



Fakulta zemědělská
a technologická
Faculty of Agriculture
and Technology

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH FAKULTA ZEMĚDĚLSKÁ A TECHNOLOGICKÁ

Katedra krajinného managementu

Diplomová práce

Výpočet odtokových poměrů v GIS v závislosti na
kvalitě DMT vzniklých z různých vstupních dat

Autor práce: Bc. Vítězslav Plic

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

České Budějovice
2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne

Podpis

Abstrakt

Tato diplomová práce je věnována výpočtu odtokových parametrů pomocí geografických informačních systémů (GIS) v povodí Třísovského potoka. V práci byly vytvořeny a porovnány digitální modely terénu z různých vstupních dat, včetně digitalizace stávajícího mapového podkladu a geodetického zaměření terénu s využitím metody GNSS a tachymetrické metody. Následně byly společně s dalšími vstupy vypočteny odtokové poměry pro návrhové srážky. Práce se zabývá vlivem kvality vstupních dat při tvorbě DMT na odtokové poměry v malém povodí. V rámci této práce byla provedena analýza výsledků odtokových drah, porovnání odtoku po zanesení uměle vybudované vodoteče do digitálního modelu terénu a určení množství zadržené vody v této vodoteči. Cílem práce bylo zlepšit kvalitu vstupních dat pro přesnější a spolehlivější stanovení odtokových poměrů v krajině.

Klíčová slova: Digitální model terénu, ArcGIS, CN křivky, odtokové dráhy, odtok z povodí

Abstract

This thesis deals with the calculation of runoff parameters in the Třísov stream catchment using geographic information systems (GIS). Various digital terrain models were created and compared from different input data, including the digitization of existing maps and the surveying of the terrain using GNSS and tachymetry methods. Subsequently, runoff ratios were calculated for design rainfall events along with other input data. The thesis examines the impact of input data quality on the accuracy of runoff ratio determination in a small catchment. The analysis includes the examination of runoff paths, the comparison of runoff before and after adding an unknown watercourse to the digital terrain model, and the determination of the amount of water retained in the watercourse. The aim of this thesis was to improve the quality of input data for more precise and reliable determination of runoff parameters in the landscape.

Key words: Digital Terrain Model, ArcGIS, CN curves, runoff paths, runoff from the watershed.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Václavu Bystřickému, Ph.D. za jeho odborné rady, konzultace, ochotný přístup a čas, který mi věnoval při zpracovávání práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a blízkým za podporu po celou dobu studia.

Obsah

| | |
|---|----|
| Úvod..... | 7 |
| 1 Literární rešerše..... | 8 |
| 1.1 Charakteristika územní jednotky (povodí)..... | 8 |
| 1.2 Odtok..... | 9 |
| 1.2.1 Metody výpočtu přímého odtoku..... | 10 |
| 1.3 Faktory ovlivňující odtok..... | 11 |
| 1.3.1 Fyzikálně geometriční činitele..... | 11 |
| 1.3.2 Fyzikálně geografické činitele..... | 12 |
| 1.3.3 Hydrologické poměry..... | 14 |
| 1.4 Srážko-odtokový proces..... | 17 |
| 1.4.1 Průběh srážko-odtokového procesu..... | 17 |
| 1.4.2 Modelování srážko-odtokových procesů..... | 18 |
| 1.5 Modelování v GIS..... | 21 |
| 1.5.1 GIS systém..... | 21 |
| 1.5.2 Podkladová data pro digitální model terénu..... | 21 |
| 1.5.3 Digitální model terénu..... | 23 |
| 1.5.4 Typy DMT..... | 25 |
| 2 Materiál a metody..... | 28 |
| 2.1 Cíl práce..... | 28 |
| 2.2 Popis zkoumaného povodí..... | 28 |
| 2.2.1 Určení rozvodnic..... | 30 |
| 2.3 Polohová a výšková data..... | 31 |
| 2.3.1 Zdigitalizovaná data..... | 31 |
| 2.3.2 Zaměřená data..... | 33 |
| 2.3.3 Příprava dat pro vložení do ArcGIS..... | 36 |
| 2.3.4 Digitální model terénu..... | 37 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.4 | Srážkové poměry..... | 39 |
| 2.5 | Hydrologické vlastnosti půd | 39 |
| 2.6 | Vegetační pokryv | 41 |
| 3 | Výsledky a diskuse..... | 44 |
| 3.1 | Stanovení průměrný čísel CN..... | 44 |
| 3.2 | Výpočet odtokových poměrů | 46 |
| 3.2.1 | Stanovení potenciální retence | 46 |
| 3.2.2 | Výpočet výšky přímého odtoku | 47 |
| 3.2.3 | Výpočet objemu povrchového odtoku jedné buňky..... | 48 |
| 3.2.4 | Výpočet povrchového odtoku z celého povodí..... | 50 |
| 3.3 | Rozdíl v odtokových poměrech v závislosti na kvalitě vstupujících dat ... | 51 |
| 3.4 | Vliv umělé vodoteče na odtokové poměry v povodí | 57 |
| | Závěr | 62 |
| | Seznam použité literatury..... | 63 |
| | Seznam klasické literatury | 63 |
| | Seznam legislativy | 68 |
| | Seznam internetových zdrojů..... | 69 |
| | Seznam obrázků | 71 |
| | Seznam tabulek | 72 |

Úvod

Odtokové poměry se řadí mezi základní stavební kameny při plánování vodního hospodářství, ochraně před povodněmi či při zemědělské činnosti. S rozmachem digitálního modelování terénu (DMT) a geografických informačních systémů (GIS) se dostáváme k novým možnostem výpočtu odtokových poměrů, které jsou stále přesnější. Nicméně kvalita stanovení odtokových poměrů je přímo závislá na kvalitě vstupních dat, mezi kterou se řadí i DMT, u něhož se kvalita odvíjí od použitých podkladových dat, ze kterých tento model vychází.

Tato práce je zaměřena na výpočet odtokových poměrů v malém povodí v aplikaci GIS, v níž jsou vytvořeny a porovnány DMT z různých vstupních dat a následně jsou stanoveny odtokové poměry. Účelem práce je porovnat tato data a zhodnotit, jak kvalita DMT ovlivňuje stanovení odtokových poměrů v malém povodí.

V rámci práce byla získána potřebná podkladová data pro vytvoření DMT. Tato data byla zdigitalizována z již stávajícího mapového podkladu a podrobným zaměřením terénu s využitím geodetických metod. Jako nejvhodnější metoda pro geodetické zaměření terénu byla zvolena metoda GNSS, která byla doplněna tachymetrickou metodou ve špatně přístupných místech. Současně s geodetickým zaměřením také probíhala rekognoskace terénu.

Po sběru veškerých podkladových dat byla práce rozdělena na dvě části, protože bylo zjištěno, že povodí je přetnuto umělou vodotečí. Ta způsobuje přerušení odtokových poměrů v povodí. V mapových podkladech, které byly digitalizovány tato vodoteč nebyla zobrazena. První část této práce se zabývala především analýzou výsledků odtokových drah, které se lišily u jednotlivých digitálních modelů, protože každý z nich využíval odlišná vstupní data i rozdílné interpolační metody. Nicméně, množství odtoku v této části práce zůstalo stejné.

Druhá část byla zaměřena na rozdíly v odtoku po zanesení neznámé vodoteče do DMT a na určení množství zadržené vody v této vodoteči. Bylo zjištěno, že umělá vodoteč má značný vliv na odtokové poměry v námi zkoumaném povodí.

1 Literární rešerše

1.1 Charakteristika územní jednotky (povodí)

Povodí je základní hydrologickou jednotkou, kterou v České republice definuje zákon č. 254/2001, nazývaný též Vodní zákon. Jedná se o územní jednotku, která je ohraničená rozvodnicí. Rozvodnice představuje myšlenou čáru, která vyznačuje územní hranici mezi jednotlivými povodími. Probíhá po nejvyšších vrcholcích, hřebenech, sedlech a je vedena kolmo na vrstevnice (Ruda, 2014). Samostatné povodí pak definuje povrchový odtok. Povrchový odtok je tvořen srážkami, které nejsou vypařeny nebo vsáknuty do půdy. V praxi se můžeme setkat s tvrzením, že kapka, která dopadne kdekoli v daném povodí, oteče za pomoci říční sítě do uzávěrového profilu povodí. Rozvodnice se dělí na dva typy, a to orografickou neboli povrchovou a hydrogeologickou, známou též jako podpovrchovou (Kemel, 1996).

Hydrogeologická rozvodnice znázorňuje povodí podpovrchových vod. Zatímco orografickou rozvodnicí můžeme určit pomocí vrstevnicových map, u hydrogeologické rozvodnice musíme dbát na geologické složení půdy a průběh nepropustných bariér pod povrchem terénu. Orografická rozvodnice vymezuje povodí povrchové vody. Rozvodnice vede od uzávěrového profilu přes nejvyšší vrcholy v povodí (Borga et al., 2000).

Charakteristika povodí

Kemel (1996) prezentuje, že povodí je charakterizováno jeho plochou, která určuje velikost území. Z území je voda odváděna daným uzávěrovým profilem. Velikost povodí nepřímo charakterizuje významnost toku. Mezi další charakteristiky povodí se řadí typ říční sítě, který se dělí na stromovitý, pravoúhlý, mřížovitý, paprscitý a prstencovitý. Kvítek (2018) doplňuje, že základní charakteristika povodí je neopomenutelným podkladem pro pochopení vodního režimu krajiny.

Vlastnosti povodí

Odtok vody z povodí je dán také množstvím geografických faktorů. Nejvýznamnější vlastnosti podle Starého (2005) jsou fyzikálně geometrické činitele, geologické vlastnosti povodí, vegetační pokryv a hustota říční sítě. Tito činitelé ovlivňují hydrodynamické vlastnosti povodí.

1.2 Odtok

Odtokem se rozumím množství vody, které odečte z povodí během určitého časového úseku. Povrchový odtok může vznikat v souvislosti s příchodem příčinné srážky (Hall, 1968) a to, když půda nedokáže zadržet dopadající vodu. V tom případě nastává překročení infiltrační kapacity půdy nebo se půda dostane do plně nasyceného stavu. Ovšem jak dodávají Tachecí et al. (2018) na povrch může vystupovat i mělká podzemní voda, která předtím proudila pod povrchem. Důležitou roli zde také hrají půdní poměry (propustnost hornin), morfologie terénu či intenzita srážkového úhrnu. Odtok pak můžeme rozdělit na povrchový a podpovrchový (Stašek et al., 2018). Tachecí et al. (2018) ještě rozšiřují dělení odtoku o podzemní vodu, která přitéká korytem do vodoteče prostřednictvím vratného odtoku.

Povrchový odtok

Povrchový odtok je charakterizován odtékající vodou po zemském povrchu a je rozdělen podle jeho vzniku. Odtok může nastat, když dojde k překročení infiltrační kapacity půdy. K tomuto jevu dochází v závislosti na větší intenzitě srážek. S přibývajícimi srážkami vzniká přebytek vody nad depresí, který se začíná pohybovat a tím vzniká plošný odtok. Jedná se tedy o odtok, který vzniká při krátkých, avšak velmi intenzivních dešťových srážkách (Serrano, 1997). Druhý typ vzniku povrchového odtoku nastává při dosažení stavu nasycení. Půda je zcela nasycena vodou a není schopna přijímat další vodu. Voda zůstává na zemském povrchu a přeměňuje se na povrchový odtok.

Podpovrchový odtok

Podpovrchový odtok, také známý jako hypodermický odtok, vzniká v nízké hloubce pod povrchem terénu. Voda se dostává pod povrch země, kde odtéká podél vrstev se zvětšenou hydraulickou vodivostí a s větším obsahem pórů. Směr proudění tohoto typu odtoku je daný sklonitostí terénu nad ním, jelikož voda proudí souběžně s povrchem terénu (Tachecí et al., 2018).

