

Česká zemědělská univerzita v Praze



Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

**Využití hydrologického modelu HEC-HMS pro predikci
maximálních odtoků z povodí**

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Radek Roub, Ph.D.

Diplomant: Tomáš Mach

2019

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Tomáš Mach

Environmentální modelování

Název práce

Využití hydrologického modelu HEC-HMS pro predikci maximálních odtoků z povodí

Název anglicky

Application of the HEC-HMS hydrological model for prediction of maximum outflows from catchments

Cíle práce

1. První cíl se týká zpracování rešerše odborných publikací s pomocí informací získaných studiem na téma týkající se dané problematiky. V této části bude popsán srážko-odtokový proces, dále principy a druhy jednotkových hydrogramů. Poté budou analyzovány důležité geometrické a hydrologické charakteristiky nepozorovaného povodí. Následně se provede zpracování různých přístupů k hydrologickému modelování se zaměřením se na konkrétní hydrologické modely.
2. Druhým cílem je zhotovení detailního land use (využití území) pro řešenou oblast nezbytného k odvození čísel odtokových CN křivek. Budou vypočteny a analyzovány charakteristiky zkoumaného povodí v podrobném měřítku. Dojde k sestavení hydrologicky korektního srážko-odtokového modelu v prostředí programu HEC-HMS pro predikci kulminačních průtoků, určení průběhu povodňové vlny a objemů odtoku z povodí. Následně bude zpracována metoda odtokových CN křivek pro obecný odhad kulminačního průtoku a objemu odtoku řešeného povodí.
3. Posledním třetím cílem je aplikace obou metod pro zkoumané nepozorované povodí při různých vstupních srážkách a zkoumání reakce tohoto povodí. Provedení volby vhodných vstupních parametrů modelu na základě odvozených charakteristik povodí a také prezentace výstupů a jejich zhodnocení.

Metodika

Diplomová práce se zabývá problematikou tvorby hydrologického modelu v konkrétní lokalitě s použitím srážko-odtokového modelu HEC-HMS. Práce je zaměřena na zpracování odborných informací k tématu hydrologických modelů a dalších nezbytných komponentů pro tvorbu a správnou aplikaci modelu. Nejdříve je představen obecný pohled na srážko-odtokový proces, dále je interpretována klasifikace modelů, jejich výhody a nevýhody. Další část je věnována celkovému procesu tvorby hydrologického modelu v konkrétním prostředí modelu HEC-HMS. V procesu je zahrnuto získání potřebných dat, jejich úprava a zpracování, posléze práce v Geografickém informačním systému (GIS). Pre-processing, jenž je nezbytný pro přípravu dat a podkladních vrstev pro program HEC-HMS, se aplikuje v prostředí ArcGIS především pomocí nástrojů ArcHydroTools a HECGeoHMS.

Za velmi důležité procesy pro správné sestavení modelu se považuje optimální odhad parametrů z charakteristik povodí. Jelikož se jedná o nepozorované povodí, není možné výsledky kalibrovat a verifikovat pozorovanými daty, konkrétně průtoky. Při práci s hydrologickým modelem bylo z tohoto důvodu pečlivě

přístupováno k volbě správných vstupních parametrů do modelu. Proto se podrobně zpracovaly a analyzovaly všechny potřebné charakteristiky povodí takovým způsobem, aby byly vstupní parametry modelu co nejvhodnější. V diplomové práci je také velmi podrobně vytvořena mapa využití území (land use). Značnou část práce představuje sestavení modelu v programu HEC-HMS. Následné simulace byly provedeny pro různé srážkové vstupy, aby bylo možné pozorovat odtokovou odezvu povodí. Jako kontrolní metoda programu HEC-HMS byla sestavena metoda CN-křivek. Metoda odtokových CN křivek byla zhotovena především pro prvotní odhad hodnot odtoků z povodí a také pro porovnání výsledků. Výstupy obou metod jsou vyhodnoceny pro uzávěrový profil povodí ležící v obci Tajanov. Jsou porovnány výsledky obou metod a různých transformačních funkcí programu HEC-HMS. Závěrečná část práce představuje prezentaci dat společně s vhodnou vizualizací výsledků modelu. Je provedeno a analyzováno zhodnocení možností využití modelu HEC-HMS a odtokových CN křivek pro nepozorované povodí.

Doporučený rozsah práce
cca 60 stran + grafické přílohy

Klíčová slova

srážko-odtokový proces, sestavení modelu, program HEC-HMS, CN křivky, nepozorované povodí, kulminační průtok, parametry modelu

Doporučené zdroje informací

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. LESNICKÁ FAKULTA, – HRÁDEK, F. – KUŘÍK, P. *Hydrologie*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Lesnická fakulta ve vydavatelství Credit, 2002. ISBN 80-213-0950-4.

DAŇHELKA, J. *Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2003. ISBN 80-213-1003-0.

CHOW T., MAIDMENT D., MAYS W. *Applied Hydrology*. International Edition, Singapore, 1988. ISBN 0-07-100174-3.

SCHARFFENBERG B., BARTLES M., BRAUER T., FLEMING M., KARLOVITS G. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual*. Version 4. 3. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, 2018. 640 pp.

Předběžný termín obhajoby
2019/20 LS – FŽP

Vedoucí práce
Ing. Radek Roub, Ph.D.

Garantující pracoviště
Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 13. 11. 2019

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.
Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 25. 11. 2019

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.
Děkan

V Praze dne 25. 11. 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Využití hydrologického modelu HEC-HMS pro predikci maximálních odtoků z povodí vypracoval samostatně pod vedením Ing. Radka Rouba, Ph.D. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Ve Svrčovci dne 10. 11. 2019

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Radkovi Roubovi, Ph.D. za vedení práce a poskytnutí odborných rad. Mé poděkování patří lidem v mé zájmové oblasti za poskytnuté informace. Děkuji též svým rodičům a přítelkyni za jejich podporu při studiu a při psaní diplomové práce.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou tvorby hydrologického modelu v konkrétní lokalitě s použitím srážko-odtokového modelu HEC-HMS. Práce je zaměřena na zpracování odborných informací k tématu hydrologických modelů a dalších nezbytných komponentů pro tvorbu a správnou aplikaci modelu. Nejdříve je představen obecný pohled na srážko-odtokový proces, dále je interpretována klasifikace modelů, jejich výhody a nevýhody. Další část je věnována celkovému procesu tvorby hydrologického modelu v konkrétním prostředí modelu HEC-HMS. V procesu je zahrnuto získání potřebných dat, jejich úprava a zpracování, posléze práce v Geografickém informačním systému (GIS). Pre-processing, jenž je nezbytný pro přípravu dat a podkladních vrstev pro program HEC-HMS, se aplikuje v prostředí ArcGIS především pomocí nástrojů ArcHydroTools a HECGeoHMS.

Za velmi důležité procesy pro správné sestavení modelu se považuje optimální odhad parametrů z charakteristik povodí. Jelikož se jedná o nepozorované povodí, není možné výsledky kalibrovat a verifikovat pozorovanými daty, konkrétně průtoky. Při práci s hydrologickým modelem bylo z tohoto důvodu pečlivě přistupováno k volbě správných vstupních parametrů do modelu. Proto se podrobně zpracovaly a analyzovaly všechny potřebné charakteristiky povodí takovým způsobem, aby byly vstupní parametry modelu co nejvhodnější. V diplomové práci je také velmi podrobně vytvořena mapa využití území (land use). Značnou část práce představuje sestavení modelu v programu HEC-HMS. Následné simulace byly provedeny pro různé srážkové vstupy, aby bylo možné pozorovat odtokovou odezvu povodí. Jako kontrolní metoda programu HEC-HMS byla sestavena metoda CN-křivek. Metoda odtokových CN křivek byla zhotovena především pro prvotní odhad hodnot odtoků z povodí a také pro porovnání výsledků. Jsou porovnány výsledky obou metod a různých transformačních funkcí programu HEC-HMS. Závěrečná část práce představuje prezentaci dat společně s vhodnou vizualizací výsledků modelu. Je provedeno a analyzováno zhodnocení možností využití modelu HEC-HMS a odtokových CN křivek pro nepozorované povodí.

Klíčová slova

Srážko-odtokový proces, sestavení modelu, program HEC-HMS, CN křivky, nepozorované povodí, kulminační průtok, parametry modelu

Abstract

The diploma thesis deals problems of creating a hydrological model in a specific location using HEC-HMS rainfall-runoff model. The work is focused on the processing of technical information on the topic of hydrological models and other necessary components for the creation and correct application of the model. First, a general view of the precipitation-runoff process is introduced, then the classification of models, their advantages and disadvantages are interpreted. The next part is devoted to the overall process of creating a hydrological model in a specific environment of the HEC-HMS model. The process includes the acquisition of necessary data, their modification and processing, then work in the Geographic Information System (GIS). Pre-processing, which is necessary for the preparation of data and underlying layers for the HEC-HMS program, is applied in the ArcGIS environment mainly using the ArcHydroTools and HECGeoHMS tools.

Optimum estimation of the parameters from the river basin characteristics is considered as a very important process for correct model building. Since this is an unobserved river catchment, it is not possible to calibrate and verify the results with the observed data, namely the flow rates. Therefore, when working with the hydrological model, the correct input parameters for the model were carefully approached. Therefore, all necessary catchment characteristics were compiled and analyzed in such a way that the input parameters of the model were as appropriate as possible. The diploma thesis also contains a very detailed map of land use. A great part of the work is the model building in HEC-HMS. Subsequent simulations were carried out for various precipitation inputs in order to observe the catchment runoff response. As a control method of the HEC-HMS program the CN-curves method was constructed. The method of runoff CN curves was made mainly for the initial estimation of runoff values and also for comparison of results. The results of both HEC-HMS transformation methods and different transformation functions are compared. The final part of the thesis presents data presentation together with a suitable visualization of model results. The evaluation of the possibilities of using the HEC-HMS model and runoff CN curves for the unobserved catchment area is evaluated and analyzed.

Keywords

Rainfall-runoff process, model building, HEC-HMS program, CN curves, unobserved catchment, peak flow, model parameters

OBSAH

1. Úvod.....	12
2. Cíle práce	14
3. Literární rešerše	15
3.1. Pojmy a terminologie používaná v hydrologii související s modelováním	15
3.2. Srážko – odtokový proces	16
3.2.1. Dynamika a bilanční rovnice hydrologického systému	16
3.2.2. Srážky	19
3.2.3. Odtokový proces	21
3.2.4. Doba dotoku a koncentrace.....	22
3.2.5. Jednotkový hydrogram.....	23
3.3. Povodí a jeho charakteristiky	26
3.3.1. Povodí	26
3.3.2. Charakteristiky povodí.....	27
3.4. Rozdělení a popis matematických modelů používaných v hydrologii.....	32
3.4.1. Modelování hydrologických procesů.....	32
3.4.2. Klasifikace matematických modelů podle WMO	33
3.4.3. Klasifikace modelů podle Singha	37
3.4.4. Rozdíly mezi celistvými a distribuovanými modely a jejich aplikace.....	41
3.5. Hydrologický model HEC-HMS	42
3.6. Metoda CN křivek.....	43
4. Metodika	45
4.1. Charakteristika zájmového území.....	45
4.2. Základní charakteristiky povodí.....	46
4.2.1. Geometrické charakteristiky	47
4.2.2. Orografické poměry v povodí	48
4.2.3. Půdní a geologické charakteristiky povodí	48
4.2.4. Vegetace v povodí.....	52
4.2.5. Akumulace vody a vodní plochy v povodí	53
4.2.6. Říční síť povodí	55
4.2.7. Antropogenní činnost.....	57
4.3. Podklady a příprava dat pro program HEC-HMS.....	57
4.3.1. Použité programy a nástroje.....	57
4.3.2. Vstupní data	58
4.3.3. Tvorba podkladových vrstev.....	58
4.4. Stanovení návrhového deště.....	62
4.4.1. Návrhový déšť pro epizodní model.....	62

4.4.2.	N-letý návrhový déšť	62
4.5.	Doba dotoku a doba koncentrace	63
4.5.1.	Metoda SCS pro vypočtení doby koncentrace	63
4.5.2.	Výpočet doby doběhu a koncentrace dle metodiky Janečka a kol.	64
4.6.	Stanovení hodnoty odtokových CN křivek	68
4.6.1.	Postup pro stanovení odtokových křivek CN pro lesy a ornou půdu	73
4.6.2.	Stanovení čísla odtokových CN křivek a retence celého povodí	75
4.7.	Stanovení přímého odtoku a kulminačního průtoku metodou odtokových CN křivek	76
4.7.1.	Stanovení výšky a objemu přímého odtoku z povodí	77
4.7.2.	Výpočet kulminačního průtoku v uzávěrovém profilu povodí	78
4.8.	Příprava dat v prostředí ArcMap pro program HEC-HMS	80
4.8.1.	Nástroje ArcHydroTools	80
4.8.2.	Příprava dat nástroji HecGeoHMS	83
4.9.	Modelování v programu HEC-HMS	89
4.9.1.	Kompatibilita HECGeoHMS a programem HEC-HMS	89
4.9.2.	Sestavení vstupních dat a spuštění simulace	90
4.9.3.	Struktura, chování a vstupní parametry modelu	91
5.	Výsledky	94
5.1.	Výstupné hodnoty ze simulací v programu HEC-HMS	94
5.1.1.	Simulace 1 (2 – denní vstupní srážka)	94
5.1.2.	Simulace 2 v programu HEC-HMS (N-leté srážky odvozené pro dobu trvání 169 minut)	95
5.2.	Výsledné kulminační průtoky a objemy odtoku podle metody odtokových CN křivek	99
5.3.	Porovnání obou použitých metod	100
5.4.	Retenční schopnost povodí	101
6.	Diskuze	102
7.	Závěr	103
8.	Seznam literatury a použitých zdrojů	105
8.1.	Literatura	105
8.2.	Internetové zdroje	108
8.3.	Legislativní zdroje a normy	109
9.	Seznam obrázků a tabulek	110
10.	Seznam zkratk	113
11.	Seznam příloh	114

1. Úvod

Vzhledem k rostoucím změnám v životním prostředí a výskytu stále častějších extrémních událostí jak po celém světě, tak i v České republice vzniká potřeba změny v přístupu lidstva k přírodě. Diplomová práce je zaměřena na jednu v našich geografických podmínkách nejčastěji se vyskytující živelnou pohromu – tj. povodeň. Převážně v posledních dvou desetiletích docházelo na našem území k častému výskytu zmíněných extrémních jevů. Jedná se především o již uvedené povodně či v poslední době stále více se projevující období sucha.

V souvislosti s těmito událostmi vzniká potřeba predikce a modelování hydrologických procesů pro návrhové a další účely. V ruku v ruce s vývojem informačních technologií se vyvíjí odvětví numerického modelování v hydrologii, jež se dnes díky stále více se rozvíjející a dostupnější počítačové technice a softwarového vybavení hojně využívá při modelování hydrologických jevů.

Diplomové práce je situována do několika částí. První část představuje literární rešerši, jež má za úkol popsat základní terminologii v hydrologickém modelování, srážko-odtokový proces, jednotkový hydrogram, předpoklady hydrologického modelování. Je zde zpracována teorie hydrologických a geometrických charakteristik povodí a jejich důležitost pro sestavení modelu. Dále je popsáno rozdělení a charakteristika jednotlivých přístupů v matematickém modelování zejména dle organizace WMO (world meteorological organisation) s uvedením určitých výhod a nevýhod, způsobů použití pro různé situace. V dané části jsou detailněji analyzovány dvě metody hydrologického modelování, které byly v diplomové práci využity.

Metodika, jež představuje druhou část této práce, je zaměřena na popis zájmového území a stanovení jednotlivých charakteristik nepozorovaného povodí. Dále je velmi detailně analyzováno využití krajiny tj. land use uvedené lokality. Z informací o složení ploch v řešené oblasti jsou dále zpracovány a odvozeny hodnoty odtokových CN křivek. Získané údaje byly posléze použity u obou metod hydrologického modelování. Pro simulaci odtoku z povodí byla provedena metoda odtokových CN křivek především pro svoji jednoduchost a široké užití v praxi. Tento postup slouží převážně k obecnému výpočtu kulminačních průtoků a objemů z povodí jako kontrolní metoda. Jako hlavní komponenta hydrologického modelování byl využit software HEC-HMS společně s dalšími programy skupiny HEC. Potřebný preprocessing (příprava dat) byl uskutečněn v prostředí ArcGIS s využitím dalších

nástrojů ArcHydroTools a HECGeoHMS. Připravená data byla následně importována do programu HEC-HMS.

Pro simulování odtokových procesů jsou jako vstup do modelu využity bodové srážkové úhrny ze srážkoměrných stanic, návrhové srážky odvozené z databáze DES-RAIN, následně časové řady srážek pro vybranou epizodní událost.

Závěrečná třetí část diplomové práce slouží k sestavení konkrétních simulací v programu HEC-HMS, kde byly použity různé nabízené metody transformace srážko-odtokového vztahu spolu s dalšími parametry. Poté byly vkládány různé srážkové vstupy a následně je pozorována reakce povodí na tuto vstupní srážku. Jelikož se jedná o nepozorované povodí, kde není možné použít měřená data (průtoky) pro kalibraci povodí a od toho odvozených parametrů, je nezbytné velmi citlivě přistupovat k volbě vstupních parametrů do modelu odvozených z charakteristik povodí. Pro potřeby znalosti charakteristik povodí, říční struktury byl proveden terénní průzkum a došlo k zaměření příčných profilů důležitějších vodních toků. Dále bylo zmapováno využití krajiny, morfologie terénu a všeobecné údaje o povodí. Všechny tyto znalosti a zjištěné informace slouží k určení kulminačních průtoků a objemů odtoku z povodí společně s časovým nástupem povodňové vlny. Nakonec byly analyzovány a vyhodnoceny zjištěné hodnoty, došlo k porovnání metody CN křivek s výsledky simulací z programu HEC-HMS.

2. Cíle práce

1. První cíl se týká zpracování rešerše odborných publikací s pomocí informací získaných studiem na téma týkající se dané problematiky. V této části bude popsán srážko-odtokový proces, dále principy a druhy jednotkových hydrogramů. Poté budou analyzovány důležité geometrické a hydrologické charakteristiky nepozorovaného povodí. Následně se provede zpracování různých přístupů k hydrologickému modelování se zaměřením se na konkrétní hydrologické modely.
2. Druhým cílem je zhotovení detailního land use (využití území) pro řešenou oblast nezbytného k odvození čísel odtokových CN křivek. Budou vypočteny a analyzovány charakteristiky zkoumaného povodí v podrobném měřítku. Dojde k sestavení hydrologicky korektního srážko-odtokového modelu v prostředí programu HEC-HMS pro predikci kulminačních průtoků, určení průběhu povodňové vlny a objemů odtoku z povodí. Následně bude zpracována metoda odtokových CN křivek pro obecný odhad kulminačního průtoku a objemu odtoku řešeného povodí.
3. Posledním třetím cílem je aplikace obou metod pro zkoumané nepozorované povodí při různých vstupních srážkách a zkoumání reakce tohoto povodí. Provedení volby vhodných vstupních parametrů modelu na základě odvozených charakteristik povodí a také prezentace výstupů a jejich zhodnocení.

3. Literární rešerše

3.1. Pojmy a terminologie používaná v hydrologii související s modelováním

Mezi klíčové pojmy používané pro modelování v hydrologii se řadí:

- **Hydrologický cyklus:** probíhá jak v globálním měřítku, tak v měřítkách menších, kde základní měrnou jednotkou je povodí. Cyklus je charakterizován dvěma částmi tzn. akumulací a procesy přivádějící a odvádějící vodu do těchto prostorů. (Máca 2014)
- **Hydrologický systém:** je obecně popisován jako fyzikální celek schopný přijímat vstup ve formě srážek a přeměnit je na výstup v podobě odtoku. Dle definice je HS „*jakákoliv struktura, schéma, zařízení nebo postup, která dávají do vztahu vstup s výstupem*“ (Dooge 1988)
- **Matematický model:** jedná se o zjednodušený popis části přírodního či uměle utvořeného celku. V obecné rovině jde o jakýsi algoritmus či schéma rovnic a procesů, které převádí numerické řady vstupů do hledaných výstupů. Tento algoritmus řešení soustavy rovnic popisuje strukturu a chování povodí. (Dingman 2002)
- **Struktura modelu:** struktura systému je tvořena vnitřními proměnnými modelů a jejich vzájemnými vztahy. (Kulhavý et Kovář 2000)
- **Prvky struktury modelu:** jedná se o souhrn fyzikálně geometrických vlastností, které vyjadřují charakteristiky povodí (sklon, plocha, drsnost, tvar, údolnice). Dále jsou zde zakomponovány též půdní vlastnosti, vegetační kryt, geologické podloží atd. (Kulhavý et Kovář 2000)
- **Chování modelu:** je prezentován jako způsob přeměny vstupních hodnot do hodnot výstupních. Jedná se o okamžitou reakci systému na vstup. (Kulhavý et Kovář 2000)
- **Parametry modelu:** lze nazvat **stavovými veličinami** modelu. Popisují vnitřní veličiny, jež vyjadřují aktuální stav uvnitř modelu v konkrétním časovém okamžiku za předpokladu stálosti těchto veličin. (Kulhavý et Kovář 2000)

- **Transformační funkce povodí:** jedná se o vlastní popis chování modelu např. jednotkový hydrogram či výtoková čára. (Kulhavý et Kovář 2000)
- **Modelovací technika:** znázorňuje numerické schéma řídicích rovnic, výpočetní schéma převedené do programu pro výpočet. (Daňhelka a kol. 2003)
- **Lineární model:** linearita v modelu platí za předpokladu, že jsou v rámci řešených diferenciálních rovnic zachovány lineární vztahy (vstupy a výstupy). Platí zde princip superpozice. Funkce tohoto druhu modelu závisí pouze na transformační funkci. (Kulhavý et Kovář 2000)
- **Nelineární model:** popisuje systém s nelineárními diferenciálními rovnicemi. Odezva systému závisí nejen na funkci chování, ale také na intenzitě vstupu. (Kulhavý et Kovář 2000)
- **Citlivost modelu:** ukazuje náchylnost ke změně fungování modelu při reakci na změnu vstupních veličin a parametrů. Tento fakt se ověří při kalibraci. (Daňhelka a kol. 2003)

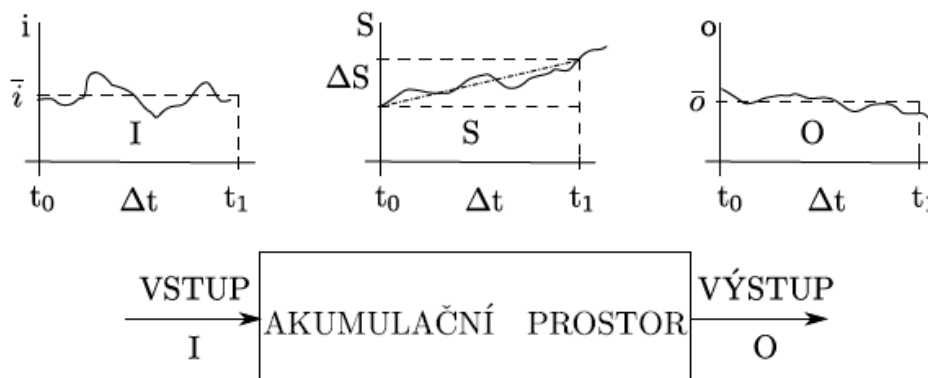
3.2. Srážko – odtokový proces

3.2.1. Dynamika a bilanční rovnice hydrologického systému

Hydrologický cyklus lze rozdělit z hlediska dvou přístupů, a to na pohled kvantitativní a kvalitativní. Část kvalitativní se zabývá zadržením (akumulací) vody v povodí a procesy určenými pro hlavní působení procesů v povodí. Kvantitativní pohled analyzuje množství zadržené vody ve zkoumaném území. V rámci hydrologického systému probíhají časové a prostorové změny zadržovaných a proudících vod v rámci povodí. Hydrologický systém je charakterizován jako dynamický systém. Mezi tři základní vlastnosti hydrologického systému se řadí vstupní a výstupní procesy a procesy spojené s akumulací vody. Ty jsou v rámci povodí, interakce mezi vstupy, výstupy a zásobou vody vyjádřeny základním schématem pro určitý časový úsek Δt . (Dooge 1988)

Obr. č. 1: Koncept hydrologického systému (Dooge 1988)

$$I - Q = \Delta S \quad \text{VSTUP} - \text{VÝSTUP} = \text{ZMĚNA ZÁSOB}$$



Transformace atmosférických srážek na odtok z povodí je ovlivněna retenční kapacitou daného systému, dále procesy evapotranspirace, výpary, intercepce vegetace, infiltrací do půdy a dalšími procesy. Všechny tyto hydrologické procesy ovlivňují srážko-odtokový proces. Bilanci hydrologického systému je možné vyjádřit pomocí **konservačních rovnic**. Tyto rovnice jsou použity pro vyjádření zákona zachování hmoty, energie a hybnosti. Lze použít několik přístupů pro vyjádření procesů a funkcí hydrologického systému. V konečné podobě má rovnice č. 1 níže uvedený tvar:

Obr. č. 2: Rovnice č. 1

$$i - o = \frac{dS}{dt}$$

Odečtením odtoku **o** od přítoku **i** do systému dochází ke změně zásoby nádrže **dS** za časový interval **dt**. Tato diferenciální rovnice řeší přitekly a odteklý objem vody za časový interval pro případ dodržení zákona zachování hmoty. (Dingman 2002)

Důležité v popisu dynamiky hydrologického systému je vyjádření chování akumulčního prostoru. Akumulační prostor je popsán pomocí optimálního funkčního vztahu mezi odtokem **o** a zásobou vody **S** pro různé druhy nádrží. Obecně lze konstatovat, že pokud je povodí plně nasyceno, produkuje větší odtok než suché povodí. (Kirchner 2009)

Lineární nádrž je nejjednodušším příkladem funkčního vztahu mezi odtokem z povodí a zásobou vody v povodí. Uplatnění našla v celé řadě hydrologických procesů nejčastěji při stanovení odtokového procesu, při určení např. evapotranspirace. (Beven 2004)

Obr. č. 3 – Rovnice č. 2

$$q = K * S$$

Výše uvedená rovnice č. 2 popisuje funkční vztah lineární nádrže, kde odtok q je vyjádřen jako součin zásoby vody S a konstanty K , tzv. součinitele zásobnosti.

Obr. č. 4 – Rovnice č. 3

$$q = \frac{S}{T_{RES}}$$

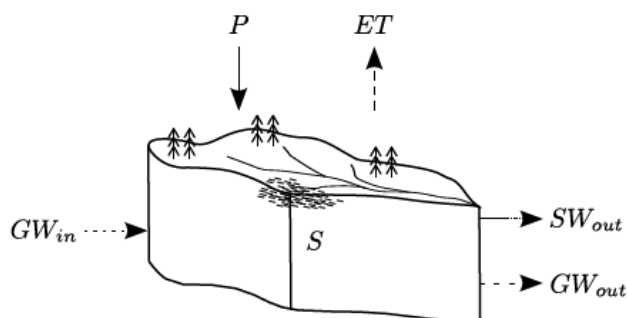
Obdobným vyjádřením vztahu rovnice č. 2 je rovnice č. 3, kde je na místo součinitele zásobnosti použita doba zdržení T_{res} . Doba zdržení vyjadřuje princip, jak dlouhou dobu je voda udržena v daném akumulacním prostoru. Obdobou k T_{res} představuje reakční doba, která uvádí, za jak dlouhou dobu začne nádrž uvolňovat určitý objem vody. (Dingman 2002)

Dalším způsobem pro vyjádření závislosti mezi odtokem vody z nádrže a její zásobou je princip **nelineární nádrže**, jež má navíc jeden parametr. Existuje také koncept **exponenciální nádrže** se dvěma parametry, kde ovšem není uvažováno dno nádrže jako u dvou předchozích typů nádrží.

Bilanční rovnice

Území uzavřené rozvodnicí povrchových vod je vyjádřeno regionální bilanční rovnicí. Ta dává do závislosti přítok do systému v podobě srážek P a podpovrchových vod GW_{in} , které jsou tvořeny půdní a podzemní vodou. Jelikož povodí je uzavřeno rozvodnicí, není zde uvažován žádný přítok povrchových vod SW_{in} . Voda se z povodí dostává evapotranspirací ET , povrchovým SW_{out} a podzemním odtokem GW_{out} . Nasycení povodí je popsáno objemem vody v akumulacním prostoru povodí. Zásoba vody v povodí S zahrnuje všechny dílčí zásoby, jako intercepce vegetace, voda vázaná v půdě a objem vody, jež je zadržen a neodtéká z povodí. (Dingman 2002)

Obr. č. 5: Základní schéma bilanční rovnice (Máca 2014)



Pro libovolný časový interval Δt je hydrologická bilance povodí vyjádřena rovnicí: (Bras 1990)

Obr. č. 6: Rovnice č. 4

$$(P + GW_{in}) - (ET + SW_{out} + GW_{out}) = \Delta S$$

3.2.2. Srážky

Na území české republiky jsou srážky jedním z nejdůležitějších procesů, které přivádí vody do povodí. Ovlivňují podle svého časového průběhu a prostorového rozložení všechny hydrologické a akumulární procesy. Pro odtokový proces jsou nejvíce důležité srážky ve formě deště a sněhu. (Dingman 2002)

Podmínky pro tvorbu atmosférických srážek vznikají při vzestupu vzdušných mas nasycených vodní párou. Dochází k adiabatickému ochlazení a nastává kondenzace vodních par, které indikují vznik srážek. Zásadní pro vznik atmosférických srážek je existence kondenzačních či desublimačních jader společně se vzduchem nasyceným vodní párou. Podle způsobu vzniku srážek při vertikálnímu vzestupu vzdušných mas se srážky rozdělují: (Hrádek et Kuřík 2002; Viessman a kol. 1989)

- Frontální
- Orografické
- Konvektivní

Frontální srážky souvisí s pohybem vzdušných mas s rozdílným atmosférickým tlakem pro velká měřítka a jsou tvořeny dešťovými pásy. Typické pro tento typ srážek je nízká intenzita a dlouhodobý průběh. (Wheater et al. 2000)

Orografické srážky jsou vytvářeny podobně jako frontální srážky specifickým výstupem vzdušných mas. Tento typ vzniká při srážce s nějakou vertikální překážkou, nejčastěji se jedná o pohoří. Typický je fakt, že na návětrné straně hor se vyskytuje vyšší srážkový úhrn než na druhé straně, kde je tzv. srážkový stín. Velice často tento orografický efekt doplňuje jiný typ srážek. (Pokorná a kol. 2008)

Konvektivní srážky jsou způsobeny ohříváním zemského povrchu, kde následuje vystoupení teplého vzduchu, poté ochlazení na úroveň rosného bodu a kondenzace. V porovnání s frontálními srážkami je rozsah malý, obvykle pouze jedno dešťové jádro nebo shluk několika. Typický znak konvektivních srážek představuje velká intenzita za kratší dobu trvání zejména pro menší plochu. Konvektivní srážky se charakterizují pro letní měsíce, kdy dochází k silným bouřkám a srážkové činnosti tzv. přívalové deště. (Dingman 2002)

Měření srážek

Data srážkových úhrnů se dělí na dvě skupiny. První skupina jsou bodová měření srážek, obvykle se jedná o srážkoměrné stanice. Zde jsou hodnoty srážek měřeny pomocí srážkoměrných přístrojů a totalizátorů. Tyto přístroje jsou schopny zaznamenat objem spadlých srážek v časovém průběhu. Objem se obvykle převádí na výšku srážek v mm. Tento průběh množství srážek zaznamenaný pro časovou periodu se nazývá *hyetogram*. Druhým typem jsou plošná měření srážek pomocí srážkových radarů a družic. (Kemel 1996)

Odhad srážkových dat

Z hlediska hydrologického modelování je zcela zásadním krokem správný odhad vstupních srážek s plošným a časovým rozdělením, neboť vstup vede k základním zdrojům nejistot. Pro správný odhad plošného zastoupení srážkové výšky je velice důležité vzít v úvahu všechny parametry jako intenzitu, dobu trvání, množství spadlých srážek atd. Důležitý čin pro rozdělení srážkových úhrnů pro povodí je výběr vhodných stanic, jejich rozestavení a také nadmořská výška. Z hlediska časového rozložení srážek se využívají dlouhodobé statistiky srážek, které obecně slouží k odvození pravděpodobnosti výskytu úhrnů pro konkrétní případ. (Kemel 1996; Pokorná a kol. 2008)

Pro odhad plošného rozdělení srážek jsou využívány interpolační metody. Jedna z nejčastěji aplikovaných metod nese název *IDW* (metoda vážených inverzních vzdáleností). Dává stanicím určitou váhu na základě vzdálenosti. Další základní metodou jsou *Thiessenovy polygony*, které jsou zhotoveny z vytvořené trojúhelníkové sítě stanic. Polygony nebo také pětiúhelníky jsou vytvořeny z propojení geometrických středů trojúhelníků tak, aby vznikla síť těchto polygonů. Každý bod nacházející se v polygonu má tedy přiřazenou srážkoměrnou stanici. *Metoda Izohyet*, izohyeta spojuje místa se stejnou srážkou a vytváří tak liniovou vrstvu obdobně jako vrstevnice. *Optimální interpolace* je jednou z nejstarších používaných metod. Využívá se pro odhad srážek metody nejmenších čtverců. Jedna z novějších metod se nazývá *Spline* a využívá se pro získání hodnot matematických funkcí. *Kriging* se nazývá metoda využívána jako součást predikce srážek a modelována podle Gaussovského procesu apriorních kovariancí. (Máca 2014; Pokorná a kol. 2008)

Charakteristiky deště

Z hydrologického pozorování časové řady dešťů lze odvodit příslušné charakteristiky řady. Ty jsou odvozovány z hyetogramu, jenž nese záznam srážek. Z hyetogramu odpovídající časové řady lze získat např. průměrnou intenzitu deště, maximálně desetiminutovou intenzitu deště, relativní dobu výskytu maximální srážky atd. Poslední zajímavou charakteristikou je pravděpodobná maximální srážka vznikající na základě fyzikálních podmínek atmosféry. (Hanel et. Máca 2013; Hrádek et Kuřík 2002)

3.2.3. Odtokový proces

Odtok lze charakterizovat jako odezvu povodí na vstupní složky systému. Většinou se jedná o hydrogram odtoku, jenž je pozorován v uzávěrovém profilu povodí. Ten vznikne reakcí povodí na hyetogram příčinného deště. Zcela zásadní prvky pro srážko-odtokový proces jsou geometrické charakteristiky povodí jako např. tvar povodí a časové charakteristiky hyetogramu příčinného deště a hydrogramu odtoku. Za velmi důležité pro menší povodí se považuje doba dotoku a koncentrace vyjadřující dobu, po které odtéká z povodí největší objem vody. (Máca 2014)

Voda v povodí se může dostat do uzávěrového profilu třemi způsoby: povrchový, podpovrchový (hypodermický) odtok a odtok podzemních vod. Povrchový odtok je složen z fáze nasycování půdy, kdy je intenzita deště menší než infiltrace. Všechna spadlá voda je zadržena infiltrační schopností půdy, intercepčí a akumulací vody v depresích. Druhou fází se značí plošný jinak řečeno svahový odtok, jenž nastává, když intenzita deště překročí intenzitu infiltrace a saturaci vody intercepčí a akumulací vody. Odtok je veden ve slabé plošné vrstvě po plochách s větším sklonem. Jedná se o velmi složitý proces ovlivněný řadou charakteristik povodí. Třetí fáze povrchového odtoku definuje soustředěný odtok říční sítě. Projevuje se povrchový i podpovrchový odtok. (Hrádek et. Kuřík 2002)

Složky odtoku dle autora Hrádka

- **Povrchový odtok** - složka celkového odtoku, který odtéká po nepropustném povrchu povodí. Skládá se z plošného a soustředěného odtoku.
- **Hypodermický odtok** - složka celkového odtoku, která představuje rychlý podpovrchový odtok z povodí v mělkých hloubkách povrchu.
- **Přímý odtok** – složka představující rychlý odtok. Jedná se o součet povrchového a hypodermického odtoku.

