboken, NJ: Wiley, [2019]. ISBN 9781119490579.*

*NETOPIL, Rostislav. Hydrologie pevnin. Praha: Academia, 1972.*

*NĚMEC, Jaromír. Hydrologie. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1965.*

*PAVELKOVÁ CHMELOVÁ, Renata a Jindřich FRAJER. Základy fyzické geografie 1: Hydrologie. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013. ISBN 9788024438436.*

*PAVLICA, Jan. Malé vodní nádrže a rybníky. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.*

ŘÍHA, Jaromír. *Návrh a realizace suchých nádrží z pohledu technickobezpečnostního dohledu*. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2014. ISBN 9788072126002.

SALEH, A., R. GHOBAD a N. ROSTAMI. *Evaluation of HEC-HMS methods in surface runoff simulation (Case study: Kan watershed, Iran)*. 5. 2011. 1316-1321.

SOMMER, Miroslav. *Hydrologie*. 3. přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.

SOUKUPOVÁ, Jana. *Atmosférické procesy: (základy meteorologie a klimatologie)*. Vyd. 4., přeprac. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2009. ISBN 978-80-213-1895-3.

STARÝ, Miloš. *Hydrologie*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005.

SYNKOVÁ, Jana a Karel ZLATUŠKA. *Malé vodní nádrže: cvičení*. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2003. ISBN 80-7157-672-7.

ŠÁLEK, Jan. *Malé vodní nádrže a životní prostředí*. Brno: Dům techniky ČSVTS, 1987.

ŠÁLEK, Jan. *Malé vodní nádrže v zemědělské krajině: (studijní zpráva)*. Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací, c2000. Studijní informace. ISBN 8072710516.

ŠEDIVÝ, Vilém a Karel VRÁNA. *Vodní hospodářství: hydraulika, malé vodní nádrže, revitalizace krajiny*. Vodňany: Střední rybářská škola a Vyšší odborná škola vodního hospodářství a ekologie, 2011. ISBN 9788087096147.

ŠRÁČEK, Ondřej a Tomáš KUCHOVSKÝ. *Základy hydrogeologie*. Brno: Masarykova univerzita, 2003. ISBN 80-210-3146-8.



*TLAPÁK, Václav a Jaroslav HERYNEK. Malé vodní nádrže. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2002. ISBN 8071576352.*

*TNV 75 2415. Odvětvová technická norma vodního hospodářství: Suché nádrže. Praha: Sweco Hydroprojekt, 2013.*

*TRIZNA, Milan. Klimageografia a hydrogeografia. 1. vyd. Bratislava: Geo-grafika, 2004. 154 s. ISBN 8096814672.*

*Uhliř, Pavel. Meteorologie: I. díl. Základy obecné meteorologie, klimatologie a fenologie a data o nárocích zemědělských kultur a zvířat na podnebí a počasí. 1958*

*US ARMY CORPS OF ENGINEERS. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual. Davis, CA USA, 2000.*

*US ARMY CORPS OF ENGINEERS. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Quick Start Guide. Version 3.1.0. Davis, CA USA, 2006.*

*US ARMY CORPS OF ENGINEERS. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual. Version 4.0. Davis, CA USA, 2013.*

*US ARMY CORPS OF ENGINEERS. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual. Version 4.3. Davis, CA USA, 2018.*

*VOLOŠ, Boris. Vliv časového kroku záznamu srážky na tvar a průběh povodňové vlny: Závěrečná zpráva za rok 2004, AV – Ústav pro hydrodynamiku.*

*VOTRUBA, Ladislav a Vojtěch BROŽA. Hospodaření s vodou v nádržích: vysokoškolská příručka. Praha: SNTL, 1966. Řada stavební literatury.*

*VRÁNA, Karel. Revitalizace krajiny. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta, 2009. ISBN 9788073941604.*

*VRÁNA, Karel a Jan BERAN. Rybníky a účelové nádrže. Vyd. 3. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-04002-7.*