Základní odtok

Základní odtok se řadí mezi části celkového odtoku vodního toku. Jedná se o pohyblivou složkou podzemního odtoku, která pochází ze zdrojů podzemní vody. Proudění

prochází porézním médiem vodonosné vrstvy, díky kterému dosahuje pomalé rychlosti proudění. I při nízké rychlosti odtoku se podzemní voda může postupně vlévat do řek či jezer. To nastává ovšem s výrazným zpožděním oproti povrchovému odtoku, jelikož voda může putovat týdny, ba dokonce i měsíce (Serrano, 1997).

Přímý odtok

Tento typ odtoku vzniká sloučením odtoku povrchového a hypodermického. Vzniká převážně v průběhu nebo krátce po skončení delších srážkových událostí či při tání sněhu (Beven, 2012).

1.2.1 Metody výpočtu přímého odtoku

Smelík (2016) definuje přímý odtok z povodí jako odtok, který je stanoven prostřednictvím srážko-odtokových modelů. Jednotlivé modely jsou využity k předpovědi velikosti odtoku na základě vstupních údajů o srážkách.

Jednotlivé typy modelů pracují s odlišnými údaji o daném povodí. Existuje tedy velké množství modelů. Odlišuje je například to, jakým způsobem schematizují (zjednodušují) povodí, s kterými modely pracují. Dále se také odlišují v použitých vstupních údajích, náročností na výpočet nebo také shodou s reálně naměřenými daty. Některé typy modelů jsou vytvořeny pro specifický typ povodí, a mají tak velmi omezenou použitelnost. Ovšem převážná většina těchto modelů se využívá pro větší povodí, jelikož nebere v potaz půdní vlastnosti ani vegetaci na povrchu. Mezi další nevýhody některých modelů můžeme zařadit i to, že neoddělují povrchový odtok, což je v některých případech také velmi důležitá veličina. Například metoda CN křivek bere v potaz půdní vlastnosti i vegetaci, ovšem při výpočtu se nepočítá s konkrétními hodnotami intenzity a délky trvání dešťových srážek, proto je tato metoda využívána převážně pro malá povodí.

Vzhledem k omezenému rozsahu měřících technik v prostoru i čase je potřeba v hydrologii využívat odlišných způsobů získávání dat, a to například predikcí hydrologických charakteristik. Díky tomu je možné posoudit dopady budoucích hydrologických změn. Tato predikce může být použita pro plánování vodohospodářských opatření a zásahů, jako je například předpovídání povodňových úrovní a plánování stavby přehrad (Beven, 2012).

1.3 Faktory ovlivňující odtok

Tachecí et al. (2018) popisují odtokové vlny, jako odezvu na srážkové úhrny. Odtoková odezva vzniká ze dvou procesů. Vytvořený odtok postupuje ve formě odtokové vlny korytem toku. Pokud chceme sledovat způsob, jakým odtok vzniká je potřeba zaměřit se na území o velikosti několika ha až jednotek km². Při určení odtokové vlny na větším povodí je důležité odtokovou vlnu spočítat a poskládat z jednotlivých sub-povodí. To je dáno především proměnlivými podmínkami, které má každé povodí jiné. Tyto podmínky se dělí na fyzikálně geometrické a fyzikálně geografické činitele.

1.3.1 Fyzikálně geometrické činitele

Fyzikálně-geometrické vlastnosti povodí ovlivňují odtok vody především zeměpisnou polohou, průměrnou nadmořskou výškou a morfologií povodí. Největší rozdíly se vyskytují mezi nížinnými a horskými povodími, nebo také mezi povodími v mírném a subtropickém pásmu (Kemel, 1996).

Morfologie povodí zahrnuje tvar a velikost povodí, délku a šířku toku, sklon terénu a další charakteristiky, které ovlivňují chování vodního režimu v povodí. Průměrná nadmořská výška se určuje pomocí hypsometrické křivky. Jedná se o grafické znázornění, které udává vztah mezi nadmořskou výškou a plochou povodí. Plocha povodí je určována buďto planimetrií z map, nebo výpočtem ze souřadnic lomových bodů v povodí. S výpočtem výměr pomocí lomových bodů pracují grafické programy, jako jsou například Microstation nebo ArcGIS. Plocha povodí je udávána v km². Povodí může mít tvar pravidelného nebo nepravidelného listu, který může být více či méně protáhlý. Tvar povodí je definován střední šířkou povodí, koeficientem tvaru povodí a průměrným sklonem (Ruda, 2014).

Po určení fyzikálně geometrických činitelů je možné implicitně určit klimatické a meteorologické charakteristiky povodí, jako jsou například teplota vzduchu, srážkové úhrny, výpar, sluneční záření či vlhkost vzduchu (Kravka et al., 2009).

1.3.2 Fyzikálně geografické činitele

Půdní a geologický faktor

Nejvíce ovlivňujícím faktorem geologických vlastností půdy je množství infiltrované vody. Množství vsáknuté vody je klíčové, protože rozhoduje o tom, zda se srážková voda stane povrchovým nebo podpovrchovým odtokem. Svrchní vrstva půdy je tvořena díky působení hlavních půdotvorných faktorů v krajině. Jedná se především o mateční horninu, reliéf, vegetační kryt nebo způsob využití půdy. Na odtok vody má největší vliv uspořádání půdních jednotek, zrnitost, struktura, humóznost, šterkovitost či mocnost půdního krytu, což potvrzují i Tachecí et al. (2018), kteří tento faktor označili za nejdůležitější. V případě, že se jedná o nepropustné horniny dochází pouze k povrchovému odtoku. Množství vsaku srážkové vody závisí jak na propustnosti materiálu, tak i na velikosti a intenzitě srážek. Suchá půda disponuje největším vsakem, ale až po navlhnutí půdy. Při velmi rychlých a vydatných srážkách může srážková voda z větší části z území povrchově odtéct (Daňhelka, 2007).

Pedologické vlastnosti, které charakterizují dané povodí z hlediska půdní geneze, jsou velmi důležité v pochopení vztahů mezi půdním krytem, reliéfem, geologickou skladbou, vegetačním krytem a využitím půdy. Tato charakteristika území je možná odvozením z půdních map 1:50 000, které jsou dostupné díky České geologické službě. Mapa vznikla z dat získaných kompletním průzkumem zemědělských půd v měřítku 1:5 000 a z lesotypologického mapování 1:10 000. Z dostupných dat můžeme pochopit pedologické vlastnosti na zemědělských i lesních půdách. Nicméně, jak popisují Šefrna et al. (2018), u ostatních půd, jako je například půda neplodná, zastavěná, nebo jako jsou hřbitovy či parky, jsou vlastnosti neznámé. Jelikož se ve většině případů jedná o malá území, je možné vlastnosti odvodit z okolních pozemků. Některé tyto plochy mohou výrazně zasahovat do celkových hydrologických parametrů povodí, a to jak negativně, tak pozitivně. Negativně ovlivňují povodí zakryté plochy, nádvoří nebo třeba místní cestní síť, jelikož zásadně pozměňují infiltrační a retenční schopnost půdy. Pozitivní funkce mající vliv na povodí jsou například remízky, rozptýlená zeleň, meze či terasy.

Bonitovaná půdně ekologická jednotka (BPEJ) se řadí mezi další charakteristiku, kterou je možno určit z mapových výstupů kompletního průzkumu zemědělských půd. Jedná se o hodnotu, která se především využívá pro hodnocení půdní úrodnosti, avšak

mimoprodukční funkce půd jsou hůře odvoditelné. Bonita je tvořena pětímístným číselným kódem.

W.XX.YZ

W = Klimatický region

XX= Hlavní půdní jednotka

Y= sklonitost a expozice

Z= skeletovitost a hloubka půdy

Kód BPEJ je využíván jako podklad pro modelování, posuzování a výpočet funkcí, jako například erozní ohroženost či vodní retence (VÚMOP, 2022).

Klimatické poměry

Klimatické poměry v dané oblasti jsou dalším faktorem ovlivňujícím odtok. Do těchto faktorů můžeme zařadit například teplotu, rychlost a směr větru, vlhkost vzduchu a srážky. Lokální faktory mají významný vliv na klimatické podmínky. To dokazuje i to, že lidská činnost dokáže v určité míře klimatické faktory ovlivnit. Davie (2008) udává, že v městských částech je až o 15 % sníženo množství slunečního záření dopadajícího horizontálně na povrch, což ovlivňuje odpařování.

U klimatických poměrů hrají zásadní roli srážky. Srážky jsou základní hydrologickou funkcí, která ovlivňuje množství vody v jezerech, v půdě či v řekách (Serrano, 1997). Tvorba srážek je výsledkem akumulace vodní páry v atmosféře. Ta vzniká přirozeným vypařováním a je transportována v podobě vodních par větrem. Vznik srážek závisí na několika faktorech, jako je například množství produkce nasyceného vzduchu a kondenzace vodních par na kapky vody nebo na ledové krystaly. V případě dostatečné kondenzace nebo sublimace a za pomoci ochlazení teplého vzduchu dochází k dešťovým srážkám. Ochlazení vzduchu vzniká různými způsoby. Jsou to advekce, radiace, smíchání vzduchových hmot o různých teplotách nebo vertikálním pohybem vzduchu. Tuto teorii potvrzuje i Vysoudil (2013), který tento způsob definuje jako nejčastější možnost vzniku srážek. Voda kondenzuje při dosažení 100% relativní vlhkosti, což je docíleno na frontálním rozhraní, kde se setkává teplá i studená fronta. Teplý vzduch zde stoupá vzhůru, kde dochází ke kondenzaci formou malých kapiček za pomoci kondenzačních jader. Při tomto jevu se začíná uvolňovat kondenzační teplo a postupně vzniká oblačnost.

Srážky můžeme rozdělit na horizontální a vertikální. Mezi horizontální můžeme zařadit rosu, jínovatku či námrazu. Mezi vertikální srážky patří déšť, mrholení, sníh, kroupy, ledový déšť a ledovka.

Data o srážkových podmínkách v povodí

Data o srážkových úhrnech se určují pomocí průměru z nejbližších srážkoměrných stanic. Ze získaných dat vypočteme za pomoci aritmetického průměru nebo thiessenových polygonů množství srážek v daném povodí (Smelík, 2016). Serrano (1997) potvrzuje tyto výpočetní metody množství srážek, ovšem konstatuje, že aritmetickým průměrem není brána v úvahu hustota srážek. V prostředí GIS aplikací je možné místo aritmetického průměru využití různých interpolačních technik, které daná aplikace nabízí. U programu ArcGIS je to například metoda přirozeného souseda nebo IDW.

1.3.3 Hydrologické poměry

Infiltrace vody do půdy

Kirkham (2014) definuje infiltraci jako množství vody, ať už srážkové či zavlažované, která je vsáknuta do půdy za určitou jednotku času. Infiltrace je ovlivňována několika faktory, které určují, jak velké množství vody půda propustí. Mezi tyto faktory se řadí fyzikální vlastnosti půdy, velikosti půdních částic, vegetační pokryv, počáteční vlhkost půdy, intenzita a trvání srážek a chemické látky, které jsou přidávány do půdy. Infiltrace se udává v intenzitě (mm/s) nebo ve velikosti infiltrace (mm). Rychlost infiltrace závisí především na výskytu překážek, které jsou ovlivňovány hydraulickými charakteristikami povrchových nebo podpovrchových vrstev, nebo také na množství volných pórů v půdě. Pokud je množství volných pórů v půdě omezeno, může dojít ke snížené infiltraci vody, a tím dojde ke zvýšení povrchového odtoku. (Tachecí et al., 2018).

Evaporace

Evaporace neboli výpar je přenos kapalné vody do plynného skupenství a jeho difuze do atmosféry. Výpar je docílen existencí kapalné vody, na kterou působí sluneční energie. Význam vypařování uvnitř hydrologického cyklu závisí především na množství odpařované vody. Toto množství udávají dva faktory, a to dostupnost kapalné vody a množství energie, což je dáno klimatem konkrétního regionu. Davie (2008) zmiňuje,

že také záleží na ročním období, jelikož v zimních měsících je výpar mnohem menší než v letních měsících, kdy má výpar potenciál se stát hlavní složkou vodní bilance.