- **Základní odtok** – nejpomalejší složka odtoku z povodí. Je tvořena prázdňem akumulací prostor zásobami podzemní vody. (Hrádek et. Kuřík 2002)

Rozdělení odtoku dle místa výskytu

➤ **Plošný, svahový odtok** je formovaný na svazích povodí a je převážně ovlivněn geomorfologickými a klimatologickými charakteristikami povodí. Plošný povrchový odtok je transformován svahem podle 3 základních mechanismů generujících odtok.

Hortonovský povrchový odtok představuje část odtoku, který nastává, pokud je intenzita infiltrace menší. Nemůže docházet k vsakování vody do půdního profilu a voda odtéká ve směru největšího spádu. (Beven 2004)

Hypodermický odtok nastává tehdy, kdy je intenzita infiltrace výrazně vyšší než intenzita deště. Podpovrchový svahový odtok je podpořen existencí preferenčních cest proudění. V nasycené půdní zóně je popsán Boussinesquovou rovnicí a pro proudění v nenasyčené zóně půdy podle Richardsovy rovnice.

Odtok se zdrojových ploch vzniká na svazích po překročení akumulací schopnosti prostoru, pokud voda již není schopna odtékat podpovrchovým odtokem. V místě, kde je překročena kapacita prostoru, dochází k výronu vody nad terén a následnému povrchovému odtoku. Zdrojovou plochou je nazýván prostor, kde voda vyvěrá na povrch. (Máca 2014)

➤ **Soustředěný odtok** je tvořen říční sítí povodí. V přírodě se většinou projevuje neustálené proudění v říčním úseku, které je popsáno hydrodynamickými rovnicemi. Rovnice kontinuity nazývaná také rovnice spojitosti představuje zákon zachování hmoty v prostředí. Pohybová rovnice také momentová rovnice vyjadřuje zákon zachování hybnosti. Při proudění v říčním úseku dochází k transformaci průtokové vlny. Dává do vztahu vstup do říčního systému, změnu zásoby vody a odtok ze systému. Hydrologickou odezvu vodního toku je možné vysvětlit podle reakce říčního úseku na vstupní hydrogram, jenž je prostřednictvím říčního úseku transformován na výstupní hydrogram. (Máca 2014)

- **Odtok soustavou nádrží** je transformován akumulací prostorem nádrže.

3.2.4. Doba dotoku a koncentrace

Doba dotoku je odhadována širokým spektrem postupů dle různých autorů. Bývá také nazývána LAG TIME. Zásadní význam zaujímá především pro povodí s malou

dobou zdržení a rychlou odtokovou odezvou. Nejrozšířenější vyjádření doby dotoku je vzdálenost mezi těžištěm hyetogramu efektivního deště a těžištěm hydrogramu. (Singh 1988)

Odhadem doby dotoku se zabývala celá řada autorů. Mezi nimi se řadí i autoři Clarke či Dooge a mnoho dalších. Do výpočtu doby dotoku T_L vstupují různé odvozené parametry a také konstanty pro druhy povodí zejména zemědělsky využívané či urbanizované povodí. Dále jsou pro správné určení zásadní údaje o délce hlavního toku, sklonu koryta, ploše povodí či průměrnému sklonu povodí. (Packman 1979)

Doba koncentrace je definována jako doba, kdy částička vody z nejvzdálenějšího místa povodí doteče do uzávěrového profilu. (Hrádek et. Kuřík 2002; Te Chow 1964)

Důležitým údajem pro výpočet dle více autorů je délka a sklon toku a řada odvozených, obvykle konstantních parametrů.

3.2.5. Jednotkový hydrogram

Jednotkový hydrogram představuje koncept, jímž je možné popsat odtokovou odezvu povodí tvořenou přímým odtokem. Vychází z úvahy, že každé povodí je unikátní svým hydrologickým systémem a vytváří odtok vlastním způsobem promítnutým do tvaru hydrogramu. Jednotkový hydrogram je definován jako hydrogram odtoku vytvořený hydrologickým systémem povodí při zatížení povodí vstupní efektivní srážkou o jednotkovém objemu. Velká výhoda je v tom, že na základě znalosti jednotkového hydrogramu je možné odhadnout hydrogram přímého odtoku pro libovolný efektivní déšť distribuovaný v čase s různým celkovým objemem. (Sherman 1932)

Intervalový jednotkový hydrogram TJH

TJH je zapříčiněn efektivním deštěm o nenulové době trvání a jednotkovém objemu. Je určen pořadnicemi určující hodnotu průtoku v daném čase.

Základní podmínku tvoří **efektivní déšť**. Ten vyjadřuje pouze část srážkového vstupu, který odtéká formou přímého odtoku. Předpokladem JH je zachování lineárního vztahu a časové neměnnosti mezi efektivní srážkou a přímým odtokem z povodí. Tyto předpoklady jsou shrnuty do 3 základních principů jednotkového hydrogramu. (Beven 2001)

➤ **Princip proporcionality**

Princip proporcionality vyjadřuje odezvu povodí v případě, kdy pro stejnou dobu trvání efektivního deště vstoupí do povodí několikanásobek jednotkového objemu efektivní srážky, pro kterou je určen JH. Libovolnou pořadnici hydrologického systému lze vyjádřit násobkem známé průtokové pořadnice. (Dooge 2003)

➤ **Princip superpozice**

Podle principu superpozice je velikost výstupu lineárně závislá na velikosti vstupu do povodí. Časové rozložení přímého dotoku není ovlivněno velikostí efektivního deště. Celkový přímý odtok je roven součtu dílčích odtokových pořadnic vyvolaných odpovídající efektivní srážkou. (Hrádek et. Kuřík 2002)

➤ **Princip časové invariance**

Vyjadřuje stálost odtokové odezvy. Tento předpoklad časové neměnnosti odtokové odezvy povodí je vyjádřen konstantním tvarem jednotkového hydrogramu v čase. (Singh 1988)

Okamžikový jednotkový hydrogram (OJH)

OJH je koncept jednotkového hydrogramu popisující chování hydrologického systému zatíženého efektivní srážkou nekonečně krátké doby trvání, okamžikem. (Máca 2010)

Modely jednotkových hydrogramů

Vedle klasického přímého stanovení jednotkového hydrogramu ze srážko-odtokových dat je velmi užitečné využití JH bez použití těchto dat. Jedná se o syntetické jednotkové hydrogramy, které jsou stanoveny na základě předpokladů. Vztahují se k vybraným parametrům popisující tvar JH. Syntetické hydrogramy jsou rozděleny do čtyř skupin. (Singh, 1988)

A) Pravděpodobnostní JH

Pravděpodobnostní jednotkové hydrogramy jsou odvozeny z rozdělení pravděpodobnosti náhodných veličin. To je popsáno hustotou pravděpodobnosti a distribuční funkcí. Velká výhoda těchto JH spočívá v tom, že jsou velmi dobře popsány v celé řadě literatury. Často využívanými rozděleními pravděpodobnosti se definuje *gamma a beta rozdělení*. (Máca, 2010)

B) Empirický JH

Empirické jednotkové hydrogramy se stanovují na základě indexů, jež jsou odvozeny z geometrických charakteristik povodí. Velmi důležitou roli při srážko-odtokovém procesu hraje tvar povodí. (Hrádek at Kuřík, 2002)

Charakteristiky srážko-odtokové události lze rozdělit na časové charakteristiky příčinných srážek, hydrogramu a srážko-odtokové události. Mezi časové charakteristiky srážek se řadí doba trvání, trvání efektivního deště, těžiště a maximum hyetogramu a další. Časové charakteristiky hydrogramu odpovídají těm, co má hyetogram. Časové charakteristiky srážko-odtokové události odvozené na základě hyetogramu se nazývají **doba dotoku a koncentrace**. (Packman, 1979), (Te Chow, 1964)

Důležité je stanovit tvarové charakteristiky povodí jako délku údolnice, sklon toku a povodí a další. Tato data jsou nezbytná pro vypočtení doby dotoku a koncentrace, které jsou zcela zásadní u povodí s rychlou odtokovou odezvou a malou dobou zdržení. Nejznámější představitel empirických jednotkových hydrogramů je **Snyderův JH**. Další často využívaný pro malá urbanizovaná povodí s rychlou odtokovou odezvou je **Espeyův JH**. (Viessman et Lewis 1989)

C) Konceptuální JH

Konceptuální modely využívají k odvození JH předpoklady chování hydrologického systému řešeného povodí, které v sobě skýtá retenční a translační funkci tohoto systému. Obecně jsou modely schematizovány do podoby vzájemně propojených nádrží a kanálů. (Dooge 2003)

Mezi jedny z nejznámějších představitelů patří **Clarkův jednotkový hydrogram**. Tento hydrogram využívá spojení modelu izochron s principem lineární nádrže. Efektivní déšť vstupuje do modelu izochron, jenž představuje především translační funkci a je na odtok transformován lineární nádrží. Pro potřeby hydrologického modelování je JH zobecněn histogramem izochron s analytickým tvarem, který představuje střední rozložení izochron. Tento tvar je využíván např. modelem HEC-1 a novějším HEC-HMS. Tento střední tvar se nazývá TA-křivka a má dva parametry. Ty je důležité odhadnout z charakteristik povodí. Odhadem parametrů se zabývala celá řada autorů. Dle autora Strauba et al (2000) jsou odvozovány parametry **T_c** - doba koncentrace a **R** – koeficient lineární nádrže. Pro stanovení obou parametrů Clarkova JH je odvozena řada analytických vzorců. Další konceptuální modely nesoucí název podle jejich autora jsou např. Nashův JH, Diskingův JH a Doogův JH. (Straub et al., 2000)

D) Geomorfologický JH

Geomorfologické jednotkové hydrogramy využívají přístup, kdy je JH odhadnut podle geomorfologických poměrů v povodí. Využívají koncept, v němž se částičky

vody dostávají do UZ v určitých trasách podle geomorfologických podmínek povodí. Je přiřazena pravděpodobnost určující fakt, že tato částice si zvolí právě určitou trasu. Pro popis trasy využívající k pohybu jsou používány Hortonovy zákony, z nichž je odvozeno Strahlerovo číslování říční sítě. (Bras 1990)

3.3. Povodí a jeho charakteristiky

3.3.1. Povodí

Povodí je základní hydrologická jednotka, do které voda vstupuje převážně ve formě srážek. Odtok z povodí probíhá v jediném místě tzv. *uzávěrovém profilu*. Jedná se o hydrologicky uzavřený celek, do něhož nepřitéká voda po povrchu ani pod povrchem. Hranice povodí je ohraničena rozvodnicí. (Hrádek et. Kuřík 2002)

Podle vzájemné interakce mezi povodím, hydrologickými procesy a systémem činí povodí otevřený celek v rámci jeho vstupů a výstupů. (Dooge 2003)

Z hlediska způsobu, jakým se voda dostává do systému povodí, jsou povodí rozdělena na povodí povrchových a podpovrchových vod. Území povodí povrchových vod je ohraničeno orografickou rozvodnicí za předpokladu, že povrch povodí tvoří nepropustná vrstva. Povodí podpovrchových vod je vymezeno hydrogeologickou rozvodnicí s ohledem na hydrogeologické poměry v povodí. Z hlediska tohoto rozdělení mohou mít oba druhy povodí jinou velikost. V přírodě jsou však tyto rozdíly většinou nepodstatné, záleží na velikosti povodí. Rozvodnice představuje myšlenou čáru vymežující dané povodí a probíhá přes nejvyšší topografické vrcholy (sedla, hřebeny, vrcholy). Sbíhá se v nejnižším místě povodí v uzavěrovém profilu. Mezipovodím je nazýváno území mezi dvěma uzavírajícími profily na toku. (Hrádek et. Kuřík 2002)

Interakce v rámci povodí vyplývají z funkce hydrologického cyklu posléze hydrologického systému. Hydrologický cyklus je složen z dvou hlavních procesů. Jedná se o proces zadržení (akumulace) vody v území a proces pohybu, interakce mezi jednotlivými akumuláčními prostory. Prostory pro zadržení vody jsou nazývány rezervoáry s určitým objemem vody v různém skupenství – *zásoby*. Hydrologické procesy popisují transport vody mezi jednotlivými nádržemi především přítoky, odtoky z rezervoárů. (Pokorná a spol. 2008)

3.3.2. Charakteristiky povodí

A) Plocha povodí

Vyjadřuje půdorysný průmět povodí do vodorovné roviny. V rámci velmi malých povodí je vhodné navštívit danou lokalitu, poté určit a zkontrolovat rozvodnici. Z důvodu zásahu do krajiny může být rozvodnice umístěna na mapě v jiném místě. Hydrografická síť neboli struktura hlavních toků v rámci povodí se považuje za jednu z nejpodstatnějších charakteristik povodí, jež má zásadní vliv na soustředěný odtok z povodí. Schematizaci toků v povodí lze vyjádřit pomocí grafu vývinu povodí. Ten schematizuje hlavní tok a k němu přilehlé přítoky s jejich příslušnou plochou. (Kemel 1996)

B) Tvar povodí

Poměr mezi plochou levé a pravé strany povodí vzhledem k jeho celkové ploše je vyjádřen pomocí *součinitele asymetrie α* . Povodí bývá většinou nejširší v prostřední části, obecně se směrem k prameništi zužuje. U velice malých povodí může být jeho tvar ovlivněn zásahem člověka do krajiny. Týká se to zejména úseků vymezených polními cestami, dále podle různých osevních postupů či meliorizačních ploch. Tvar povodí a jeho sklonové poměry významně ovlivňují čas, kdy se koncentruje povrchový odtok do uzavíracího profilu. (Hrádek et. Kuřík 2002)

Často využívanou charakteristikou pro popis tvaru povodí činí *součinitel tvaru povodí α* . Ten je vyjádřen jako podíl střední šířky povodí vzhledem k délce údolnice. Tento vztah se odvozuje z předpokladu optimalizovaného tvaru povodí na obdélník, jenž má plochu rovnou ploše skutečného povodí F . Součinitel tvaru povodí umožňuje určit součinitele jako podíl plochy povodí a druhé mocniny délky údolnice. Jelikož ve skutečnosti není jednoduché promítnout různá povodí vždy na obdélník, používají se jiné obrazce např. kruh, trojúhelník nebo tvary ohraničené parabolou s vrcholem v uzavíracím profilu. Tato metoda se uplatňuje často pro povodí o rozloze 5 – 50 km², kde se podle hodnoty součinitele tvaru povodí dělí: (Nysl et. Kuráž 1992)

- protáhlá povodí - $\alpha < 0,24$
- přechodného typu – $\alpha = 0,24 – 0,26$
- vějířovitá – $\alpha > 0,26$

Metoda je uplatňována pro popis povodí z důvodu určení povrchového odtoku. Zde je zohledněn vliv tvaru povodí na soustředěný odtok v uzávěrovém profilu. (Hrádek et. Kuřík 2002)

C) Orografické poměry v povodí

Orografické poměry označují sklonové a výškové poměry v rámci povodí. Jsou ovlivněny klimatickými a meteorologickými charakteristikami jako např. teplota, srážky, výpar, vlhkost. Pro zjištění potřebných údajů o nejvyšších místech v povodí (bodech rozvodnice) a nadmořské výšce uzávěrového profilu se používají topografické a vrstevnicové mapy.

Výškové poměry povodí se určují pomocí sestavené *hypsografické křivky*. Graf této křivky vymezuje na ose y vynesené nadmořské výšky povodí **H** a k nim na ose x odpovídající plochy **F** ohraničené vrstevnicí a rozvodnicí. Křivka grafu představuje minimální a maximální výšku povodí a také průměrnou nadmořskou výšku povodí. Znázorňuje též charakter a polohu povodí. Dále značí, zda se jedná o povodí v nížině či v horských a podhorských oblastech. Sklonové poměry se v této oblasti vyjadřují *středním sklonem svahu*. Tento parametr výrazně ovlivňuje výpočet rychlosti soustředění vody v povodí. (Hrádek et. Kuřík 2002)

Mezi další charakteristiky popisující vlastnosti povodí a vodního toku se řadí délka povodí a sklon vodního toku. Pro vyjádření výše uvedených charakteristik se používají v prostředí ArcGIS příslušné nástroje, které v principu pracují s DMT. V případě nejasností se porovnávají s ručně stanovenými charakteristikami. (Nypl et. Kuráž 1992)

D) Půdní a geologické charakteristiky povodí

Půdní a geologické parametry povodí zásadně ovlivňují infiltraci a odtok spadlých srážek. Určují projev povrchového a podpovrchového odtoku v povodí. Vlastnosti půd jsou ovlivněny geologickým podložím. Horniny se dělí dle své *propustnosti* do 3 skupin:

- Propustné (sedimenty, rozrušené a pórovité horniny atd.)
- Polopropustné (rašeliny, pískovce, slepence, hlinité písky a spraše atd.)
- Nepropustné horniny (celistvé neporušené horniny - žuly, čediče, jíly, břidlice atd.)

Dalším faktorem rozhodujícím o pronikání vody do dolních vrstev je *sklon* těchto horninových vrstev. Velký vliv vykazují *půdní poměry* (půdní druh, struktura a

výška půdního horizontu, propustnost a vlhkost půdy). Propustnost zemin se určuje dle součinitele filtrace K. (Němec 1965)

Výrazný vliv na kvalitu a strukturu půdního horizontu má způsob využívání půd. Tím je ovlivněna právě retence vody v krajině. Za zásadním prvek ovlivňující povrchový a podpovrchový odtok spojený s vlastnostmi půdy se považuje obhospodařování a zacházení s půdou. Velmi důležitá pro vsakování vody je struktura zemin, jež může být narušena právě nevhodným obhospodařováním a využíváním krajiny. U nestrukturních půd dochází k extrémnímu povrchovému odtoku, jelikož půda není schopna akumulace vody. Naopak u půd strukturních dochází k akumulaci a pomalému povrchovému odtoku. (Sommer 1981)

E) Vegetace v povodí

Vegetační kryt povodí je velmi důležitý pro zachycení množství vody při srážkové události. Vegetace zadržuje množství vody na povrchu rostlin (intercepce), ovlivňuje výpar z rostlin a půdy (evapotranspirace) a ovlivňuje též povrchový odtok. Stanoví se podle zastoupení jednotlivých druhů ploch v povodí, zalesněných ploch, rozloh luk, pastvin a polí. Za důležité se považují též zastavěná území, nepropustné plochy, infrastruktura, vodní plochy. Jednotlivá zastoupení ploch se většinou vyjadřuje v % vzhledem k celkové ploše povodí. Za hydrologicky nejvýznamnější vegetační část povodí se považuje lesní porost. Důležitou roli zde hraje umístění lesních ploch, výskyt jednotlivých dřevin a jejich druhová skladba, stáří a obsah humusu v lese a také na antropogenní činnosti. Optimální funkci na zadržování vody a správnou funkci lesa v povodí se značí stav, kdy se lesní porost nachází v nejvýše položených částech povodí blízko rozvodnice. Z pohledu intercepce lesních ploch jsou schopné při srážkové události listnaté lesy zadržet 20 % spadlých kapek, jehličnaté až 60 %. Velikost intercepce záleží na tzv. velikosti poměrné listové plochy. Zastoupení zalesněných ploch v povodí vyjadřuje tzv. *součinitel lesnatosti*. (Hrádek et. Kuřík 2002; Hubačíková 2002)

F) Akumulace vody

Voda v povodí se akumuluje v povrchových depresích (brázdy, prohlubně), dále v jezerech, bažinách a nádržích. Výskyt těchto prvků v povodí ovlivňuje velikost, rychlost, způsob povrchového odtoku a celkovou hydrologickou bilanci povodí. (Hrádek et. Kuřík 2002)

Povrchové deprese často tvoří orbou vzniklé brázdy na zemědělsky využívaných plochách. V případě, že jsou orány po vrstevnicích, mají poměrně velkou zadržovací

schopnost. Za faktor ovlivňující množství vody akumulované v brázdách se považuje sklon terénu a charakter povrchu. Závisí též na tom, zda se orba vede po vrstevnicích či kolmo na vrstevnice nebo je povrch bez brázd. V praxi se stanovuje složitě množství vody akumulované v těchto mikrodepresích. Aplikují se empirické vzorce, jež pracují s pojmem „retenční kapacita povrchu“ a udávají množství akumulované vody v povrchových mikrodepresích, brázdách a na povrchu. (Nypl et Kuráž 1992)

Za další významný prvek pro akumulaci vody v krajině se označují nádrže a bažiny. Nádrže se dělí na průtočné a neprůtočné. Neprůtočné nádrže zadržují vodu svým akumulačním objemem. U průtočných nádrží je množství zadržené vody možné regulovat. Nádrže dle svého akumulačního prostoru, tvaru, velikosti a způsobu využití, umístění v povodí a dalších vlastností mají různou regulační schopnost. Plochy nádrží, vodních ploch v povodí se vyjadřují pomocí *součinitele jezernatosti*. (Sommer 1981)

Značnou akumulační schopnost mají také bažiny, které svým charakterem zadržují velké množství spadlých srážek. Podíl bažin v rámci povodí se vyznačuje *součinitelem bažinatosti*. (Pokorná a kol. 2008)

G) Říční síť

Říční síť se vytváří gravitačním odtokem vody ze zemského povrchu, která se soustřeďuje do vodních toků. Odtok z povrchu začíná nejprve při proudění vody ze svahu ve formě „ronů“, dále pomocí malých struh (erozních rýhách), jež postupně vytvářejí vodní tok. Při klasifikaci vodního toku v povodí je důležité stanovit jeho *trasu a podélný profil*. V povodí tvoří vodní toky říční soustavu, kde se jednotlivé toky značí řádem toku. Tok, který se vlévá do moře je označen I. řádem a naopak, postupně směrem proti proudu se řády toku zvyšují. V obecné rovině se aplikuje smluvený systém *hydrologického pořadí* vodních toků od pramene k ústí. V povodí se soustava řek popisuje charakteristikou *hustoty a tvaru říční sítě* vyjadřující poměr mezi celkovou délkou všech vodních toků a plochou povodí. (Hrádek et. Kuřík 2002)

Obr. č. 7: Struktura jednotlivých říčních sítí (Netopil 1984)



Jednotlivé druhy říčních sítí

- Stromovitá říční síť se vyskytuje v oblastech s erozně stejně odolnými horninami a přítoky do hlavního toku. Zprava a leva jsou víceméně pravidelně zaústěny.
- Pravoúhlá říční síť se nachází v obvykle tektonicky narušených lokalitách, kdy jsou jednotlivé toky podle zlomů terénu a jsou na sebe kolmé.
- Mřížovitá říční síť má toky, které na sebe navazují téměř kolmo s tím, že jeden směr tvoří vždy delší přítoky.
- Paprscitá (radiální) síť vzniká ve vulkanických oblastech, kdy se toky rozdělují a zase sbíhají.
- Prstencovitá říční síť je tvořena dlouhými prstencovými úseky s krátkými přítoky převážně v rozsáhlých pánevních oblastech. (Netopil 1984)

H) Antropogenní činnost

Antropogenní činnost zásadně ovlivňuje přírodní charakter povodí. Dochází k přetváření přirozeného prostředí na umělé. Veškeré umělé zásahy do povodí by

měly být prováděny s poukázáním na komplexní organizaci povodí. Jedná se o souhrnnou plánovanou činnost s jednotlivými složkami, jež představují pozemkové úpravy, podíl orné půdy a travních ploch, ochrana vodních zdrojů a říční sítě, obnova a ochrana lesních porostů. Jelikož antropogenní činnost výrazně ovlivňuje téměř všechny charakteristiky povodí, považuje se za nevyhnutelné řídit technické úpravy v povodí s ohledem na komplexní organizaci v dané problematice. Plocha povodí může být změněna např. výstavbou silničního tělesa či rozložením cestní sítě. Tyto násypy komunikací a cest ovlivňují odtok z povodí, kdy voda může být odvedena podél silničního tělesa. Orografické sklonové poměry narušují těžební činnost, dochází k velkým zásahům do terénu a tvorbě jam, erozních rýh a strží. Akumulace vody v povodí, jež je přirozeně zadržována v různých povrchových depresích, mokřadech, prohlubních, může být změněna výstavbou nádrží, rybníků, agrotechnickými úpravami povrchu, změnou vegetačního krytu a využitím území. (Kemel 1996)

3.4. Rozdělení a popis matematických modelů používaných v hydrologii

Počátek významného vývoje matematických modelů pro využití v oblasti vodního hospodářství se datuje do 80. let 20. století společně s rozvojem informačních technologií. Matematické simulace hydrologických procesů slouží jako nezbytný prostředek pro řešení situací v operativní hydrologii a při návrhové činnosti. V obecné představě vyjadřuje matematický model hydrologické procesy dle definice. Jedná se o „*kvantitativní vztah mezi vstupními a výstupními stavovými veličinami*“ (WMO 1994).

3.4.1. Modelování hydrologických procesů

Každý model v hydrologii značí obecně zjednodušenou reprezentaci přírodního či lidstvem upraveného světa, který může napodobovat některou z jeho charakteristik. Za další zásadní termín se považuje definice hydrologického systému znázorňující jistou strukturu, postup či schéma. Ta dává do souvislosti vstup s výstupem. Základní vztah popisující chování veličin vstupu a výstupu do systému řeší konservační rovnice. (Dooge 1988)

Hydrologické modely není možné striktně rozdělit, lze na ně nahlížet podle klasifikace jednotlivých autorů (Singh, Beven, Dingman). Jednotliví autoři popisují skupiny modelů podle různých klasifikačních kritérií a z jiného pohledu. Mezi hlavní

kritéria pro klasifikaci modelů se řadí matematické vyjádření procesů, prostorové a časové řešení a schematizace plochy a popisovaných jevů. (Clarke 1973)

3.4.2. Klasifikace matematických modelů podle WMO

- A) Podle účelu a způsobu aplikace modelu
- B) Podle typu simulovaného systému či subsystému
- C) Podle komplexnosti modelovaného hydrologického procesu
- D) Podle vztahu příčina a důsledek

A) Podle účelu a způsobu aplikace modelu

Modely operativní hydrologie se zabývají předpovědí hydrologických veličin. Modely obecně vycházejí jak ze stavových veličin, tak z okamžitých měřených hodnot z automatizovaných meteorologických stanic a radarů. Data z automatických stanic jsou přímo předávána do modelu. Za zásadní se považuje rychlost zpracování dat pro krátkodobou předpovědní činnost. Velký rozvoj předpovědních modelů přišel ruku v ruce s rozvojem výpočetní techniky. Významným milníkem v České republice byly povodně v roce 1997 a 2002. Základní rozdělení modelů se používá na manuální hydrometrické předpovědi a modelové deterministické hydrologické předpovědi. Manuální předpovědi obecně vycházejí ze zákonitostí, jimiž se určuje pohyb vody v přírodě. Závisí na postupové rychlosti vody z horního do dolního profilu toku. Jejich použití je vhodné pro větší koryta s delší trajektorií proudění. V ČR jsou tyto předpovědi predikované v předstihu asi 6 až 10 hodin. Naopak deterministické hydrologické předpovědi udávají schopnost pracovat s předstihem 48 hodin, v České republice na 88 hydrologických profilech. Výpočet se provádí na základě zákonitostí proudění vody v povodí. Lze jednoduše odhadnout jaké množství vody a v jakém čase odteče z krajiny okamžitě po srážkové události. V předpovědních hydrologických modelech se vyjadřují charakteristiky proudění vody pomocí matematických rovnic, které zjednodušeně popisují skutečné procesy infiltrace, proudění po povrchu v půdě, pohyb vody v korytech a nádržích, evapotranspiraci a další související procesy. (Daňhelka et al. 2003)

Modely pro návrhovou a projekční praxi v oblasti vodního hospodářství řeší dlouhodobou koncepci v oblasti protipovodňové ochrany (protipovodňové stavby typu zemních hrází, retenčních nádrží, poldrů). Dále jsou tyto modely využívány jako podklad pro řešení hydrotechnická a hydromeliorační. V neposlední řadě hrají důležitý fakt pro návrh různých technických staveb, vodních nádrží, čistíren

odpadních vod, úprav vodních toků, návrh mostních konstrukcí atd. (Becker et Serban 1990)

Modely používané pro výzkumnou činnost se zabývají dalším pokrokem a rozvojem modelů společně s výzkumem jednotlivých komponentů srážko-odtokového procesu, jejich detailnější a přesnější popis pro vhodnější využití v rámci modelování. Pro účely výzkumu se zřizují experimentální povodí s širokou pozorovací sítí, kde se rozvíjí chápání hydrologických procesů. (Becker et Serban 1990)

B) Podle typu simulovaného systému či subsystému

Podle WMO lze rozdělit typy systému na elementární a komplexní. Elementární typ modelovaného systému zahrnuje veličiny s konstantními charakteristikami (hydrotop). Jako jedny z příkladů hydrotopů se charakterizují odtokové plochy, jezera, nádrže, dále zvodnělé vrstvy půdy. Druhý komplexní systém se skládá z velkých odtokových ploch, systému říčních sítí a jezer a povodí.

Rozdělení typu modelovaného systému podle WMO (WMO 1990) je uvedeno v tabulce č. 1.

Tab. č. 1: Hydrologické procesy a proměnné používané při klasifikaci modelů, rozdělení dle simulovaného systému (WMO 1990)

Číslo	Použití modelu	ID dle WMO
1.	Elementární prvky modelovaných systémů	
1.1.	Hydrotopy (odtokové plochy s konstantními charakteristikami)	HU
1.2.	Malé až středně velké odtokové plochy	SA
1.3.	Zvodnělé vrstvy	AQ
1.4.	Říční síť	RR
1.5.	Nádrže nebo jezera	RL
2.	Komplexní systémy	
2.1.	Systém říčních sítí, kanálů a nádrží	CS
2.2.	Povodí nebo velké odtokové plochy	CB

C) Podle komplexnosti modelovaného hydrologického procesu

Tato klasifikace zohledňuje rozdělení na základě procesu v hydrologii, jež jsou modelovány. Jedná se o modely týkající se evapotranspirace, výpočtu půdní vlhkosti, proudění podzemní vody, režim splavenin, modely na kontaminaci a šíření znečištění. Dále jsou zde zahrnuty modely zabývající se sedimentací částic a proudění povrchové vody v korytech (postup povodňové vlny). Rozdělení do jednotlivých skupin dle WMO (WMO 1990) znázorňuje tabulka. č. 2.

Tab. č. 2: Hydrologické procesy a proměnné používané při klasifikaci modelů, rozdělení dle hydrologického procesu (WMO 1990)

Číslo	Použití modelu	ID dle WMO
1.	Půdní vlhkost a evapotranspirace	ES
2.	Objemy podzemní vody, hladina, průtok	SG
3.	Průtoky a vodní stavy v říční síti	
3.1.	s časovým krokem < 1 den	OF
3.2.	s časovým krokem > 1 den	QM
4.	Teplota, ledový režim	TW
5.	Splaveniny a související parametry	QS
6.	Parametry kvality vody	WQ

D) Podle vztahu příčina a důsledek

Obecné rozlišení kategorií modelu podle směrnice WMO (1994) je uvedeno ve 4 skupinách:

- Systémové přístupy
- Koncepční
- Hydrodynamické
- Stochastické

Jedná se o obecně známý a platný pohled, kdy jsou modely kategorizovány podle přístupu dle principů deterministických a stochastických. Oba pohledy jsou v zásadě obsaženy v každém hydrologickém procesu. Matematická formulace hydrologických procesů obsahuje vždy jak prvky deterministického, tak stochastického přístupu. Větší část hydrologických modelů je postavena na deterministických principech, kde ovšem nemůže komplexní systém vždy využít celé spektrum vstupních informací a vyjádřit tím procesy generující výstup ze systému. Model je vždy poznamenán určitou chybou. Míra nejistoty je vyjádřena pomocí stochastických prostředků. Chyby poznamenávající model obsahují obecně dvě roviny. První spočívá v chybě vlastních vstupních hodnot, druhý v nedokonalosti konkrétních modelů. Modely deterministického přístupu se stochastickými procedurami jsou využívány především pro hydrologické předpovědi v reálném čase, kde mohou být aplikovány na vstup, výstup i vlastní model. Vazby mezi jednotlivými hydrologickými procesy jsou vyjádřeny explicitními vztahy *funkčních závislostí (vztahem)* proměnných veličin. (Daňhelka et al. 2003)

$$y = f(x, a)$$

y ...výstupní parametry nebo stavové proměnné řešeného systému

x... nezávisle proměnné funkce (počáteční podmínky, vstupní hodnoty)

a...hydrologické parametry charakterizující chování daného systému

A) Deterministické modely

Deterministické modely jsou rozšířeny do všech oblastí vodohospodářské problematiky. Obecně bývají matematicky i fyzikálně srozumitelnější pro koncového uživatele, jelikož jejich vnitřní vazby jsou koncipovány vzhledem k jednotlivým procesům hydrologického cyklu. Deterministické modely se dělí dle složitosti vazeb a podle vztahu příčina – důsledek na tři základní kategorie. (WMO 1990)

➤ DL modely (Deterministic hydrodynamic Laws)

Tato kategorie modelů pracuje na základě hydrodynamických zákonů, jež popisují fyzikální podstatu hydrologického systému se zachováním platnosti zákonů zachování hmoty, energie a hybnosti. Modely lze doplnit o informace z obecné fyziky, chemie a biologie. Častý název pro tuto skupinu jsou tzv. **white box** modely. (Kulhavý et Kovář 2000).