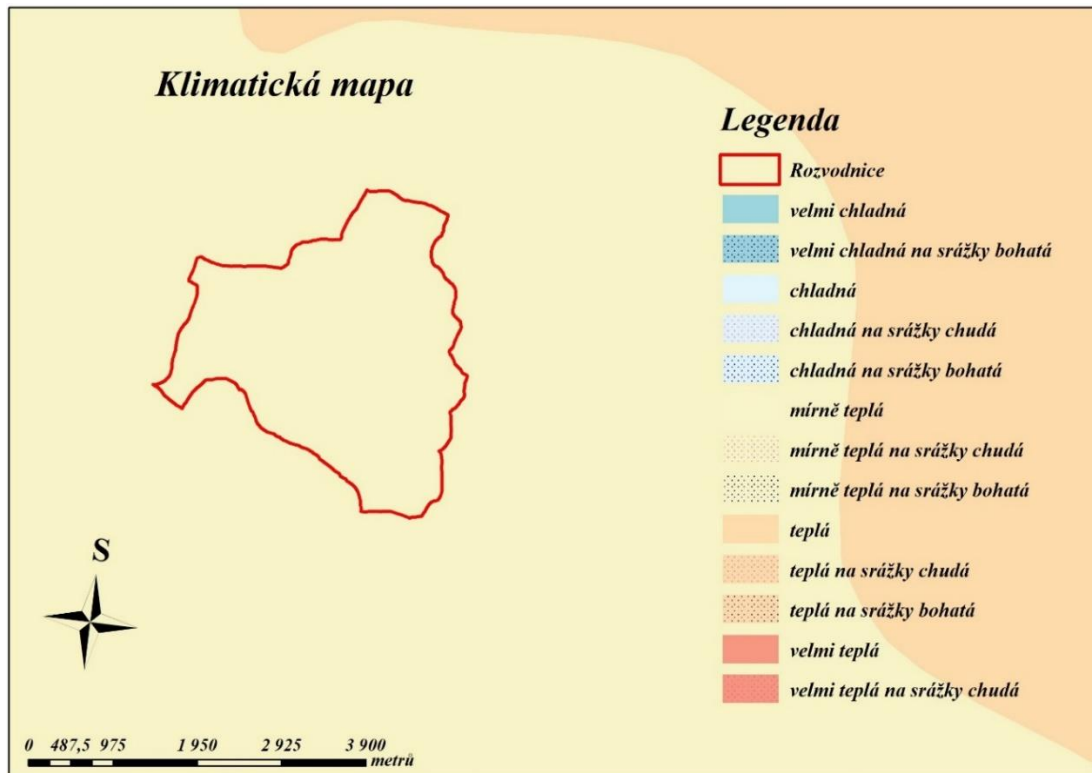
*VYSOUDIL, Miroslav. Základy fyzické geografie 1: Meteorologie a klimatologie. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013. ISBN 978-80-244-3892-4.*

*Předpis č. 254/2001 Sb.: Zákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon). (úplné znění). Znění od 1. 1. 2019*