Transpirace

Transpirace představuje nepřetržitý proces, který probíhá i bez srážek. Během tohoto procesu dochází k výparu vody skrze rostlinné orgány do ovzduší. Jedná se o fyziologický proces, který společně s evaporací nazýváme evapotranspirace a definuje nám celkový výpar. Serrano (1997) popisuje rychlost transpirace jako vztah mezi srážkovým režimem, ročním obdobím, hloubkou kořenového systému, hloubkou půdního profilu a hustotou a typem vegetace. Vysoudil (2013) dodává, že v České republice převažuje transpirace nad evaporací.

Retence vody v krajině

Jedná se o jev, kterým se v hydrologii označuje přirozené nebo umělé zadržování vody v krajině. Retence vody ovlivňuje tvorbu a transformaci průtokových a povodňových profilů a zároveň odráží množství zachycené srážky. Půda funguje jako porézní průtočná nádrž, která je především charakterizována svou retenční kapacitou. Retence neboli zadržení vody v půdě je limitována pro každou půdu maximální retenční kapacitou, která se s ohledem na typ půdy liší. Po dovršení maximální retenční kapacity dochází k jejímu přetečení, což může způsobit povrchový či podpovrchový odtok. Velikost retenční kapacity u jednotlivých typů půd je odvozena za pomoci maximální infiltrační rychlosti, kumulativního objemu infiltrace, změnami obsahu vody v půdě nebo také za pomoci hydraulické vodivosti (Tachecí et al., 2018).

Vegetační faktor

Vegetace zachycuje povrchový odtok pomocí svých listů, stonků i kořenů. Vegetace tak působí jako drobná bariéra pro povrchový odtok, který důsledkem toho zpomaluje. Vegetace také ovlivňuje odtok úrovní diverzity rostlin. Jednotlivé rostliny pomocí veškerých svých částí (stonků, listů i kořenů) zpomalují odtok a díky tomu může voda více pronikat do země. Hustý porost s protierozními kořeny (chlupaté kořeny s velkou plochou), dokáže absorbovat velké objemy vody, což také zabraňuje odtoku vody a tím snižuje erozní ohroženost půdy (Liu et al., 2018).

Díky těmto vlastnostem se pěstování plodin využívá pro snížení erozní ohroženosti půdy. Janeček et al. (2012) uvádějí, že pro dosažení dokonalé protierozní ochrany

půdy je nejlepší využití porostu trav a jetelovin, zatímco špatný vliv na erozi i odtok vody z povodí mají okopaniny, kukuřice, sady či vinice. Pro zvýšení protierozní ochrany se mohou navrhovat protierozní opatření, jako jsou například ochranné travní pásy či pásové střídání plodin. Šířka pásů trav a píce se volí podle šířky mechanizačních prostředků nebo podle svažitosti terénu. Jednotlivé pásy se volí ve směru podél vrstevnic (Kvítek a Tippl, 2003). Smelík (2016) doplňuje, že množství vody, které projde skrze půdní pokryv závisí na způsobu využití pozemků a vlastností pokryvu. Pokryvem je myšlena jakákoliv vegetace, jako například les, pole, louka nebo zástavba.

Vliv lidské činnosti

Vliv lidské činnosti na odtokové poměry lze rozdělit na vlivy přímé a vlivy nepřímé. Přímé vlivy využívají vodu nebo s ní hospodaří. Mezi tyto činnosti je možné zařadit zemědělské zavlažování či odvodnění pozemků. Jako největší přímý faktor je dozajisté výstavba vodních nádrží.

Mezi nepřímé vlivy, které mají ovšem také významný vliv na odtok, můžeme zařadit změny ve využívání půdy, opatření na ochranu vody a půdy nebo urbanizaci (Xue, et al., 2021). To potvrzuje i Serrano (1997), který dodává, že odlesňování, zemědělství a rozšiřování zastavěných ploch snižuje množství infiltrované vody, což má za následek zvýšení odtoku. Odtok v zastavěných oblastech, kde převažují povrchy z betonu, nebo kde se nachází značné zastoupení asfaltových ploch, je velmi rychlý a je zde velmi nízká infiltrace vody. To navíc doplňuje Davie (2008), který dodává, že kromě zvýšeného odtoku mají zastavěná území vliv i na kvalitu vody, jelikož se v odtékajících vodách nachází značné množství těžkých kovů, nerozpuštěných látek či uhlovodíků. Celkově městské prostředí má významný vliv na odtokové poměry. Kromě betonových nebo asfaltových ploch, jako jsou například rozlehlá parkoviště či silnice, mají vliv i chodníky nebo střechy. Střechy odvádějí velký povrchový odtok na zem pomocí dešťových svodů, které alespoň kontrolují povrchový odtok ze střech a směřují ho do kanalizací.

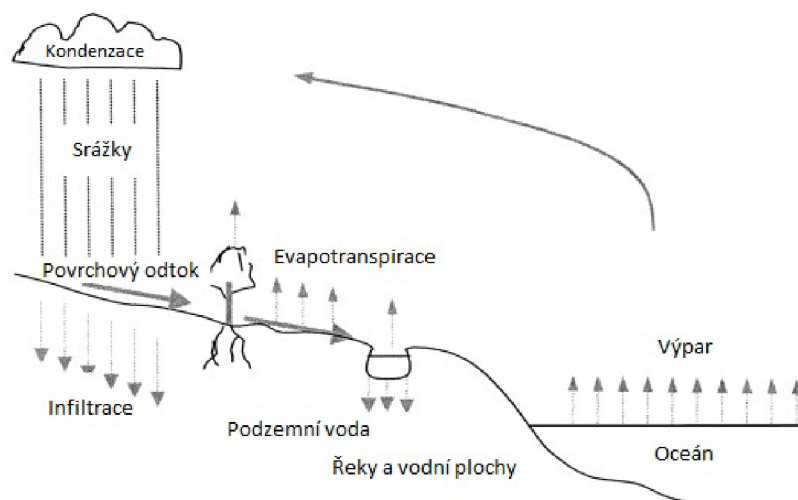
Davie (2008) ve své publikaci tvrdí, že při pozorování městského odtoku s velkým zastoupením betonových ploch, je odtok až 250krát větší než při stejných srážkových podmínkách ve venkovském prostředí, kde převažuje množství travnatých ploch. Rose a Peters (2001) zase analyzovali rozdíly v dlouhodobém pozorování mezi venkovským

a městským prostředím a došli k závěru, že odtok je o 30 % až o 100 % větší v urbanizovaném prostředí.

1.4 Srážko-odtokový proces

Rožnovský (2013) popisuje činnost srážko-odtokového procesu, jako důležitý faktor, který zasahuje do procesů distribuce vody v krajině. Jedná se o velice složitý děj, který má významný vliv na mnoho faktorů. Mezi ty nejzásadnější, které srážko-odtokový proces zasahuje, patří faktory klimatické, hydrologické, fyzicko-geografické a antropogenní. Jedná se v zásadě o děj, který definuje vztah mezi dešťovými srážkami a povrchovým odtokem. Tento vztah je zobrazený na obrázku 1.1. Srážko-odtokový proces je většinou vztažen k základní hydrologické územní jednotce, a to buď za jednu srážkovou epizodu nebo za určitou časovou jednotku.

Společně s infiltrační schopností půdy definuje proces, při kterém dochází k postupné transformaci atmosférických srážek, které dopadají na povrch základní hydrologické jednotky (Starý, 2005).



Obrázek 1.1 Srážko odtokový proces (Schroeder, 2003)

1.4.1 Průběh srážko-odtokového procesu

Průběhem srážko-odtokového procesu se rozumí proces, který se odehrává mezi dopadem srážek na základní hydrologickou jednotku a následné opuštění vody uzavěrovým profilem. Část spadlých srážek je zachycena vegetací. Tento jev se nazývá intercepce a je nejvíce znatelný na počátcích dešťů. Intercepce je závislá na druhu a stáří vegetace, vlhkosti vzduchu a rychlosti větru (Dub a Němec, 1969). Zbylá část srážek

dopadá na povrch půdy, kde se vsakuje. Po dosažení bodu nasycení nebo po dopadu vody na nepropustný povrch, nebo také v případě, že nastane stav, kdy je intenzita deště větší než vsakovací schopnost půdy, nastává povrchový odtok. Ten má za následek erozi půdy. Důsledkem eroze je například odnos jemných částic půdy a vytváření brázd, skrze které odtéká voda do říční sítě. Tato fáze je označována jako soustředěný povrchový odtok. Současně s tímto odtokem vzniká také hypodermický a podzemní odtok (Starý, 2005). Výška celkového odtoku je tedy součtem odtoku povrchového, hypodermického a podzemního. Součet povrchového a hypodermického odtoku označujeme jako odtok přímý. Podzemní je označován jako odtok základní. Srážko-odtokový proces je pak možno vyjádřit pomocí bilanční rovnice (Kulhavý a Kovář, 2000).

$$P = AES + TQ \pm \Delta W \text{ (mm)}$$

P = výška srážek (mm)

AES = výška výparu (mm)

TQ = výška odtoku (mm)

ΔW = výška odtokové ztráty (mm)

1.4.2 Modelování srážko-odtokových procesů

Kučerová (2018) charakterizuje modelování jako experimentální proces, při kterém podrobujeme zkoumaný objekt, který je reálný, simulacím a sledováním jevů či procesů, ze kterých vyvozujeme možné důsledky. Model představuje umělý výtvar, který je vytvářen záměrně pro dosažení určitých cílů výzkumu. Model je především specifikován svým účelem. Cílem modelování je časové nebo časově prostorové vyjádření veličin, které charakterizují hydrologický režim daného objektu (povodí nebo jeho částí). Metody modelování vytvářejí simulaci hydrologických procesů, kdy můžeme přibližně určovat i reakce modelovaného objektu v extrémních podmínkách.

Modely srážko-odtokových procesů

Xue et al. (2021) dodávají, že hydrologické modelování poskytuje důležitý prostředek pro testování změn odtoku. Smelík (2016) popisuje následující případy modelů, které jsou popsány níže.

Model povodí UBCWM

Smelík (2016) definuje UBCWM jako model, který se využívá převážně na horských nebo zaledněných územích, proto není vhodný pro použití na území České republiky. Model byl navržen pro výpočet proudění vody v horských oblastech, kde se voda skládá z tání sněhu, deště a z odtoku vody z ledovců. Model využívá koncept plošných výškových pásem, ve kterých zohledňuje orografické gradienty srážek a teploty. U orografických gradientů se předpokládá, že jejich chování je konzistentní pro každou příčinnou srážku. Model také poskytuje informace o ploše sněhové pokrývky, evapotranspirační a intercepční ztrátě a také poskytuje data o půdní vlhkosti.

Metoda umělé neuronové sítě ANN

Metoda využitelná na malých povodích, řešící souvislosti mezi jednotlivými srážkovými událostmi. Pro území ČR využití metod neuronových sítí není vhodné (Smelík, 2016).

Modely jednotkových hydrogramů

Tyto modely pracují za pomoci předpokladu, že jednotkový hydrogram má stálou intenzitu a rovnoměrné rozložení dešťových srážek v povodí. Přímý odtok je určen pomocí výpočtu z měřených srážek a odtoků (Micovic, 2005).

Metoda CN křivek

Metoda CN křivek vznikla experimentálním výzkumem. Byla odvozena na základě analýzy dat z malých povodí v USA. Metoda vychází ze znalosti dešťových srážek a povrchu, na který srážky dopadají (Smelík, 2016). Vzorec byl vytvořen na základě analýzy dat z malých povodí Americkou službou ochrany půd. Metoda vznikla analyzováním podmínek na povodích o rozloze do 0,04 km². V praxi se tento typ výpočtů srážko-odtokových procesů využívá u povodích do velikosti 10 km². Při překročení této velikosti povodí je nutné počítat s většími nepřesnostmi výpočtu. Těmito nepřesnostem u velkých povodí je ovšem možné předejít, a to jejich rozložením na jednotlivá dílčí subpovodí. Rozložením na jednotlivá subpovodí nedojde k tak velkému zkreslení výsledku. Rozdělení velkých povodí je důležité především s časovým vývojem srážek a rozdílnou dobou odtoku. Správnost metody by měla být ověřena podle skutečných srážkových událostí. Využitelnost metody je nejlepší pro zemědělsky využívaná po-

vodí, jako nejlepší povodí se jeví ta s volnou okolní krajinou, avšak výpočty lze provést i na mírně urbanizovaných územích. Pro intravilány, ani pro horská povodí však není tato metoda vhodná. Zatímco v městských částech je metoda nevhodná kvůli množství nepropustných povrchů, mezi které můžeme zařadit betonové plochy, asfaltové silnice nebo opevňování koryta toku, tak v horských oblastech je nevhodná právě kvůli velkým sklonitostním poměrům. Nevhodnost pro tato území plyne z výpočtu CN, který nebere v potaz sklon povodí (Smelík, 2016).