➤ DC modely (Deterministic Conceptual)

Tyto konceptuální modely odkazují na obecné fyzikální zákonitosti ve zjednodušeném konceptu s určitým množstvím empiricky odvozených vztahů. Dochází k transformaci prostorové složky na konkrétní diskretizované body, jež vedou ke změnám stavových veličin. Řešení modelů spočívá v obecných diferenciálních rovnicích. Nesou název též **grey box** modely. (Daňhelka et al. 2003)

➤ DB modely (Deterministic Black Box)

Tyto modely neobsahují explicitně řídicí rovnice v podobě fyzikálních zákonů, ale uvažují pouze empiricky odvozené vztahy mezi vstupními a výstupními hodnotami. Hodnoty do modelu vstupující a z něj vystupující nezahrnují hydrologické parametry a vnitřní vztahy modelu. Modely tzv. **black box** se značí velice obecnými vztahy mezi vstupními a výstupními hodnotami, jsou náročnější na kalibraci. Využívají se především jako komponenta rozmanitějších modelů, dále také v operativní hydrologii pro menší povodí. (Buchtele 2002)

B) Stochastické modely

➤ SP – modely pravděpodobnosti (Stochastic – Probabilistic models)

Tato skupina modelů je prezentována hydrologickými funkcemi s určeným rozdělením pravděpodobnosti. Obsahují konkrétní hydrologické veličiny jako kulminační průtok, minimální a maximální odtok, podzemní odtok, retenční objemy. Jsou charakterizovány statistickými veličinami tj. aritmetický průměr, rozptyl, směrodatná odchylka, koeficienty variace a šikmosti atd. (Daňhelka et al. 2003)

- **ST** – modely pro generování časových řad (Stochastic Time series generation)

Primární použití těchto modelů spočívá v extrapolaci hydrologických parametrů a časových řad při dodržení platnosti obecných statistických charakteristik. Jedním z nejznámějších příkladů je model ARMA (Autoregressive Moving Average). Stochastické modely se vážou na určitou veličinu v hydrologickém systému případně proces, jež se uskutečňuje v rámci konkrétního bodu, měrného profilu či vodoměrné nebo meteorologické stanice. Vzhledem k této specifikaci se stochastické modely často nevyužívají k simulaci komplexnějších hydrologických procesů, ale více jak komponent v deterministických modelech. Zde mohou chybu postihující model popisovat rozdělením pravděpodobnosti. Stochastické modely se dále rozšiřují do operativní hydrologie, kde zaujímají důležitý význam pro prodloužené predikované události. (Becker a kol. 1990)

3.4.3. Klasifikace modelů podle Singha

Tento přístup dle autora Singha je vymezen z odlišného náhledu než podle WMO, primárně pomocí tří kritérií pro klasifikování modelu:

- Matematická formulace procesu
- Prostorová klasifikace
- Časo-prostorová závislost

Další kritéria, dle kterých lze nahlížet na matematické modely, jsou odvětví pro použití modelu, výpočetní koncept a struktura, schematizace a struktura řešeného území, správné popsání hydrologických procesů společně s ohledem na to, jaký je konkrétní účel jednotlivého modelu. Je zřejmé, že kritéria pro třídění a rozdělení modelů nejsou striktní a dochází k prolínání kritérií pro konkrétní modely dle řady autorů. Koncept náhledu na klasifikaci se odlišuje. Vychází ovšem ze stejných základních pravidel, charakteristik. (Daňhelka et al. 2003)

A) Modely dle matematické formulace procesu

➤ **Celistvé modely** se soustředěnými parametry (0D, lumped) - empirické, fyzikálně orientované (dle použitých výpočetních metod). Ve větší míře případů se celistvé modely vyjadřují pomocí obyčejných diferenciálních rovnic v 0D společně s empirickými vztahy. Jedním z nejnámějších a nejrozšířenějších představitelů tohoto typu modelů jsou HEC-WMS a SAC-SMA. Podle druhu použití výpočetních metod se tyto celistvé modely dělí na modely empirické a simulační fyzikálně založené modely. (Jeníček 2007)

Empirické modely pracují s širokým spektrem historicky měřených dat. Používají zejména omezené vstupní informace, které jsou vystiženy ve formě koeficientů a součinitelů do databází. Obecně se tyto modely specifikují svou jednoduchostí a nenáročností výpočetního systému. Model poskytuje platné výsledky v případě, pokud se uživatel drží v rámci šířky odvozených vztahů. (Kulhavý et Kovář 2000)

Simulační fyzikálně založené modely vycházejí z fyzikální podstaty popisovaného systému. Výhodou těchto modelů bývá možnost jejich přenosu do jiných podmínek s možností extrapolace výsledných veličin mimo nekalibrovanou oblast. (Kulhavý et Kovář 2000)

➤ **Distribuované modely (1D, 2D, 3D)**

Procesy v těchto modelech se definují pomocí parciálních diferenciálních rovnic, které jsou řešeny numericky pomocí konečných prvků, diferencí, objemů.

B) Modely dle prostorového klasifikace

Na základě velikosti zkoumaného území lze modely rozčlenit do skupin na modely pro povodí malá do asi 100 km², střední 100–1000 km² a velká nad 1000 km². Toto rozdělení se považuje za velmi obecné a v každém konkrétním případě se volené měřítko posuzuje podle zkušeností modeláře. Dle velikosti povodí a vlastností výstupů z modelu lze prostorové měřítko rozčlenit na regionální a lokální. (Daňhelka et al. 2003)

➤ **Regionální**

Toto měřítko je aplikováno pro povodňové oblasti velikosti stovek až tisíců kilometrů, jež se člení na menší subpovodí. Ta jsou maximálně ohrožena povodněmi a přispívají tak ke kulminacím v povodí a vytváření povodňových vln. (Daňhelka et al. 2003)

➤ **Lokální**

Modely se zaměřují na území desítek km², kde se soustředí na popis srážko-odtokového vztahu v tomto malém měřítku. Modely jsou většinou využívány pro vytipování rizikových lokalit z hlediska povodňového nebezpečí, určení charakteristik povrchového odtoku, pro návrh či posouzení protipovodňových opatření. Užívá se modelů na fyzikálních principech zejména matematické simulační modely. (Beven 2001)

C) Časoprostorová závislost

Časová diskretizace

Dle tohoto přístupu jsou modely brány vzhledem k časovému kroku. Jedná se o časový krok jak vstupních hydrometeorologických informací, tak výstupních dat z modelu, kde se oba kroky mohou odlišovat. Rozdíl může být i mezi jednotlivými časovými řadami vstupních veličin a také u kalibračních dat. Modely jsou z hlediska časového kroku rozděleny na kontinuální a epizodní, dále na modely s krátkým a dlouhým výpočetním krokem. *Epizodní modely* je vhodné aplikovat pro malá povodí při stanovení odtoku za konkrétní jednu srážkovou událost. Za zásadní a velmi důležitý parametr se považují počáteční podmínky, jako je nasycení půdy. Často se jako vstupní hodnota definuje přívalová srážka. Další druh představují *kontinuální modely*, jež pracují s větším množstvím počátečních podmínek a širší časovou náplní. Logicky jsou modely náročnější na množství vstupních dat. Aplikují se pro větší povodí a jako tzv. bilanční modely nebo pro vyhodnocení možných případů využití území. (Kulhavý et Kovář 2000)

Časový krok modelu je volen primárně dle požadovaného využití modelu, dále dle stability numerických výpočtů. Model pro vyhodnocení protipovodňové ochrany, eroze a kvality vod má časový krok obvykle jednu hodinu až den. Naopak bilanční modely pracují s krokem jednoho dne až jednoho měsíce. (Daňhelka et al. 2003)

Prostorová diskretizace

Značí prostorové členění závislých proměnných hydrologických charakteristik, funkcí a parametrů. Z hlediska této diskretizace jsou uváděny již zmíněné 2 kategorie modelů.

- L Lumped – nazývají se také modely celistvé a modely soustředěných parametrů (lumped, 0D).
- I Distribuované modely – rozdělují se na modely 1D, 2D, 3D.

Na rozhraní těchto dvou skupin se vyskytují modely *semi-distribované*. Zcela zásadní fakt pro výběr vhodného modelu je nutné zohlednit o jakou lokalitu, s jakými vlastnostmi a o jaké velikosti se jedná při modelování. Také je zásadní dostupnost a kvalita potřebných dat. Pro menší povodí se primárně řeší plošný povrchový odtok měnící se na odtok soustředěný. Není zde významný průtok korytem. Naopak pro větší povodí není možné průtok a transformaci vlny korytem zanedbat. Za nutnost se považuje spojit S-O model s modely proudění říčních sítí. (Kulhavý et Kovář 2000)

Celistvé modely pracují se zjednodušenou schematizací řešeného území. Předpoklad spočívá v koncentraci všech vlastností povodí do jednoho konkrétního bodu. V porovnání s distribuovanými modely se jejich struktura zjednoduší, proto jsou snáze použitelné. Tento krok se považuje za hlavní důvod, proč jsou široce rozšířeny v operativní hydrologii. Jejich výpočetní koncept se zakládá na obyčejných diferenciálních rovnicích (ODR). Za typického představitele se považuje systém HEC-1 (Hydrological Engineering Center) nebo SAC-SMA, poté další koncepční modely. (Jeníček 2007)

Distribuované modely se vážou na rozdělení povodí na určitou pravidelnou schematizaci většinou čtvercovou či trojúhelníkovou sítí. Na rozdíl od celistvých modelů, kde jsou informace soustředěny do jediného bodu, využívá zde model prostorovou závislost modelovaných procesů. Ty pracují s prostorovou závislostí vstupů a výstupů, proměnných a stavových veličin. Dále pracují s výpočetním schématem parciálních diferenciálních rovnic. Povodí se dělí na jednotlivé odtokové plochy vyjádřené velikostí gridu. Náročnost výpočtu závisí na velikosti těchto výpočetních veličin. Jelikož jsou tyto modely velmi náročné, v praxi dochází často k zjednodušení na modely semi-distribované. Typický příklad udává model HEC-WMS nebo AquaLog používaný ČHMÚ. (Moravcová 2011)

Semi-distribované modely spočívají v rozdělení povodí na menší celky dle stanovených kritérií a charakteristik. Podstatným kritériem je prostorová homogenita jednotlivých vlastností povodí a parametrů. Jelikož model zaznamenává jakousi optimalizaci mezi oběma přístupy, stále více se s ním v praxi pracuje. Pro použití semi-distribovaného modelu se dodržuje prostorové rozdělení parametrů v hydrologickém systému, distribuce půdních vlastností a topografie území. Tyto parametry nejvíce ovlivňují odtok z povodí. Na základě schopnosti stanovení hodnot (průtoků) v konkrétních bodech lze konstatovat, že model je velmi vhodný pro predikci přívalových dešťů. (Daňhelka et al. 2003)

3.4.4. Rozdíly mezi celistvými a distribuovanými modely a jejich aplikace

Dle vědeckých poznatků a praktických zkušeností s oběma typy modelů je přijímán fakt, že u obou skupin činí výsledná kvalita a použitelnost modelů výsledek kombinace struktury modelu a vhodných procedur po odhad parametrů. Hlavní rozdíl spočívá ve faktu, že celistvé modely neberou klasický zákon zachování hmoty a hybnosti, ale jejich struktura se staví na fyzikálním konceptu s využitím experimentálních výsledků. Výstupním prvkem reprezentace charakteristik povodí je výstupní hydrogram. Lze konstatovat, že distribuované modely pracují s bodovou sítí řídicích rovnic a jejich parametry definují lokální podmínky. Z tohoto důvodu se považuje za velmi náročný na základě výstupního hydrogramu odhad vlivu parametrů modelu. Od 80. let dochází k stále širšímu využití distribuovaných modelů, jelikož se modely vyvíjí vzájemně s rozvojem počítačových technologií, zvyšuje se kvalita a rozlišení prostorových dat. (Clarke 1973; Dingman 2002)

Časoprostorové rozdělení vstupních dat znamená velmi důležitou otázku pro správnou interpretaci vstupních dat modelu spočívající v jejím časoprostorovém rozdělení. Dle výzkumu autora Wilsona (Wilson et al. 1979) je prokázáno jako velmi důležitý vliv prostorového rozdělení srážek na výsledný hydrogram. Autoři Beven a Hornberger (Beven a Hornberger 1982) se přiklánějí k významnosti objemu vstupních srážek oproti jejich průběhu. Dle autora Krajewskiho (Krajewski et al. 1991) se považuje za podstatnější časové rozdělení srážek než prostorová variabilita pro malá povodí. V zásadě proto není možné určit, zda je v konkrétním případě důležitější časová či prostorová proměnlivost.

Pro úspěšnou aplikaci modelů hrají velice důležitou roli fyzikálně-geografické podmínky, správná kalibrace a kvalita dat pro parametrizování. Obecně se považuje za velmi důležitý správný pohled a intuici uživatele modelů volba správného typu a vhodných parametrů vzhledem ke konkrétním podmínkám v povodí. Pro usnadnění odhadu počátečních parametrů lze uplatnit předem stanovené postupy či automatické optimalizace. To může velmi usnadnit práci s modelem. (Kovář 1990)

Transformační funkce povodí neboli jednotkový hydrogram (IUH) se považuje ve většině modelů za konstantní na rozdíl od dalších hydrologických procesů infiltrace a evapotranspirace, kde se proměnlivost značí za podstatně více výraznou. Nasycenost půdního horizontu velmi ovlivňuje jednotlivé komponenty, ze kterých se skládá celkový odtok. Dalším zásadním krokem pro správný výběr modelu je predikovaná

délka události, dostupnost dat srážek a průtoků, jež jsou obvykle v denním či hodinovém kroku. (Clarke 1973)

Pro praktické využití představují hydrologické modely velmi podstatnou skupinu zabývající se modelováním povodní z přívalových dešťů. Jelikož se tyto události obvykle dějí velice rychle, hraje zásadní roli přímý odtok složený z povrchového a hypodermického odtoku. V závislosti na intenzitě srážek se s vyšší intenzitou více projevuje povrchový odtok. Tyto modely zachycují srážkové události v časovém období méně než několik dní, jejich časové kroky jsou hodiny i méně. Z toho plyne, že modely se specializují na povrchový odtok. Odtok podzemní je zanedbáván, jedná se o tzv. „*event*“ *modely*. Důležitým prvkem pro aplikování modelu spočívá ve správné volbě a kalibraci jeho parametrů. Zvyšující počet parametrů vyjadřuje chování povodí, roste přesnost modelu, ale i jeho časová náročnost a obtížnost kalibrace. Obecnou nejasností u většiny modelů je zakomponování pohybu vody v nenasycené zóně. Nasycená zóna dlouhou dobu (několik dní) po skončení srážkové události stále vydatně podporuje svým vyprazdňováním odtok z povodí. (Daňhelka a kol. 2003)

3.5. Hydrologický model HEC-HMS

Srážko-odtokový model HEC-1 je vyvíjen už od 60. let ženíjním sborem americké armády. Jedná se o průmyslový standart FEMA/NFIP. Prvního z této skupiny modelů představuje HEC-1, model HEC-HMS je dalším v řadě, nejnovější produkt se nazývá HEC-WMS. Všechny nadcházející systémy vycházejí z původního konceptu HEC-1. Model HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) je uživatelsky příjemnější verzí HEC-1.

Z hlediska výše popsané klasifikace se HEC-HMS řadí mezi deterministické koncepční modely popisující části hydrologického procesu různými matematickými vztahy. Používá celistvý přístup pro dělení parametrů a veličin. Částečně program aplikuje i distribuovaný přístup (infiltrační metody Gridded SMA nebo Gridded SCS CN). Využitelnost programu se označuje jako epizodní model na malých či středních povodích nebo pro použití kontinentálního přístupu pro velká povodí. (Jeníček 2007)

Systém modelování v programu *HEC-HMS* je vyvinut pro schopnost simulovat komplexní hydrologické procesy probíhající v povodí. Program zahrnuje také řadu běžných metod hydrologické analýzy jako je infiltrace, jednotkové hydrogramy, dále procesy kontinuální simulace včetně evapotranspirace a půdní vlhkosti. Komponent

HEC-HMS umožňuje svými pokročilejšími funkcemi provádět gridové simulace odtoku s využitím kvazi-distribované transformace. Program je koncipován na modelování celé řady procesů. Obsahuje komponenty pro simulaci přímého a základního odtoku z povodí, transformační reakci na příčinnou srážku ve formě hydrogramů odtoku, dále možnost modelování odtoku z tání sněhu. V programu se též modeluje průchod povodňové vlny nádrží a pomocí omezených technik i transformaci vln v říčních korytech. Program umožňuje import a export dat z jiných a do jiných programů jako skupiny HEC, tak i cizích programů jako např. MS Excel či jiných programů pro hydrologické modelování. Zásadní výhodou programu HEC-HMS především při přípravě dat je jeho dobrá propojitelnost s prostředím ArcGIS. Pro zpracování prostorových dat a hydrologických charakteristik povodí je v prostředí ArcGIS možnost využití nadstavby ArcHydroTools, ze které ovšem není možné data importovat přímo do HEC-HMS. Je nezbytné využít extenze HEC-GeoHMS, která v prostředí ArcGIS navazuje na výstupy vytvořené extenzí ArcHydroTools. Data vytvořená extenzí HEC-GeoHMS je možné importovat přímo do prostředí HEC-HMS. Výhodou použití extenze je vytvoření celé struktury hydrologického systému, které je následně využito již přímo pro simulaci a další procesy. (HEC -1 1990)

3.6. Metoda CN křivek

Tato metoda byla vyvinuta v USA službou pro ochranu půd (US - Soil Conservation Service) a byla publikována celou řadou autorů např. National Engineering Handbook, Hydrolog. Section 4, SCS, USDA Washington D.S. (Hrádek et. Kuřík 2002)

Metoda odtokových CN křivek představuje poměrně jednoduchý srážko-odtokový model pro stanovení objemu přímého odtoku a kulminačního průtoku. Také je pomocí metody možné stanovit dobu dobíhání a koncentrace. Metoda byla odvozena pro analýzu přímého odtoku na malých obvykle zemědělsky či lesnický využívaných povodí s plochou od 5 – 10 km². Použitelnost metody se dá využít při zatížení povodí návrhovým deštěm určité doby trvání, který může být představen např. významnými přívalovými srážkami. Metoda není určena pro stanovení odtoku z tání sněhu. V projekční praxi je metoda využívána k navrhování protierozních opatření dle normy ČSN 75 1400 “Hydrologické údaje povrchových vod”. (Janeček 2012)

Princip metody vychází z předpokladu, že povodí je zatíženo rovnoměrně rozloženou srážkou pro celé povodí, která je v čase neměnná. Metoda nepopisuje prostorovou a časovou variabilitu. Její využití je možné uplatnit pouze stanovením ztrát při přívalových deštích. Objem vstupní výšky srážek je transformován hodnotami CN křivek na výšku odtoku. Čím větší je hodnota CN křivek, tím více se zjevně projevuje povrchový odtok. (Podhrázská 2003)

4. Metodika

Cílem této diplomové práce je sestavení hydrologického modelu v programu HEC-HMS, který bude predikovat maximální odtoky z povodí. Za nezbytný další krok praktické části považuji provedení výpočtu odtoků z povodí pomocí metodiky odtokových CN křivek. Ten slouží převážně pro prvotní odhad hodnot. Metoda byla též využita při porovnání výsledků.

Pro modelování hydrologických procesů byly pro obě metody použity N-leté srážkové úhrny s určenou dobou trvání. Dále byl sestaven epizodní hydrologický model pro vybraný časový úsek s největším srážkovým úhrnem v roce 2013. Je nezbytné konstatovat, že obě metody jsou poměrně náročné na přípravu vstupních dat. Z tohoto důvodu je značná část diplomové práce koncipována právě na podrobnou přípravu těchto dat.

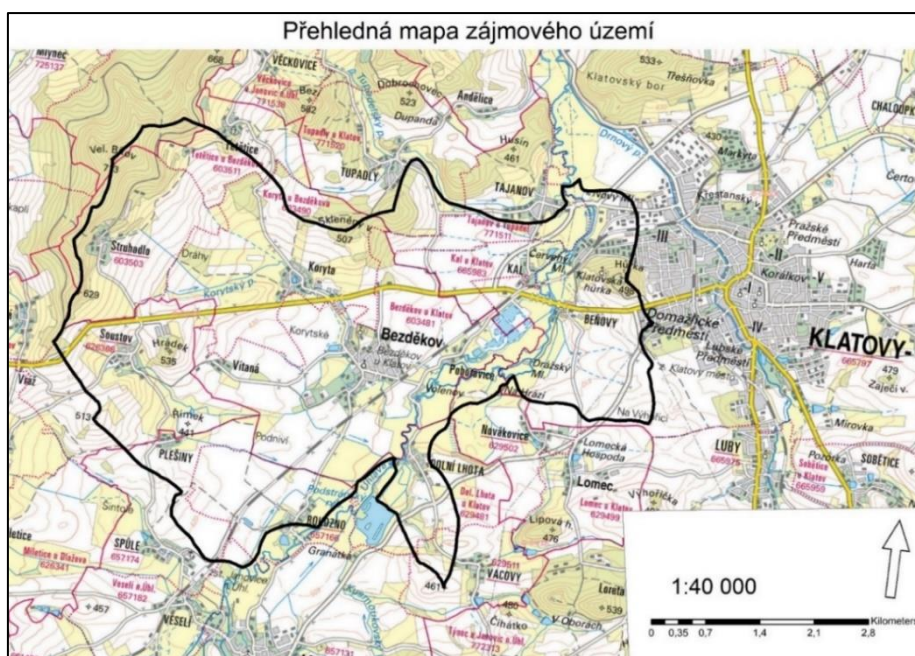
Téma diplomové práce bylo zvoleno z několika důvodů. Jelikož se zájmové území nachází v blízkosti mého bydliště, rád bych zde posoudil hydrologickou situaci. V mém zájmu bylo též zpracovat práci, která řeší odtoky z nepozorovaného povodí, kde není možná kalibrace dat měřeními průtoky. Tato lokalita patří dle ČHMÚ do oblasti s potenciálně významným povodňovým rizikem. Lokalita není ohrožena pouze zvýšeným povodňovým stavem řeky Úhlavy a následným vybřežením, ale dle vlastních zkušeností lokálním povrchovým odtokem v rámci malých povodí. Práce je z tohoto důvodu koncipována k vytvoření hydrologického modelu pro tři vybraná malá povodí IV. řádu, která jsou vyhodnocena společně.

4.1. Charakteristika zájmového území

Lokalita se nachází v Plzeňském kraji v blízkosti města Klatovy. Do zájmového území zasahují obce Bezděkov, Kal, Dolní Lhota, Rohozno, Plešiny, Vítaná, Soustov, Struhadlo, Koryta. Území patří do povodí řeky Úhlavy, jež protéká zájmovým územím. Řeka pramení na Šumavě konkrétně na severozápadních svazích hory Pancíř ve výšce 1110 m n. m. Rozloha celého povodí Úhlavy činí 915 km². Jedná se o povodí III. řádu. Odvodňuje část železnorudských hor. Dále tok protéká přes Švihovskou vrchovinu směrem do Plzeňské kotliny, kde se stéká s řekou Radbuzou. Společně s řekami Úslava, Radbuza a Mže tvoří řeku Berounku. Na řece Úhlavě se vyskytuje významná vodárenská nádrž zvaná Nýrská vodní přehradní nádrž. Jedná se o největší vodní nádrž v povodí Berounky s objemem ovladatelného

prostoru necelých 19 milionů m³. Zájmová oblast je složena ze tří povodí IV. řádu. Údolnicí prochází zmíněná řeka Úhlava, jež odvodňuje danou oblast. Uzávěrový profil řešeného území se nachází v těsné blízkosti obce Tajanov. Ve vzdálenosti několika stovek metrů od UZ se nalézá vodoměrná stanice Tajanov. Stanice leží na 61. říčním kilometru vodního toku Úhlavy a do tohoto bodu je odvoděno území o rozloze 338,7 km². Průměrný průtok ve stanici Tajanov je 3,46 m³/s. Řeka Úhlava má v zájmové oblasti především levostranné přítoky. Z hydrologického hlediska jsou významné potoky zejména Korytský potok (ř. km 68), Plešinský (ř. km 68) a Tupadelský potok (ř. km 61,5). Řeka Úhlava je dle historických událostí i z vlastních zkušeností známá častým výskytem povodňových stavů. Řeka Úhlava reaguje velice rychle zvýšeným odtokem v případě zásadnější srážkové události (povodně v roce 2002, 2006, 2013). Práce se přímo nezabývá modelováním průtoku v řece Úhlavě, ale zaměřuje se na odtokové procesy a hydrologické poměry v rámci vybraných povodí IV. řádu. Součástí práce je vyhodnocení velikosti povrchového odtoku vznikajícího v rámci těchto malých povodí v podhorských oblastech. Dále posouzení, jak tyto odtoky ovlivňují celkový průtok v korytě, zhodnocení jejich retenční schopnosti a také chování těchto povodí při srážko-odtokové události.

Obr. č. 9: Topografická mapa s vyznačením zájmového povodí (ČÚZK 2019)



4.2. Základní charakteristiky povodí

V rámci této kapitoly byly vyhodnoceny podrobně všechny potřebné charakteristiky povodí nezbytné pro modelování hydrologických procesů.

4.2.1. Geometrické charakteristiky

V lokalitě se nachází několik vesnic a část města Klatovy. Oblast má rozlohu 26,2 km² a zasahuje do 5 katastrálních území. (Klatovy, Bezděkov, Dlažov, Lomec, Janovice nad Úhlavou). Plochy jednotlivých povodí a celkové zájmové oblasti je uvedena v tabulce č. 3.

Tab. č. 3: Plocha dílčích povodí IV. řádu a celková plocha (Vlastní zpracování 2019)

Povodí (hydrologické číslo)	Plocha (km ²)
1-10-03-0360	8,59
1-10-03-0340	2,77
1-10-03-0330	15,57
Zájmové povodí	26,18

Za zájmové území byla stanovena plocha, jež obsahuje zmíněné tři povodí IV. řádu. Jelikož je území v některých místech zejména v údolní nivě kolem řeky Úhlavy velmi rovinaté, převzaté rozvodnice povodí nemusí plně odpovídat skutečnému stavu. Dle vytvořeného digitálního modelu terénu byla určena odpovídající rozvodnice. Z tohoto důvodu došlo k drobným odchylkám a celková plocha povodí byla zmenšena z 26,93 km² na 26,18 km². Základní topografická mapa s vyznačeným zájmovým územím se nachází v příloze č.1.

Tvar povodí je určen pomocí *součinitele asymetrie a*. Podle součinitele se určují povodí protáhlá, přechodná a vějířovitá.

- protáhlá povodí - $\alpha < 0,24$
- přechodného typu - $\alpha = 0,24 - 0,26$
- vějířovitá - $\alpha > 0,26$

Délka údolnice L_u byla stanovena jako nejdelší dráha odtoku pro dané povodí. Údolnice začíná na hranici povodí (rozvodnici) ve formě plošného odtoku, přechází na odtok soustředěný a následně na otevřené koryto a končí v uzavřeném profilu. Údolnice je v povodí tvořena Korytským potokem a řekou Úhlavou.

Tab. č. 4: Tvarové charakteristiky povodí (Vlastní zpracování 2019)

Charakteristiky povodí	F_L (km)	F_P (km)	a	α	L_u (km)	B (km)	Tvar povodí
Zájmová oblast	14,18	12	0,0837	0,1213	14,689	1,78	Protáhlé

4.2.2. Orografické poměry v povodí

Vyjadřují sklonové a výškové poměry v rámci povodí. Pro zjištění potřebných údajů např. nejvyšší a nejnižší místa v povodí, nadmořská výška uzávěrového profilu byly využity topografické podklady především vygenerované vrstevnice. Pro odvození výškových údajů byl použit digitální model terénu vygenerovaný z vrstevnic. Uvedené hodnoty výškových poměrů jsou dostatečně přesné.

Tab. č. 5: Orografické poměry v povodí (Vlastní zpracování 2019)

Sklonové a výškové poměry v povodí					
Minimální nadmořská výška H_{min} (m.n.m.)	Maximální nadmořská výška H_{max} (m.n.m.)	Průměrný nadmořská výška povodí Δ H (%)	Průměrný sklon povodí I_{sv} (%)	Průměrný sklon údolnice I_u (%)	Koeficient lesnatosti K_L (%)
384,67	712,17	443,72	8,24	0,0187	0,1164

4.2.3. Půdní a geologické charakteristiky povodí

Geologické a půdní poměry hrají důležitou roli při rozdělení povrchového a podpovrchového odtoku. Mají zásadní infiltrační význam z krátkodobého i dlouhodobého hlediska. Významný jev činí zastoupení propustných, polopropustných a nepropustných hornin na odtoky z povodí.

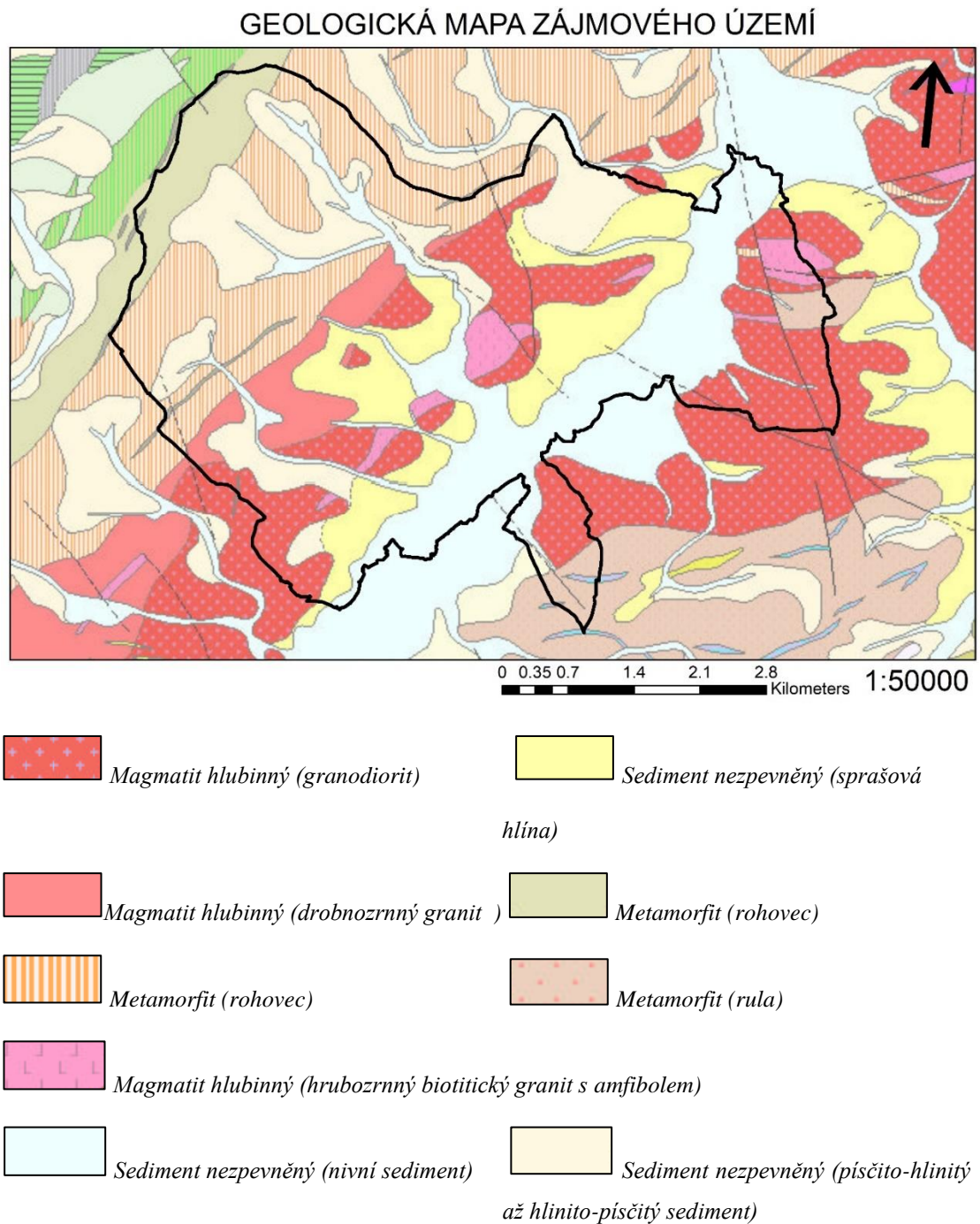
A) Geologické poměry v povodí

Horniny, které se nacházejí v zájmové oblasti, náleží ke geologické soustavě Český masiv, převážně krystalinikum a prevariské paleozoikum, částečně pokryté útvary a postvariskými magmaty. Horniny patří převážně k Moldanubické oblasti, některé ke Středočeskému plutonu u mladších hornin. U sedimentů není regionální oblast určena. Vyvřelé a metamorfované horniny se datují do Paleozoika (prvohory), konkrétně do období karbonu a permu, některé horniny až do Proterozoika (starohor). Sedimentární horniny jsou výrazně mladší horniny z hlediska geologického stáří se vznikem v Kenozoiku, konkrétně v období kvartéru (čtvrtohor). Vyvřelé, usazené a přeměněné horniny jsou z hlediska výskytu v zájmové oblasti zastoupeny poměrně rovnoměrně. Ve výše položených částech povodí se prosazují výrazně metamorfované horniny, rohovce a ruly. Ve středních polohách se definují hlavně vyvřelé horniny, granodiority, drobnozrnné a hrubozrnné granity.

V nejnižších místech povodí, převážně okolo vodních toků a v údolích, se vyskytují sedimentární horniny. Jde o nivní, písčitohlinité až hlinitopísčité sedimenty a sprašové hlíny.

Geologické složení hornin slouží jako mateční substrát, který má zásadní vliv na vlastnosti půdních typů vzniklých zvětráváním a dalšími procesy.