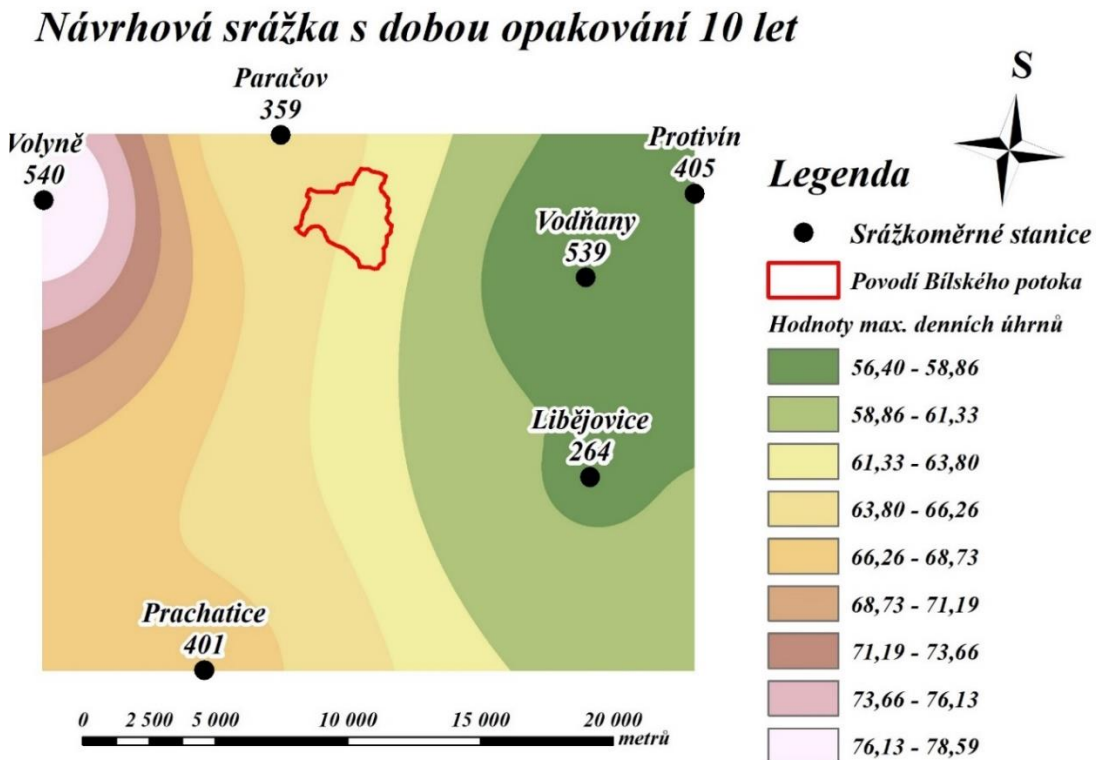
*YANG, Sheng-Chi a Tsun-Hua YANG. Uncertainty Assessment: Reservoir Inflow Forecasting with Ensemble Precipitation Forecasts and HEC-HMS. Taiwan Typhoon and Flood Research Institute, National Applied Research Laboratories, 11 F, No. 97, Section 1, Roosevelt Road, Zhongzheng District, Taipei 10093, Taiwan. 2014.*