Veškeré odvozené vztahy jsou empirické. Metoda se využívá například při tvorbě a zjišťování účinnosti protierozních opatření, jako jsou například zatravněné údolnice, dráhy soustředěného povrchového odtoku, průlehy, příkopy, zasakovací pásy nebo malé vodní nádrže. U malých vodních nádrží lze získat informace o přítoku do nádrže. Metoda CN pracuje s předpokladem, že poměr mezi aktuální a maximální retencí vody je stejný, jako poměr výšky odtoku s výškou přívalových srážek po odečtení počátečních ztrát. Jedná se o metodu, která za pomoci jednoduché lineární rovnice stanoví odtok při srážkové události. Metoda operuje s veličinami, jako jsou ztráty deště, efektivní dešť a s vlastnostmi povodí, jako jsou půdní poměry, využití území, nebo také vláhové podmínky (Smelík, 2016).

Rovnice CN křivky

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

F – skutečná retence vody od počátku odtoku (mm)

S – maximální potencionální retence na povodí od počátku odtoku (mm)

P – kumulativní výška srážky (mm)

I_a – počáteční retence vody, když ještě nedochází k odtoku (mm)

R – kumulativní odtoková výška (mm)

Kdy F se určí prostřednictvím rovnice (mm)

$$F = P - I_a - R$$

Hodnotu I_a získáme prostřednictvím maximální potencionální retence. Uvádí se, že $I_a = 1/5 * S$. Veškeré dosazované jednotky se uvádí v délkových jednotkách nejčastěji v mm. Výstupem z rovnice dostaneme hodnotu, která charakterizuje propustnost

podloží v daném území, určenou za pomoci tabulek. Hodnota se pohybuje od 1 do 100, kdy 1 je zcela propustné podloží a 100 reprezentuje zcela nepropustné podloží. Urban a Pácl (2011) doplňují, že v praxi se převážně setkáváme s hodnotami od 30 do 100. Výsledné číslo určené z tabulky závisí na hydrologické vlastnosti půd, využití území a předchozích vláhových podmínkách.

Hydrologické vlastnosti půd – udává infiltrační a retenční schopnost půd

Využitelnost území – vychází z obdělávání půdy a vegetačního pokryvu

Vláhové podmínky – reprezentuje úhrn srážek v předchozích dnech

1.5 Modelování v GIS

1.5.1 GIS systém

Jedná se o analytický nástroj, jenž vytváří prostředí pro práci s prostorovými vztahy mezi jednotlivými subjekty. Informace těchto subjektů jsou odvozeny ze získaných dat. Hodnota (kvalita) těchto informací závisí na rozsáhlé škále faktorů, mezi které se řadí například aktuálnost, náklady na sběr, manipulace či prezentace dat. Soubor GIS dále zprostředkovává prostředí pro správu a analýzu těchto dat Maguire (1991).

Soubor GIS obsahuje několik typů informací:

- Prostorová data – Obsahují informaci o pozici (X, Y, Z v libovolném souřadnicovém systému), popřípadě mohou obsahovat informaci o tvaru objektu či vztahu s ostatními objekty.
- Popisná data – Zahrnují data o vlastnostech objektu, jako například teplotě, hustotě, množství některých látek či další potřebná data.
- Časová informace – Jedná se o informaci, díky které zkoumáme dynamické vlastnosti daného modelu (Břehovský et al., 2003).

1.5.2 Podkladová data pro digitální model terénu

Pro určení odtokových poměrů hraje významnou roli členitost terénu. Je nutné určit charakter terénního reliéfu a model co nejpřesněji převést do prostředí softwaru GIS. Terén se do digitálního prostředí převede za použití vstupních dat. Ty se liší, jak v přesnosti, ceně pořízení, tak i ve způsobu získání. Dostál (2014) doporučuje pro vytvoření digitálních modelů využít výškopisných dat v rozlišení, které se nachází v rozmezí 1 až 20 m.

Vstupní data pro digitální modely terénu (DMT) se rozlišují podle jejich získání. Většina dat obsahuje totožnou informaci, a to o poloze a výšce jednotlivých bodů. Množina těchto bodů reprezentuje požadovaný terénní reliéf. Jednotlivá data se odlišují například množstvím, rozložením či přesností těchto bodů. Tyto parametry mají zásadní vliv na vytvoření DMT i na jeho výslednou přesnost. Proto je třeba zvážit při vytváření DMT veškeré proměnné, aby byla použita data, která dosahují takové kvality, aby výsledný DMT vyhovoval zadaným požadavkům. Další vstupní data mohou být tvořena například vrstevnicemi nebo výkresy z ostatních grafických programů. Klimánek (2006) dále rozděluje metody sběru dat na přímé a nepřímé.

Nepřímé metody sběru dat

Pro nepřímé metody sběru dat je charakteristické, že data pro vyhotovení DMT byla získána z již existujících zdrojů. Jedná se například o kartografickou digitalizaci výškového plánu či data získaná geodetickými nebo jinými metodami. Avšak tyto data byla primárně vyhotovena pro jiný účel než pro tvorbu DMT.

Tato data lze získat i z Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního (ČÚZK). Ten poskytuje digitální topografický model, který je odvozen ze Základní mapy 1:10 000 (ZM10) a nazývá se ZABAGED. Je tvořen několika datovými sadami, které poskytují výškopisná data rozdílné úrovně, podrobnosti a přesnosti výškopisu. Jedná se o datové sady DMR 5G, DMR 4G, DMP 1G a také výškopis tvořen vrstevnicemi a datovými sadami INSPIRE (Pacina a Brejcha, 2014).

Přímé metody sběru dat

Přímými metodami získáváme data přímo za účelem modelování terénu. Přímé metody se dále rozdělují na metody kontaktní a bezkontaktní. Mezi kontaktní metody můžeme zařadit takové metody, které vyžadují přímé geodetické měření na daném místě. Řadí se mezi ně tachymetrie, globální družicový polohový systém (z anglického názvu Global Navigation Satellite System – GNSS), nivelace a laserové skenování, které lze zařadit do obou skupin. Kontaktní metody charakterizuje především vyšší přesnost výsledných dat (je možné dosáhnout přesnosti v řádu několika mm), avšak nevýhodou je vyšší časová náročnost, což potvrzuje i Tuček (1998), který doplňuje využitelnost metod pro projekční účely. Měření se proto převážně využívá pro menší území, kde je potřeba vyšší přesnost výsledného modelu. Výběr použité metody

také závisí na finančních možnostech, což uvádí i Pacina a Brejcha (2014), kteří zařazují kontaktní metody mezi finančně nejnákladnější s ohledem na velikost zaměřeného území.

Bezkontaktní metody charakterizuje fakt, že měření probíhá bez nutnosti přímého kontaktu s daným územím. Jedná se především o metody, které využívají jako nosiče letecké prostředky, a to jak pilotní, tak i bezpilotní. Mezi tyto metody můžeme zařadit například využití bezpilotních letounů (z anglického unmanned aerial vehicle – UAV), které mohou zaměřovat území fotogrammetrií, lidarem či radarovým snímkováním. Jednotlivé metody se využívají převážně na rozsáhlá území nebo na území se špatně přístupným terénem. Přesnost měření u těchto metod závisí na použitém nosiči a může se lišit v rozmezí několika centimetrů u UAV až po metry u metod jako je Dálkový průzkum země (DPZ) a radarové snímkování.

1.5.3 Digitální model terénu

Li et. al. (2005) definují DMT jako znázornění zemského povrchu za pomoci matematických operací. Pro jeho vytvoření je nejprve nutné převést zemský povrch na plochu, kterou je možné matematicky definovat. Tato plocha je tvořena body o známých souřadnicích X, Y, Z, které jsou určeny v libovolném souřadnicovém systému. Tyto body reprezentují styková místa, na kterých dochází k doteku vytvářeného DMT se zemským povrchem. Výsledný model reprezentuje povrch pomocí zjednodušené spojitě plochy. Jeho využití je možné uplatnit v mnoha odvětvích, která využívají matematické, analytické či grafické operace.

Klimánek (2006) doplňuje rozdělení DMT na digitální model reliéfu a povrchu. Kdy digitálním modelem reliéfu je označován model tvořený z dat holého zemského povrchu, bez vegetace či staveb. Zatím co digitální model povrchu je tvořen z dat povrchu obsahujícího stavby i vegetaci.

Interpolační metody digitálních modelů

Sárközy (1999) charakterizuje interpolaci jako metodu, při které dochází k určení neznámé hodnoty zkoumaného jevu z okolních dat. Zkoumaným jevem mohou být například srážky, teplota, výška nebo se může jednat i o jakákoli jiná měřená data, u kterých je potřeba určit neměřené hodnoty. Princip metody spočívá v určení hodnoty nezměřených bodů za pomoci bodů okolních. Nejsme totiž schopni zaměřit veškeré

body daného jevu. Mezi zaměřenými body vznikají prázdná místa, která jsou za pomoci interpolačních technik vypočteny. Interpolace se provádí pro zahuštění měřených dat.

Interpolace je při tvorbě digitálních modelů jedním ze základních kamenů jeho tvorby. Díky ní vznikne pravidelná síť, která se snaží co nejpřesněji reprezentovat terénní reliéf. Při nepoužití nebo při špatném zvolení interpolační metody dojde k nepřesné reprezentaci povrchu terénu a digitální model nebude odpovídat skutečnému stavu terénu. Existuje velké množství interpolačních metod. Výběr vhodné metody určuje především charakter díla a rozložení vstupních dat. Každá interpolační metoda má své výhody i nevýhody.

Interpolační metody v programu ArcGIS

Interpolace, jak již bylo zmíněno je nedílnou součástí při vytváření digitálních modelů. Některé interpolační metody nabízí i ArcGIS, a to skrze rozšíření 3D Analyst či Spatial Analyst. Celkem je zde k dispozici 6 interpolačních metod. Mezi tyto metody se řadí metoda IDW, kriging, spline, metoda trendu, topo to raster a metoda nejbližšího souseda.

IDW

Ježek (2015) definuje IDW jako deterministickou interpolační metodu, která předpokládá, že bližší body mají na interpolovaný bod větší vliv než vzdálenější body. Samotná interpolace pak pracuje s váženým průměrem, kdy váha bodu závisí na vzdálenosti od bodu určovaného.

Kriging

Metoda kriging se řadí mezi geostatistické metody. Metoda pracuje při vytváření bodů s prostorovým uspořádáním a vzdáleností okolních bodů. Hodnoty vzdáleností a výšek okolních bodů jsou vloženy do matematické funkce. Váha bodů je určena variogramem (ARCGIS¹, 2023).

Spline

Metoda spline je metodou minimální křivosti. Využívá pro určení hodnoty bodů matematicky definované křivky. Interpolaci lze díky těmto křivkám počítat i po částech. Díky tomu je možné po upravení modelu počítat pouze jeho část. Jednotlivé křivky

jsou určovány tak, aby procházely co nejvíce zaměřenými daty. Výsledkem je dokonale vyhlazený model terénu, který prochází většinou naměřených bodů (Kadlčíková, 2007).

Metoda trendu

Tato metoda pracuje s polynomicou regresí, kterou prokládá metodou nejmenších čtverců. Polynomem neboli mnohočlenem jsou myšleny křivky či plochy. Pro jejich vypočtení je možné využít až n -tého stupně polynomu. Převážně se však využívá první až třetí stupeň. Vzniklá plocha pak nemusí procházet vstupními body, jelikož má snahu vytvořit hladký povrch (Ježek, 2015).