Obr. č. 10: Geologická mapa povodí (ArcGIS online 2019)



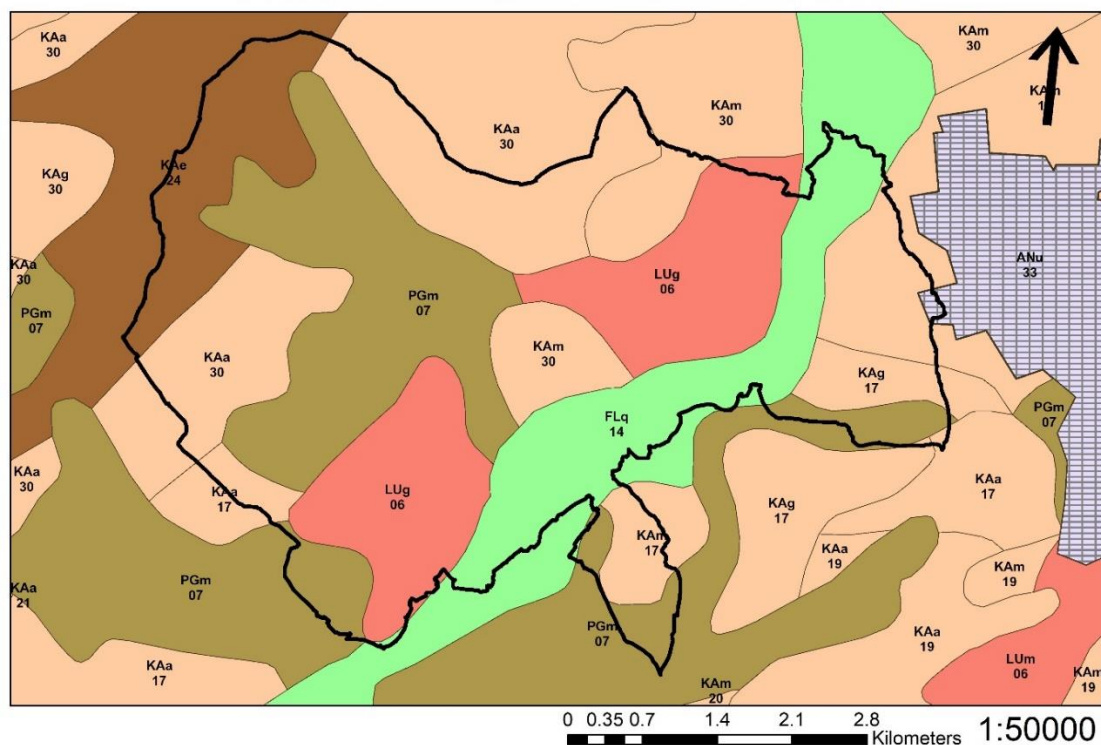
B) Pedologické poměry v povodí

Zastoupení a mocnost jednotlivých půdních typů je dána řadou faktorů zvané pedogeneze. Mezi pedogenetické faktory ovlivňující vývoj půdy se řadí mateční hornina, podnebí, vliv organismů, členitost a nadmořské výšky terénu, vliv člověka a zásadním faktorem je čas. Půdní typy vznikají pedogenetickými procesy jako jsou zvětrávání, přeměna organických látek, přemísťování, akumulace rozpustných látek a půdních koloidů, humifikace a další. Vlastnosti jednotlivých půdních typů ovlivňují infiltrační a retenční schopnost půd, která je velmi důležitá pro určení schopnosti povodí zadržovat vodu a pro odtokový režim. Vlastnosti půd ovlivňující odtok z povodí jsou zahrnuty v metodě odtokových CN křivek řešené v kapitole 4.4.3.

V nivách řek a v rovinnatém terénu kolem vodních toků jsou vázány převážně fluvizemě často s glejovými subtypy. Půdotvorný substrát těchto půd tvoří nivné sedimenty. Jsou zde zastoupeny také gleje se subtypem glej fluvický a modální, které jsou vázány především na místa s výskytem nehluboké úrovně podzemní vody. Dalším půdním typem v povodí jsou pseudogleje vyskytující se převážně v rovinnatém či mírně sklonitém terénu a často v terénních depresích. Typickým prvkem je opakující se převlhčení a opětované vysoušení těchto půd, proto se tento typ vyskytuje i v často zaplavovaném území. Půdotvorný substrát tvoří též polygenetické hlíny a glaciální uloženiny. Dalším hojně zastoupeným půdním typem je kambizemě a to hlavně na pevných horninách, v polohách pahorkatin a nižších či středních vrchovin. Půdotvorným substrátem těchto půd jsou svahoviny čedičů a sedimentárních hornin. V území se vyskytují kambizemě s několika půdními subtypy, převážně kambizemě mesobazické, oglejené a dystrické. Luvizemě se nacházejí v rovinnatém terénu s typickým sprašovým substrátem. V území jsou zastoupeny půdy se subtypem luvizemě oglejené a modální. Typickým substrátem jsou prachovce. V neposlední řadě se v oblasti objevují hnědozemě s půdním typem hnědozem luvická oglejená. Tyto půdy se obecně využívají pro zemědělskou činnost, jsou tedy hlavně v rovinnatém terénu.

Pro účely diplomové práce byly zkoumány především infiltrační a retenční vlastnosti půdních typů. Bylo využito databáze BPEJ, která nese informace o půdních typech v 2 a 3 čísle v HPJ. V hlavní půdní jednotce, jež je tvořena dvojčísly, jsou sděleny informace o typech a subtypech s jejich infiltrační rychlostí, propustností a retenční kapacitou. Tyto údaje byly využity při stanovení odtokových CN křivek dle kapitoly 4.4.3

PEDOLOGICKÁ MAPA ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ



PGm 07	<i>Stagnosoly (pseudoglej modální)</i>	KAA 30	<i>Kambisoly (kambizem kyselá)</i>
LUg 06	<i>Luvizosoly (luvizem oglejená)</i>	FLq 14	<i>Fluvisoly (fluvizem glejová)</i>
KAg 17	<i>Kambisoly (kambizem oglejená)</i>	KAe 24	<i>Kambisoly (kambizem eutrofní)</i>

Hlavní půdní typy se svými subtypy s největším zastoupením v řešeném území s přiřazenými HPJ:

HPJ 71 - FLg – fluvizem glejová (infiltrační rychlost D)

HPJ 23 - PGm – Pseudoglej modální (infiltrační rychlost D)

HPJ 34 - KAA – kambizem mesobazická, kyselá (infiltrační rychlost B)

HPJ 13 - LUg – Luvigem oglejená (infiltrační rychlost B)

HPJ 13 - LUm – Luvizem modální (infiltrační rychlost B)

HPJ 73 - KAg – kambizem oglejená mesobazická (infiltrační rychlost D)

HPJ 36 - KAd – kambizem dystrická (infiltrační rychlost B)

HPJ 37 - KAA – kambizem rankerová mesobazická (infiltrační rychlost B)

HPJ 14 - HNIg – hnědozem luvická oglejená (infiltrační rychlost B)

HPJ 64 - GLf – glej fluvický (infiltrační rychlost C)

HPJ 70 - GLm – glej modální (infiltrační rychlost D)

HPJ 56 - FLm – fluvizem modální (infiltrační rychlost B)

4.2.4. Vegetace v povodí

Vegetační kryt povodí je schopen zachytit určité množství srážkových úhrnů vlivem intercepce. Ta vyjadřuje množství vody zadržené na vegetaci v povodí. Ovlivňuje procesy výparu z půdy a rostlin. Evapotranspirace svými vlastnostmi významně zasahuje do plošného odtoku z povodí. Jedná se o důležitý proces při zadržování vody v povodí při srážkových událostech a pro celkovou správnou hydrologickou funkci. Maximální množství, které je vegetační kryt schopen zadržet, se vyjadřuje pomocí **potenciální intercepce** I_{pot} . Uvádí se jako poměr listové plochy k ploše povodí. Kapacita potenciální intercepce bývá obvykle dosažena krátce po začátku deště.

Sledované území leží v podhůří Šumavy v blízkosti města Klatovy. Z hlediska vegetace a využití půdy se jedná o zemědělsky výrazně využívanou oblast. Údolní niva řeky Úhlavy je v těchto poměrně dost široká, tudíž je rovinný terén zemědělsky využíván. Vyskytují se zde často velké územní celky s několika druhy plodin. Nejčastěji se zde pěstují úzkořádkové plodiny (obilniny, řepka olejka), širokořádkové (kukuřice) a další méně zastoupené plodiny. Z hlediska procentuálního zastoupení pokrývá 49 % celkové plochy orná půda.

V okolí řeky Úhlavy se rozléhají převážně pastviny a louky, jež zauímají své místo také v kopcovitém terénu blíže k rozvodnici povodí. Tato vegetace činí přibližně 27,5 % z celkové plochy. Doprovodná zeleň (trávníky, zahrady, remízky, vegetace a stromy kolem toků a cest a další) se počítá přibližně na 7 %.

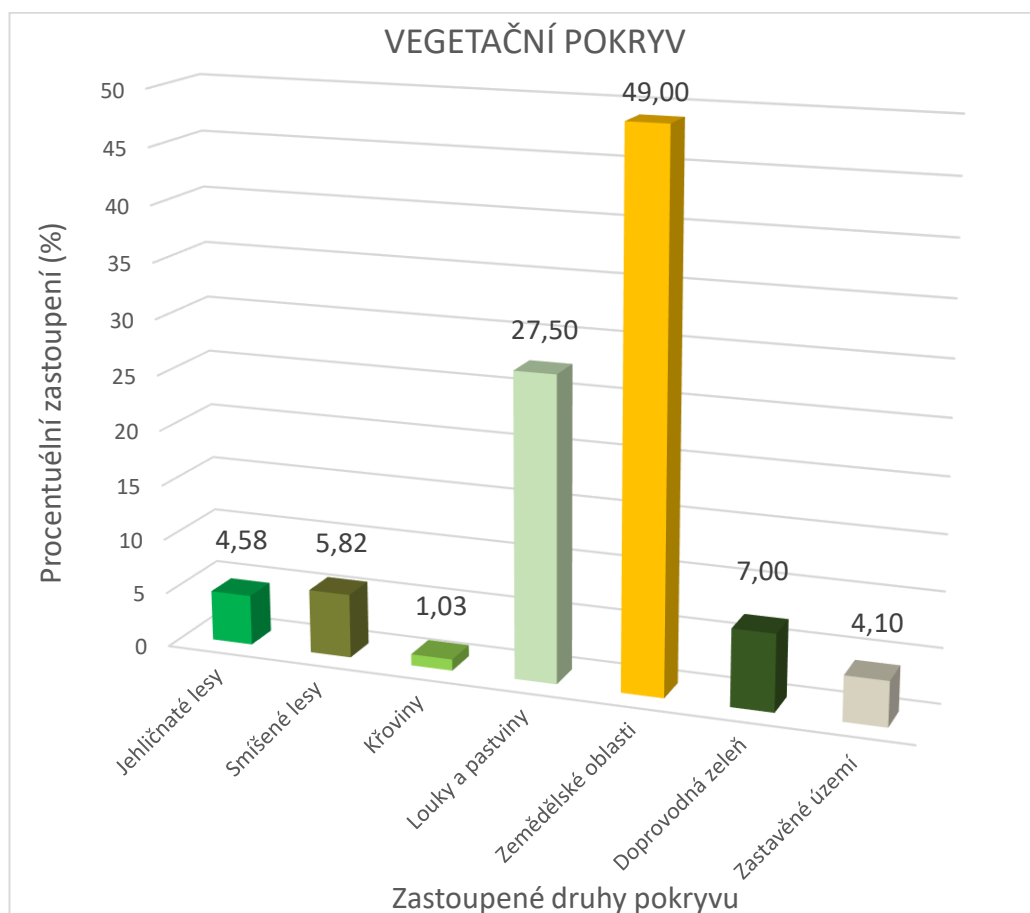
Z hlediska regulace povrchového odtoku hraje velmi důležitou roli les, jeho složení a poloha. Vzrostlý smíšený les s dostatečným množstvím lesní hrabanky a humusu bez narušení lidskou činností, dokáže velmi příznivě ovlivňovat odtok z povodí zejména v horní části povodí. V zájmové lokalitě jsou lesy převážně situovány do horních částí povodí, ovšem celkové zastoupení lesa je pouze necelých 11 %. Jedná se o les smíšený 6 % a les jehličnatý 5 %. Pro podrobnější analýzu byl proveden terénní průzkum lesů. Z výsledku vyplývá, že lesy jsou v dobrém stavu s dostatečným množstvím lesní hrabanky a humusu. Většinou se jedná o vyspělé lesy se souvislým zastoupením bylinného a keřového pásma. Lokálně je les zasažen těžbou dřeva, avšak ne v rozsahu, který by narušoval funkci lesa. Z hlediska potenciální intercepce dokáže listnatý les zadržet až 20 % spadlého deště a jehličnatý dokonce až 60 %.

V tabulce č. 6 se nachází maximální potenciální intercepce vybraných rostlin.

Tab. č. 6: Hodnoty potenciální intercepce pro různou vegetaci (Vlastní zpracování 2019)

Plodiny	Potenciální intercepce (mm)
Obilniny	0,20
Kukuřice	0,13
Louky a pastviny	0,40

Obr. č. 12: Vegetační pokryv v procentuálním zastoupení k celkové ploše povodí (Vlastní zpracování 2019)



4.2.5. Akumulace vody a vodní plochy v povodí

Voda je v povodí akumulována v povrchové depresích (prohlubních, brázdách, rýhách), dále v nádržích, jezerech, v bažinách a rašeliništích. Všechny tyto akumulační prostory mají vliv na retenci vody, hydrologickou bilanci, velikost a průběh odtoku z povodí.

Povrchové deprese mají různý tvar a mohou zadržet i značný objem vody. Často se jedná o brázdy vzniklé orbou či různými prohlubněmi. V povodí je velmi obtížné určit celkový objem depresí. Z tohoto důvodu se jimi způsobená ztráta odtoku

zahrnuje do tzv. celkové retence povodí v závislosti na využívání pozemků a způsobu obhospodařování. (Hrádek et. Kuřík 2002)

Pro modelování odtoku z povodí byly povrchové deprese odstraněny funkcí „fill sinks“, nebyly zahrnuty do modelu. Z hlediska vodních nádrží se v povodí nacházejí ve velmi malé míře průtočné, ve větší míře neprůtočné nádrže. Průtočné nádrže mají schopnost regulace odtoku akumulací vody v retenčním prostoru. Neprůtočné nádrže zadržují část povrchového odtoku svým akumulacním prostorem. Regulační schopnost průtočných nádrží na vodních tocích je dána jejím objemem a funkcí.

Jednoznačně největší neprůtočnou vodní nádrží je označována **pískovna** s celkovou plochou téměř 14 ha. Hloubky jsou rozdílné, dosahují často až 4-5 metrů. Jak již název říká, hlavní využití se týká těžby písku. Presentovaná oblast se využívá k rekreačním účelům. Jámy vzniklé těžbou jsou zatopené v důvodu vysoké hladiny podzemní vody. Tyto vodní plochy se nacházejí ve velmi rovinatém terénu v blízkosti řeky Úhlavy. Svojí polohou ovšem nijak výrazně neovlivňují odtokové poměry z povodí zvláště při rychlých přívalových srážkách.

Obr. č. 13: Vodní plocha pískovna u obce Kal (Vlastní zpracování 2019)



Další neprůtočnou nádrží tvoří **rybník Ovčák**. Leží v těsné blízkosti obce Bezděkov. Vodní plocha definuje rozlohu okolo 1 ha. Slouží jako rybochovný a požární rybník. Korytský potok protéká kolem rybníka. Z tohoto důvodu není využit jeho regulační a akumulacní potenciál při odtokovém procesu.

Obr. č. 14: Rybník Ovčák u obce Bezděkov (Vlastní zpracování 2019)



V oblasti se nacházejí další vodní plochy, které ovšem zaujímají velmi malou rozlohu a neovlivní příliš odtokový režim. Největší průtočnou nádrží se značí vodní plocha mezi vesnicemi Kal a Tajanov na Tupadelském potoce s rozlohou asi 0,8 ha. V obcích jsou často požární nádrže, které ovšem svým retenčním objemem nehrají významnější roli při odtoku.

4.2.6. Říční síť povodí

Říční síť se svým charakterem nejvíce přibližuje stromové struktuře. Vzhledem k poloze přítoků je spíše asymetrická. Dominantním vodním tokem zkoumaného povodí je řeka Úhlava, která protéká údolím území v délce necelých 7 km od 68. říčního km do 61. říčního km. Řeka má přírodní meandrující charakter povětšinou s nezpevněnými břehy pokryté travním porostem, vegetací a křovinami, s několika vodními stavbami, konkrétně jezy. Úhlava je v zájmové oblasti silně dotována levostrannými přítoky. Jedná se především Korytský potok, do kterého se těsně před ústím do Úhlavy vlévá Plešinský potok. Posledním důležitým vodním tokem je opět levostranný přítok řeky Úhlavy, a to Tupadelský potok, jenž ústí do řeky poblíž uzávěrového profilu povodí. Potoky mají převážně přírodní charakter. Většinou se charakterizují zatravněnými břehy a nezpevněnými dny. V některých úsecích lze

konstatovat patrné umělé napřímení toků. V obcích jsou v některých místech břehy zpevněny dlažbou či kameny a charakterizují se obdélníkovými či lichoběžníkovými tvary.

Obr. č. 15: Řeka Úhlava s vodoměrnou stanicí u obce Tajanov (Vlastní zpracování 2019)



Hlavní charakteristiky zmíněných vodních toků jsou uvedeny v tabulce č. 7. Jedná se především o údaje o podélném a příčném profilu vodních toků. Charakteristiky vodních toků jsou vyhodnoceny podle váženého průměru a zobecněny ze zjištěných pokladů topografických map, ortofoto map, vodní toky DIBAVOD a především z podrobného místního šetření v povodí. Hydrologická mapa zobrazující říční síť a povodí zájmové lokality je zobrazena v příloze č. 2.

Tab. č. 7: Charakteristiky hlavních vodních toků (Vlastní zpracování 2019)

Název toku	Délka (m)	Sklon (%)	Hloubka (m)	Průtočný profil (m ²)	R (m)	Začátek (m.n.m.)	Konec (m.n.m.)
Řeka Úhlava	6929	0,0015	2	25	1,43	395,2	384,7
Korytský potok	6528	0,013	1,7	6	0,72	486,5	395,2
Plešinský potok	4807	0,021	1,4	1,4	0,4	498	397,4
Tupadelský potok	1757	0,013	1,5	2,25	0,5	410	386,6

4.2.7. Antropogenní činnost

Z pohledu antropogenní činnosti v povodí se nejvíce projevuje zemědělská rostlinná produkce. Téměř 50% plochy povodí je využíváno jako orná půda k pěstování obecně rozšířených plodin řepky olejky, obilí a kukuřice. Velké zastoupení zde mají plochy s trvalým travním porostem (louky a pastviny), které mají obecně pozitivní vliv na funkce v povodí. Lesní plochy jsou zastoupeny velmi omezeně, jejich využívání je téměř bez negativního dopadu. Nепropustné plochy jsou koncentrovány hlavně v obcích. Největší zpevněnou plochu představuje obec Bezděkov.

Z pohledu tvorby odtoku je povodí výrazně zasaženo komunikací I. třídy ze směru Klatovy – Domažlice, která svojí polohou částečně narušuje přirozený odtok z povodí. Tento dopravní tah vede přes celé povodí. Odtok v těchto místech se soustředí do vodních koryt. Narušení přirozeného stavu tudíž není tak významné. Přes povodí procházejí také železnice ze směru Klatovy – Železná ruda. Ta probíhá v údolní nivě řeky Úhlavy. Na generování odtoku ve svažitých oblastech nemá vliv. Z celkového pohledu je povodí nejvíce ovlivněno způsobem zemědělského využití.

4.3. Podklady a příprava dat pro program HEC-HMS

Při přípravě dat pro program HEC-HMS byla použita celá řada nástrojů, jež jsou podrobně popsány v následujících kapitolách.

4.3.1. Použité programy a nástroje

Pro vytvoření hydrologického modelu a pro výpočet hodnot charakteristik byly použity tyto programy a databáze:

- Geoinformační program ArcMap
- Nástroje ArcHydroTools
- Nástroje HEC-GeoHMS implementované do ArcMap
- Program HEC-HMS
- Databáze DES-RAIN
- MS Excel

4.3.2. Vstupní data

Při vytvoření modelu HEC-HMS se pracovalo s celou škálou podkladů a dat. Jednalo se o vstupní data popisující topografické poměry v povodí, dále také podklady pro zpracování využití krajiny a další.

A) Data od ČÚZK

- data časových řad srážek z roku 2013 v denním kroku pro 2 srážkoměrné stanice a data v 10 ti minutovém kroku také pro 2 stanice
- Základní mapa ZABAGED ČR v měřítku 1: 10 000
- Ortofotomapa ČR
- Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) – formáty bodů X ,Y, Z

B) Další podklady

- Vrstva vodních toků DIBAVOD
- Vrstva vodních nádrží DIBAVOD
- Vrstva hydrologického členění - povodí IV. řádu DIBAVOD
- Vrstva pozorovací sítě povrchových vod DIBAVOD
- LPIS – Veřejný registr půd
- BPEJ – Bonitně půdně ekologická jednotka
- CORINE land cover ČR
- Pedologická mapa 1: 50 000
- Geologická mapa 1:50 000
- Katastrální mapa v digitální formě
- Data z databáze DES-RAIN

4.3.3. Tvorba podkladových vrstev

Pro práci v prostředí programu HEC-HMS při sestavení modelu a jeho následné simulace je nezbytná příprava podkladových vrstev tzv. „preprocessing“. Příprava dat je velmi důležitá i pro zpracování odtokových CN křivek.

Podkladové soubory pro tvorbu modelu se skládají ze dvou skupin. Jako první se jedná o podklady vycházející z digitálního modelu terénu DTM. Dále podklady zohledňující využití krajiny zájmového území tzv. „land use“. Jelikož hydrologické modely programu HEC-HMS pracují na základě odtokových CN křivek, je nezbytné vytvořit mapu využití krajiny s příslušnými hodnotami CN křivek.

A) DTM – digital terrain model (digitální model terénu)

Na základě získaných dat z ČÚZK byl vypracován v prostředí ArcGIS digitální model terénu pro zájmovou lokalitu. Výškopisná data digitálního modelu reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) byla poskytnuta úřadem souřadnicového systému S-JTSK a ve výškovém retenčním systému Balt po vyrovnání v ASCII kódování a formátu X, Y, Z. DMR 5G zobrazuje zemský povrch ve formě bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti TIN. Tento soubor bodů je nejkvalitnějším podkladem pro tvorbu digitálního modelu terénu v České republice. Je zatížen úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném území. Data byla získána metodou leteckého laserového skenování výškopisu ČR systémem LIDAR. (ČÚZK 2018)

Tvorba digitálního modelu terénu v prostředí ArcGIS

Nejdříve bylo nezbytné data v ASCII kódování a formátu X, Y, Z nahrát do prostředí ArcGIS pomocí nástroje *ASCII 3D to feature class* potřebná data. Data byla načtena jako bodová vrstva. Pro vytvoření DTM byla použita funkce *create TIN*. Jelikož při leteckém skenování nejsou paprsky schopny proniknout přes vodní plochy, tak ve vytvořené vrstvě nebyly zaneseny nadmořské výšky dna vodních koryt a ploch. Proto byly pro vytvoření hydrologicky korektního zahloubeného digitálního terénu použity příslušné nástroje, popsáno níže.

Prostředí programu HEC-HMS vyžaduje podkladní vrstvy DTM připravené ve formě rastru jinak gridu ve formě pravidelné čtvercové sítě bodů o stejné velikosti každé buňky rastru. Bylo potřeba DTM ve formě TIN převést do formy rastru. Z tohoto důvodu byly vygenerovány vrstevnice z TIN pomocí nástroje *surface contour*. Vrstevnice byly tvořeny s krokem 1 m. Nakonec s nástrojem *topo to raster* byl zhotoven DMT, který je optimální pro hydrologické účely. Výhoda nástroje spočívá, že při vytváření digitálního modelu lze přidat k vrstvě vrstevnic další vrstvy jako linie vodních toků, vodní plochy a např. vrstvu s rozvodnicí. Při vytváření DTM byla použita vrstva s hranicí rozvodnice, která byla nastavena na typ *Boundary*. Posléze byla využita vektorová vrstva s liniemi vodních toků, kde byl nastaven typ *stream*.

Pro účely správného zahloubení vodních toků do terénu byl proveden terénní průzkum vodních toků v zájmovém území. Na hlavním toku Úhlavy a dalších významných přítocích byla zaměřena na několika místech hloubka toku. Dále byly zmapovány i méně významné vodní linie jako jsou strouhy, různé viditelné rýhy. Tyto hloubky a poznatky z terénu byly zakomponovány do liniové vrstvy vodních toků, jež byla následně převedena na rastr s hloubkami. Zájmové území, kterým protéká řeka Úhlava, má velice širokou inundační oblast s velmi malými rozdíly nadmořských výšek. Řeka Úhlava má poměrně rozvětvenou síť ramen a náhonů. Z tohoto důvodu je vzhledem k malým rozdílům výšek poměrně obtížné vytvořit korektní digitální model terénu, který po použití následných funkcí (*flow direction a flow accumulation*) vytvoří vhodnou říční síť odpovídající vrstvě toků z portálu Dibavod. Proto byla využita funkce *Assign stream slope* společně s další funkcí *Generate From/To Node for Lines*. Tyto funkce vytvoří konstantní sklon vodního toku. Těch bylo následně využito v některých částech řeky Úhlavy, kde má řeka velmi malý sklon.

Takto připravená liniová vrstva vodních toků obsahující nadmořské výšky zahloubených koryt byla použita v dalších krocích pro tvorbu hydrologicky korektního digitálního modelu terénu, následně pomocí funkce *minus* k odečtení rastru hloubek toků od digitálního modelu terénu. Výsledný rastr, jenž obsahuje informaci o výškách dna vodních toků, byl převeden na bodovou vrstvu pro další využití.

Tato bodová vrstva vodních toků byla aplikována při tvorbě digitálního modelu terénu, kde už byly takto zakomponovány skutečně zahloubené vodní toky. Do funkce *Topo to raster* byly jako vstupní vrstvy definovány vrstvy s vrstevnicemi, dále linie vodních toků, rozvodnice a vytvořená bodová vrstva vodních toků obsahující informace s výškou dna koryt. Takto vytvořený digitální model terénu byl následně používán pro další funkce z extenze ArcHydroTools a HecGeoHMS a k odhadu charakteristik povodí. Vytvořený DTM se nachází v příloze č. 3.

B) Tvorba Land use – krajinný pokryv zájmového území

Dalším krokem při přípravě podkladů pro práci v prostředí HEC-HMS bylo vytvoření vrstvy s využitím krajiny (land use). K této vrstvě budou následně přiřazeny hodnoty čísel odtokových křivek CN dle vhodné kategorizace. Při volbě klasifikačního schéma krajinného pokryvu je potřeba vzít v úvahu metodu aplikovanou pro s-o modelování, půdní poměry, druh využití a pokryv krajiny.

Zásadní faktory ovlivňující změny využití území představují odlesnění krajiny, intenzivní konvenční zemědělství, urbanizace a industrializace území. Se zohledněním těchto skutečností bylo vytvořeno optimální klasifikační schéma pro konkrétní oblast.

Byly použity tyto podklady pro tvorbu land use:

- Základní mapa ZABAGED ČR v měřítku 1: 10 000
- Ortofotomapa ČR
- Vrstva polygonů vodních toků nádrží DIBAVOD
- LPIS – Veřejný registr půd
- BPEJ – Bonitně půdně ekologická jednotka
- CORINE land cover 2012 ČR
- Katastrální mapa v digitální formě

Postup při tvorbě land use

Při tvorbě polygonové vrstvy byla použita převážně ortofotomapa, polygony z LPIS, základní mapa ČR a poznatky z terénního průzkumu. Postupnou *vektORIZACÍ* jednotlivých prvků krajinného pokryvu byla zhotovena výsledná vrstva s jednotlivými kategoriemi využití území. Kategorie využití území rozdělené do krajinných prvků byly převzaty z publikace Applied hydrology a dle klasifikace autora Janečka. (Ven Te Chow a kol 1988.; Janeček a kol. 2012)

Seznam prvků krajinného pokryvu:

- Úhor
- Orná půda
- Pastviny s pokryvem >75%
- Louky
- Křoviny s pokryvem <50%
- Křoviny s pokryvem 50-75%
- Křoviny s pokryvem >75%
- Sady se zatravněným meziřadím (doprovodná zeleň, zahrady)
- Lesy
- Komunikace zpevněné (dlážděné, živičné, šterkové)
- Komunikace nezpevněné (hliněné, prашné, polní cesty)
- Nepropustné plochy

Výstup tvoří vrstva, jež je kategorizována dle výše uvedené klasifikace, ke všem kategoriím krajinného pokryvu byly vypočteny plochy. Dále je tato vektorová vrstva

využití půdy (land use) použita především pro stanovení hodnoty CN křivek viz kapitola 4.6.

4.4. Stanovení návrhového deště

Návrhová vstupní srážka byla stanovena pro dva druhy srážek. Byly definovány N-leté srážkové úhrny s určenou dobou trvání. Další typ vstupních srážek tvoří časová řada ve formě návrhového *hyetogramu* srážkových úhrnů odvozeného z okolních srážkoměrných stanic.

4.4.1. Návrhový dešť pro epizodní model

Pro odvození návrhové srážky pro zájmové povodí bylo využito dat ze čtyř meteorologických stanic ČHMÚ v nejbližším okolí povodí. Jedná se o stanice Klatovy, Chudenice, Libkov a Strážov, která tvoří čtyřúhelník, uprostřed kterého je zájmové území. Byla získána data srážkových úhrnů v desetiminutovém kroku ze stanic Klatovy a Chudenice, data v denním kroku z Libkova a Strážova pro rok 2013. Vzhledem k velikosti povodí a odtokové odezvě se stanovenou dobou koncentrace 169 minut bylo potřeba provést odhad srážek v krátkém časovém intervalu. Správně zvolený časový interval je velmi důležitý pro optimální časové rozložení vstupních dat. Bohužel dostatečně podrobná data poskytují pouze dvě stanice, proto byla pomocí metody inverzních vzdáleností odhadnuta časová řada srážek v desetiminutovém kroku pro stanice Staňkov a Libkov.

Dále byl určen geometrický střed povodí, pro něhož byla odhadnuta časová řada srážek ze všech čtyř srážkoměrných stanic opět metodou inverzních vzdáleností. Metoda IDW přiřazuje každému bodu váhu na základě vzdálenosti, tedy čím menší délka, tím vyšší váha. Takto byla odvozena časová řada v desetiminutovém kroku pro povodí. Z této časové řady byla vybrána srážková událost pro epizodní hydrologický model, popsáno v kapitole 5.1.1.

4.4.2. N-letý návrhový dešť

Ke stanovení vstupní srážky s určitou N-letostí byla použita databáze DES-RAIN. Z této databáze byly odvozeny různé N-leté srážky v pěti-minutových krocích s dobou trvání 169 minut. K odvození pravděpodobné srážky byly použity data ze stanice Klatovy, jelikož ostatní dostupné stanice jsou ve velké vzdálenosti od povodí a na odvozené srážky mají zanedbatelný vliv.

Tab. č. 8: N-leté návrhové srážkové úhrny pro řešené povodí (DES-RAIN 2019)

Návrhové srážkové úhrny						
N - letost	2	5	10	20	50	100
N – letá maximální denní úhrn srážek (mm)	35,7	48,1	56,1	64,4	74,6	82,6
N – letá srážka s dobou trvání 169 minut (mm)	23,25	34,48	42,14	51,33	63,54	72,49

4.5. Doba dotoku a doba koncentrace

Doba dotoku a koncentrace znamenají zásadní charakteristiky povodí určující jeho odtokovou odezvu na příčinný vstupní déšť. Byly zpracovány výpočty doby koncentrace podle dvou přístupů. Ty byly následně porovnány a pro hydrologický model byla pak vybrána vhodnější doba koncentrace.

4.5.1. Metoda SCS pro vypočtení doby koncentrace

Doba koncentrace byla spočítána dle vzorce SCS (Soil Conservation Service) pro odvození T_{LAG} . Vyjadřuje časový posun v hodinách mezi výskytem maxima příčinné srážky a výskytem kulminačního průtoku v počítaném celkovém uzávěrovém profilu povodí.

Obr. č.16: Rovnice č. 6

$$T_{LAG} = \frac{L^{0,8}(S + 1)^{0,7}}{1900\sqrt{Y}}$$

L délka údolnice k rozvodnici (feet)

S maximální retence povodí (inches)

Y průměrný sklon povodí (%)

Doba koncentrace je obecně odhadnuta jako:

Obr. č. 17: Rovnice č. 7

$$T_c = 1,67 * T_{LAG}$$

Tab. č. 9: Výsledná hodnota doby koncentrace a charakteristiky povodí (Vlastní zpracování 2019)

L (m)	L (feet)	S (mm)	S (inches)	Y (%)	T_{LAG} (hod)	T_c (hod)	T_c (min)
14689,4	48193,7	88,27	3,475	8,24	2,92	4,87	292,5

4.5.2. Výpočet doby doběhu a koncentrace dle metodiky Janečka a kol.

Byla provedena metodika dle autora Janečka a kol., která celkovou odtokovou dráhu (údolnici povodí) dělí do tří částí dle způsobu odtoku. První část se zabývá začátkem odtoku v hydraulicky nejvzdálenějším místě povodí **plošný povrchový odtok**, za ním následuje **soustředěný odtok o malé hloubce** a nejdlejší část odtokové dráhy tzv. **otevřená koryta**. Pro určení celkové doby koncentrace se určí dílčí doba dotoku v každé ze tří uvedených kategorií. Přesnost výpočtu se odvíjí od morfologie a znalosti povodí, definování správných hodnot u jednotlivých odtokových linií

A) Plošný povrchový odtok

Je tvořen z hydraulicky nejvzdálenějšího bodu v povodí. Jedná se o povrchový svahový odtok, který přechází v soustředěný odtok o malé hloubce. Tento odtok obvykle bývá kratší než 100 m. V tomto případě lze využít Manningovu kinematickou rovnici pro výpočet doby doběhu T_{ta} . Hodnoty Manningova drsnostního součinitele n jsou odvozeny pro odtokovou dráhu o hloubce do 3 cm pro různé druhy povrchů terénu.

Obr. č. 18: Rovnice č. 8

$$T_{ta} = 0,007 \left(n * \frac{l}{0,3048} \right)^{0,8} / \left[\left(\frac{H_{s2}}{25,4} \right)^{0,5} * s^{0,4} \right]$$

T_{ta} je doba doběhu (hod)

n Manningův součinitel drsnosti

l délka dráhy proudění (m)

H_{s2} úhrn 24 hodinového deště s dobou opakování 2 roky (mm)

s sklon povrchu ($m \cdot m^{-1}$)

Z tabulky č. 10 byla odvozena hodnota Manningova drsnostního součinitele n pro vyskytující se povrch v povodí.