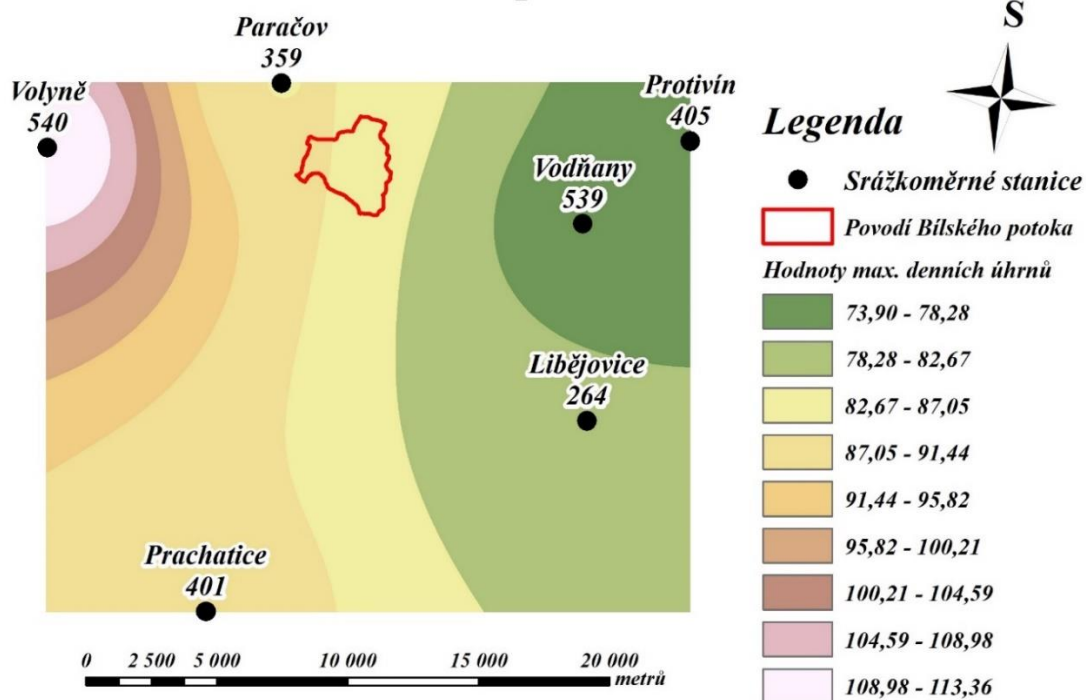
Příloha č. 3. Klimatická mapa



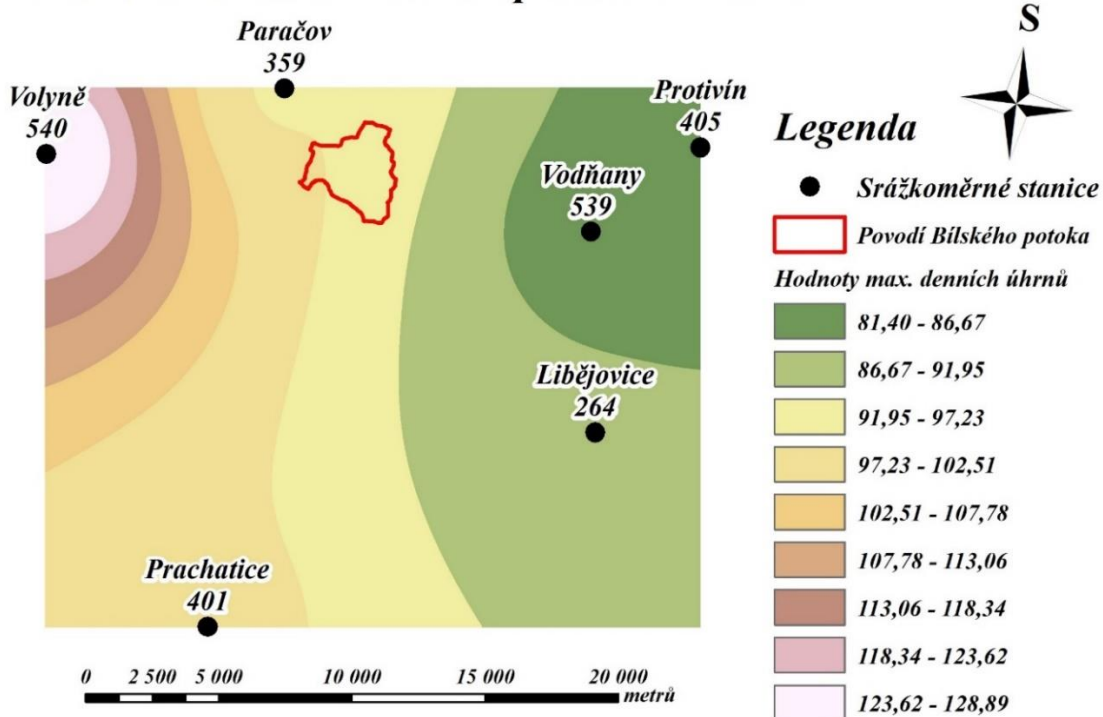
Příloha č.4. Interpolace srážky s dobou opakování 10 let