Topo to raster

Topo to raster je interpolační metoda, která se využívá pro vrstevnicová data v aplikaci ArcGIS. Díky využití vrstevnicových dat je metoda primárně určena pro výškové modely. Metoda využívá integrační techniku interpolace konečných rozdílů a to tak, aby nedocházelo ke ztrátě povrchové kontinuity. Interpolované body jsou určovány váženým průměrem a díky využití metody spline dokáže kopírovat nerovnosti v terénu jako jsou potoky, hřebeny a útesy (ARCGIS², 2023).

Metoda nejbližšího souseda

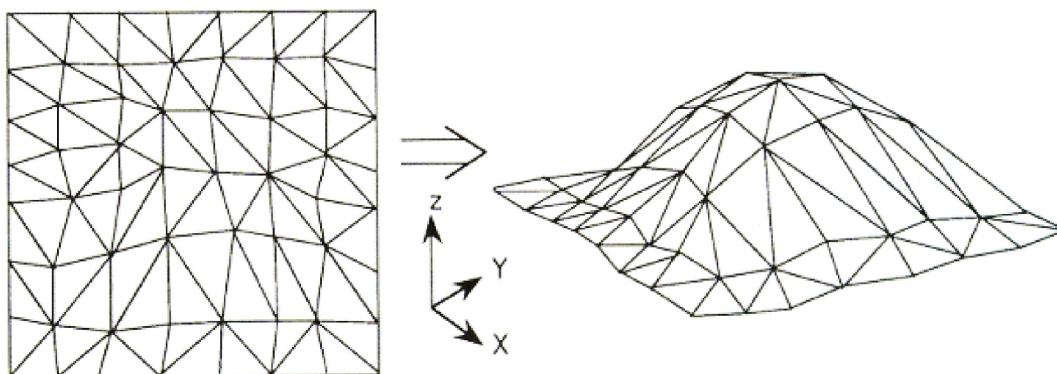
Tato metoda pracuje podobně jako IDW s váženým průměrem. Rozdíl mezi těmito metodami je, že metoda nejbližšího souseda nevyužívá vzdálenost jako váhu. Místo toho, za využití Delauneyho triangulace, vybere nejbližší body. Ty jsou propojeny Voroniovými nebo Thiessenovými polygony. Výsledkem jsou plochy, které se využijí jako váhy jednotlivých měřených bodů.

1.5.4 Typy DMT

Výstupem ze vstupních dat (X , Y , Z) a s využitím některé z interpolačních metod je v tomto případě celistvý model terénu, který se pokouší co nejvíce reprezentovat reliéf. Ten je vytvořen za pomoci jednoho ze tří typů modelů (polyedrického, rastrového a plátového). Každý z těchto typů má své výhody i nevýhody, ovšem nejvíce se využívá model polyedrický (Pacina a Brejcha, 2014).

Polyedrický model

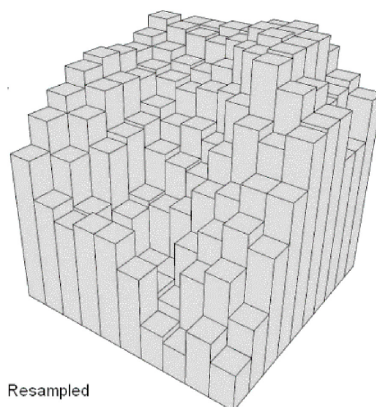
Je vektorový model, zobrazený pomocí trojúhelníkové sítě. Vrcholy těchto trojúhelníků jsou tvořeny získanými vstupními daty. Tedy body, které jsou ve styku s terénem, což potvrzuje i Urban (1991). Ten ještě dodává, že hranice dělení těchto trojúhelníků jsou taženy po singularitách. Jedná se o místa, ve kterých dochází ke změnám v průběhu terénní plochy. Model se pokouší vytvořit síť z rovnostranných trojúhelníků, k čemuž mu pomáhá Delaunayho triangulace.



Obrázek 1.2 DMT zobrazen polyedrickým modelem (sar.kangwon.ac.kr, 1996)

Rastrový model

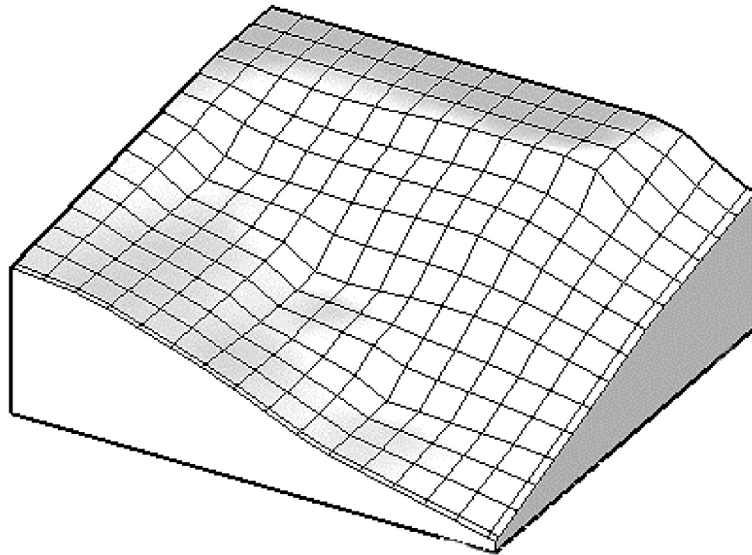
Pacina a Brejcha (2014) uvádějí, že model je založený na reprezentaci obrazu pomocí rastru. Jedná se o množinu elementárních plošek o určitých hodnotách, které jsou poskládány vedle sebe a reprezentují celistvý model. Převážně se jedná o čtvercovou síť, kdy každá ploška nese jedinečnou informaci o své poloze (X, Y, Z). Ovšem měřené body nerepresentují vrcholy plošek, ale musí se odvodit. Velikost těchto plošek pak určuje rozlišení celkového modelu, kdy jedna ploška představuje velikost jednoho pixelu.



Obrázek 1.3 DMT zobrazen rastrovým modelem (www.safe.com, 2021)

Plátový model

Jedná se o model využívající obecně křivé, nepravidelné elementární plošky určené polynomičnou funkcí. Ty mohou být čtvercové i trojúhelníkové a jejich hranice jsou vedeny po singularitách. Model nemá ostré hrany mezi přechody jednotlivých plošek.



Obrázek 1.4 DMT zobrazen plátovým modelem (www.formz.com, 2012)

2 Materiál a metody

2.1 Cíl práce

Cílem této diplomové práce byl výpočet odtokových poměrů v malém povodí a vytvoření digitálních modelů z různých vstupních dat. Vytvořená data budou sloužit pro výzkum odtokových poměrů v povodí. Práce se zaměří na rozdíly mezi vstupními daty, které mají vliv na přesnost DMT, a porovnává kvalitu vstupních dat při stanovování odtokových poměrů. Porovnáním odtokových drah budou detekovány nesrovnalosti mezi jednotlivými DMT. Zjištěné výsledky by mohly být využity pro zlepšení kvality vstupních dat, což by vedlo k přesnějším a spolehlivějším stanovení odtokových poměrů při vodohospodářských rozhodnutích v krajině.

2.2 Popis zkoumaného povodí

V rámci této diplomové práce byl proveden výzkum odtokových poměrů v konkrétním povodí. Bylo vybráno povodí malého rozsahu, ve kterém byly zásahy lidské činnosti, které měly vliv na odtokové poměry.

Zkoumané povodí se nachází v Jihočeském kraji v okrese Český Krumlov. Celé povodí se rozprostírá pouze v katastrálním území Třísov, které nese číselné označení 641529 (ČUZK¹, 2023). Obec Třísov, která je zobrazena na obrázku 2.1 spadá pod správu obce Holubov, od které se nachází necelé 2 km. Jedná se o malou malebnou obec nacházející se ve velmi svažitém terénu. Obec je z jedné strany ohraničena Jiříčkovým vrchem a z druhé strany je hranice obce tvořena Křemžským potokem. Ten se posléze vlévá do řeky Vltavy. Obec je známá převážně díky turismu. Nedaleko je možné najít keltské oppidum nebo Dívčí kámen. K oběma těmto památkám vedou z obce turistické trasy, což přináší do obce řadu turistů, kteří se tak starají o kulturní ruch. Obcí prochází také železniční trať vedoucí z Českých Budějovic do Nového Údolí. Zemědělská půda je kolem obce tvořena z velké části zatravněnou plochou a pastvinami, a to převážně kvůli vysoké svažitosti.

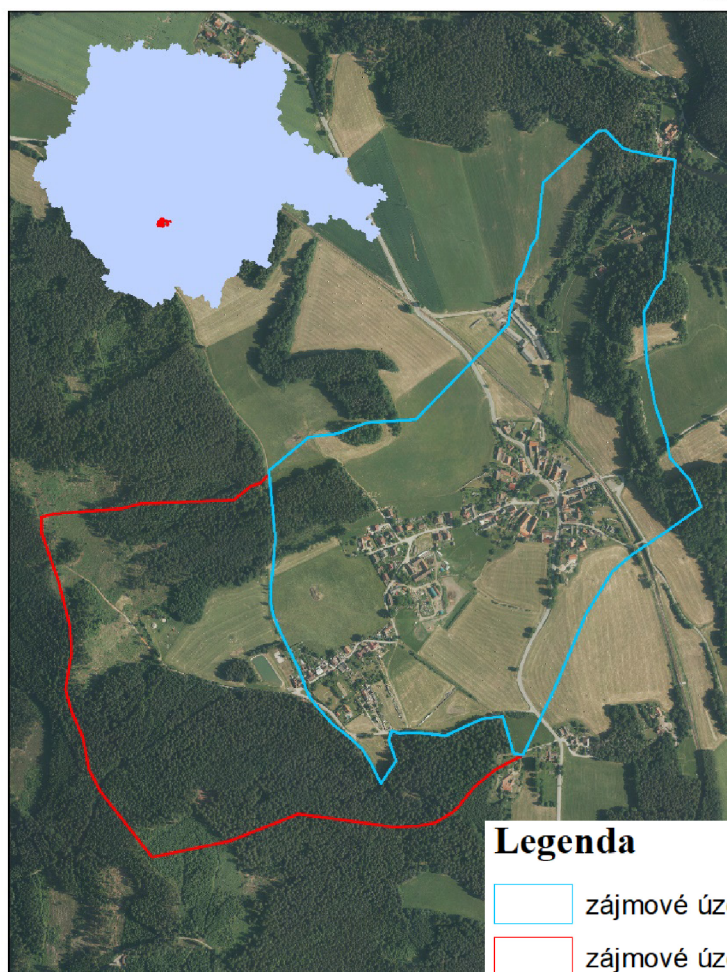
Samotné zkoumané povodí je povodí bezejmenné vodoteče, někdy označované jako Třísovský potok. Jedná se o pravostranný přítok Křemžského potoka, který nese číslo povodí 1-06-01-195. Ten se po necelých 1200 metrech od přítoku Třísovského potoka vlévá do řeky Vltavy. Povodí se rozprostírá na ploše 106 ha převážně zemědělské půdy, uprostřed které se nachází obec Třísov.



Obrázek 2.1 Fotografie obce Třisov (Plic, 2022)

Jako počátek toku je brán výtok z vodní nádrže, která se nachází nad obcí na severním svahu Jiříčkova vrchu. Z vodní nádrže pokračuje tok uzavřeným kanálem a vystupuje na povrch až za intravilánem obce. Potok v průběhu zatrubnění vystupuje na povrch pouze skrze pítko u Třisovského rybníka. Po překonání železničního koridoru nabírá tok přirozený charakter a kopíruje přirozený reliéf. Po 710 metrech se vlévá do Křemžského potoka. Celková délka toku činí 1230 m.