Tab. č. 10: Hodnoty drsnostního součinitele n pro různé povrchy (Janeček a kol., 2012)

Popis povrchu	Manningův součinitel drsnosti pro plošný povrchový odtok (n)
Hladký povrch (beton, asfalt, štěrk, holá půda)	0,011
Úhor bez posklizňových zbytků	0,05
Obdělávaná půda s posklizňovými zbytky pokrývajícími: < 20 % povrchu > 20 % povrchu	0,06 0,17
Travní porost: nízký, středně vysoký, hustý	0,15 0,24 0,41
Les s bylinným porostem – povrchový odtok do 3 cm: porost řídký porost hustý	0,40 0,80

Tab. č. 11: Doba doběhu a vstupní hodnoty do výpočtu (Vlastní zpracování 2019)

T_{ta} (hod)	n	l (m)	H_{s2} (mm)	S (m/m)
0,71	0,6	100	35,7	0,238

Úsek plošného odtoku se nachází v celé své části v jehličnatém lese. Z tohoto důvodu byla použita hodnota drsnostního součinitele **n = 60**, jelikož les má hustotu porostu přibližně odpovídající této hodnotě.

B) Soustředěný odtok o malých hloubkách

Soustředěný odtok nastává obvykle po 100 m plošného odtoku v podobě odtoku v erozních rýhách, struh a rygolů. Doba doběhu je určena dle rychlosti a délky proudění tohoto úseku. Výpočet doby doběhu pro úsek soustředěného odtoku o malých hloubkách se řídí podle rovnice:

Obr. č. 19: Rovnice č. 9

$$T_{tb} = \frac{l}{3600} * v$$

T_{tb} doba doběhu (hod)

L délka proudění (m)

v střední průřezová rychlost (m/s)

Průměrná rychlost proudění je určena na základě závislosti průměrné rychlosti a na velikosti sklonu odtokové dráhy. Pro výpočet průměrné rychlosti pro nezpevněný povrch byla využita Manningova rovnice s použitím součinitele drsnosti $n = 0,05$ a hydraulického poloměru $R = 0,12$. Pro zpevněný povrch jsou hodnoty $n = 0,025$ a $R = 0,06$ m.

Rovnice pro výpočet průměrné rychlosti pro zpevněný a nezpevněný povrch:

Obr. č. 20: Rovnice č. 10

➤ pro nezpevněný povrch $v = 4,918 * s^{0,5}$

➤ pro zpevněný povrch $v = 6,196 * s^{0,5}$

v střední průřezová rychlost (m/s)

s sklon odtokové dráhy (m/m)

Koryto v celé své délce zaujímá přírodní charakter bez zpevněných břehů či dna. Z tohoto důvodu byla využita rovnice pro nezpevněný povrch.

Tab. č. 12: Doba dotoku a další charakteristiky dráhy odtoku (Vlastní zpracování, 2019)

T_{tb} (hod)	n	l (m)	v (m/s)	s (m/m)
0	0,05	1128,5	1,79	0,133

C) Otevřená koryta

Otevřená koryta obecně začínají tam, kde se dá příčný profil toku zaměřit. Obvykle je tato poslední část odtokové dráhy již zakreslena na mapě. Průměrná rychlost proudění byla stanovena pro průtok otevřeným korytem podle Manningovy rovnice ve tvaru:

Obr. č. 21: Rovnice č. 11

$$v = \frac{l}{n} * R^{\frac{2}{3}} * s^{1/2}$$

- v střední průřezová rychlost (m/s)
- R hydraulický poloměr (m)
- S plocha příčného profilu koryta (m²)
- O omočený obvod (m)
- s sklon koryta (m/m)
- n drsnostní součinitel

Hydraulický poloměr byl vypočten dle vzorce:

Obr. č. 21: Rovnice č. 12

$$R = \frac{S}{O}$$

Hodnota Manningova drsnostního součinitele **n** byla určena podle tabulky č. 13.

Tab. č. 13: Hodnoty drsnostního součinitele n pro různá koryta (Janeček a kol. 2012)

Charakteristika koryta	Manningův součinitel drsnosti pro otevřená koryta (n)
Betonové tvárnice spárované	0,012
Betonové tvárnice	0,013
Stuskobetonové tvárnice "Klas"	0,014
Kamenná dlažba spárovaná	0,022
Polovegetační tvárnice	0,025
Zemní koryto pravidelné, kosené	0,025
Kamenná dlažba na sucho, hrubá	0,029
Kamenná rovnanina	0,032
Polovegetační tvárnice, vzrostlý dn	0,033
Zemní koryto pravidelné, nekosené	0,033

Doba doběhu byla stanovena dle vzorce:

Obr. č. 22: Rovnice č. 13

$$T_{tc} = \frac{l}{3600} * v$$

T_{tc} doba doběhu (hod)

Doba doběhu pro odtokovou dráhu s charakterem otevřeného koryta byla vypočtena pro Korytský potok a pro řeku Úhlavu s celkovou délkou 13,5 km. Jelikož koryto v celé odtokové dráze (údolnici) má proměnný tvar, velikost říčního profilu a také sklon, je nutné toky rozdělit na jednotlivé úseky. U Korytského potoka bylo koryto rozděleno na několik částí podle příčného profilu a sklonu. Následně byla vypočtena pomocí váženého průměru délek jednotlivých úseků výsledná hodnota doby doběhu. Řeka Úhlava má poměrně konstantní tvar i hloubku říčního koryta. Bylo provedeno rozdělení podle sklonů a následně byl pomocí váženého průměru délek vypočten výsledný sklon pro celý úsek. Z tohoto sklonu byla stanovena doba doběhu pro řeku Úhlavu. Nakonec byly sečteny všechny hodnoty pro jednotlivé úseky a byla definována finální hodnota pro dobu doběhu v otevřených korytech.

Výsledné hodnoty dob dotoku pro Korytský potok a řeku Úhlavu definuje tabulka č. 13.

Tab. č. 14: Doby dotoku a charakteristiky odtokové dráhy (Vlastní zpracování 2019)

Vodní tok	T_{tc} (hod)	n	l (m)	v (m/s)	s (m/m)	R (m)
Korytský potok	0,72	0,033	6531,34	2,86	0,0139	0,72
Úhlava	1,43	0,033	6929,59	1,50	0,0015	1,43

Celková doba doběhu pro úsek klasifikovaná jako otevřené koryto činí $T_{tc} = 1,92$ hod

Doba koncentrace pro celkovou odtokovou dráhu (údolnici) ve zkoumaném povodí byla vypočtena sečtením dílčích dob dotoku pro jednotlivé části odtoku:

Obr. č. 23: Rovnice č. 14

$$T_c = T_{ta} + T_{tb} + T_{tc}$$

Celková doba koncentrace pro zkoumané povodí se stanovuje na hodnotu **2,81** hod. Hodnota odpovídá době **Tc = 168,8** minut.

Tab. č. 15: Výsledné hodnoty doby koncentrace (Vlastní zpracování 2019)

Délka údolnice (m)	Průměrný sklon (%)	Doba koncentrace (hod)	Doba koncentrace (min)
14689,43	0,0187	2,81	169

4.6. Stanovení hodnoty odtokových CN křivek

Pro odvození hodnot odtokových CN křivek byla využita metodika dle autora Janečka a kol. Čísla odtokových CN křivek byla analyzována na základě údajů ze třech oblastí. Jedná se o hydrologické vlastnosti půd, její vlhkosti a využití.

Hydrologické vlastnosti půd

Hydrologické vlastnosti půd jsou děleny do čtyř skupin (A, B, C, D) na základě minimálních infiltračních rychlostí vody do půdy bez pokryvu po dlouhodobém sycení. Rozdělení jednotlivých skupin je uvedeno v tabulce č. 16.

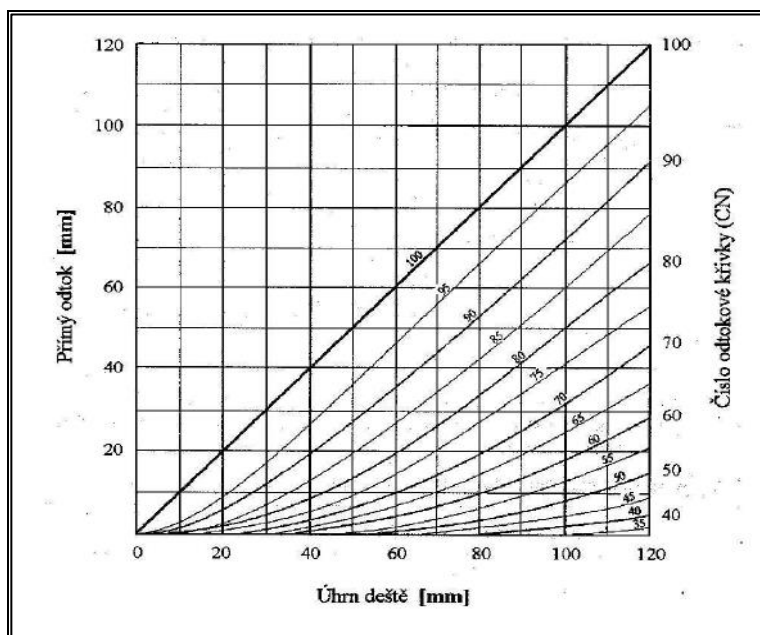
Vlhkost půdy

Je určena na základě předchozích vláhových poměrů dle indexu IPS. Po stanovení vlhkosti půdy je aplikován pěti-denní srážkový úhrn přechozích dnů. Index je rozdělen do tří skupin. IPS I je určen jako minimální vláhový podíl v půdě, který umožňuje spolehlivou orbu a obdělávání. Naopak IPS III zahrnuje hodnoty vlhkosti půd, jež jsou přesyceny vodou z předcházejících úhrnů srážek. Pro návrhové účely se využívá střední hodnota IPS II.

Využití půdy

Využití půdy závisí na zastoupení vegetačního pokryvu, množství zastavěného území a cest, zastoupení a stavu lesních ploch, na způsobu obdělávání, stavu zemědělské půdy a zastoupení protierozních opatření.

Obr. č. 24: Diagram závislosti odtoku na srážkách a CN křivek (Janeček a kol. 2012)



Pro výpočet hodnoty CN křivek bylo aplikováno rozdělení do čtyř skupin dle hydrologických vlastností půd. Hydrologické skupiny A, B, C, D jsou tabelovány na základě minimálních infiltračních rychlostí půd po dlouhodobém sycení. Jednotlivé hydrologické půdní skupiny určují hydrologické vlastnosti půd společně s infiltrační rychlostí. Půdní skupiny A zahrnuje půdy s vysokou rychlostí infiltrace, naopak D vykazuje velmi nízkou rychlost infiltrace (MŽP 2008)

Tab. č. 16: Rozdělení hydrologických skupin půd z hlediska infiltrace (VÚMOP 2019)

Hydrologická skupina půdy	Hydrologické vlastnosti	Infiltrační rychlost [mm ³ ·min ⁻¹]
A	Půdy hluboké, dobře až nadměrně odvodněné písky nebo šterky	vysoká rychlost (>0,20)
B	Půdy středně hluboké až hluboké, středně až dobře odvodněné, hlinitopísčité až jílovitohlinité	Střední rychlost (0,1 - 0,20)
C	Půdy s málo propustnou vrstvou v původním profilu a půdy jílovitohlinité až jílovité	Nízká rychlost (0,05 - 0,1)
D	Jíly s vysokou bobtnatostí, půdy s trvale vysokou hladinou podzemní vody, půdy s vrstvou jílu na povrchu nebo těsně pod ním a mělké půdy na téměř nepropustném podloží	Velmi nízká rychlost (<0,05)

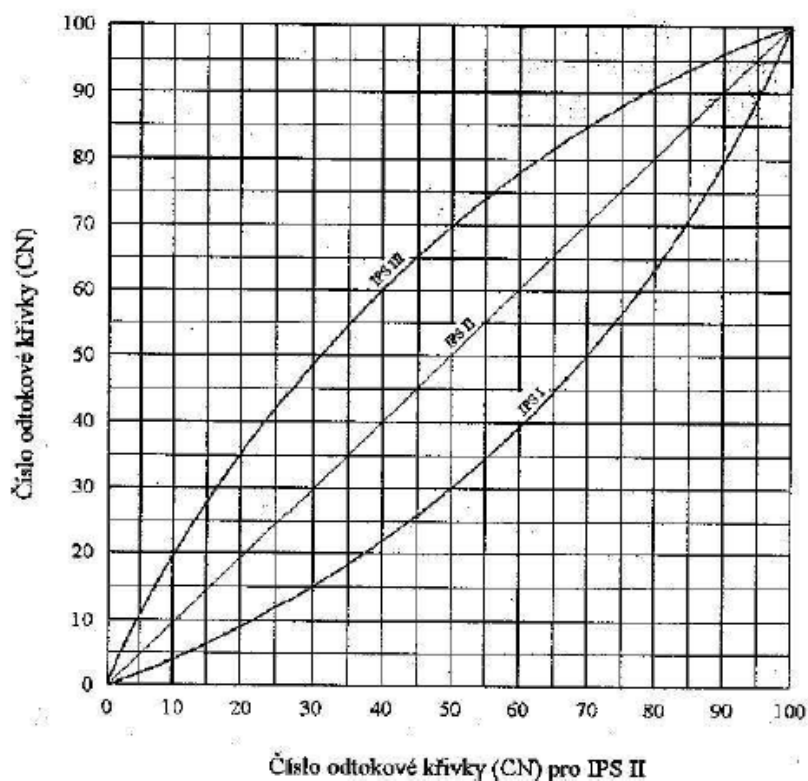
Vlhkost půdy je určována na základě předcházejícího pětidenního úhrnu srážek, který je vyjádřen pomocí indexu srážek IPS do tří stupňů. IPS odpovídá nominálnímu obsahu vody pro možnost orby a obdělávání. Naopak při IPS III je orba přesycena vodou.

Tab. č. 17: Stav předchozích vláhových podmínek IPS (Podhrázká 2003)

Skupina IPS	Úhrn srážek za 5 dnů [mm]	
	Mimovegetační období	Vegetační období
I	<13	<36
II	13 - 28	36 - 53
III	>28	>53

Obr. č. 25 popisuje, jak velký vliv mají předchozí vláhové podmínky na výslednou hodnotu odtokových CN křivek. IPS I se rovná suché půdě, IPS II odpovídá střednímu nasycení a IPS III značí velmi nasycenou půdu. Pro účely této diplomové práce bylo použito hodnot **IPS II**, které jsou dle autora Janečka vhodné pro návrhové účely.

Obr. č. 25: Graf závislosti CN křivek na vláhových podmínkách (Janeček a kol. 2012)



Pro určení čísel odtokových CN křivek rozdělených dle hydrologických vlastností A, B, C, D je nezbytné využít BPEJ pro jejich zatřídění. Bonitně-půdní ekologická

jednotka se skládá z pěti čísel. Pro stanovení hodnot CN postačí číslo 2 a 3 představující HPJ. Zatřídění bylo provedeno dle tabulky. č. 18.

Tab. č. 18: Hydrologické půdní skupiny podle HPJ získané z BPEJ (Janeček a kol. 2012)

HPJ (2. a 3. č. BPEJ)	Hydrologická půdní skupina	HPJ (2. a 3. č. BPEJ)	Hydrologická půdní skupina	HPJ (2. a 3. č. BPEJ)	Hydrologická půdní skupina
1	B	27	B	53	D
2	B	28	B	54	D
3	C	29	B	55	A
4	A	30	B	56	B
5	A	31	A	57	C
6	C	32	A	58	C
7	D	33	B	59	D
8	B	34	B	60	B
9	B	35	B	61	D
10	B	36	B	62	C
11	B	37	B	63	D
12	B	38	B	64	C
13	B	39	C	65	C
14	B	40	B	66	D
15	B	41	B	67	D
16	B	42	B	68	D
17	A	43	B	69	D
18	B	44	C	70	D
19	B	45	C	71	D
20	D	46	C	72	D
21	A	47	C	73	D
22	B	48	C	74	D
23	C	49	D	75	C
24	B	50	C	76	D
25	B	51	C	77	C
26	B	52	C	78	C

Tabulka č. 19 obsahuje data roztržena podle hydrologických půdních skupin, jež mají zásadní vliv na hodnotu CN křivek. Při určení čísla odtokové křivky CN ke každému využití půdy se vychází nejen z určené hydrologické půdní skupiny, ale též z hydrologických podmínek, jež se dělí:

- Šp – špatné hydrologické podmínky bránící infiltraci vody do půdy a zvyšující odtok
- Stř – střední hydrologické podmínky
- Db – dobré hydrologické podmínky zvyšující infiltraci do půdy a snižující odtok

Tab. č. 19: Průměrná čísla odtokových křivek CN pro IPS II (Janeček a kol. 2012)

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

V obecné rovině se stanovují hydrologické podmínky převážně pro zemědělsky využívanou půdu a pro lesní části povodí, jelikož tyto plochy mají obvykle zásadní

vliv na povrchový odtok z povodí. Postup při stanovení odtokových křivek CN pro ornou půdu a lesy jsou popsány v kapitole 4.6.1.

4.6.1. Postup pro stanovení odtokových křivek CN pro lesy a ornou půdu

V dostupné vektorové vrstvě BPEJ, která byla získána z portálu Státního pozemkového úřadu (SPÚ, 2019) nejsou obsaženy informace o všech plochách zájmového území. Z tohoto důvodu byla doplněna informace pro následné stanovení hydrologické půdní skupiny. Informace o BPEJ chybí převážně v místech, kde se nachází lesní plochy. Pro určení kvality a typu lesního porostu bylo využito informací OPRL a SLT. Tyto informace potřebné ke stanovení plošného zastoupení jednotlivých typů půdních porostů byly získány z portálu Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHÚL, 2019). Z uvedených pokladů nebyly též získány dostatečně přesné údaje pro konkrétní účely této práce, jelikož lesní celky nejsou v dostatečně podrobném měřítku. Z tohoto důvodu bylo provedeno místní šetření a na několika místech v terénu zhotoveny povrchové sondy, zhodnocení lesa, zjištěna hloubka a stav hrabanky. Dále bylo zhodnoceno zastoupení jednotlivých bylinných, keřových, stromových pater a také byla vyhodnocena antropogenní činnost v lesních porostech. Pro další analýzu bylo pracováno s pedologickou mapou, ze které byly získány informace o půdních typech. Z katalogu BPEJ, jež je dostupný na portálu Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půd (VÚMOP, 2019), byly zjištěny informace o hydrologické půdní skupině náležící každému půdnímu typu. Následně proběhlo zařazení zbývajících ploch pomocí hydrologické půdní skupiny.

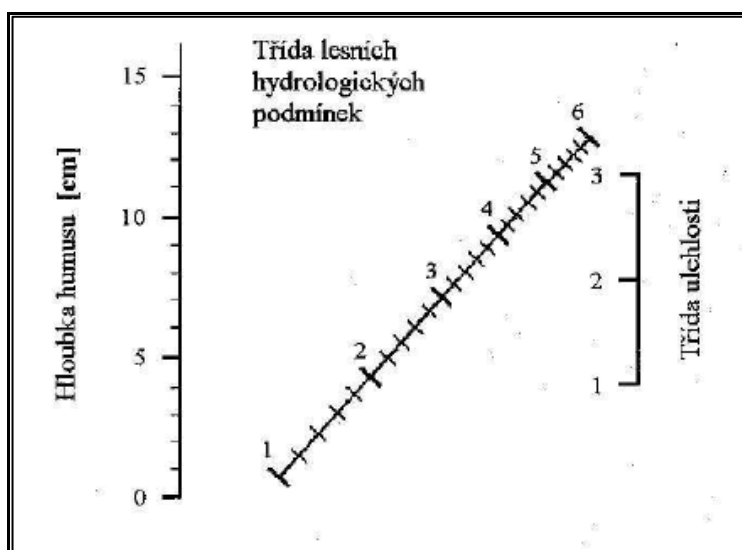
Pro správné stanovení CN křivek pro lesní plochy a zemědělsky obdělávané plochy je nutné určit citlivěji výslednou hodnotu CN pro každou lokalitu. V první řadě bylo analyzováno, zda jsou na jednotlivých plochách dobré, střední či naopak špatné hydrologické podmínky. U zemědělsky využívané orné půdy jsou hydrologické podmínky převážně závislé na zastoupení porostu během roku, jetelotrav v osevním postupu a také procentuální množství posklizňových zbytků. U lesních porostů jde především o zastoupení, hloubku lesní hrabanky (jehličí, listy na povrchu), dále o kompaktnost stromového, keřového a bylinného patra z důvodu dobrého pokrytí povrchu. Důležitou roli zde hraje narušení lesa kvůli antropogenní činnosti. Vznikají cesty a rýhy, které odvádí vodu z lesních porostů a výrazně tím narušují přirozený funkční lesní hydrologický systém.

Obrázek č. 26, 27 a tabulka č. 20 obsahují data, jež byly společně s dalšími informacemi využity při stanovení CN křivek pro lesní porosty.

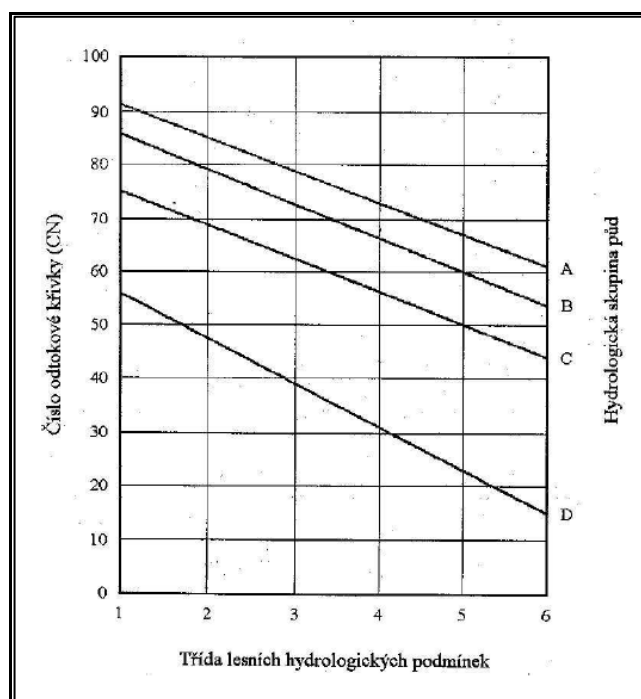
Tab. č. 20: Ohodnocení nadložního humusu pro určení CN (Janeček a kol. 2012)

Humus	Třída ulehlosti
zcela slehlý	1
málo slehlý	2
kyprý a sypký	3

Obr. č. 26: Graf pro určení lesních hydrologických podmínek (Janeček a kol. 2012)



Obr. č. 27: Diagram pro určení CN na základě lesních hydrologických podmínek hydrologické skupiny půd (Janeček a kol. 2012)



Z poznatků z místního šetření lze konstatovat fakt, že na většině míst měří hloubka a zastoupení lesní hrabanky v rozmezí 5-7 cm. Nadložní humus zaujímá hloubku kolem 10 cm či více. Bylinné, keřové a lesní pásmo bylo povětšinou dostatečně zastoupené. V některých místech se zjistila poměrně výrazná těžba dřeva. Narušení povrchu a stavu lesa, částečně i vytvoření umělých odvodňovacích rýh bylo zohledněno při stanovení čísla CN. Obecně se třída lesních hydrologických podmínek pohybovala v rozmezí 3,5 – 5,5 dle diagramu. Závěrem zkoumání lze konstatovat, že lesy ve sledovaném povodí se nachází v dobrém stavu z hydrologického hlediska. Z tohoto důvodu byla také stanovena nižší čísla CN křivek.

U zemědělských ploch je důležité vegetační období plodin. Byla určena hodnota CN křivky odpovídající průměrným hodnotám odtokových křivek z tabulky č. 19. Pro období orání a setí odpovídá hodnota CN úhoru. V období vrcholového růstu plodin, obvykle před sklizní, činí hodnota $CN = 2 * CN_{\emptyset} - CN_{\text{úhor}}$. Po sklizni jsou čísla CN závislá na množství posklizňových zbytků. Udává-li se 2/3 povrchu bez pokryvu, CN odpovídá hodnotě při úhoru. Pokud však činí zemědělská plocha 1/3 bez pokryvu, dosahuje hodnota CN odpovídající průměru. Dále jsou hodnoty CN křivek na zemědělsky obdělávaných území závislé na způsobu obdělávání, na řádcích v polích (řádky po spádnicí, vrstevnicové řádky) či zda se nejedná o pásově pěstované plodiny. Výsledné hodnoty CN byly počítány dle uvedeného postupu a byly při výpočtu zahrnuty všechny zmíněné atributy.

4.6.2. Stanovení čísla odtokových CN křivek a retence celého povodí

Po zjištění výše uvedených údajů v kapitole 4.6. byla vypočtena výsledná hodnota CN křivek pro jednotlivé skupiny využití území. Jednotlivé druhy využití území byly vyjádřeny podle svého plošného zastoupení **P** a dle vzorce byla vypočtena hodnota CN.

Obr. č. 28: Rovnice č. 15

$$CN = CN_{\text{tab}} * P$$

CN_{tab} odpovídá stanovené hodnotě a **P** značí procentuální zastoupení jednotlivých ploch využití území v %. Dále se kalkuluje hodnota potenciální retence. Dle autora Janečka byl proveden výpočet podle níže uvedeného vzorce:

Obr. č. 29: Rovnice č. 16

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Potenciální retence je označována jako S (mm), CN odpovídá číslu odtokových křivek CN. V závěrečné části se stanoví hodnota počáteční ztráty. Počáteční ztráta byla vypočtena dle obecně známé rovnice:

Obr. č. 30: Rovnice č. 17

$$I_a = 0,2 * S$$

Počáteční ztráta odpovídá 20 % potenciální retence.

Tento výše uvedený postup pro stanovení celkové hodnoty odtokové CN křivky podle rovnice č. 15 byl realizován pro všechny čtyři hydrologické skupiny půd, kterým odpovídá procentuální zastoupení ploch v zájmové lokalitě. Celková hodnota CN křivky byla určena váženým průměrováním všech zastoupených ploch. Vážený průměr byl určen za základě velikosti plochy odpovídající každé hydrologické skupině. Následně byly opět všechny čtyři hydrologické skupiny se svým CN číslem pomocí váženého průměru plošného zastoupení vyhodnoceny.

Tab. č. 21: Hodnota CN křivky pro plochu povodí P_p , hodnota maximální potenciální retence S a počáteční retence I_a (Vlastní zpracování 2019)

CN	S (mm)	I_a (mm)	P_p (km ²)
74,21	88,27	17,65	26,203

Mapa zájmového území s detailním grafickým zpracováním odtokových CN křivek se nachází v příloze č.4.

4.7. Stanovení přímého odtoku a kulminačního průtoku metodou odtokových CN křivek

Metoda odtokových CN křivek odvozená SCS USDA (Soil Conservation Service, US Department of Agriculture) využívá empirických vzorců a je široce obsažena v celé řadě hydrologických modelů a při návrzích opatření pro ochranu půdy. Slouží k určení přímého odtoku z malých povodí. Metoda pracuje s převodem přívalové srážky na přímý odtok pomocí odtokových CN křivek. Ty charakterizují hydrologické vlastnosti půd, využití a obhospodařování krajiny, množství nepropustných ploch, předchozí vláhové podmínky a také retenční a intercepční schopnost povodí.

Za základním vstup této metody byl srážkový úhrn návrhového deště s určitou dobou opakování (N-letost), který je rovnoměrně rozdělen na povodí. Na základě tohoto vstupu se stanovil přímý odtok a také kulminační průtok. Objem (výška) srážek byla transformována na objem (výšku) odtoku. Metoda platí za předpokladu, že pro určitou časovou událost, je podíl mezi skutečnou a potenciální retencí povodí, která je uvažována jako velikost ztrát v rámci povodí, roven poměru mezi objemem odtoku a objemem srážek redukováných o počáteční ztrátu. Tato ztráta se skládá z infiltrace a intercepce v době, kdy nedochází ke tvorbě odtoku.

Obr. č. 31: Rovnice č. 18

$$\frac{F}{S} = \frac{R}{P - I_a}$$

- F skutečná velikost retence (ztráta)
- S maximální potenciální retence (ztráta)
- R kumulativní odtoková výška
- P kumulativní výška srážky
- I_a počáteční retence, kdy nedochází k odtoku

Jednotky zpravidla užívané jsou značeny milimetry v případě anglosaské soustavy palce. Skutečná velikost ztrát se dá stanovit jako kumulativní výška srážky bez počáteční retence a odtokové výšky.

Obr. č. 32: Rovnice č. 19

$$F = P - I_a - R$$

Po dosazení do základní rovnice je odtok vyjádřen dle níže uvedeného vzorce:

Obr. č. 33: Rovnice č. 20

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

Odtok obecně začíná až po určité akumulaci srážek, tedy jisté počáteční tratě, která se skládá z intercepce a infiltrace do půdního profilu a povrchové akumulaci. Na základě experimentálních měření a praktických zkušeností byla počáteční ztráta obecně stanovena jako 20% potenciální retence. (MŽP 2008).

4.7.1. Stanovení výšky a objemu přímého odtoku z povodí

Podle níže uvedených rovnic byl stanoven výsledný přímý odtok z povodí pro různé N-leté srážky.

Obr. č. 34: Rovnice č. 21

$$R = \frac{(P-0,2*S)^2}{P+0,8*S} \dots R, P, S \text{ (mm)}$$

Maximální potenciální retence S, která je stanovena pomocí vzorce odtokových CN křivek, výše uvedená rovnice č.16.

Objem přímého odtoku je možné určit dle rovnice:

Obr. č. 35: Rovnice č. 22

$$R_{obj} = 1000 * P_p * R \dots [m^3]$$

P_p plocha povodí [km²]

Pro stanovení přímého odtoku z řešeného povodí byla použita jako jedna z variant metoda CN křivek. Jelikož tato metoda vychází z empiricky odvozených vzorců, poskytuje poměrně jednoduché a rychlé stanovení přímého odtoku. Avšak i přes svoji jednoduchost, kdy je řada faktorů ovlivňující odtok z povodí zanedbána či odhadnuta, jedná se v praxi o často využívanou metodu.

Pro výpočet výšky a objemu odtoku byly použity hodnoty N-letých návrhových dešťů převzaté z databáze DES-RAIN. Stanovení návrhových dešťů se popisuje v kapitole 4.4.2.

Výsledné hodnoty výšky přímých odtoků (mm) a objemů odtoku (m³) z povodí pro navrhované N-leté srážkové úhrny se stanovou dobou doběhu (min) a pro maximální denní N-leté srážkové úhrny s určitou dobou opakování se nachází v kapitole 5.2 – Výsledky.

4.7.2. Výpočet kulminačního průtoku v uzávěrovém profilu povodí

Určení kulminačního (vrcholového) průtoku bývá poměrně obtížné stanovit u nepřímých metod. V povodí se vyskytuje řada proměnných hodnot, které je obtížné vytýčit. Metoda odtokových CN křivek nijak nezahrnuje proměnlivost v čase. Pro stanovení kulminačního průtoku se využívá **nomogram**. V něm se stanoví poměr počáteční akumulace povodí I_a vzhledem k jednodennímu maximálnímu srážkovému úhrnu P. Poměr I_a/P byl stanoven na základě vypočtené počáteční retence a odečtené hodnoty jednodenního maximálního úhrnu z databáze DES-RAIN. Dále je potřeba znát hodnotu doby koncentrace T_c pro zkoumané povodí. Následně byla zjištěna z nomogramu hodnota jednotkového kulminačního průtoku q_{pH} na základě hodnot doby koncentrace a poměru mezi I_a/P .

Obr. č. 36: Rovnice č. 23

$$Q = 0,00043 * q_{pH} * P_p * R * f \quad (m^3 * s^{-1})$$

q_{pH} jednotkový kulminační průtok

P_p plocha povodí (km^2)

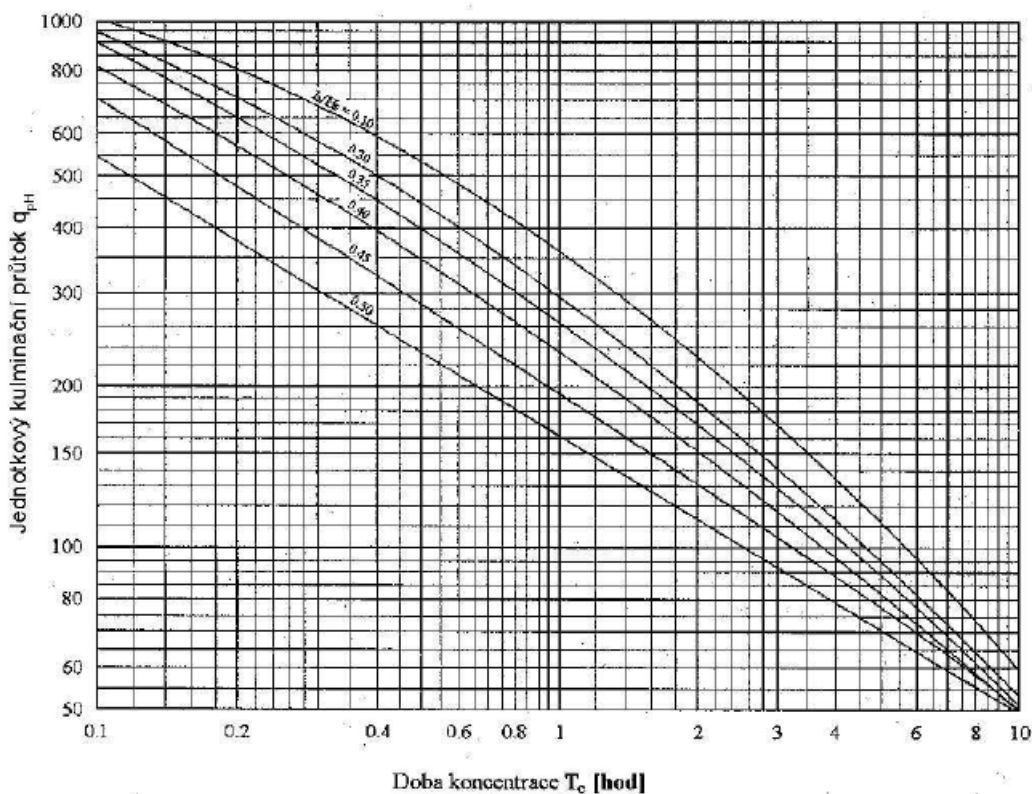
R výška odtoku z povodí (mm)

P_p opravný součinitel pro vodní toky (-)

Hodnota opravného součinitele pro rybníky a vodní plochy f byla určena pro nádrže, které neleží na hlavním toku a nebyly tedy uvažovány ve výpočtu doby koncentrace.