### Návrhová srážka s dobou opakování 50 let

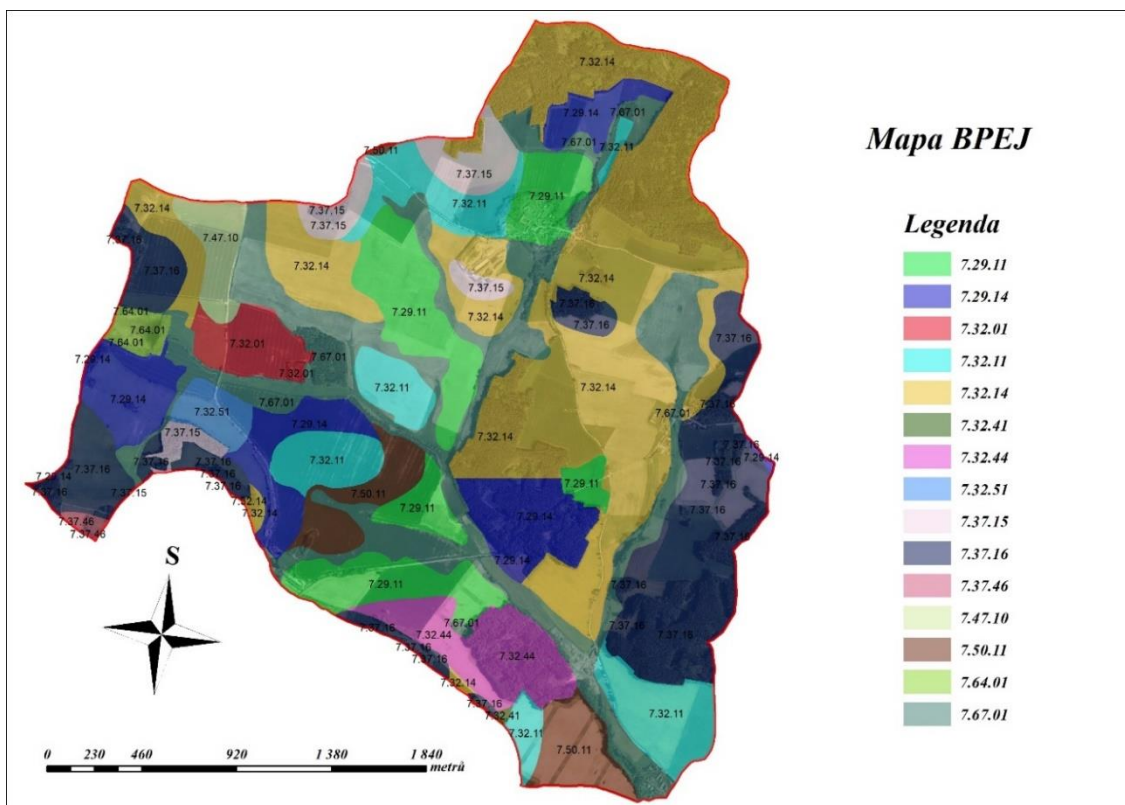


### Návrhová srážka s dobou opakování 100 let

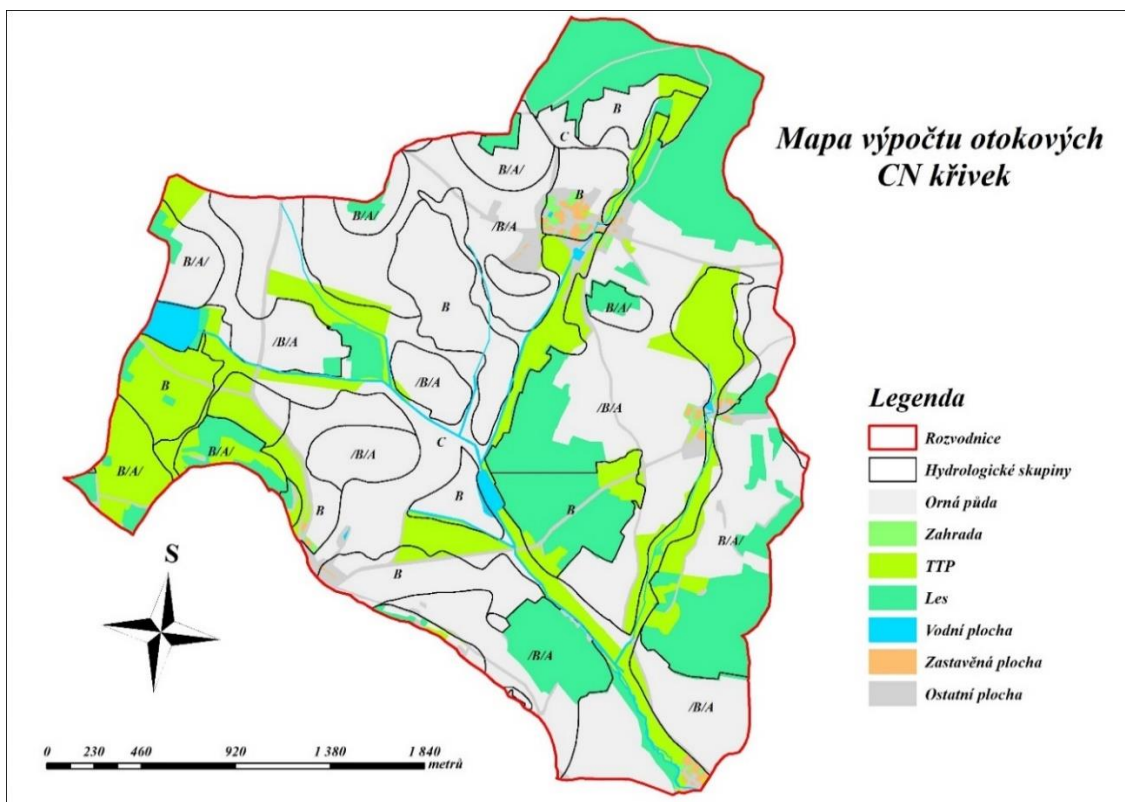




Příloha č.6. Mapa BPEJ



Příloha č.7. Mapa výpočtu odtokových křivek CN



Příloha č.8. Postup výpočtu doby koncentrace pro subpovodí 1

### Výpočet kulminačního průtoku pomocí CN - křivek

Zadání vstupních hodnot

Plocha povodí :  ha

Průměrné CN :