Zobrazení zájmového území na úrovni kraje



Obrázek 2.2 Rozvodnice Třisovského potoka zobrazeny na mapě ZM 10 (Plic, 2023)

Povodí má převážně přirozený charakter, avšak jsou zde vidět zásahy lidské činnosti. Pomineme-li samotný intravilán obce, nacházejí se zde další zásahy, které mají vliv na odtokové poměry. Mezi největší vlivy patří dozajista již zmíněný železniční koridor. Dále se zde nachází svahové úpravy u dopravních komunikací, koupaliště pod Jiříčkovým vrchem a umělá vodoteč. V nedávné době zde také proběhla pozemková úprava, jejímž výsledkem byla realizace některých protierozních opatření.

Pro diplomovou práci bylo zájmové území rozděleno na 2 části. První část se zabývá výpočtem odtokových poměrů v závislosti na kvalitě vstupních dat. Tato část má zmenšené povodí, které je ohraničeno umělým tokem. Zatímco druhá část zkoumá vliv této umělé vodoteče na odtokové poměry, a to v celém povodí Třísovského potoka. Jednotlivé části jsou zachyceny na obrázku č. 2.2.

2.2.1 Určení rozvodnic

Zájmové území je ohraničeno rozvodnicí. Jelikož byl projekt zpracován v prostředí ArcGIS, byla tato rozvodnice vygenerována pomocí tohoto programu. Vygenerování rozvodnice proběhlo za pomoci výškopisného modelu. Pracovní postup spočíval ve zpracování dat pomocí ArcToolboxu. Díky němu bylo možné využít několika matematických operací a určit tak rozvodnici. Práce započala digitalizací vrstevnic z mapy ZM10. Po digitalizaci vrstevnic byl vytvořen rastrový DMT pomocí funkce Topo to raster. Tato interpolační metoda, která je převážně určena k vytváření hydrologicky korektních digitálních výškových modelů byla vybrána především pro její integrační techniku interpolace konečných rozdílů. Nedochází tedy ke ztrátě povrchové kontinuity (Childs, 2004).

Vytvořený digitální model byl vyhlazen pomocí funkce Fill. Tato funkce vyplňuje propady a nedokonalosti v datech. Následně byl vložen DMT jako vstup do nástroje Flow Direction. Ten dokáže z hydrologicky korektního DMT vytvořit rastrový model zobrazující směry odtoku všemi osmi směry. Každý směr má své vlastní kódové označení a barvu. Pro každý pixel proběhne výpočet, který stanoví jeho sklon a podle něj je mu přiřazena barva a hodnota (Jenson a Domingue, 1988). Poté byl model směrů odtoku vložen jako jeden ze dvou vstupů do funkce watershed. Druhým vstupem byl uzávěrový profil, který byl zaměřen GNSS stanicí. Funkce watershed stanoví, ze kterých pixelů voda odtéká do uzávěrového profilu a následně dojde k označení a přiřazení hodnoty a barvy. Výsledkem této funkce bylo hydrologicky přesné povodí, které bylo vytvořeno v rastrové formě. To bylo změněno funkcí Raster to polygon,

kteřá převedla rastrovou rozvodnici do vektorové podoby ve formátu „.shp“ polygonového typu. Vygenerovaná rozvodnice byla následně zkontrolována a poupravena. Výsledkem byla rozvodnice o ploše 106 ha, která byla využita v druhé části diplomové práce.

Území pro první část diplomové práce bylo zmenšeno kvůli umělému vodnímu toku, který rozděluje vypočtenou rozvodnici. Jeho hranici tvoří umělý vodní tok. Z tohoto zmenšeného území byly také vyňaty velké lesní celky, které se nacházely na okrajích povodí. Vyjmutí velkých lesních komplexů bylo z důvodu malého množství dat vyskytujících se v této oblasti. Kvůli malému množství dat by nedošlo k dostatečné přesnosti výsledků při další práci s podkladovými daty.

2.3 Polohová a výšková data

Před vytvořením digitálního modelu bylo potřeba nejprve shromáždit a zpracovat data. Tato diplomová práce pracuje se dvěma typy polohových a výškových dat. Prvním typem jsou vrstevnicová data, která byla zdigitalizována. Druhým typem jsou bodová data, vzniklá geodetickým zaměřením.

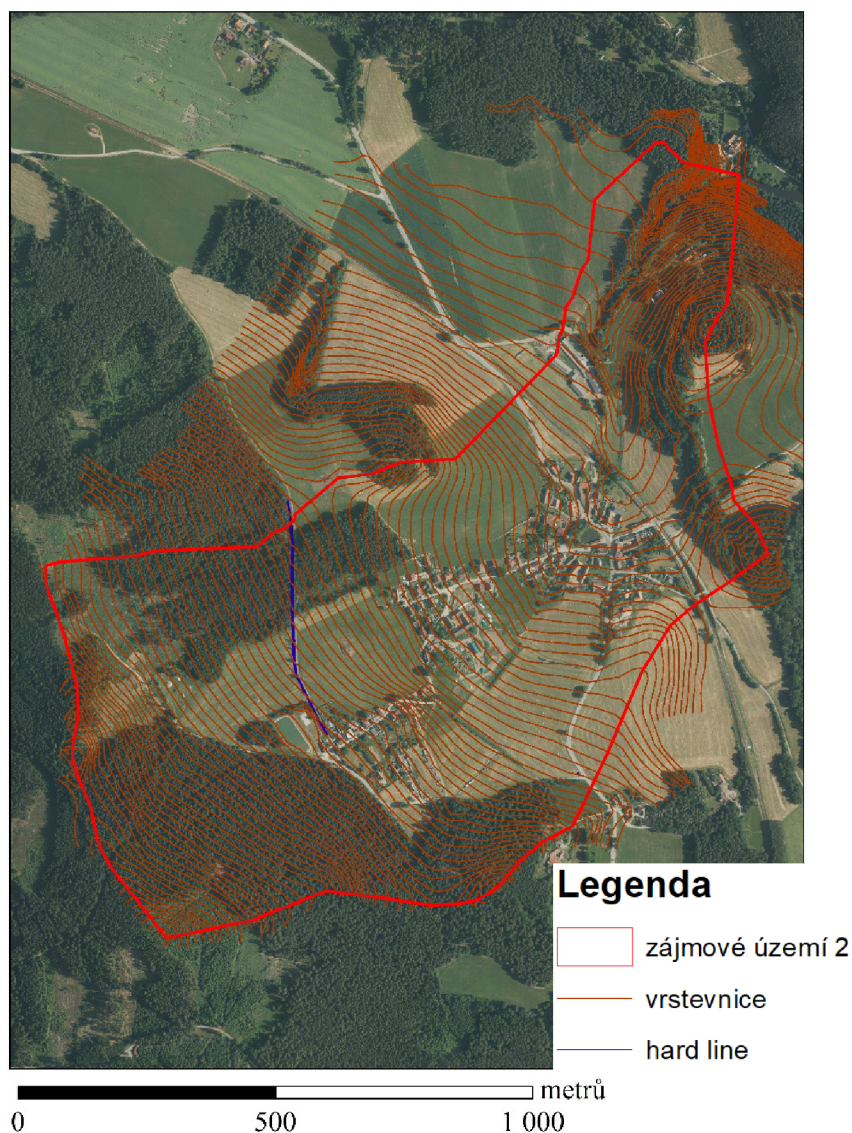
2.3.1 Zdigitalizovaná data

Pro digitalizaci byla použita výšková data, která jsou obsažena v základní mapa České republiky 1:10 000. Jedná se o mapové dílo, které se řadí mezi základní státní mapová díla a pokrývá celou Českou republiku. Pro pokrytí celé republiky je využito 4533 mapových listů, které jsou vedeny v souvislém kladu, tak aby vytvářely celistvé mapové dílo. Mapa obsahuje polohopisné, výškopisné i popisné informace. Výškopisné informace jsou tvořeny prostřednictvím výškových bodů, vrstevnic nebo terénních stupňů. Jednotlivé vrstevnice jsou tvořeny po 2 výškových metrech. Popisové informace znázorňují informace o výšce vrstevnic či výšce výškových bodů, geografické názvosloví, druhové označení objektů nebo také rámové i mimo rámové údaje. Některé předměty v mapě jsou částečně generalizovány, jedná se například o spojování budov do jednotlivých celistvých bloků či zjednodušování některých útvarů. To vše utváří mapový podklad, který poskytuje velmi dobrou představu o zobrazovaném území (ČUZK², 2023). ZM10 je vyhotovována digitální technologií, a to pomocí základní báze geografických dat České republiky (ZABAGED) a databáze GEONAMES.

Tvorbu a aktualizaci mapového podkladu zajišťuje zeměměřičský úřad. Mapa je dostupná veřejnosti prostřednictvím prohlížečích služeb na webových stránkách ČUZK.

Samotná digitalizace dat započala vytvořením nové „shp“ vrstvy. Do té byly pomocí editace prvku zdigitalizovány vrstevnice podkladové mapy. Nově vzniklé vektorové vrstevnice byly doplněny o jejich výškopisnou informaci skrze atributovou tabulku prvků. Data byla digitalizována pouze pro zájmové území s drobným přesahem na všechny strany, což je patrné na obrázku č. 2.3. Na tomto obrázku jsou znázorněny jak vrstevnice, tak Hard line, o kterých je více informací v dalších částech práce.

Vrstevnice v zájmovém území 2



Obrázek 2.3 Dokončená digitalizace dat v povodí Třísovského potoka (Plíc, 2023)

2.3.2 Zaměřená data

Poskytnutá zaměřená data

Velký objem dat, která byla použita jako data zaměřená, byla poskytnuta firmou GEOTAN s.r.o. Firma zde zaměřovala skutečný stav území. Veškerá tato data byla vyhotovena pomocí polární metody. Data byla vytvořena jako podklad pro pozemkovou úpravu. Zaměření probíhalo mezi lety 2006 a 2007. Jednalo se o zaměření jak polohopisného, tak i výškopisného skutečného stavu terénu. Polohopisné zaměření probíhalo v souřadnicovém systému S-JTSK a výškové zaměření bylo v systému Balt po vyrovnání (Bpv). Měření probíhalo v souladu s katastrální vyhláškou č. 357/2013 Sb., tedy s maximální střední souřadnicovou chybou $m_{xy} = 14$ cm a s kódem kvality 3. Měření probíhalo metodou tachymetrie, s využitím geodetické totální stanice TOPCON GPT – 9003M. Jak potvrzuje Pacina a Brejcha (2014) přesnost tachymetrické metody činí 2 až 5 cm, což je dostatečná přesnost pro vytváření DMT. Pro samotné tachymetrické měření bylo zapotřebí nejprve vyhotovení bodového pole, ze kterého měření probíhalo. Bodové pole bylo tvořeno body určenými metodou GNSS. Současně s vytvořenými body bylo bodové pole doplněno o body z bodového pole České republiky. Jedná se o databázi bodů, kterou poskytuje Zeměměřičský úřad na celém území ČR. Bodové pole je tvořeno souborem bodů základního bodového pole polohového, výškového a tíhového, doplněného o body zhušťovací a body podrobných bodových polí. Body jsou v terénu označeny pruhovanou červenobílou tyčí a osazeny žulovým mezníkem s křížkem. Kříž je opatřen dvěma podzemními značkami (kamennou a skleněnou destičkou). Data o těchto bodech jsou poskytována formou geodetických údajů. Tyto údaje obsahují podrobné informace o poloze, souřadnicích, místopisu a popisu bodu.

Podrobné bodové pole, které zahustilo bodové pole České republiky bylo stabilizováno a zaměřeno metodou GNSS, a to podle vyhlášky 31/1995. Body byly měřeny opakovaným měření, a to v rozmezí delším jak jedna hodina. Bodové pole bylo tvořeno tak, aby z něj bylo možné za pomoci tachymetrické metody zaměřit celé území. Pro podrobné zaměření polohopisu a výškopisu byla použita metoda tachymetrie, a to převážně díky rychlosti určování bodů a přesnosti. Metoda byla také využita i díky své výhodě, kdy je možné měřit i v podmínkách, kde je zhoršená viditelnost oblohy, a tedy není možné využít metodu GNSS. Tachymetrická metoda využívá k polohopisnému měření polární metodu. To znamená, že přístroj určuje polohu bodu za pomoci

délky a úhlu. Výška podrobného bodu je poté spočítána trigonometricky pomocí zenitového úhlu, výšky stroje, výšky měřičského hranolu a vzdálenosti bodu. Data byla poskytnuta formou souřadnic. Ty byly vedeny v seznamu bodů, který byl opatřen číslem záznamu podrobného měření změn (ZPMZ), číslem bodu, souřadnicemi X, Y, Z a jejich popisem.