Nomogram pro určení jednotkové kulminačního průtoku q_{pH} na základě znalosti doby koncentrace **T_c (2,81 hod).**

Obr. č. 37: Nomogram pro určení jednotkového kulminačního průtoku (Janeček a kol. 2012)



Výsledné hodnoty kulminačních průtoků (m^3/s) pro jednotlivé návrhové deště N-2, N-5, N-10, N-20, N-50, N-10 jsou uvedeny v kapitole 5.2. – Výsledky. Hodnoty jednotkového kulminačního průtoků a opravného součinitele pro vodní plochy jsou popsány v tabulce č. 22

Tab. č. 22: Hodnoty jednotkového kulminačního průtoku, opravného součinitele f a poměr Ia/P (Vlastní zpracování 2019)

	N-2	N-5	N-10	N-20	N-50	N-100
Ia/P	0,4943	0,3669	0,3146	0,2740	0,2365	0,2136
q_{pH}	96	135	146	155	162	170
f	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

4.8. Příprava dat v prostředí ArcMap pro program HEC-HMS

V další části analýzy byl zpracován podrobný postup pro sestavení potřebných podkladových vrstev pro program HEC-HMS pomocí nástrojů ArcHydroTools a HECGeoHMS v prostředí ArcMAP.

4.8.1. Nástroje ArcHydroTools

ArcHydroTools vyjadřuje jeden z mnoha nástrojů programu ArcGIS určeného pro vytvoření mapových podkladů sloužícím k hydrologickým účelům. ArcHydroTools obsahuje celou škálu sad funkcí, se kterými je možné zjistit mnohé hydrologické charakteristiky povodí. Mezi ně se řadí identifikace jednotlivých složek, zjištění délkových atributů povodí, vymezení povodí a subpovodí. Postup přípravy vrstev byl zpracován s použitím manuálu Arc Hydro Geoprocessing Tools, Version 2.0 (ESRI 2011)

DEM reconditioning pracuje s digitálním modelem terénu a vrstvou vodních toků. Tento nástroj je schopen zakomponovat tuto vrstvu do DTM. Řádky se *Smooth drop/raise* a *Sharp drop/raise* určují velikost zahloubení vodních toků do terénu. Jelikož tento nástroj sníží všechny linie vodních toků o jednotnou hodnotu, byl upřednostněn postup uvedený výše v kapitole 4.3.3.

Fill Sinks je definována jako kontrolní a opravná funkce. V případě tvorby rastru DTM vznikají bezodtokové oblasti, kde se vyskytuje velký pokles či navýšení pixelu. Terén bude upraven podle okolních pixelů. Nástroj pracuje se zahloubeným rastrem terénu.

Flow Direction funkce pracuje s rastem vytvořeným funkcí *Fill Sinks*. Ta na podkladě DTM určí směr toku vody v území. Princip je založen na situaci, že ve zkoumaném místě (pixelu) funkce určí nejnižší nadmořskou výšku okolních pixelů. Tím je vyjádřen skutečný průběh odtoku vody.

Flow Accumulation nástroj pracuje s výše uvedeným rastrem *Flow Direction*. Tato funkce vytváří místa, kde dochází k soustředěnému povrchovému odtoku z povodí. Tímto je vytvořena říční síť povodí, která by měla odpovídat skutečné říční síti. Po správné aplikaci uvedených postupů bylo docíleno, že modelovaná vrstva toků kopíruje skutečnou vrstvu vodních toků.

Stream Definition tento nástroj slouží k vykreslení vrstvy toků podle dvou prahových hodnot. Funkce pracují s rastrem vzniklým funkcí *Flow accumulation* a přiřadí pixelům, kde se vyskytuje vodní tok hodnotu *I* naopak prázdnému rastru *No data*. Takto je docíleno čistého rastru vodních toků. Na základě prahové hodnoty % je vykreslena hustota říčních toků. Pro hodnotu v poli „Area (square km) = 0,15 bylo docíleno optimální vizualizace se skutečnými vodními toky. Může dojít k jistému vybočení či vytvoření vodního toku, který neodpovídá skutečné vrstvě toků. V takovém případě je nutné opravit vrstevnice a provést opakovaně celý postup vytvoření DTM. V tomto případě nebylo třeba opakování postupu.

Stream segmentation rozdělí z výše uvedeného rastru *Stream Definition* toky na dílčí segmenty podle místa, kde dochází k jejich křížení a přiřadí jim identifikační číslo. Pomocí této funkce bude možné určení jednotlivých subpovodí k příslušným tokům. Jako vstupní hodnoty byly vloženy rastry vzniklé funkcí *flow direction* a předchozí funkcí *Stream definiton*.

Catchment Grid Delineation vyplývá z předchozí funkce, která rozdělila říční síť na menší části. Tento nástroj k jednotlivým vygenerovaným liniím přiřadí odpovídající plochu. Je nezbytné vygenerovat subpovodí k jednotlivým částem toků. Každé generované oblasti bude přiřazeno specifické číslo. Jako vstupní rastr byl použit *flow direction* a výstup z předchozí funkce *Stream segmentation*.

Catchment polygon processing je určený k převodu rastru dílčích oblastí z předchozí funkce na vektorovou vrstvu polygonů. V atributové tabulce vrstvy budou uvedeny sloupce s hodnotami ploch a délek k jednotlivým polygonům subpovodí. Dále také vytvoří Grid ID a Hydro ID, což značí specifické číslo databáze. Jako vstupní rastr zde figuruje rastr z předchozí funkce.

Drainage Line processing je obdobná funkce jako *Catchment polygon processing*. Ta převádí rastr linií vodních toků na vektorovou vrstvu linií toků. V atributové tabulce je opět ke každému segmentu přiřazeno Grid ID a Hydro ID a navíc jsou uvedeny sloupce s hodnotami segmentů (uzlů), odkud kam každá část vede („*from*

node“ a „to node“). NextDownID ukáže na následující napojený segment (tok) po směru toku. V případě, že žádný tok nenavazuje, výsledná hodnota se rovná -1.

Adjoint Catchment processing

Jedná se o funkci, která přiřadí ke každému segmentu (toku) jeho dílčí povodí za uzávěrovým profilem. Ve své podstatě spojí dílčí povodí vzhledem k jednomu toku až po uzávěrový profil. Funkce vytvoří sloupec DrainID, která se navíc vygeneruje i ve vrstvě vzniklé funkcí *Drainage Line processing*. Tato hodnota představuje dílčí subpovodí, k němuž náleží příslušný vodní tok.

Drainage point processing

Tato funkce vytvoří k jednotlivým subpovodím konkrétní uzávěrové profily. Jako vstupní rastry do funkce zde figurují rastry *Flow accumulation*, *Catchment polygon processing* a *Catchment grid delineation*.

Batch Point Generation

Jelikož v přechodím kroku byly definovány uzávěrové profily ke všem sub-povodím, považuje se za nutnost pro potřeby dalších výpočtů a funkcí určit uzávěrový profil celkového zájmového území. K tomu slouží právě funkce *Batch Point Generation*, kde se pomocí kurzoru určí místo uzávěrového profilu. Okno, které se objeví po zapnutí funkce, slouží k pojmenování uzávěrového profilu. V řádce type byla vyplněna hodnota outlet, tím dojde ke správnému nadefinování.

Batch Watershed Delineation

Jedná se o funkci, jež generuje celkovou zájmovou oblast jako povodí se všemi sub-povodími a jejich vlastnostmi. V poli *Batch point* byl vybrán výstup z předchozí funkce. Následně byly definovány další rastry z předchozích funkcí.

Flow Path Tracing

Tato funkce byla použita jako poslední kontrola se zjištěním, zda jsou vygenerovány toky předchozími funkcemi v souladu s vektorovou vrstvou toků z portálu Dibavod. Po spuštění funkce byla kliknutím na začátek toku zkontrolována dráha jednotlivých toků. Všechny toky dosahují požadované přesnosti, jelikož mají prakticky stejnou trasu jako toky z Dibavodu.

Slope

Dále je potřeba pomocí funkce *Slope* vypočítat sklon povrchu zájmového území (povodí). Jako vstup do funkce slouží digitální model terénu. Výsledkem funkce je rastr sklonitosti v %.

4.8.2. Příprava dat nástroji HecGeoHMS

HEC-GeoHMS je nástroj skupiny HEC, který pracuje v mapovém prostředí ArcMAP a je používán ke snadnější a přehlednější přípravě dat pro program HEC-HMS. Po sestavení potřebných dat, vrstev jsou tato data importována do programu HEC-HMS, kde dochází ke skutečné simulaci srážko-odtokových procesů v povodí.

Tento nástroj pracuje s předpřipravenými daty a vrstvami, jež byly vytvořeny z digitálního modelu terénu pomocí nástrojů ArcHydroTools. V nastavbě HEC-GeoHMS se následně upraví vrstvy z ArcHydroTools. V tomto prostředí se spočítají délky a sklon jednotlivých toků, průměrný sklon pro každé sub-povodí, těžiště sub-povodí, nejdelší dráhy odtoku a další charakteristiky povodí a toků. Na konci postupu jsou použity hodnoty z vytvořeného rastru odtokových CN křivek a jsou specifikovány metody, které bude model HEC-HMS používat k transformaci srážek na odtok. Jednotlivé funkce byly zpracovány především s použitím uživatelského manuálu HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension, User's Manual, Version 10.1. (Fleming M. et Doan J. 2013)

Project Setup

Pro práci s nástrojem HECGeoHMS se musí založit projekt. K tomu slouží skupina funkcí pod odrážkou *Project setup*, kde jsou obsaženy jednotlivé funkce pro export dat vytvořených v ArcHydroTools.

Data Management

V této funkci byla definována data, jež byla vytvořena předchozími nástroji ArcHydroTool. Po spuštění funkce byl v dialogovém okně vzat neupravený digitální model terénu v poli RawDEM, dále HydroDEM odpovídající DTM po úpravě funkcí FillSinks, posléze rastry funkcí Flow direction a Flow accumulation. V poli StreamGrid byl vzat rastr funkce Stream definition a následujícím poli rastr funkce Stream segmentation. V poli Catchment byly zpracovány výstupy z funkce Catchment polygon processing. V poli níže byl použit výstup z funkce Adjoint Catchment processing. Následující 2 pole v dialogovém okně zůstala nevyplněna, jelikož byla následně vytvořena po generování projektu.

Start New project

Po přípravě vstupních dat funkcí *Data management* je založen nový projekt. Po potvrzení prvního dialogového okna se následně vyplní informace o projektu. Jedná se o název a popis projektu, dále jsou vyplněna metadata a je určen cílový adresář.

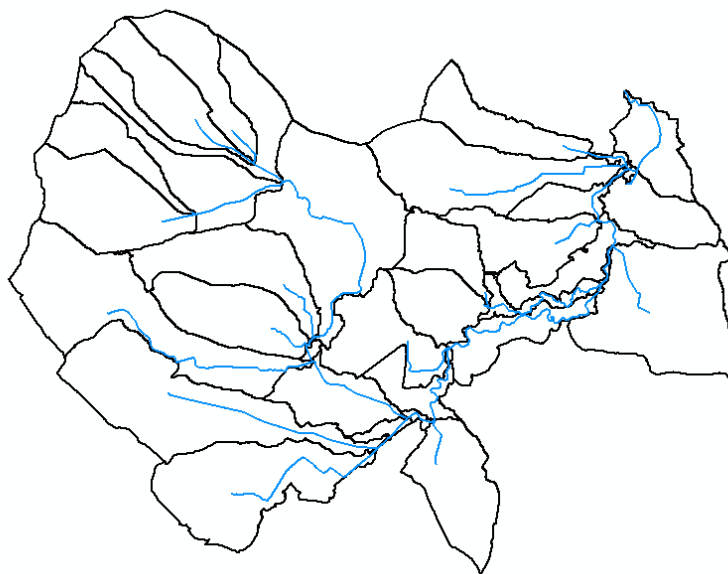
Add Project Points

Tato funkce slouží k označení celkového uzávěrového profilu v povodí. Jelikož tento profil byl již vytvořen nástroji ArcHydroTools, stačí po spuštění funkce tento vytvořený UZ znovu označit.

Generate Project

Generate project je posledním krokem v sekci *Project Setup*, kde je stanoven již výsledný tvar generovaného projektu. Po spuštění funkce byl znázorněn tvar povodí (rozvodnice). Jelikož tato sekce proběhla úspěšně, bylo možné dále pokračovat a analyzovat. Další krok se týkal kontroly dialogové okno se správně zvolenými vstupními daty. Následně se projekt začne generovat. Vznikne *data frame* se všemi zadanými informacemi a vrstvami. Všechna potřebná data byla převzata z výsledků nástroje ArcHydroTools.

Obr. č. 38: Povodí vytvoření generováním nástroji HECGeoHMS (Vlastní zpracování 2019)



River Profile

Tato funkce vykresluje tvar profilu říčního koryta. Slouží především jako kontrola, zda při generování vodních toků nedošlo k nějakým razantním chybám. Ty by následně významně ovlivnily výpočty např. změny trasy toku či situaci, při které by voda tekla do kopce.

River Length

Funkce *River Length* byla definována pro vypočítání délky jednotlivých částí toků, které přísluší každému sub-povodí. Hodnota délky segmentu toku byla vepsána do atributové tabulky vrstvy vodních toků (river1).

River Slope

Funkce byla využita pro výpočet sklonů jednotlivých částí vodních toků. Hodnoty sklonů byly zaznamenány v atributové tabulce vrstev toků. Jako vstupní vrstvy pro výpočet sklonů byla použita vrstva (*river1*) a digitální model terénu (*RawDEM*). Byly kontrolovány sklony v atributové tabulce, po odhalení případné chyby byl provedeny výpočty.

Basin Slope

Obdobná funkce jako *River slope*, která počítá průměrný sklon každého sub-povodí. Jako vstupní vrstva do této funkce byla vložena vrstva rastru sklonu pro povodí a vrstva sub-povodí (*subbasin1*). Po proběhnutí funkce byl zobrazen nový sloupec ve vrstvě sub-povodí, do kterého byl přiřazen sklon ke každému prvku.

Longest Flowpath

Pomocí této funkce byly získány nejdelší dráhy odtoku v rámci každého sub-povodí. Dráha odtoku je počítána od hranice (rozvodnice) sub-povodí do jeho uzávěrového profilu. Pro spouštění funkce posloužil raster digitálního modelu terénu (*RawDEM*), dále raster směrů odtoku (*Flow direction*) a vrstva sub-povodí (*Subbasin1*). Pro správné fungování funkce byl zvolen jako cílový adresář pro uložení vrstvy do database s příponou "gdb".

Basin Centroid

Funkce, kterou byla vypočtena těžiště ke každému sub-povodí. Výsledek znázorňuje bodovou vrstvu obsahující zmíněná těžiště k povodím. Jako vstupní data do funkce byla použita vrstva sub-povodí (*subbasin1*) a metoda byla zvolena *Center of gravity*. Jako v předchozí funkci pro uložení výstupu slouží stejná database.

Basin Centroid Elevation

Touto funkcí jsou přiřazeny ke každému těžišti jednotlivých sub-povodí v atributové tabulce vrstvy nadmořských výšek. Vstupní data do funkce znázorňují vrstvy digitálního modelu terénu (*RawDEM*) a bodové vrstvy z předchozí funkce *Basin Centroid*.

Centroidal Longest Flowpath

Funkce, při které je vytvořena dráha odtoku od těžiště sub-povodí směrem k uzávěrovému profilu každého jednotlivého povodí. Jako vstupní data zde figurují sub-povodí (*subbasin1*), dále vrstva vytvořená funkcí *Longest Flowpath* a vrstva z funkce *Basin Centroid*.

Select HMS Processes

Funkce slouží ke specifikování a určení metod, které budou využity v prostředí programu HEC-HMS k transformaci srážek na odtok a k vyjádření proudění vody v korytech. Specifikace stanovenou touto je možná změnit v programu HEC-HMS. Jako vstupní data zde figuruje vrstva vodních toků (*river1*) a sub-povodí (*subbasin1*). Dále je nutné určit, které metody budou používány a nastavit parametry funkce. Byla zvolena metoda SCS, jež vypočítá nadměrné srážky ze srážek celkových. V poli níže byla vybrána metoda SCS pro transformaci srážek na přímý odtok. V poli River – route method byla zvolena možnost Muskingum, která funguje na principu zachování hmoty vody, posuzuje objem přiteklé a odtékající vody v rámci subpovodí. V prostředí HEC-HMS byly tyto stanovené funkce změněny, a tak byly použity i jiné funkce

River Auto Name

Tato funkce pouze pojmenuje jednotlivé říční úseky tím, že vytvoří nový sloupec v atributové tabulce vrstvy řek.

Basin Auto Name

Funkce pracující stejně jako River Auto Name pojmenuje jednotlivá sub-povodí.

Subbasin Parameters From Raster

Pro zapracování povrchu povodí do modelu byla použita mapa využití území tzv. land use. Byl vytvořen rastr s přiřazenými čísly odtokových CN křivek. Ten měl velikost buňky 1*1 m stejnou jako vytvořený digitální model terénu. Hodnoty CN křivek byly přiřčeny k jednotlivým sub-povodím. Jako vstupní data do funkce zde figurovala vrstva sub-povodí (*subbasin1*) a zmíněný rastr CN křivek, který bude vybrán v položce *input curve number grid*.

CN Lag

Poté co jsou přiřazeny hodnoty CN-křivek ke každému sub-povodí, vypočítá se pomocí funkce *CN lag* zpoždění odtoku v hodinách ze sub-povodí v závislosti na odtokové CN křivce na základě NRCS National Engineering Handbook (1972). Zpoždění odtoku bylo zaznamenáno do atributové tabulky vrstvy sub-povodí (*subbasin*).

Map to HMS Units

Pro správnou funkci modelu a vyhnutí se pozdějším problémům byly vzaty vrstvy vytvořené v programu ArcMap nástroji ArcHydroTools a HECGeoHMS převedeny do jednotek používaných ve Spojených státech amerických, jež jsou nazývány anglosaské jednotky. Funkce *Map to HMS Units* tedy konvertuje používané jednotky

do nových anglosaských jednotek (English). Po spuštění funkce je potřeba v každém řádku vybrat správnou vrstvu, které budou konvertovány. Ve vrstvách vodních toků (*river*) a sub-povodí (*Subbasin*) byly touto funkcí vytvořeny nové sloupce s příponou HMS, kde se nacházejí údaje ve zvolených jednotkách. Stejně tak u dalších vrstev, které byly vybrány v dialogovém okně, použity vrstvy digitálního modelu terénu (*RawDEM*), nejdelší dráha odtoku (*LongestFlowPath*), linie odtoku z těžiště každého sub-povodí (*CentroidalLongestFlowPath*), bodová vrstva s těžišti každého sub-povodí (*Centroid*). Jelikož se při procesu zpracování funkce objevila zpráva Error, bylo nezbytné změnit jednotky v celém počítači do amerických jednotek společně s datумы. Po této úpravě funkce proběhla správně.

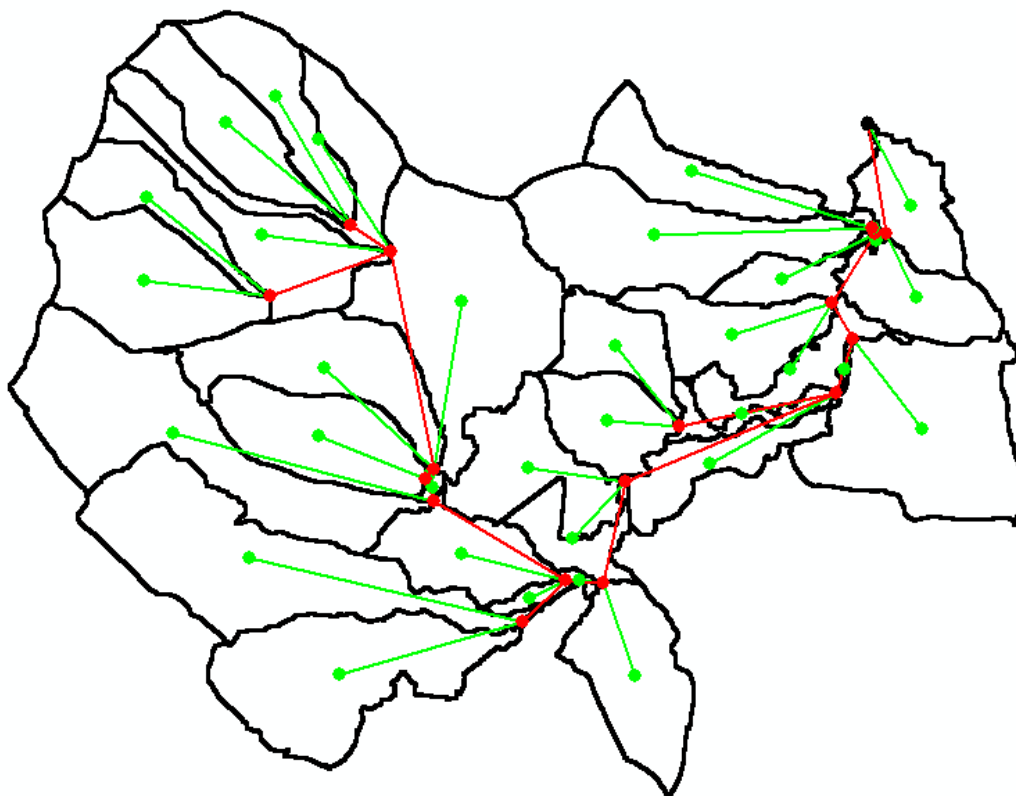
Check Data

Funkce *Check Data* byla použita ke kontrole jednotlivých vrstev po převodu jednotek tak, aby byla zachována konzistence mezi jednotlivými komponenty a konektivity v popisu struktury hydrologického modelu. Po provedení kontroly vrstev obsahující všechna potřebná data se jedná se o vrstvy vodních toků, sub-povodí, těžiště sub-povodí a uzávěrový profil, jež jsou při spuštění funkce vybrána v dialogovém okně. Po proběhnutí funkce je vytvořen textový dokument, kde je popsáno, zda kontrola dat proběhla v pořádku. V případě této práce nastal problém. Těžiště některých sub-povodí měla své těžiště na rozvodnici, proto byla provedena drobná úprava polohy a funkce byla spuštěna opětovně a úspěšně.

HMS Schematic

Funkce prezentuje zjednodušené hydrologické sítě povodí tvořené vodními toky společně s vrstvou bodů reprezentující uzávěrové profily a těžiště sub-povodí. Výsledek dokumentuje zjednodušenou reprezentaci hydrologického systému připravenou pro použití v programu HEC-HMS. Jako vstup do této funkce byla použita vrstva hlavního uzávěrového profilu, dále vodních toků, sub-povodí a vrstva reprezentující těžiště sub-povodí. Výstupem je propojené schéma obsahující zjednodušenou síť vodních toků (*HMS Link Layer*) a bodová vrstva s uzávěrovými profily a těžišti (*HMS Node Layer*).

Obr. 39 - Schéma reprezentující sub-povodí, uzávěrové profily a linie toků (Vlastní zpracování 2019)



Add Coordinates

Funkce slouží k přiřazení informace o poloze a nadmořské výšce vodních toků, uzávěrových profileů a těžišť jednotlivých sub-povodí. Jedná se o vrstvy vytvořené předchozí funkcí (*HMS Link*, *HMS Node*), ve kterých byly v atributové tabulce vytvořeny sloupce popisující polohopisné a výškopisné informace v anglosaských jednotkách. Ty jsou nezbytné pro export dat z programu ArcMap do modelovacího programu HEC-HMS.

Prepare Data for Model Export

Po spuštění funkce byly v dialogovém okně nastaveny správné vstupní vrstvy vodních toků, sub-povodí, nejdelsí dráhy odtoku vzhledem k těžišti sub-povodí. Takto byla připravena data s hydrologickými parametry určená pro export do programu HEC-HMS.

Background Shape File

Funkce převádí geografickou informaci o poloze vodních toků a sub-povodí do textového dokumentu. Tím je umožněno v programu HEC-HMS zobrazit informace o vodních tocích a sub-povodí.

Basin Model File

Jedná se o funkci, která provádí export údajů o struktuře hydrologického modelu konkrétně o povodí do textového dokumentu. Vzniklý soubor byl následně otevřen v programu HEC-HMS, kde se reprezentují základní geometrické informace o sledovaném povodí.

Meteorological Model

Dalším výstupem, který byl vložen do programu HEC-HMS, je meteorologický model. Ten zachycuje informace o srážkách. Je možné vytvořit vstup srážkového úhrnu již v nástroji HECGeoHMS. Byla vybrána metoda *Specified Hyetograph*, jež zachycuje informaci o vstupní srážce pro každé sub-povodí. Konkrétní hodnota byla nastavena dle potřeb až v programu HEC-HMS. Zde byla vytvořena vhodná struktura pro pozdější vložení srážky v programu HEC-HMS.

Create HEC-HMS Project

Závěrečným krokem přípravy dat pro program HEC-HMS nástroji HECGeoHMS v prostředí ArcMAP je vytvoření již samotného HEC-HMS projektu. Pro spuštění funkce byly v dialogovém okně přiřazeny cesty k jednotlivým adresářům. Jedná se o dříve vytvořené soubory funkcemi *basin model a meteorological model*. Dále byl nastaven název simulace. Naskytuje se možnost nastavit i informace o časech simulace a časový krok. Tyto informace zde nebyly nastaveny, byly dopsány se až později přímo v programu HEC-HMS. Po odsouhlasení dialogového okna se zobrazilo upozornění „successfully copied“. Vše proběhlo v pořádku a přistoupilo se již konkrétně k modelování v programu HEC-HMS.

4.9. Modelování v programu HEC-HMS

Pro modelování v programu HEC-HMS byly využity především uživatelské manuály Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Quick Start Guide, Version 4. 3. (Fleming a kol. 2018) a také manuál Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual, Version 4. 3. (Scharffenberg a kol. 2018)

4.9.1. Kompatibilita HECGeoHMS a programem HEC-HMS

Při zpracování diplomové práce docházelo k častým problémům. Vyskytovaly se zejména při přípravě dat v programu ArcGIS a též v modelovacím programu HEC-HMS. Často se jednalo o problémy s kompatibilitou přípravných nástrojů HECGeoHMS a programem HEC-HMS. Po získaných zkušenostech s těmito programy a nástroji si dovoluji konstatovat několik faktů. Je důležité používat verzi

programu ArcGIS 10.1 či starší a k tomu odpovídající verzi nástrojů ArcHydroTools a HECGeoHMS. Nástroje HECGeoHMS nejsou již pro novější verze programu ArcGIS podporovány. Naopak program HEC-HMS je důležité mít v novější verzi, jelikož vstupní data lze jednoduše konvertovat, je to vhodné řešení. Starší verze programu je v tomto směru problematická. Za velice důležité považují dodržování postupných kroků při přípravě dat a vytvořené vrstvy. Data se musejí ukládat do správných adresářů a databází.

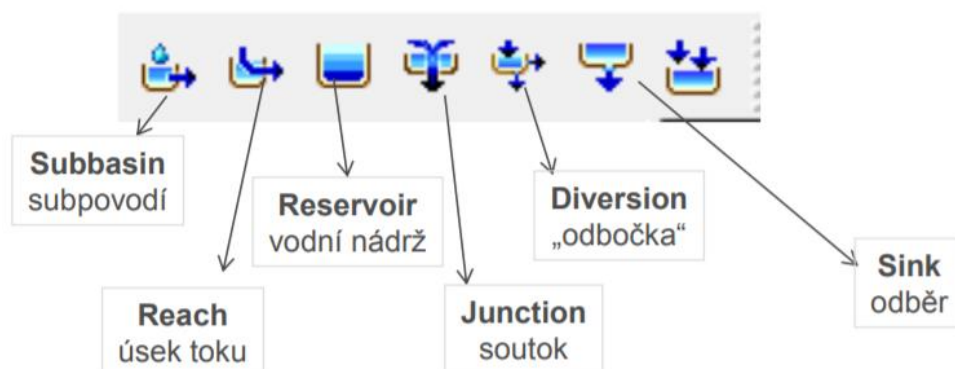
4.9.2. Sestavení vstupních dat a spuštění simulace

Po spuštění programu HEC-HMS byla nahrána data vytvořená nástrojem HECGeoHMS. Jedná se jednotlivé komponenty definované v kap. 4.8.2. konkrétně o *basin model*, *meteorological model* a *precipitation gage*. HEC-HMS bude otevřen již existující projekt s příponou.hms vytvořený funkcí *Create HEC-HMS project* v kap. 4.8.2. Po otevření projektu se v okně programu zobrazí jednotlivé části hydrologického modelu. Jde o *Basin models*, *Meteorological models*, *Control specification*, *Time-series Data*. Všechny tyto komponenty bylo nutné správně nastavit před spuštěním simulace.

Basin models

Tento komponent popisuje základní hydrologickou strukturu systému. Celý hydrologický systém povodí je složen z částí, jako jsou vodní toky (*reach*), jednotlivá sub-povodí (*subbasin*), uzávěrové profily sub-povodí nebo také soutok (*junction*). Poslední použitý komponent charakterizuje uzávěrový profil celého povodí. V něm je počítán celkový odtok z povodí (*sink*). V této části *basin models* byly upraveny jednotlivé komponenty a jejich parametry dle potřeby hydrologického modelování. V tomto případě zůstala struktura povodí zachována, ale bylo nezbytné upravovat jednotlivé parametry u různých částí popisující celý systém.

Obr. 40 - Jednotlivé komponenty HEC-HMS popisující strukturu povodí (HEC-1 1990)



Meteorological models

Meteorological models popisuje vstupní srážky (*Gage*) použité při simulaci. Program HEC-HMS nabízí několik možností jakým způsobem lze importovat hodnoty srážek do modelu např. *Gage weight*, *Gridded precipitation*, *Inverse distance*, *Specified Hyetograph* a další. Byla použita metoda *Specified Hyetograph*. V této metodě byla ke každému povodí přiřčena odpovídající vstupní srážka, která je pro každé subpovodí shodná, jelikož je využíván koncept celistvého modelu.

Control specification

Control specification plní kontrolní funkci dat pro simulaci. Je zde nastaveno datum a čas začátku a konce simulace, také časový krok simulace. Pro spuštění simulace je nutné, aby tyto hodnoty byly stejné jako v části *Time-series data*.

Time-series Data

Část, která nese hodnoty příslušných dat, definuje časové řady vstupních srážek, vstupní N-leté srážky, efektivní srážky (*Precipitation Gages*). Dále se dají nastavit hodnoty kalibračních, kontrolních hodnot, které ovšem v tomto případě nebyly k dispozici. Jedná se hlavně o průtoky (*Discharge Gages*). Časové řady mohou být do programu HEC-HMS importovány z programu skupiny HEC konkrétně HECDSSVue nebo jednoduše manuálně vepsány přímo do záložky *Precipitation Gages*, tak tomu bylo v tomto případě. V záložce týkající se srážek byly správně zvoleny datumy a časy začátku a konce simulace korespondující s hodnotami v části *Control specification*. Dále byl definován vhodný časový krok dle vstupních dat.

Spuštění a průběh situace

Po přípravě výše uvedených částí modelu lze již spustit příslušnou simulaci. V záložce *Compute/Create - compute/Simulation Run* byla vytvořena nová simulace. Došlo k pojmenování a popisu simulace společně s nastavením správných komponentů. Nakonec tlačítkem *Compute Current Run* je již spuštěna simulace. Pokud simulace proběhne úspěšně, ke všem částem povodí jsou vypočteny hodnoty **časového průběhu simulace** (*time of peak*), **objemu odtoku** (*volume*), **vrcholového průtoku** (*peak discharge*) a **hydrogramu odtoku** (*hydrograph*).

4.9.3. Struktura, chování a vstupní parametry modelu

V programu HEC-HMS byly u jednotlivých simulací nastaveny specifické parametry odpovídající zkoumanému povodí. Byly mimo jiné využity charakteristiky povodí a parametry pro povodí a vodní toky z přílohy č.5 a č.6.

Došlo k nastavení metod popisujících tyto hydrologické procesy u vodních toků (*reach*) a u subpovodí (*subbasin*).

Subpovodí (subbasin)

Jednotlivá subpovodí mají v těchto konkrétních simulacích dva parametry *Loss method* a *Transform method*. ***Loss method*** určuje ztrátu srážkového vstupu vzniklou procesy infiltrace, evaporace, intercepce. Hodnota této ztráty vychází z odvozené z metodiky odtokových CN křivek s hodnotou **20 %** maximální potenciální retence povodí.

Také je možné nastavit, jakým způsobem bude vypočten základní odtok z povodí tzv. ***Baseflow method***. Jelikož jsou jednotlivé simulace koncipovány na řešení povrchového odtoku, nebyl zahrnut výpočet základního odtoku.

A) Metoda transformace pomocí SCS jednotkového hydrogramu

Tato metoda transformace přímého odtoku metodou SCS jednotkového hydrogramu byla použita v simulaci 1 a v simulaci 2 v části A).

Transformační funkce povodí, která určuje tvar povodňové vlny, a tím i velikost kulminačního průtoku byla nastavena na ***SCS jednotkový hydrogram***. Jedná se o empirický jednotkový hydrogram, který pracuje s parametrem odvozeným z charakteristik povodí. Parametr, jenž využívá tento jednotkový hydrogram, nese název ***Lag Time*** či doba, kterou je zpožděn odtok v povodí. Tato doba zpoždění odtoku je odvozena z hodnoty odtokové CN křivky v povodí.

B) Metoda transformace podle Clarkova jednotkového hydrogramu

V programu HEC-HMS byla použita jako metoda transformace přímého odtoku ***Clarkův jednotkový hydrogram***. Clarkův model je syntetickým jednotkovým hydrogramem založeným na kvazi-koncepčním přístupu. Počítá s translací přímého odtoku a následně s jeho transformací či snížením maxima v důsledku krátkodobého zdržení vody v povodí. (Máca) Clarkův JH je reprezentován dvěma parametry: (Straub et al. 2000)

T_c doba koncentrace (hod)

R retenční konstanta, vyjadřující dobu držení vody v povodí (hod)

Doba koncentrace T_c vyjadřuje čas, po který trvá netransformovaný povrchový odtok a je jednou z nejdůležitějších charakteristik povodí, jelikož určuje tvar a rychlost nástupu povodňové vlny. Existuje řada vzorců a metod na odvození doby koncentrace jako např. vzorec SCS (Soil conservation service), TR-55, vzorce dle autorů (Janeček et kol. 2012; Straub et al. 2000).