Max. 24-h srážkový úhrn :  mm

Opravný koef. nádrží :  mm

Přímý odtok : **2.25** mm

la / Hs : **0.56**

OpH : **12952.85** m<sup>3</sup>

qpH = **0.21**

QpH = **0.64** m<sup>3</sup>/s

Celková doba koncentrace

Plošný povrchový odtok

Délka : l =  m    Hydraulický sklon : s =  tg α

Drsnost : n =  ...    Dvouletý 24-h déšť : Hs2 =  mm

Tta = **0.617** h

Soustředěný odtok o malé hloubce

Délka : l =  m    Hydraulický sklon : s =  tg α

Povrch na zájmovém území

Nedlážděný    Rychlost : v =  m /s

Dlážděný    Ttb = **0.059** h

Soustředěný odtok v otevřeném korytě

Délka : l =  m    Hydraulický sklon : s =  tg α

Drsnost : n =  ...    Plocha příč. profilu : F =  m<sup>2</sup>

Rychlost : v =  m /s    Omočený obvod : O =  m

Ttc = **0.207** h    Hydraulický ploměr : R =  m

Tc = **0.883** h

Příloha č.9. Postup výpočtu doby koncentrace pro subpovodí 2

### Výpočet kulminačního průtoku pomocí CN - křivek

Zadání vstupních hodnot

Plocha povodí :  ha

Průměrné CN :

Max. 24-h srážkový úhrn :  mm

Opravný koef. nádrží :  mm

Přímý odtok : **0.62** mm

la / Hs : **0.75**

OpH : **932.27** m<sup>3</sup>

qpH = **0.11**

QpH = **0.03** m<sup>3</sup>/s

Celková doba koncentrace

Plošný povrchový odtok

Délka : l =  m    Hydraulický sklon : s =  tg α

Drsnost : n =  ...    Dvouletý 24-h déšť : Hs2 =  mm

Tta = **0.469** h

Soustředěný odtok o malé hloubce

Délka : l =  m    Hydraulický sklon : s =  tg α

Povrch na zájmovém území

Nedlážděný    Rychlost : v =  m /s

Dlážděný    Ttb = **0.158** h

Soustředěný odtok v otevřeném korytě

Délka : l =  m    Hydraulický sklon : s =  tg α

Drsnost : n =  ...    Plocha příč. profilu : F =  m<sup>2</sup>

Rychlost : v =  m /s    Omočený obvod : O =  m

Ttc = **0.084** h    Hydraulický ploměr : R =  m

Tc = **0.711** h

Příloha č.10. Postup výpočtu doby koncentrace pro subpovodí 3

### Výpočet kulminačního průtoku pomocí CN - křivek

Zadání vstupních hodnot

Plocha povodí :  ha

Průměrné CN :

Max. 24-h srážkový úhrn :  mm

Opravný koef. nádrží :  mm

Přímý odtok :  mm

la / Hs :

OpH :  m<sup>3</sup>

qpH =

QpH =  m<sup>3</sup>/s

Celková doba koncentrace

Plošný povrchový odtok

Délka : l =  m    Hydraulický sklon : s =  tg α

Drsnost : n =  ...    Dvouletý 24-h déšť : Hs2 =  ... mm

Tta =  h

Soustředěný odtok o malé hloubce

Délka : l =  m    Hydraulický sklon : s =  tg α

Povrch na zájmovém území

Nedlážděný    Rychlost : v =  m /s

Dlážděný    Ttb =  h

Soustředěný odtok v otevřeném korytě

Délka : l =  m    Hydraulický sklon : s =  tg α

Drsnost : n =  ...    Plocha příč. profilu : F =  m<sup>2</sup>

Rychlost : v =  m /s    Omočený obvod : O =  m

Ttc =  h    Hydraulický ploměr : R =  m

Tc =  h