Doplnění výškopisných dat

Jelikož zaměření polohopisu a výškopisu bylo vyhotoveno pro pozemkovou úpravu, nebyl zaměřen intravilán ani protieroční opatření. Protieroční opatření byla zrealizována na základě společných zařízení vycházejících z pozemkové úpravy. V rámci pozemkové úpravy byly v námi zvoleném povodí realizovány dvě protieroční meze s výsadbou dřevin a ochranné zatravnění sloužící jako protipovodňová ochrana.

V rámci měření, které probíhalo 28. a 29. října byl autorem této diplomové práce zaměřen veškerý intravilán obce, protieroční meze a další prvky, které nebyly zaměřené při pozemkové úpravě. V průběhu prvního měřičského dne byl zaměřen intravilán obce a další prvky, které bylo možné zaměřit metodou GNSS. Současně s tímto zaměřením bylo připraveno podrobné bodové pole. Z toho druhý měřičský den probíhalo zaměření nepřístupných míst totální stanicí.

Doměření metodou GNSS

Měření probíhalo za pomoci GNSS stanice Getac T9 metodou RTK. Jedná se o metodu, která využívá přenosu korekcí fázového měření od referenčního bodu k pohyblivému se přijímači. Dle Voženilka (2001), metoda při optimálních podmínkách, dosahuje přesnosti 3 až 5 cm.

Samotné měření probíhalo tak, aby bylo dosaženo co nejoptimálnějšího výškového zobrazení na digitálním modelu. Byly měřeny veškeré terénní hrany, které byly doplněny o množství bodů mezi těmito hranami. Tyto body vytvářejí pravidelný čtvercový rastr. Průběh měření je patrný na obrázku č. 2.4. Rozlišení rastru bylo v terénu stanoveno na 15 měřičských kroků (~15 m). V případě, že se terénní hrany nacházely blíže u sebe, byly i tak mezi ně vloženy některé body pro vykreslení přirozenějšího modelu. Během měření nebyl brán v potaz polohopisný stav terénu.



Obrázek 2.4 Fotografie z měření výškopisu (Plic, 2022)

Výsledkem měření bylo zaměření 639 výškových bodů, které doplňují přebraná data a umožňují vytvořit digitální model terénu pro výpočet odtokových poměrů z povodí. Po zaměření výškových bodů proběhlo vyhotovení podrobného bodového pole, které bylo dočasně stabilizováno dřevěným kolíkem. Výstupem z GNSS stanice byl protokol, zobrazený v tabulce 2.1 o zaměřených bodech společně s jejich souřadnicemi X, Y, Z.

Tabulka 2.1 Ukázka protokolu vyhotoveného GNSS stanicí (Plic, 2022)

SEZNAM SOUŘADNIC MĚŘENÝCH GNSS/RTK BODŮ

Název zakázky: Trísov

Autor: Plic

Datum a čas: 28.10. 2022

Typ přístroje: Getac T9

| Č.b. | Y | X | H | kód | 3D kval |
|------|-----------|------------|--------|-------|---------|
| 72 | 766554.85 | 1174838.70 | 526.52 | ----- | 0.01 |
| 73 | 766559.38 | 1174837.44 | 526.77 | ----- | 0.02 |
| 74 | 766555.94 | 1174836.29 | 526.35 | ----- | 0.05 |
| 75 | 766551.85 | 1174838.57 | 525.93 | ----- | 0.01 |
| 76 | 766552.66 | 1174839.39 | 526.02 | ----- | 0.03 |

Doměření pomocí totální stanice

Jelikož pro přesné vykreslení digitálního modelu nebylo možné využít pouze metodu GNSS, bylo potřeba využít totální stanice zobrazenou na obrázku 2.5. Při měření bylo postupováno obdobně, jako při zaměřování pozemkové úpravy, tedy měření vycházelo z podrobného bodového pole, které bylo vytvořeno předchozí den. Samotný postup měření polohopisu a výškopisu je popsán v kapitole *Poskytnutá zaměřená data*. Zaměřování probíhalo pomocí robotické totální stanice Leica TS15. Zaměřeny byly body, které nebylo možné zaměřit GNSS stanicí. Jednalo se o body, které byly v zalesněných oblastech. Celkem bylo zaměřeno 139 bodů. Po zaměření bylo potřeba data zpracovat do požadovaného formátu, tedy souřadnic X, Y, Z. Zpracovávání probíhalo v programu Groma v13. Jedná se o výpočetní geodetický software, skrze který se zpracovávají naměřená data. Výpočet byl proveden pomocí polární metody s výškami, jehož výsledkem byl protokol o dodržení měřičských parametrů a seznam měřených bodů se souřadnicemi.



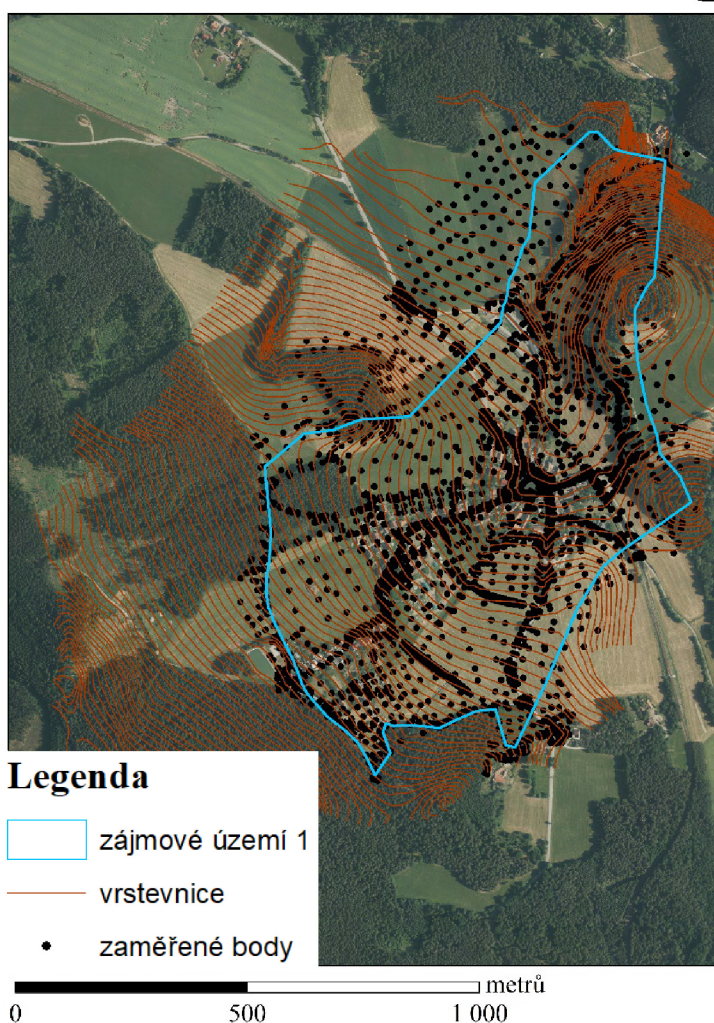
Obrázek 2.5 Doměření bodů totální stanicí (Plíc, 2022)

2.3.3 Příprava dat pro vložení do ArcGIS

Veškerá polohová data, která byla zpracována nebo převzata, byla vložena do programu ArcGIS ve správném souřadnicovém systému ze souboru ve formátu „.txt“. Textová data se dají importovat do prostředí ArcGIS několika způsoby. Tato práce pracuje s programem Excel, skrze který je možné vložit souřadnice bodů, které jsou

převedeny do tabulky. Po převedení textového souboru je potřeba souřadnice upravit podle vybraného souřadnicového systému. Námi zvolený souřadnicový systém nastavený v programu ArcGIS je „S-JTSK_Krovak_East_North“. Tento souřadnicový systém pracuje se zápornými hodnotami souřadnic, narozdíl od souřadnic získaných měření. Veškeré polohové souřadnice (X a Y) musely být vynásobeny -1. Po převedení dat do požadované podoby, byla data importována skrze funkci přidat XY data, ve které byl zvolen výchozí „.xlsx“ soubor. Výstupem importu je vrstva ve formátu „.shp“, zobrazená na obrázku č. 2.6, která obsahuje množství výškových bodů o známé výšce, se kterými je možné provádět další početní operace.

Zájmové území 1



Obrázek 2.6 Body využité k tvorbě DMT (Plic, 2023)

2.3.4 Digitální model terénu

Jako další krok bylo vytvoření digitálních modelů. Celkem byly tvořeny 3 digitální modely. První DMT byl vytvořen z vrstevnic, druhý byl vytvořen z bodové vrstvy a třetí kombinoval zaměřená a vrstevnicová data. Nejprve bylo potřeba zvolit vhodnou

interpolační metodu. Nejvhodněji se jevila interpolační metoda Topo to raster, která mohla být využita pro oba typy dat. Zvolení této metody bylo především díky možnosti interpolace jak bodové, tak i vrstevnicové datové sady. Dalším důvodem pro zvolení této metody byla její schopnost vytvářet hladké digitální modely díky technice tenkých desek. Díky tomu je tato metoda vhodná pro vytváření digitálních modelů, které budou využity pro tvorbu odtokových poměrů (Pacina a Brejcha, 2014).

Data byla vkládána do výpočetního rozšíření ArcToolboxu pomocí funkce Topo to raster. Vrstevnicovým datům byl nastaven typ Contour. Bodová data měla přiřazenou hodnotu Point elevation. Velikost pixelu byla autorem stanovena na 1 m. Toto rozlišení bylo vybráno jako optimální pro podrobné zobrazení odtokových poměrů a zároveň pro zachování dostatečné přehlednosti v území.

Autor od této metody upustil u bodových dat, jelikož při modelování docházelo k tvorbě nereálných odtokových drah, které nekorespondují se skutečným stavem. Pro správnou reprezentaci bodových dat byla zvolena metoda nejbližšího souseda. Tato metoda pracuje s podmnožinou okolních bodů, kdy nově vyinterpolovanému bodu přiřadí výšku pomocí Voroniova diagramu. Vzniklá výška se nachází v rozmezí výšek okolních bodů (Musashi et al., 2018). U této metody byly dosazeny pouze vstupní data a výsledné rozlišení rastru, které bylo stanoveno na stejnou hodnotu jako u metody Topo to raster. Využitím této metody došlo k reálnému vykreslení zemského povrchu ve zkoumaném území.

Posledním digitálním modelem byl model vytvořený kombinací vrstevnicových dat a dat měřených. Kombinace proběhla za pomoci funkce Topo to raster. Tato metoda umožňuje kombinaci podkladových dat. Při tvorbě DMT bylo nutné vytvořit lomové hrany svahu umělé vodoteče. K tomu byly využity linie spojující zaměřené body. Po získání všech potřebných vstupních dat došlo k jejich zadání do funkce Topo to raster. U zaměřených bodů byl nastaven typ vstupních dat jako Point elevation. Vrstevnicovým datům byla přiřazena hodnota Contour. Posledním vstupujícím prvkem byly lomové hrany (Hard line), které dostaly hodnotu Cliff. Bez zadání této hodnoty by nedošlo k přerušení kontinuity mezi sousedními hodnotami buněk a výsledkem by bylo nereálné vykreslení liniového prvku. Vrstva nemusela obsahovat výškovou informaci, jelikož se při hodnotě Cliff bere v úvahu pouze polohová informace a výšku přebírá z ostatních vstupů. Dále byl přenastaven primární typ vstupních dat na data bodová. Tím dojde k upřednostnění zaměřených bodů před body digitalizovanými (ARCGIS², 2023).

Po vytvoření všech DMT byla data oříznuta patřičným zájmovým územím pomocí funkce extract by mask. Následovalo využití metody Fill. Ta vyhladí povrch doplněním hodnot do drobných nerovností. Data jsou doplněna tak, aby voda měla tendenci odtékat a nezůstávat v drobných nedokonalostech vytvořeného DMT (ARCGIS³, 2023).