Doba koncentrace **T_c** byla určena metodikou **TR-55**, jež je poměrně dost podobná metodice, kterou uvádí autor (Janeček 2012). Metodika TR-55 rozděluje odtokovou dráhu povodí na část plošného povrchového odtoku, soustředěného odtoku o malých hloubkách a na odtok v otevřených korytech. Pro každou tuto část byla v každém subpovodí spočtena doba koncentrace, která byla nakonec sečtena a dala výslednou **T_c** pro každí dílčí povodí. Jelikož tato metoda zahrnuje poměrně podrobný výpočet s řadou charakteristik odtokové dráhy, bylo dosaženo poměrně odpovídajících výsledků oproti jiným metodikám výpočtu doby koncentrace. Do výpočtu byly zahrnuty údaje o délce a sklonu odtokových linií, hodnoty Manningova drstnostního součinitele *n*, příčném řezu koryta a další odvozené charakteristiky.

Retenční konstanta R

Pro odvození retenční konstanty bylo použito opět několik vzorců. Nejrelevantnější výsledky poskytl vzorec po autora (Straub et al. 2000).

Obr. č. 41: Rovnice č. 24

$$R = 16,4 * L^{0,342} * S^{-0,790}$$

L délka toku (mi)

S sklon toku (ft/mi)

Jako délka toku byla definována část odtokové linie tvořící podle metody TR-55 otevřené koryto. Výsledky parametru R byly vypočteny pro každé dílčí subpovodí a následně byly použity pro simulaci v programu HEC-HMS.

Vodní tok (reach)

Pro průtok povodňové vlny říčním korytem byla použita metoda „Muskingum“. Metoda je založena na aproximaci kombinace rovnice kontinuity a difúzní formy momentové rovnice. Metoda vychází ze vztahu založeného na bilanci odtoku a přítoku do říčního úseku. Parametr **K** vyjadřuje čas postupu povodňové vlny říčním úsekem v hodinách. Na základě znalosti délek říčních úseků a vypočtené průměrné rychlosti postupu vlny s hodnotou 1,7 m/s byl vypočten čas postupu povodňové vlny říčním úsekem **K**. Transformační parametr **X** stanovuje maximální retenci říčního úseku. Volí se mezi 0 – 0,5, kde hodnoty blízko 0 vyjadřují povodí s minimální transformační schopností, toky s velkými sklony. Pokud se hodnota **X** blíží k 0,5, vystihuje maximální transformační schopnost a jde o toky s mírnými sklony. (Scharffenberg a kol. 2018)

Ve všech simulacích byly parametry metody Muskingum zprůměrovány a nastaveny na hodnoty **K = 0,24**, **X = 0,1**.

5. Výsledky

Tato kapitola obsahuje všechny hlavní výsledky získané v této diplomové práci. Vedlejší výsledky či různé výstupy z přípravy dat se nachází v odpovídajících kapitolách společně s postupem, jimiž byly získány. Jsou zde popsány a zobrazeny výsledky jednotlivých simulací provedených v programu HEC-HMS. Z metody odtokových CN křivek jsou zde výsledky výšky a objemu odtoku z povodí a také hodnoty kulminačních průtoků. V poslední řadě jsou porovnány výsledky obou metod pro stejné vstupní srážky.

5.1. Výstupné hodnoty ze simulací v programu HEC-HMS

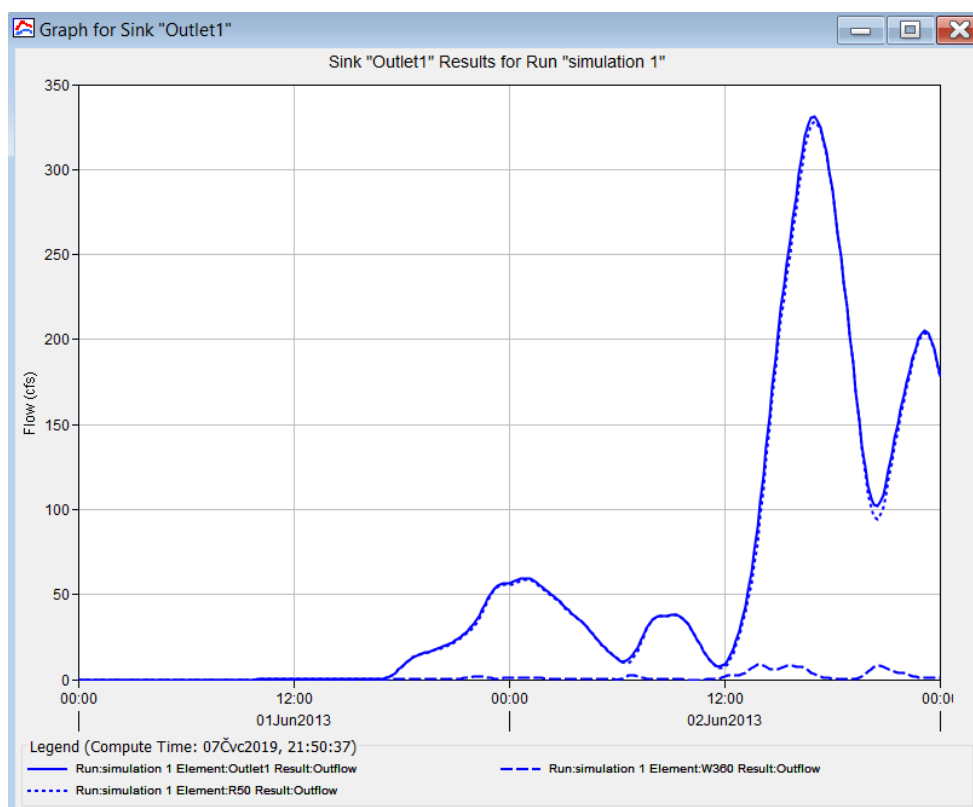
5.1.1. Simulace 1 (2 – denní vstupní srážka)

První simulace byla nastavena jako epizodní hydrologický model konkrétně pro dva dny 1. a 2. června roku 2013. Byla vybrána nejvyšší hodnota dvoudenního srážkového úhrnu za celý rok s celkovou hodnotou **55,7** mm. Byla použita data srážkových úhrnů ze čtyř srážkoměrných stanic ČHMÚ, na základě kterých byla odvozena vstupní srážka povodí viz.kapitola 4.5.1. Data srážek byla vložena do programu HEC-HMS ve formě časové řady jako *incremental millimeters* tzv. přírůstkové srážky. Jedná se o model uvažující pouze povrchový odtok, základní odtok není simulován.

Tab. 23 – Výsledné hodnoty pro 2- denní epizodní simulaci (Vlastní zpracování 2019)

Uzávěrový profil	Délka simulace	Časový krok	Vstupní srážka	Přímý vrcholový odtok	Čas vrcholového průtoků	Objem odtoku
UZ - Tajanov	48 hod	10 min	55,7 mm	9,37	2. června 16:50	227 240 m ³

Obr. 42 – Hydrogram přímého odtoku pro 2 denní vstupní srážku (Vlastní zpracování 2019)



Tab. 24 – Parametry simulace 1 (Vlastní zpracování 2019)

Routing - metoda Muskingum		Loss - SCS Curve Number	Transform method
K = 0,24	X = 0,1	odtokové CN křivky	SCS jednotkový hydrogram s parametrem LAG TIME

5.1.2. Simulace 2 v programu HEC-HMS (N-leté srážky odvozené pro dobu trvání 169 minut)

Byly provedeny dvě varianty simulací s rozdílnou transformační funkcí. První simulace využívá k transformaci vstupní srážky na odtok princip SCS jednotkového hydrogramu. Druhá simulace byla sestavena s transformační funkcí Clarkova jednotkového hydrogramu. Metody pro průtok vlny korytem (metoda Muskingum) a pro stanovení ztráty vody v povodí (SCS Curve Number) jsou pro obě simulace nastaveny stejně.

Tab. 25 – Parametry simulace 2 A) (Vlastní zpracování 2019)

Routing - metoda Muskingum		Loss - SCSCurve Number
K = 0,24	X = 0,1	odtokové CN křivky

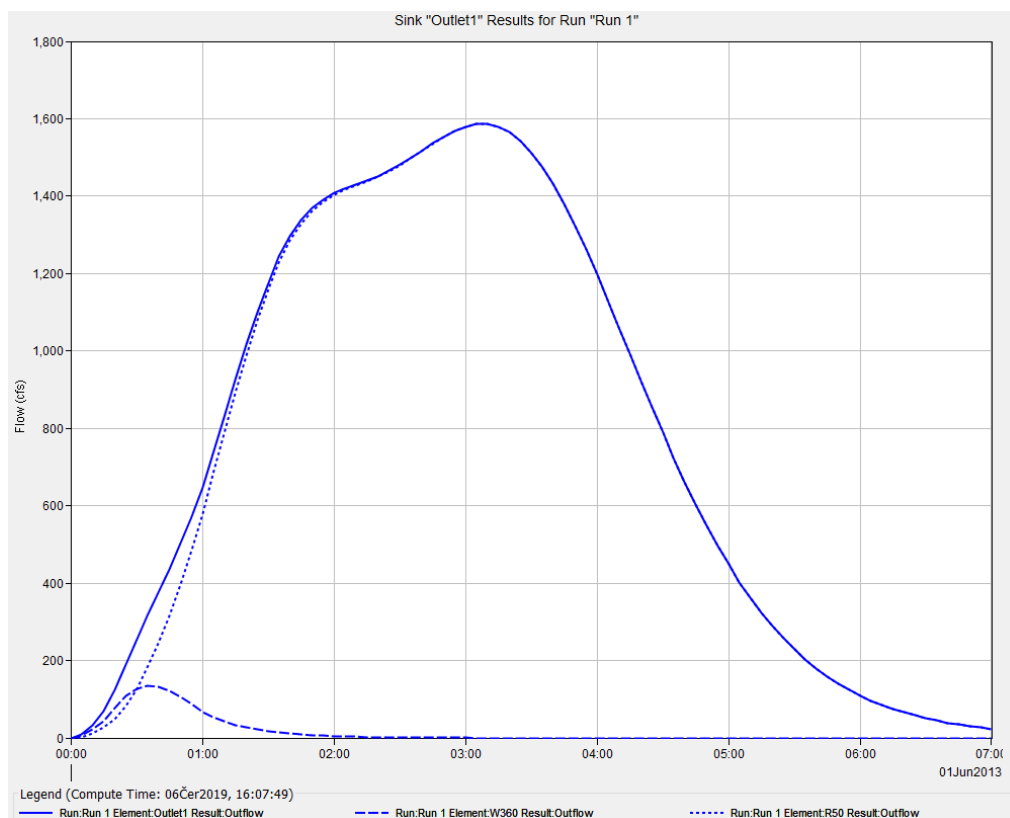
A) Metoda SCS Jednotkového hydrogramu

Metoda pro transformaci vstupní srážky na přímý odtok SCS jednotkový hydrogram má parametr tzv. *Lag time*, neboli dobu zpoždění odtoku z povodí odvozenou z odtokových CN křivek, popsáno v kapitole 4.9.3.

Tab. 26 - N - letá efektivní srážka pro dobu dotoku 169 minut, SCS JH (Vlastní zpracování 2019)

Výška a objem odtoku pro N-leté srážkové úhrny s dobou 169 minut						
N - letost	2	5	10	20	50	100
Objem odtoku (m ³)	12704,84	75612,33	556299,5	249286,31	416546,2	555066,0
Vrcholový průtok (m ³ /s)	1,29	6,18	11,52	19,96	33,59	44,91
Čas Kulm. Q (hod)	01:50	02:00	02:50	03:00	03:00	03:00

Obr. 43 - JH pro N-100 letou srážku s dobou trvání 169 min. transformován SCS JH (Vlastní zpracování 2019)



Z jednotkové hydrogramu přímého odtoku je patrné, že kulminační průtok nastane krátce po třech hodinách od začátku. Tvar hydrogramu odpovídá povodí, kdy dochází k strmému růstu vzestupové větve hydrogramu, poté dojde k zmírnění a

následuje vrcholový průtok hydrogramu. Toto čelo hydrogramu odpovídá dvěma po sobě jdoucím průtokovým vlnám, které jsou generovány v povodí.

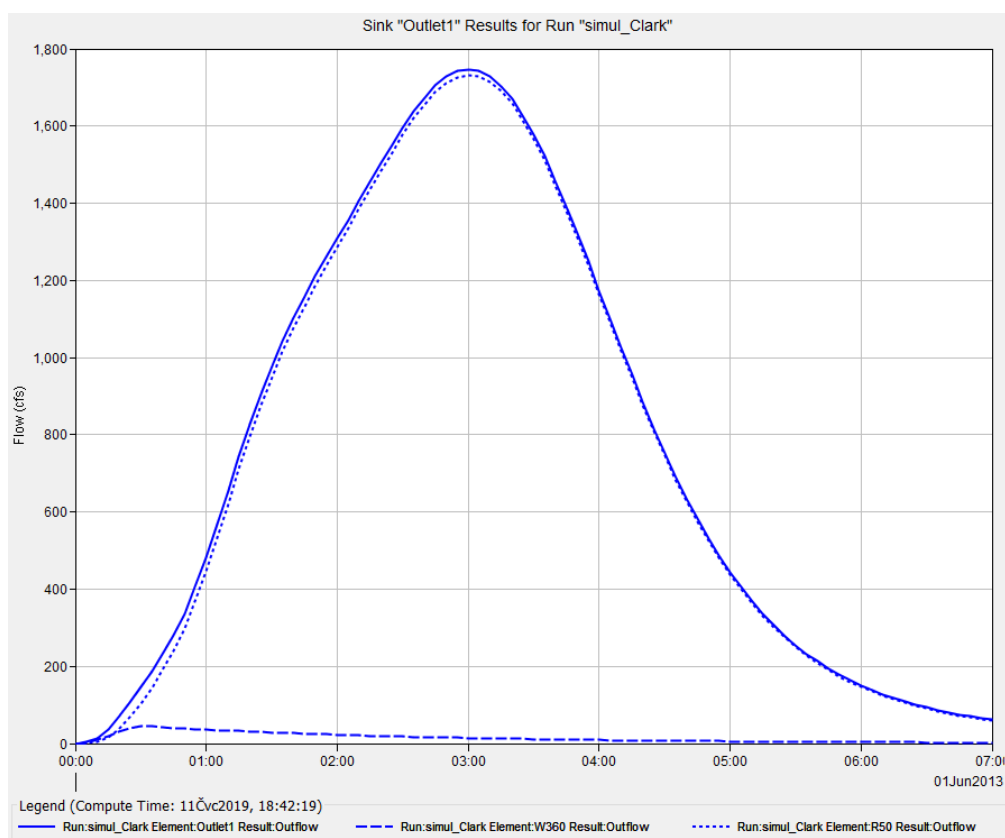
B) Metoda Clarkova jednotkového hydrogramu

Metoda transformace srážek na odtok Clarkovým jednotkovým hydrogramem má dva parametry, které je potřeba určit z geometrických charakteristik povodí a říční sítě. Metodika má dva níže uvedené parametry a byla detailněji popsána v kapitole 4.9.3.

T_c Doba koncentrace (hod)

R Retenční konstanta (hod) vyjadřující dobu zdržení vody v povodí

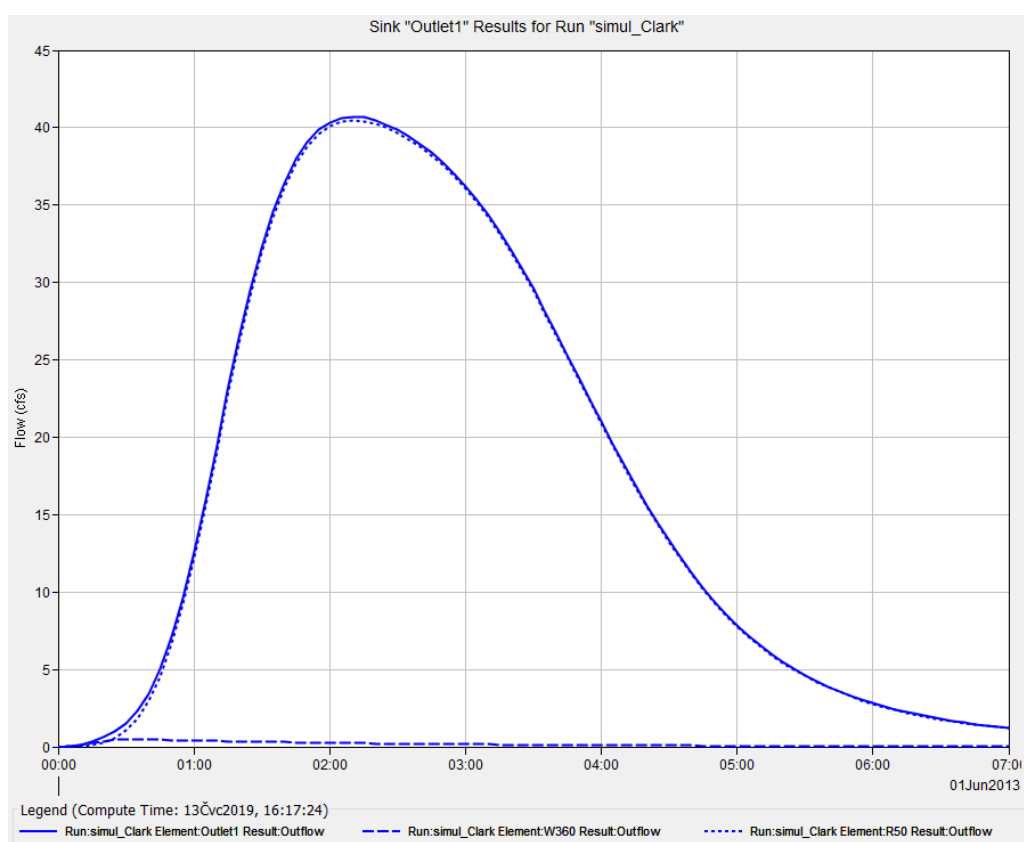
Obr. 44 - JH pro N-100 letou srážku pro dobu trvání 169 min transformován Clarkových JH (Vlastní zpracování 2019)



Tab. 27 - N - letá efektivní srážka pro dobu dotoku 169 minut, Clarkův JH (Vlastní zpracování 2019)

Výška a objem odtoku pro N-leté srážkové úhrny s dobou 169 minut						
N - letost	2	5	10	20	50	100
Objem odtoku (m ³)	12458,1	74502,1	142590,3	245462,5	410378,8	547171,7
Vrch. průtok (m ³ /s)	1,15	6,55	12,66	21,97	36,99	49,47
Čas Kulm. Q (hod)	02:05	02:45	02:50	02:55	02:55	02:55

Obr. 45 - JH pro N-2letou srážku pro dobu trvání 169 min transformován Clarkových JH (Vlastní zpracování 2019)



Na obrázku je zobrazen jednotkový hydrogram pro vstupní N-2 letou efektivní srážku s dobou trvání 169 minut. Dle principu superpozice jednotkového hydrogramu by měla kulminace pro různě velkou efektivní vstupní srážku nastat ve stejný čas. Je zřejmé, že tento princip JH zde není splněn, jako jeden z důvodů může být fakt, že hodnota vstupní srážky je jen o několik milimetrů větší než maximální potenciální retence povodí. Pravděpodobně nejsou v závislosti na hodnotě CN křivky zapojeny všechny subpovodí do výsledného odtoku z povodí v uzávěrovém profilu.

5.2. Výsledné kulminační průtoky a objemy odtoku podle metody odtokových CN křivek

Jako návrhová srážka byl použit srážkový úhrn pro různé N-letosti s dobou trvání 169 minut a jeden den odvozený z databáze DES-RAIN, viz. kapitola 4.4.2.

Metoda odtokových CN křivek byla provedena především z důvodu jakéhosi hrubého prvotního pohledu velikosti odtoku a kulminačního průtoku z povodí. Na základě hodnot zjištěných touto metodou byla prováděna kontrola výstupů se simulací v programu HEC-HMS. Podrobný popis metodiky odtokových CN křivek pro výpočet výšky a objemu odtoku z povodí se definuje v kapitole 4.7.1.

Tab. č. 28: Výška a objem odtoku pro N-leté srážky s dobou trvání 169 minut (Vlastní zpracování 2019)

Výška a objem odtoku pro N-leté srážkové úhrny s dobou 169 minut						
N - letost	2	5	10	20	50	100
Výška odtoku R (mm)	0,33	2,69	5,32	9,30	15,69	21,01
Objem odtoku R_{obj} (m ³)	8742,67	70615,04	139348,7	243652,2	411289,0	550540,7

Tab. č. 29: Výška a objem odtoku pro maximální denní N-leté úhrny srážek (Vlastní zpracování 2019)

Výška a objem odtoku pro maximální denní N-leté srážkové úhrny						
N - letost	2	5	10	20	50	100
Výška odtoku R (mm)	3,06	7,81	11,66	16,18	22,23	27,53
Objem odtoku R_{obj} (m ³)	80266,50	204605,47	305657,64	424098,66	585159,42	721377,06

Pro stejný návrhový déšť byly spočteny kulminační průtoky povodí pro různé N-letosti. Podrobný popis metodiky pro výpočet kulminačních průtoků odvozený z metodiky odtokových CN křivek je uveden v kapitole 4.7.2.

Tab. č. 30 – Hodnoty kulminačního průtoku pro návrhový déšť s dobou trvání 169 minut (Vlastní zpracování 2019)

Kulminační průtok (m³/s) pro zkoumané povodí						
N - letost	2	5	10	20	50	100
Průtok v UZ (m ³ /s)	0,36	4,06	8,67	16,08	28,36	39,84

5.3. Porovnání obou použitých metod

Zde je uvedeno porovnání všech metod, které byly použity pro výpočet objemů odtoku z povodí a ke stanovení kulminačního průtoku. Metoda odtokových CN křivek byly vypočtena dle stanovené metodiky. Metoda SCS a Clarkova jednotkového hydrogramu definována v simulacích v programu HEC-HMS.

Tab. č. 31 Porovnání objemů odtoku podle metod - CN křivky, SCS JH, Clarkův JH (Vlastní zpracování 2019)

Porovnání objemů odtoku pro N-leté srážkové úhrny s dobou 169 minut						
N - letost	2	5	10	20	50	100
Metoda odtokových CN křivek (m ³)	8742,7	70615,0	139348,7	243652,2	411289,0	550540,7
Metoda SCS JH (m ³)	12704,8	75612,3	556299,5	249286,3	416546,2	555066,0
Metoda Clarkova JH	12458,1	74502,1	142590,3	245462,5	410378,8	547171,7

Z výsledků je patrné, že rozdíl objemů odtoku všech tří je prakticky zanedbatelný. Ztráta vody v povodí je pro všechny metody stanovena podobně na základě hodnot odtokových CN křivek. Jelikož všechny metody uvažují stejnou vstupní srážku stanovenou pro vypočtenou dobu koncentrace, bylo předpokládáno, že budou dosahovat podobných hodnot.

Tab. č. 32 – Porovnání kulminačních průtoků podle metod – CN křivky, SCS JH, Clarkův JH (Vlastní zpracování 2019)

Porovnání kulminačních průtoků pro N-leté srážkové úhrny s dobou 169 min.						
N - letost	2	5	10	20	50	100
Metoda odtokových CN křivek (m ³ /s)	0,36	4,06	8,67	16,08	28,36	39,84
Metoda SCS JH (m ³ /s)	1,29	6,18	11,52	19,96	33,59	44,91
Metoda Clarkova JH (m ³ /s)	1,15	6,55	12,66	21,97	36,99	49,47

Při porovnání kulminačních průtoků je patrný větší rozdíl u jednotlivých metod. Jelikož metoda odtokových CN křivek neuvažuje ve svém výpočtu kulminačního průtoků časovou závislost proměnných je průtok zatížen větší chybou a není možné sledovat tvar a nástup povodňové vlny. Metody SCS a Clarkova jednotkového hydrogramu použité v prostředí HEC-HMS uvažují časovou závislost proměnných, a tak lépe popisují tvar a nástup povodňové vlny společně s kulminačním průtokem. Jelikož nemohly být parametry kalibrovány měřenými hodnotami, jsou výsledky více či méně zkreslené oproti skutečnosti.

5.4. Retenční schopnost povodí

Přirozená retenční schopnost povodí vyjadřuje, kolik vody je povodí schopno zadržet svým vegetačním krytem, půdním povrchem a profilem, vodními toky a nádržemi. Retence vody je důležitým faktorem pro zachycení srážek a transformaci průtokových, jinak též povodňových vln.

Tab. č. 33 – Retence povodí určená v % pro N-leté návrhové deště (Vlastní zpracování 2019)

N - letost	IPS I (%)	IPS II (%)	IPS III (%)
2	100	99,66	95,43
5	100	97,28	88,85
10	100	94,64	83,54
20	99,56	90,64	76,58
50	97,90	84,23	66,66
100	95,99	78,90	59,05

6. Diskuze

Pro vyhotovení diplomové práce a zjištění požadovaných výsledků byly využity dvě hlavní metody. Hydrologický model v programu HEC-HMS a druhou, především kontrolní nebo spíše metodou sloužící k prvotnímu odhadu hodnot byla metoda odtokových CN křivek. Obě metody kladou značný důraz na přípravu podkladových vrstev a zpracování surových dat do potřebné formy. Tudíž značná část práce se zaobírá přípravou dat v prostředí ArcGIS, kde se především pracovalo s nástroji ArcHydroTools a HECGeoHMS. Pro potřeby stanovení hodnot odtokových CN křivek byla zpracována velmi podrobná mapa využití krajiny (Land use). Zjištěné hodnoty byly využity u obou metod. Jelikož program HEC-HMS byl vyvinut v USA, dochází často k nekompatibilitě s univerzálním balíčkem Windows. Z tohoto důvodu bylo považováno za nezbytné převést celý počítačový systém do americké angličtiny a anglosaských jednotek. Řada problémů při práci s nástroji v ArcGIS byla způsobena právě touto nekompatibilitou programů ArcGIS a HEC-HMS. Do značné míry měla vliv na dlouhou přípravu dat, související s jistou nezkušeností s konkrétními nástroji, jejich optimálnímu nastavení vzhledem ke konkrétnímu povodí a jejich častá nefunkčnost, která byla krok za krokem odstraňována.

Jelikož obě metody vychází z principů odtokových CN křivek, dochází zde k předpokladu, že výsledky obou metod, by měly vykazovat jistou podobnost. V programu HEC-HMS byly k transformaci přímého odtoku použity metody SCS a Clarkova jednotkového hydrogramu. Při porovnání s metodou odtokových CN křivek přikládám větší důraz na výsledky ze simulací programu HEC-HMS. Porovnání je do jisté míry zkreslené, jelikož metodika CN křivek neuvažuje o časové proměnlivosti oproti programu HEC-HMS. I přes tuto odlišnost ve složitosti a způsobu výpočetního schématu byly výsledné hodnoty poměrně podobné, s maximální odchylkou 20 %. Vzhledem k velikosti povodí, a především k tomu, že se jedná o nepozorované povodí bez možnosti kalibrace modelu časovou řadou průtoků, definují se tyto výsledky jako poměrně uspokojivé.

7. Závěr

Prvním cílem této diplomové práce bylo zpracování odborných publikací týkajících se dané problematiky. Publikace posloužily jako teoretický podklad, na jehož základě byla provedena metodika.

Druhý cíl se týkal analýzy podrobného využití krajiny (land use) v zájmové lokalitě. Následně byl využit jako jeden z podkladů při odvození odtokových CN křivek. Mapa využití krajiny byla zpracována v maximálně možném detailním zpracování. To dále poskytovalo použité podklady, tudíž odvozené CN křivky mají velkou přesnost. Jelikož obě metody použité v diplomové práci vychází z principů odtokových CN křivek, považuje se za vhodné zpracovat podklad v takové kvalitě. Toto podrobné zpracování bylo ovšem velmi časově náročné. Naskytá se otázka, zda takto podrobně definovaná mapa využití území představuje až tak výrazný efekt při tvorbě modelu, kde není možná kalibrace měřenými daty. Dle mého názoru považuji ovšem takový způsob zpracování land use za velmi užitečný, a to i z důvodu, že v případě nepozorovaného povodí jsou takto podrobně zpracované podklady jediným možným řešením jak se co nejvíce přiblížit realitě. Na mapu využití krajiny navazuje metodika odtokových CN křivek, na jejímž základě byl stanoven kulminační průtok a odtok z povodí. Vzhledem k tomu, že tato metoda má poměrně jednoduché řešení, řadu procesů zjednodušuje, sloužila především k prvotnímu výpočtu výsledků. Druhá metoda byla zpracována v programu HEC-HMS a tvoří primární část této diplomové práce. Byly též analyzovány podrobné charakteristiky zájmového povodí, kterých bylo využito u obou metod.

Poslední třetí cíl práce se zabýval již konkrétní simulací sestaveného modelu. Jelikož je zde řešeno malé nepozorované povodí bez možnosti kalibrace měřenými průtoky, bylo zásadní zvolit vhodné výpočetní schéma s použitím co nejlépe odhadnutých vstupních parametrů. Při práci v programu HEC-HMS byla provedena simulace pro epizodní model a pro různé N-leté návrhové deště, které byly vyhodnoceny ve formě jednotkového hydrogramu. Výsledky z těchto N-letých návrhových dešťů byly porovnávány oběma metodami. Dokázané výsledky ukazují, že pro výpočet objemu odtoku z povodí dosahují obě metody velice podobných výsledků, jelikož vycházejí ze stejného principu a nejsou zde prakticky žádné proměnné, které by způsobily větší odchylky. Rozdíl nastává při vyhodnocení kulminačního průtoku, kde program HEC-HMS, který zahrnuje časovou proměnlivost systému, dosahuje relevantnějších

hodnot. Výsledky kulminačních průtoků při porovnání nedosahovaly velkých odchylek, ovšem bez možnosti kalibrovat vstupní parametry modelu, je model zatížen zřejmou chybovostí. Ze zjištěných informací je zřejmý velmi silný vliv vstupních parametrů na výsledky modelu. Za velmi důležitý fakt považuji správné zvolení těchto vstupních parametrů na základě podrobně a kvalitně zpracovaných charakteristik povodí. Dále je velmi podstatné nastavit optimální strukturu a výpočetní schéma modelu pro konkrétní řešený hydrologický systém povodí.

Závěrem bych chtěl říci, že z mého pohledu považuji za velmi zásadní zabývat se metodikou pro výpočet odtokových hodnot právě z těchto malých nepozorovaných povodí. V praxi pro návrhové účely se musí celá řada povodí obejít bez možnosti kalibrace, jelikož tyto kontrolní data zkrátka nejsou k dispozici.

8. Seznam literatury a použitých zdrojů

8.1. Literatura

- BECKER A. et SERBAN P. 1990: Hydrological models for water – resources systém desing and operation. Operational Hydrology Report No 34., WMO Geneva, 80 s.
- BEVEN K. 2001: Rainfall – Runoff Modelling. The Primer. John Wiley et Sons, Chichester, 360 s.
- BEVEN K. 2004: Horton’s perceptual model of infiltration processes. Hydrological Processes., s. 3447–3460, ISSN 0885-6087.
- BEVEN, K.J., G.M. HORNBERGER 1982: Assessing the effect of spatial pattern of precipitation in modeling stream flow hydrographs. Water Resources Bulletin, 823-829 s.
- BRAS R. L. 1990: Hydrology. An Introduction to Hydrologic Science. Addison Wesley Publishing Company, ISBN 0-2010-5922-3.
- BUCHTELE J. 2002: Okolnosti ovlivňující využití modelů a tendence v uplatňování různých přístupů. ČVUT v Praze, Praha, 55 s.
- BUCHTELE J. 2002: Hydrologické modely – okolnosti jejich uplatnění. ČVUT v Praze, Praha.
- CLARKE R. T. 1973: Mathematical models in hydrology. Irrigation and Drainage paper No 19, FAO, Rome.
- DAŇHELKA J., KREJČÍ J., ŠÁLEK, M., ŠERCL, P., ZEZULÁK, J. 2003: Posouzení vhodnosti aplikace sřížko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. ČZÚ, Praha, 214 s.
- DINGMAN S. L. 2002: Physical Hydrology, 2nd Edition. Prentice Hall ISBN 0-1309-9695-5, 646 s.
- DOOGE C. I. J. 1988: Hydrology in Perspective. Hydrological Sciences . Department of Engineering Hydrology, University College, Galway 85 s.
- DOOGE J. C. J. 2003: Linear Theory of Hydrologic Systems. EGU Reprint Series 1, ISBN 978-3-936586-10-7.
- ESRI, 2011. *Arc Hydro Geoprocessing Tools, Version 2.0*. United States of America. ESRI, 189 pp.

- FLEMING M., BRAUER T. 2018: *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Quick Start Guide, Version 4. 3.*, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, 61 pp.
- FLEMING M., DOAN J. 2013: *HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension, User's Manual, Version 10. 1.* US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, 193 pp.
- HANEL M., MÁČA, P. 2013: Spatial variability and interdependence of rain event characteristics in the Czech Republic. *Hydrological Processes*, ISSN 1099-1085.
- HEC-1 1990: *Flood Hydrograph Package. User Manual, US Army Corps of Engineers.*
- HRÁDEK F., KUŘÍK P. 2002: *Hydrologie. ČZU FŽP, Praha, 280 s. ISBN 80-213-0950-4.*
- HUBAČÍKOVÁ V. 2002: *Hydrologie. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno, ISBN 978-80-7157-638-92009.*
- CHOW T., MAIDMENT D., MAYNS W. 1988: *Applied Hydrology. International Edition, Singapore, ISBN 0-07-100174-3.*
- CHOW T. 1964: V. *Handbook of applied hydrology a compendium of water resources technology. C. sv. 1 v Handbook of Applied Hydrology: A Compendium of Water-resources Technology. McGraw-Hill.*
- JANEČEK M. 2012: *Ochrana zemědělské půdy před erozí. ČZÚ v Praha, FŽP, Praha, ISBN 978-80-87451-42-9.*
- JENÍČEK M. 2007: *Rainfall-runoff modelling in small and middle-large catchments - an overview. Geografie-Sborník ČGS č. 3 111, ISSN 1212-0014.*
- KEMEL M. 1996: *Klimatologie, meteorologie, hydrologie. ČVUT, Praha, 289 s.*
- KIRCHNER J. W. 2009: *Catchments as simple dynamical systems. Catchment characterization rainfall-runoff modeling and doing hydrology backward. Water Resources Research. ISSN 1944-7973.*
- KOVÁŘ P. 1990: *Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích. ČZÚ, Praha Suchdol, ISBN 8021300884.*
- KULHAVÝ Z., KOVÁŘ P. 2000: *Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí. Vydavatelství VÚMOP, Praha, 123 s. ISSN 1211-3972.*

- MÁČA P. 2010: Jednotkový hydrogram., Česká zemědělská univerzita v Praze ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T.G. Masaryka, Praha, ISBN 978-80-87402-05-4.
- MÁČA P. 2014: Hydrologie pro bakaláře. Česká zemědělská univerzita v Praze, fakulta životního prostředí, Praha, 126 s.
- MORAVCOVÁ J. 2011: Vliv krajinných struktur na vybrané ukazatele jakosti vody při zvýšených průtocích jako podklad pro projekci KPÚ. Katedra krajinného managementu ZF, JCU, České Budějovice, 146 s.
- MŽP 2008: Metodika Ministerstva životního prostředí k navrhování protipovodňových opatření v ploše povodí, které současně řeší obnovu vodního režimu a snižování vodní eroze pro účely plánování oblasti vod dle směrnice 2000/60/ES. VÚV TGM, Praha.
- NĚMEC J. 1965: Hydrologie. Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 235 s.
- NETOPIL R. a kol. 1984: Fyzická geografie, 1. vydání. Praha, SPN, 272 s.
- NYPL V., KURÁŽ V. 1992: Hydrologie a pedologie. VŠCHT Praha, ISBN: 80-7080-152-2, 143 s.
- PACKMAN J. 1979: The effect of urbanisation on flood magnitude and frequency. Report No 63, Institute of Hydrology Wallingford, p. 117.
- PODHRÁZSKÁ J. 2003: Vliv hospodaření v povodí na jeho retenci. Mezinárodní vědecká konference Bioklimatologické pracovní. Funkcia energetickej a vodnej vilancie v bioklimatických systémoch. Nitra, FZKI SPU.
- POKORNÁ D., ZÁBRANSKÁ J. 2008: Hydrologie a hydropedologie. Vydavatelství VŠCHT Praha, 218 s. ISBN: 978-80-7080-707-1.
- SCHARFFENBERG B., BARTLES M., BRAUER T., FLEMING M., KARLOVITS G., 2018: *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual. Version 4.3.* US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, 640 pp.
- SHERMAN L. K. 1932: Streamflow from rainfall by unit-graph method. Engineering News Record. 108 s. 501–505. ISSN 0013-807X.
- SINGH V. 1998: Hydrologic Systems V. 1. Rainfall-runoff Modeling. Hydrologic Systems, Prentice Hall PTR, 1998, ISBN 9780134480510.
- SOMMER M. 1981: Hydrologie. Vysoké učení technické v Brně, Brno.
- STRAUB T. D., MELCHING Ch. S., KOCHER K. E. 2000: Equations for Estimating Clark Unit Hydrograph Parameters for small Watersheds in Illinois.

USGS Water Resources Investigations Report 00-4184, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

- VIESSMAN W., LEWIS G., KNAPP 1989: J. W. Introduction to Hydrology. 3rd Edition. Harper & Row, ISBN 978-0-06-046822-4.
- WHEATER H. S. ET AL. 2000: Generation of Spatially Consistent Rainfall Data. DEFRA Report, Imperial Colledge, London.
- WMO 1990: Hydrological models for water-resources systém design and operation. WMO-No 740, Geneva.
- WMO 1994: Guide to Hydrological Practices, WMO Publ. No 167, Geneva.

8.2. Internetové zdroje

- HEC – 1: Flood Hydrograph Package, User Manual, US Army Corps of Engineers. Online: <http://www.hydroweb.com/hec-models.html>, staženo 2. 2. 2019.
- ČÚZK 2019: Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G).
Online:
[https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(rzhmb4pldj2hboseu34nfkyu\)\)/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&mapid=8&menu=302](https://geoportal.cuzk.cz/(S(rzhmb4pldj2hboseu34nfkyu))/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&mapid=8&menu=302), staženo 5. 3. 2019
- ČÚZK 2019: Základní mapa ČR (S-JTSK). Online:
<https://ags.cuzk.cz/arcgis/rest/services>, staženo 3. 3. 2019.
- ARCGIS 2019: Geologická mapa 1:50 00. Online:
<https://mapy.geology.cz/arcgis/services>, staženo 2. 5. 2019.
- CENIA 2019: Půdní mapa ČR 1:250 000, Online:
http://geoportal.gov.cz/ArcGIS/services/CENIA/cenia_typy_pud/mapserver/WMSserver?, staženo 2. 6. 2019.
- VÝZKUMNÝ ÚSTAV MELIORACÍ A OCHRANY PŮDY 2019: Nabídka mapových a datových produktů - Hydrologické charakteristiky. Online:
<https://www.vumop.cz/geoportal-sowac-gis-0>, staženo 2. 6. 2019.
- STÁTNÍ POZEMKOVÝ ÚŘAD 2019: Celostátní databáze BPEJ. Online:
<https://www.spucr.cz/bpej/celostatni-databaze-bpej>, staženo 2. 8. 2019.
- ÚSTAV PRO HOSPODÁŘSKOU ÚPRAVU LESŮ 2019: Oblastní plán rozvoje lesů. Online: http://gp2.uhul.cz/wms_oprl/service.svc/get, staženo 5. 8. 2019

- ČZU 2019: Taxomonický klasifikační systém půd ČR. Online:
https://klasifikace.pedologie.czu.cz/index.php?action=showPudniTyp&id_categoriaNode=167, staženo 2. 5. 2019

8.3. Legislativní zdroje a normy

ČSN 751400: Hydrologické údaje povrchových vod 2014

9. Seznam obrázků a tabulek

Obrázky:

Obr. č. 1: Koncept hydrologického systému

Obr. č. 2: Rovnice č. 1

Obr. č. 3 – Rovnice č. 2

Obr. č. 4 – Rovnice č. 3

Obr. č. 5: Základní schéma bilanční rovnice

Obr. č. 6: Rovnice č. 4

Obr. č. 7: Struktura jednotlivých říčních sítí

Obr. č. 8: Rovnice č. 5

Obr. č. 9: Topografická mapa s vyznačením zájmového povodí

Obr. č. 10: Geologická mapa povodí

Obr. č. 11: Pedologická mapa povodí

Obr. č. 12: Vegetační pokryv v procentuálním zastoupení k celkové ploše povodí

Obr. č. 13: Vodní plocha pískovna u obce Kal

Obr. č. 14: Rybník Ovčák u obce Bezděkov

Obr. č. 15: Řeka Úhlava s vodoměrnou stanicí u obce Tajanov

Obr. č. 16: Rovnice č. 6

Obr. č. 17: Rovnice č. 7

Obr. č. 18: Rovnice č. 8

Obr. č. 19: Rovnice č. 9

Obr. č. 20: Rovnice č. 10

Obr. č. 21: Rovnice č. 11

Obr. č. 21: Rovnice č. 12

Obr. č. 22: Rovnice č. 13

Obr. č. 23: Rovnice č. 14

Obr. č. 24: Diagram závislosti odtoku na srážkách a CN křivek

Obr. č. 25: Graf závislosti CN křivek na vláhových podmínkách

Obr. č. 26: Graf pro určení lesních hydrologických podmínek

Obr. č. 27: Diagram pro určení CN na základě lesních hydrologických podmínek hydrologické skupiny půd

Obr. č. 28: Rovnice č. 15

Obr. č. 29: Rovnice č. 16

Obr. č. 30: Rovnice č. 17
Obr. č. 31: Rovnice č. 18
Obr. č. 32: Rovnice č. 19
Obr. č. 33: Rovnice č. 20
Obr. č. 34: Rovnice č. 21
Obr. č. 35: Rovnice č. 22
Obr. č. 36: Rovnice č. 23
Obr. č. 37: Nomogram pro určení jednotkového kulminačního průtoku
Obr. č. 38: Povodí vytvoření generováním nástroji HECGeoHMS
Obr. 39 - Schéma reprezentující sub-povodí, uzávěrové profily a linie toků
Obr. 40 - Jednotlivé komponenty HEC-HMS popisující strukturu povodí
Obr. č. 41: Rovnice č. 26
Obr. 42 – Hydrogram přímého odtoku pro 2 denní vstupní srážku
Obr. 43 - JH pro N-100 letou srážku s dobou trvání 169 min. transformován SCS JH
Obr. 44 - JH pro N-100 letou srážku pro dobu trvání 169 min transformován Clarkových JH
Obr. 45 - JH pro N-2letou srážku pro dobu trvání 169 min transformován Clarkových JH

Tabulky:

Tab. č. 1: Hydrologické procesy a proměnné používané při klasifikaci modelů
Tab. č. 2: Hydrologické procesy a proměnné používané při klasifikaci modelů
Tab. č. 3: Plocha dílčích povodí IV. řádu a celková plocha
Tab. č. 4: Tvarové charakteristiky povodí
Tab. č. 5: Orografické poměry v povodí
Tab. č. 6: Hodnoty potenciální intercepce pro různou vegetaci
Tab. č. 7: Charakteristiky hlavních vodních toků
Tab. č. 8: N-leté návrhové srážkové úhrny pro řešené povodí
Tab. č. 9: Výsledná hodnota doby koncentrace a charakteristiky povodí
Tab. č. 10: Hodnoty drsnostního součinitele n pro různé povrchy
Tab. č. 11: Doba doběhu a vstupní hodnoty do výpočtu
Tab. č. 12: Doba dotoku a další charakteristiky dráhy odtoku
Tab. č. 13: Hodnoty drsnostního součinitele n pro různá koryta
Tab. č. 14: Doby dotoku a charakteristiky odtokové dráhy

Tab. č. 15: Výsledné hodnoty doby koncentrace

Tab. č. 16: Rozdělení hydrologických skupin půd z hlediska infiltrace

Tab. č. 17: Stav předchozích vláhových podmínek IPS

Tab. č. 18: Hydrologické půdní skupiny podle HPJ získané z BPEJ

Tab. č. 19: Průměrná čísla odtokových křivek CN pro IPS II

Tab. č. 20: Ohodnocení nadložního humusu pro určení CN

Tab. č. 21: Hodnota CN křivky pro plochu povodí P_p , hodnota maximální potenciální retence S a počáteční retence I_a

Tab. č. 22: Hodnoty jednotkového kulminačního průtoku, opravného součinitele f a poměr I_a/P

Tab. 23 – Výsledné hodnoty pro 2-denní epizodní simulaci

Tab. 24 – Parametry simulace 1

Tab. 25 – Parametry simulace 2 A)

Tab. 26 - N - letá efektivní srážka pro dobu dotoku 169 minut, SCS JH

Tab. 27 - N - letá efektivní srážka pro dobu dotoku 169 minut, Clarkův JH

Tab. č. 28: Výška a objem odtoku pro N-leté srážky s dobou trvání 169 minut

Tab. č. 29: Výška a objem odtoku pro maximální denní N-leté úhrny srážek

Tab. č. 30 – Hodnoty kulminačního průtoku pro návrhový déšť s dobou trvání 169 minut

Tab.č. 31 Porovnání objemů odtoku podle metod - CN křivky, SCS JH, Clarkův JH

Tab. č. 32 – Porovnání kulminačních průtoků podle metod – CN křivky, SCS JH, Clarkův JH

Tab. č. 33 – Retenční kapacity povodí určená v % vzhledem k IPS I, II, II pro N-leté návrhové deště

10. Seznam zkratek

TJH – Intervalový jednotkový hydrogram

JH – Jednotkový hydrogram

OJH – Okamžitý jednotkový hydrogram

WMO – world meteorological organisation

HEC – Hydrologic Engineering Center

HMS - Hydrologic Modeling Systém

HS – Hydrologický systém

WMS - Watershed Modeling System

SAC-SMA - Sacramento Soil Moisture Accounting Model

ČHMÚ – Český hydrometeorologický proces

IUH – Unit hydrograph

US - Soil Conservation Service

CN – Curve number

HEC-HMS - Hydrologic Modeling Systém

UZ – Uzávěrový profil

BPEJ - Bonitně půdně ekologická jednotka

HPJ - Hlavní půdní jednotka

HPT – Hlavní půdní typ

ČÚZK – Český úřad zeměměřičský a katastrální

DMT - Digitálního modelu terénu

TIN - Nepravidelná trojúhelníková síť

LPIS – Veřejný registr půd

MŽP – Ministerstvo životního prostředí

VÚMOP – Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy

OPRL - Oblastní plán rozvoje lesů

SLT - Soubor lesních typů

SCS - Soil Conservation Service

DTM – Digital terrain model

IDW – Inverse distance weight (metoda vážených inverzních vzdáleností)

IPS – Index předchozích srážek

11. Seznam příloh

Příloha č.1: Přehledná mapa zájmového území

Příloha č.2: Hydrologická mapa zájmové oblasti

Příloha č.3: Digitální model terénu zájmového území

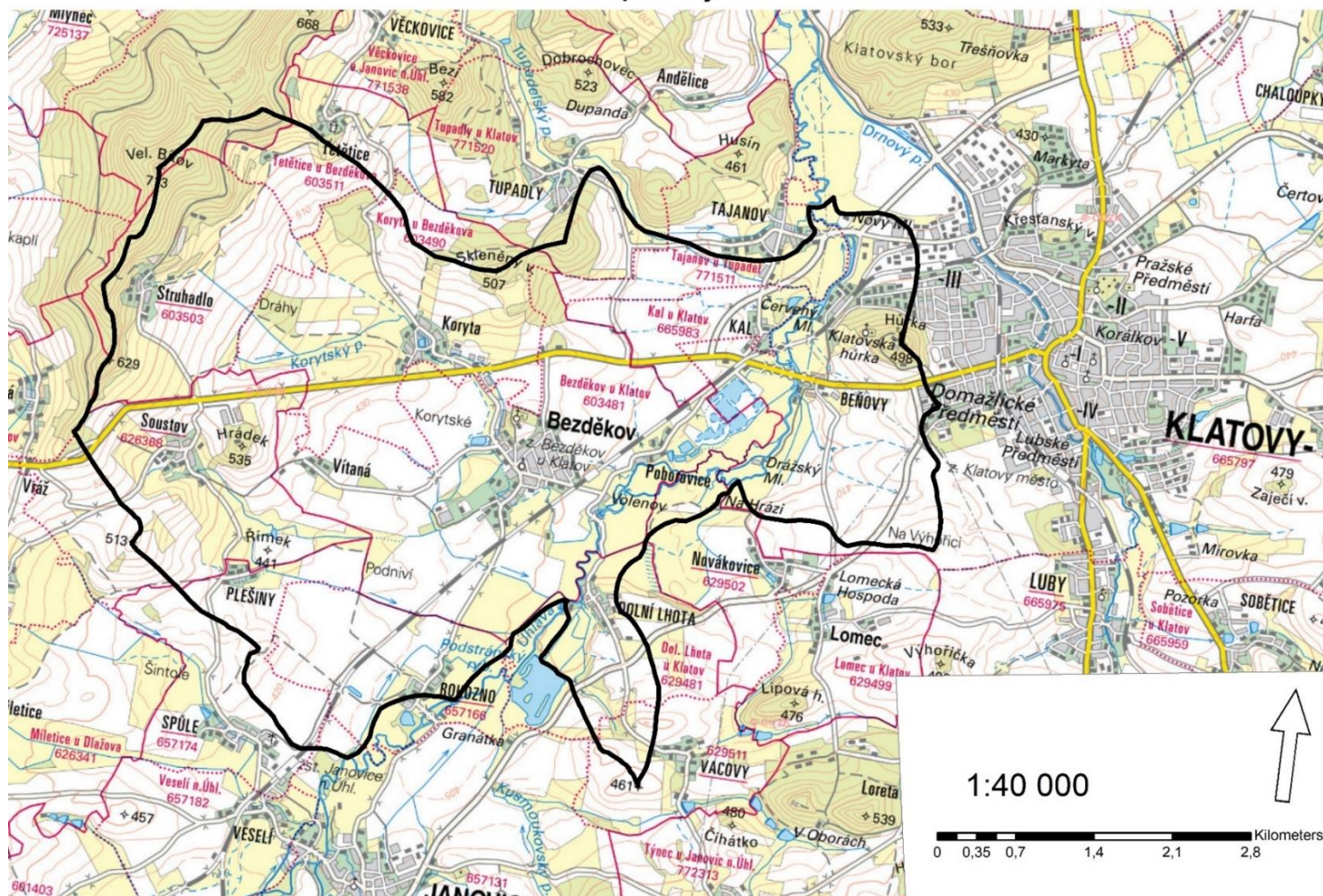
Příloha č.4: Land use zájmové oblasti

Příloha č.5: Charakteristiky a parametry povodí – 1. část

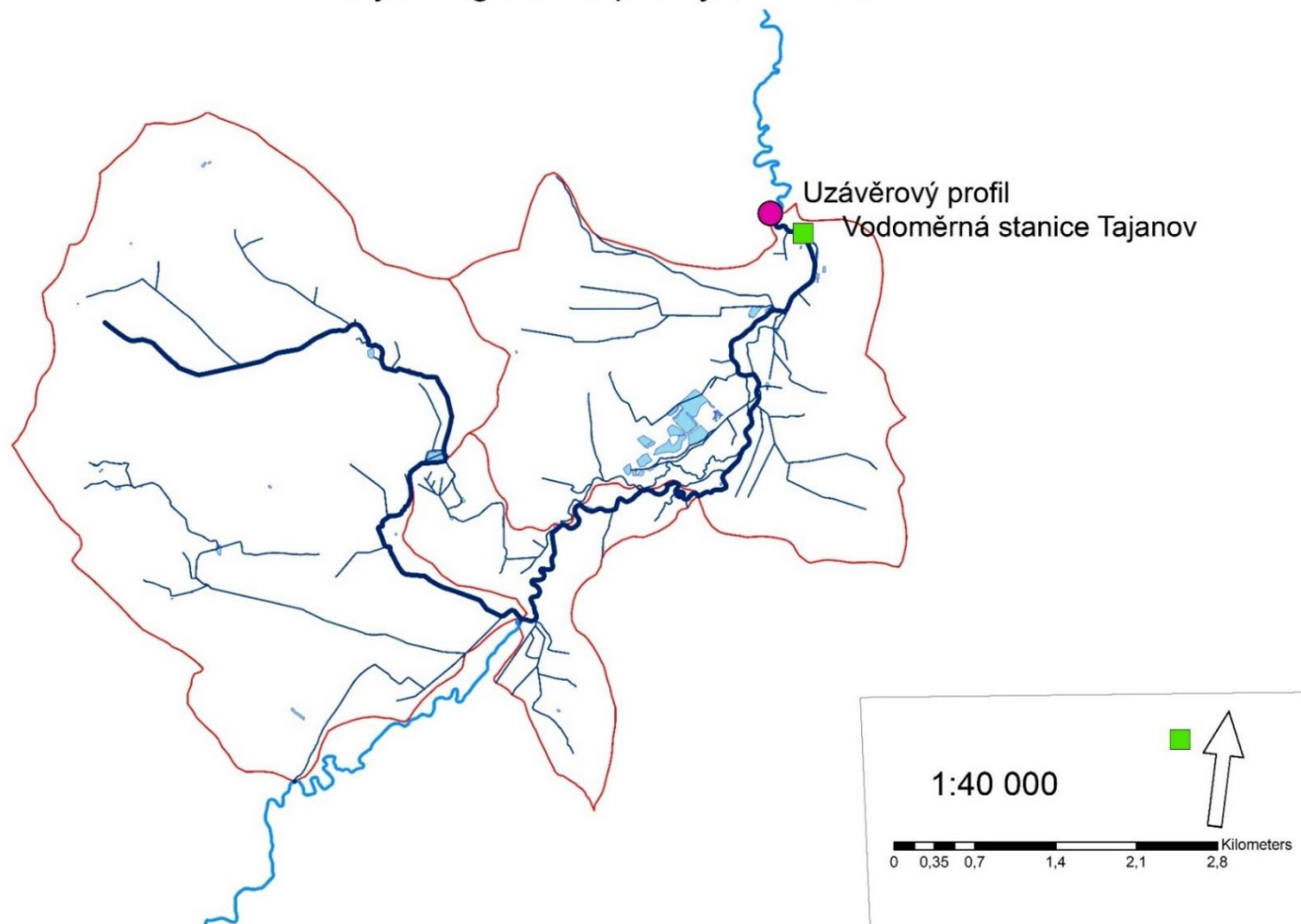
Příloha č.6: Charakteristiky a parametry povodí – 2. část

Příloha č.1: Přehledná mapa zájmového území

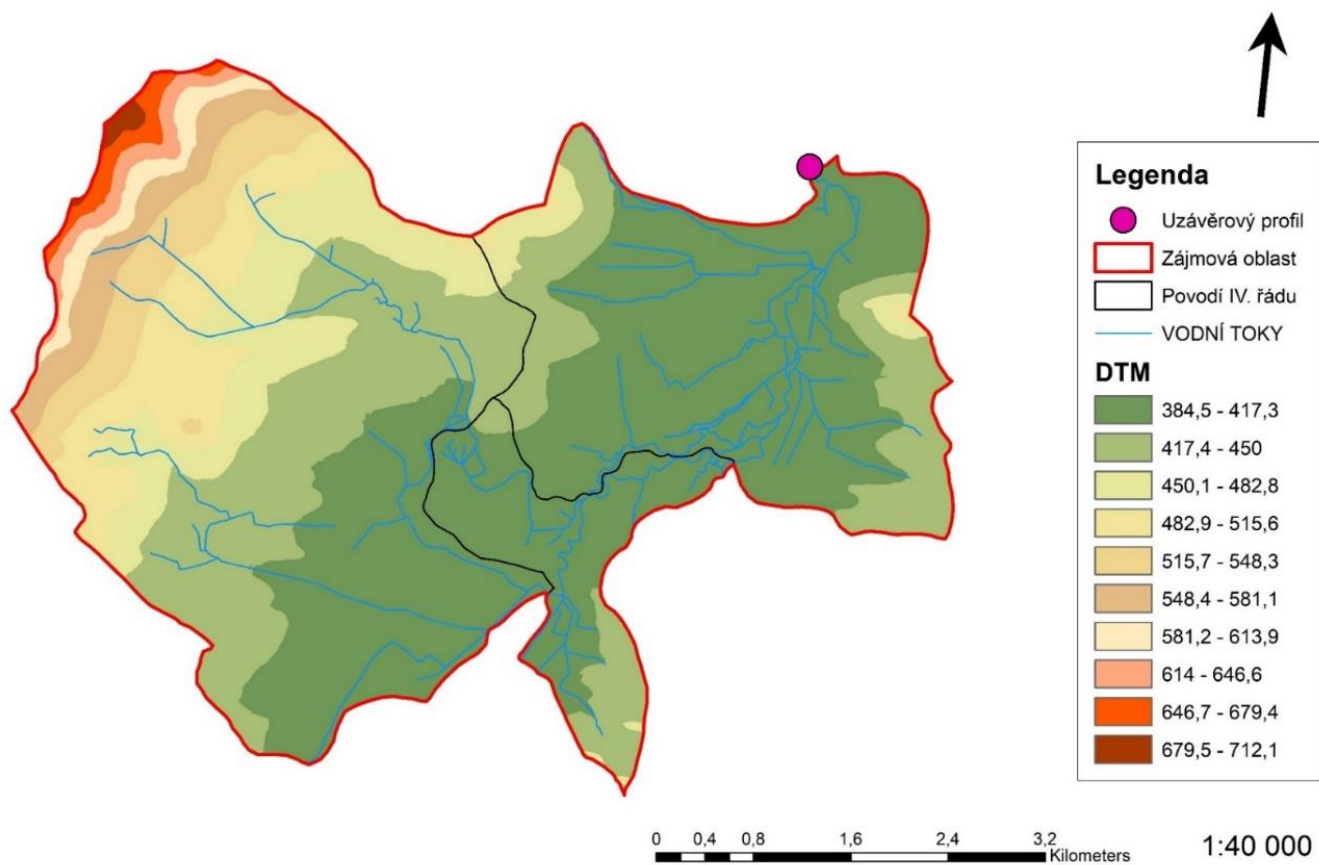
Přehledná mapa zájmového území



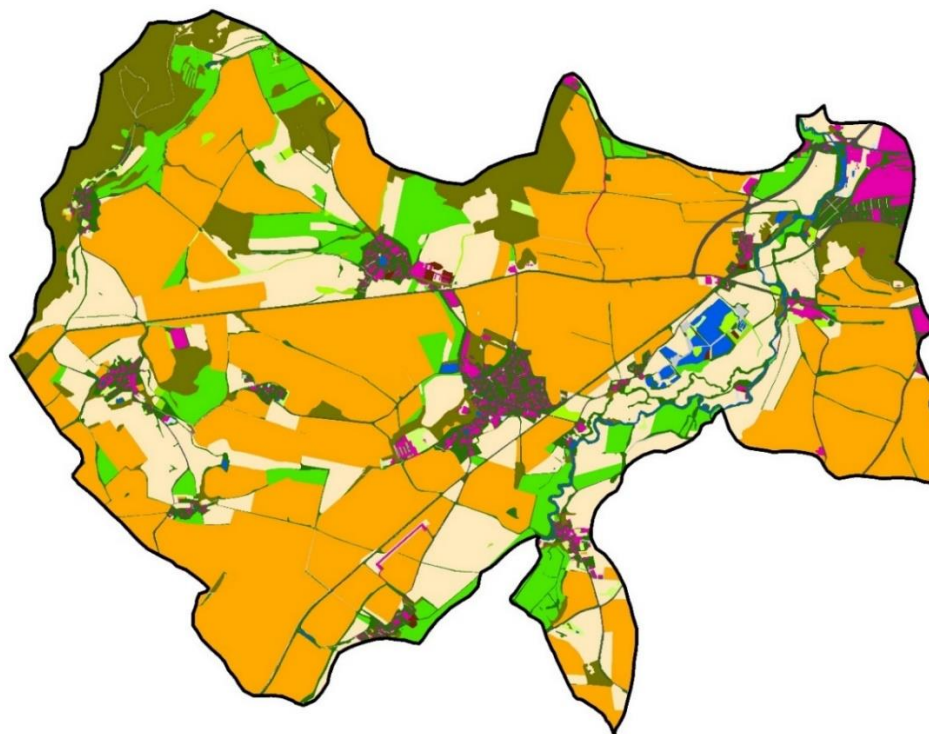
Hydrologická mapa zájmové oblasti



DIGITÁLNÍ MODEL TERÉNU ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ

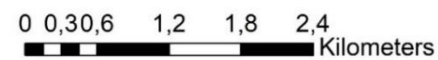


LAND USE ZÁJMOVÉ OBLASTI



LEGENDA	
	ZÁJMOVÁ OBLAST
	LOUKY
	ORNÁ PŮDA
	PASTVINY
	ZALESNĚNÁ PLOCHA
	LES
	VODNÍ PLOCHY
	ÚHOR
	CESTY ZPEVNĚNÉ
	PROPUSTNÉ PLOCHY
	NEPROPUSTNÉ PLOCHY
	KŘOVINY 100%
	KŘOVINY 75%
	KŘOVINY 50%
	DOPROVODNÁ ZELEŇ
	CESTY NEZPEVNĚNÉ

1:40 000



Příloha č.5: Charakteristiky a parametry povodí – 1. část

Worksheet for computation of time of travel according to TR-55 methodology																	
Blue - GIS defined, Green - user specified, White and yellow - calculated, Red - final result																	
Watershed Name	W360	W370	W380	W390	W400	W410	W420	W430	W440	W450	W460	W470	W480	W490	W500	W510	W520
Watershed ID	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Sheet Flow Characteristics																	
Manning's Roughness Coefficient	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Flow Length (ft)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Two-Year 24-hour Rainfall (in)	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41
Land Slope (ft/ft)	0,10	0,06	0,10	0,37	0,11	0,08	0,01	0,02	0,04	0,27	0,10	0,12	0,19	0,07	0,06	0,01	0,09
Sheet Flow Tt (hr)	0,19	0,23	0,19	0,12	0,19	0,21	0,62	0,37	0,28	0,13	0,19	0,18	0,15	0,22	0,24	0,49	0,20
Shallow Concentrated Flow Characteristics																	
Surface Description (1 - unpaved, 2 - paved)	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Flow Length (ft)	3324,41	6136,09	5824,59	7448,07	9159,49	4132,72	254,23	3710,44	454,03	5684,20	2570,24	7080,28	7142,62	5895,61	5572,50	6611,09	19,01
Watercourse Slope (ft/ft)	0,10	0,11	0,12	0,03	0,10	0,07	0,03	0,02	0,02	0,05	0,08	0,11	0,10	0,11	0,02	0,01	0,27
Average Velocity - computed (ft/s)	6,49	6,77	6,94	3,71	6,41	5,47	3,36	2,75	3,20	4,66	5,77	6,73	6,43	6,70	2,72	1,48	10,48
Shallow Concentrated Flow Tt (hr)	0,14	0,25	0,23	0,56	0,40	0,21	0,02	0,37	0,04	0,34	0,12	0,29	0,31	0,24	0,57	1,24	0,00
Channel Flow Characteristics																	
Cross-sectional Flow Area (ft2)	215,29	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	215,29	20,00	20,00	64,59	20,18	20,00	20,18	20,00	215,29	215,29
Wetted Perimeter (ft)	45,93	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	45,93	20,00	20,00	29,53	15,56	20,00	15,56	20,00	45,93	45,93
Hydraulic Radius - computed (ft)	4,69	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	4,69	1,00	1,00	2,19	1,30	1,00	1,30	1,00	4,69	4,69
Channel Slope (ft/ft)	0,00	0,05	0,04	0,01	0,04	0,01	0,06	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,07	0,04	0,00	0,00	0,00
Manning's Roughness Coefficient	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Average Velocity - computed (ft/s)	6,22	11,26	10,13	3,97	10,07	4,89	11,96	5,39	1,11	4,18	7,62	9,23	13,44	12,42	3,48	9,23	4,82
Flow Length (ft)	3343,74	2780,51	1565,18	2669,06	104,76	6893,83	71,17	2162,66	190,19	766,28	9186,40	3451,66	166,10	916,99	2065,13	258,08	1675,43
Channel Flow Tt (hr)	0,15	0,07	0,04	0,19	0,00	0,39	0,00	0,11	0,05	0,05	0,33	0,10	0,00	0,02	0,16	0,01	0,10
Tc - Watershed Time of concentration (hr)	0,48	0,55	0,47	0,86	0,59	0,81	0,64	0,86	0,37	0,52	0,65	0,57	0,46	0,49	0,98	1,74	0,30
R - storage coefficient	2,18	0,16	0,15	0,80	0,06	0,80	0,04	2,36	2,44	0,48	1,00	0,31	0,05	0,12	0,91	0,49	2,58
K - Muskingum parameter (min)	10	9	5	8	1	21	1	7	1	3	28	11	1	3	7	1	6
X - Muskingum parameter	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Příloha č. 6: Charakteristiky a parametry povodí – 2. část

Worksheet for computation of time of travel according to TR-55 methodology																		
Blue - GIS defined, Green - user specified, White and yellow - calculated, Red - final result																		
Watershed Name	W530	W540	W550	W560	W570	W580	W590	W600	W610	W620	W630	W640	W650	W660	W670	W680	W690	W700
Watershed ID	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Sheet Flow Characteristics																		
Manning's Roughness Coefficient	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Flow Length (ft)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Two-Year 24-hour Rainfall (in)	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41
Land Slope (ft/ft)	0,05	0,08	0,01	0,01	0,01	0,09	0,14	0,03	0,02	0,06	0,03	0,15	0,02	0,02	0,00	0,07	0,06	0,03
Sheet Flow Tt (hr)	0,25	0,21	0,46	0,47	0,42	0,21	0,17	0,31	0,37	0,24	0,30	0,17	0,39	0,37	0,70	0,22	0,24	0,31
Shallow Concentrated Flow Characteristics																		
Surface Description (1 - unpaved, 2 - paved)	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Flow Length (ft)	4968,60	6724,20	1425,98	2445,45	5374,63	6077,54	5589,01	69,57	573,44	4750,53	3283,38	5667,29	340,66	2385,46	2219,75	5187,45	5806,08	3313,63
Watercourse Slope (ft/ft)	0,03	0,04	0,01	0,01	0,02	0,02	0,06	0,24	0,04	0,03	0,01	0,10	0,03	0,02	0,01	0,04	0,05	0,03
Average Velocity - computed (ft/s)	3,36	4,19	2,44	1,68	2,82	3,13	5,02	9,85	4,11	3,24	1,64	6,28	3,51	2,54	1,60	3,95	4,70	3,56
Shallow Concentrated Flow Tt (hr)	0,41	0,45	0,16	0,41	0,53	0,54	0,31	0,00	0,04	0,41	0,56	0,25	0,03	0,26	0,39	0,37	0,34	0,26
Channel Flow Characteristics																		
Cross-sectional Flow Area (ft2)	20,00	20,00	20,00	215,29	20,00	20,00	20,00	20,00	29,87	20,00	215,29	20,00	29,87	29,87	20,00	20,00	20,00	20,00
Wetted Perimeter (ft)	20,00	20,00	20,00	45,93	20,00	20,00	20,00	20,00	15,42	20,00	45,93	20,00	15,42	15,42	20,00	20,00	20,00	20,00
Hydraulic Radius - computed (ft)	1,00	1,00	1,00	4,69	1,00	1,00	1,00	1,00	1,94	1,00	4,69	1,00	1,94	1,94	1,00	1,00	1,00	1,00
Channel Slope (ft/ft)	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
Manning's Roughness Coefficient	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Average Velocity - computed (ft/s)	5,19	5,83	2,28	5,56	6,70	1,92	5,49	3,94	5,72	3,91	5,56	7,15	4,82	5,18	2,53	4,18	4,50	3,29
Flow Length (ft)	3171,79	2546,56	5538,02	8095,95	618,10	225,95	1713,28	353,24	528,62	3173,88	2251,44	8587,07	1066,45	3773,98	451,07	1794,16	7270,03	6998,97
Channel Flow Tt (hr)	0,17	0,12	0,68	0,40	0,03	0,03	0,09	0,02	0,03	0,23	0,11	0,33	0,06	0,20	0,05	0,12	0,45	0,59
Tc - Watershed Time of concentration (hr)	0,83	0,78	1,30	1,28	0,98	0,78	0,57	0,34	0,44	0,87	0,97	0,75	0,47	0,83	1,13	0,71	1,03	1,16
R - storage coefficient	0,56	0,43	2,49	3,52	0,21	1,09	0,42	0,41	0,52	0,88	2,27	0,47	0,87	1,20	0,89	0,65	0,93	1,50
K - Muskingum parameter (min)	10	8	17	25	2	1	6	2	2	10	7	26	4	12	2	6	22	21
X - Muskingum parameter	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