2.4 Srážkové poměry

Janeček et al. (2007) řadí srážkové úhrny mezi základní vstupy při modelování odtokových křivek. Srážkový úhrn návrhového deště se stanovuje podle zvolených dob opakování. Tato práce používá návrhové srážky pro 2, 10, 20, 50 a 100letou srážku. Dále práce pracuje s předpokladem, že srážka je rovnoměrně rozložena na celém zkoumaném území. Pomocí metody odtokových křivek CN určíme objem odtoku, který vznikne při daných srážkových úhrnech.

Pro určení N letých srážek není možné využít váženého průměru ani thiessenových polygonů nejbližších stanic, jak udává Serrano (1997). Protože tyto stanice nemají vyhodnocené N-leté srážky. Proto pro určení N letých srážek byla použita nejbližší stanice, která tyto údaje zaznamenává, a to stanice nacházející se v Českých Budějovicích. Hodnoty z této stanice jsou zobrazeny v tabulce 2.2.

Tabulka 2.2 Úhrny návrhových N-letých srážek (Plic, 2023)

Data vychází z práce Šamaje et al. (1985)

| Opakování za N let | 2 | 10 | 20 | 50 | 100 |
|---------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Úhrn srážek [mm] | 38,6 | 64,1 | 74,6 | 87,3 | 97,3 |

Data srážkových úhrnů byla přenesena do prostředí ArcGIS. Do atributové tabulky polygonové vrstvy byly doplněny jednotlivé hodnoty pravděpodobnosti srážek. Z této vrstvy byly následně vytvořeny rastrové vrstvy s rozlišením 1 m, pomocí funkce polygon to raster. Hodnoty jednotlivých rastrových výstupů jsou N-leté srážky.

2.5 Hydrologické vlastnosti půd

Určení hydrologických vlastností půd je při tvorbě CN křivek důležité především pro určení minimálních rychlostí infiltrace vody do půdy. K určení hydrologických vlastností se využívá hlavní půdní jednotka (HPJ), ta je součástí kódu BPEJ. Data byla

převzata z celostátní databáze BPEJ, kterou poskytuje státní pozemkový úřad (SPU, 2023). Data jsou poskytována ve formátu „.shp“ a jsou volně dostupná pro veřejnost. Pro stanovení hydrologických vlastností bylo potřeba kromě BPEJ také určit hodnoty infiltrace, které HPJ mají. Hodnoty infiltrace jednotlivých HPJ rozděluje Janeček et al. (2012).

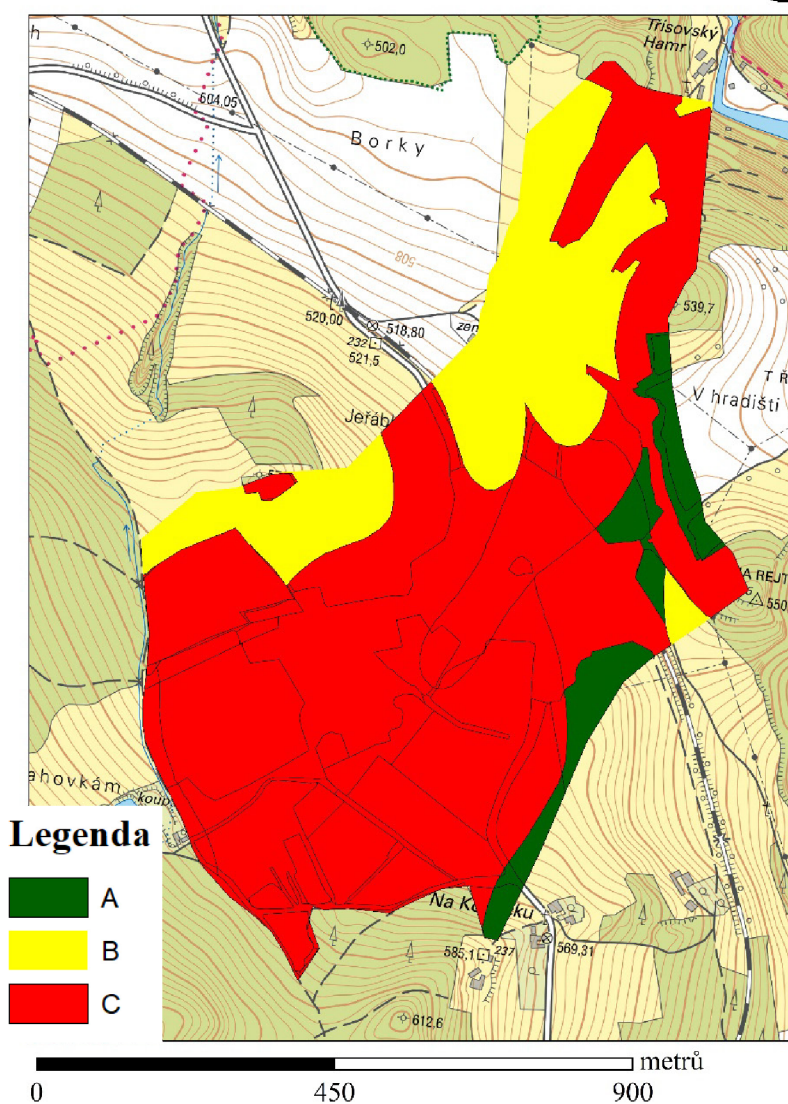
Hydrologické vlastnosti půd u zemědělských pozemků byly získány prostřednictvím dat o HPJ z BPEJ. Díky kterým je možné stanovit propustnost půdy. Ta se dělí na čtyři skupiny. První jsou půdy propustné, mezi které se řadí písčité půdy. Středně propustné půdy jsou převážně hlinité, až hlinito-jílovité. Další skupinou jsou půdy s malou schopností vsaku, a to jílovito-hlinité a jílovité půdy. Poslední skupinou jsou půdy s nízkou vsakovací schopností. Do tohoto typu půd patří jílovité a mělké půdy, a také půdy s vysokou hladinou podzemní vody. Jedná se tedy o půdy téměř nepropustné. Tyto skupiny jsou oklasifikovány od A do D, kdy A jsou půdy propustné a D jsou půdy s nízkou schopností vsaku. Janeček et al. (2012) stanovuje ve své publikaci tabulku, ve které definuje hodnoty propustnosti pro jednotlivé HPJ.

Samostatná tvorba vrstvy s informacemi o hydrologických vlastnostech půd započala získáním vektorových dat BPEJ. Tato data byla vložena do programu ArcGIS a oříznuta funkcí Clip na velikost zájmového území. Dalším krokem bylo ve vzniklé vrstvě doplnit editací informací o hydrologických vlastnostech. Tato informace byla doplněna do atributové tabulky, ve které pro ni byl vytvořen nový sloupec. Na základě znalosti HPJ byla za pomoci tabulky, kterou uvádí Janeček et al. (2012), stanovena hodnota hydrologické půdní skupiny (A, B, C, D). Rozdělení HPJ do jednotlivých hydrologických půdních skupin je zobrazeno na obrázku č. 2.7.

Výjimku v tomto procesu tvořily lesy, jelikož nemají stanovenou BPEJ. Postup při určování hydrologických kategorií pro lesní půdy popisuje Šinka et al. (2013). Ti sice prezentují, že výpočet CN křivek se dělá převážně na zemědělsky obdělávaných územích, ale připouštějí, že při řešení území jako celku jsou řešeny i lesní pozemky. Postup stanovení hydrologické půdní skupiny je obdobný jako u zemědělských půd. Nevychází však z mapy BPEJ, nýbrž z mapy souboru lesních typů. Údaje o lesních typech byly vloženy do ArcGIS prostřednictvím mapy ve formátu „WMS“, kterou poskytuje Ústav pro hospodářskou úpravu lesů. Tato mapa je dostupná v rámci map oblastních plánů rozvoje lesů (UHUL, 2022). Na základě této mapy byla určena

skupina lesních typů a za pomoci převodního klíče souboru lesních typů byla převedena na skupinu geobiocénů, ze které byla stanovena HPJ (Bínová et al., 2017). Ze skupiny geobiocénů bylo pak možné stanovit hydrologickou půdní skupinu.

Rozložení hydrologických skupin

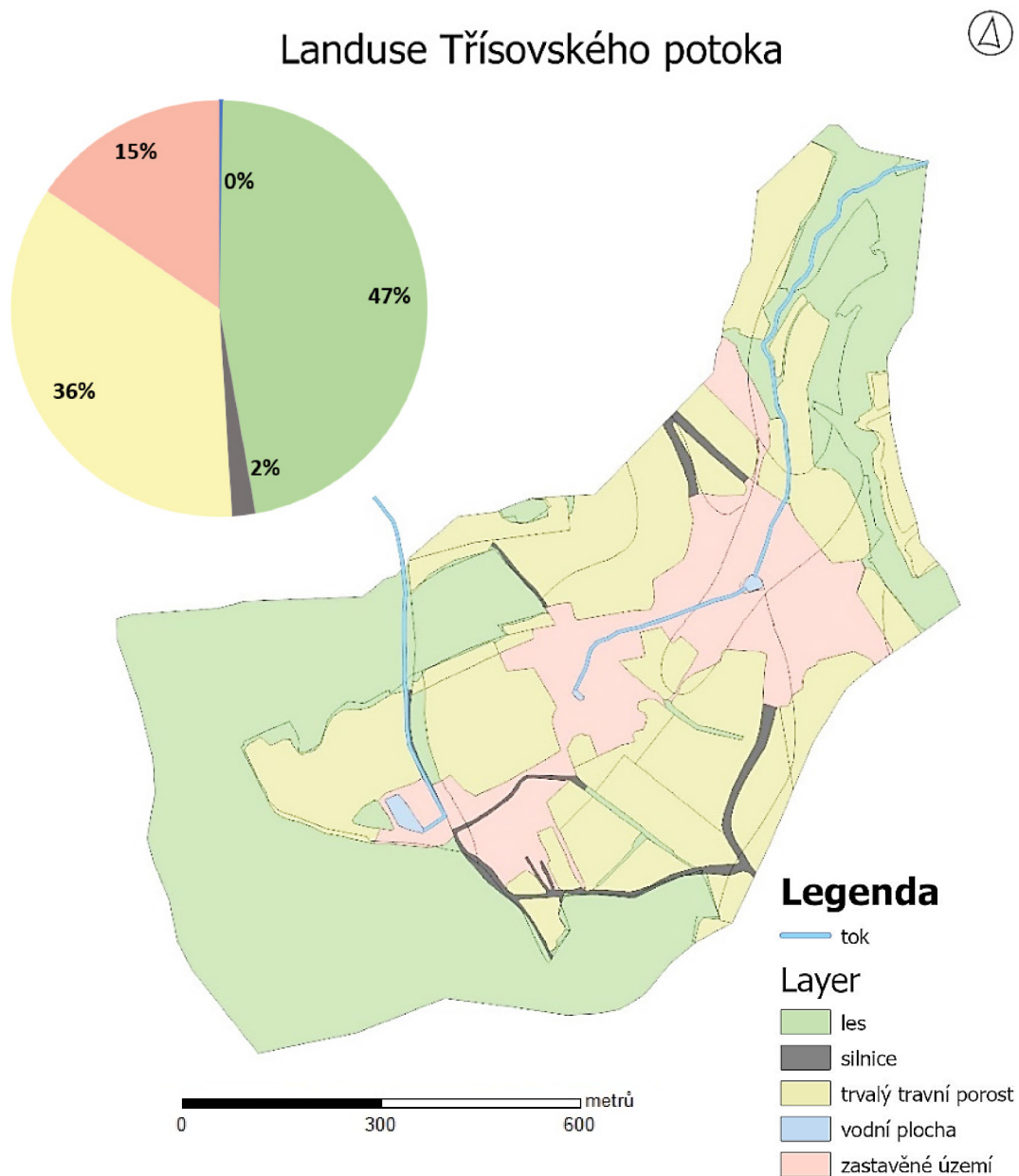


Obrázek 2.7 Povodí Trisovského potoka rozdělené na jednotlivé hydrologické skupiny (Plíč, 2023)

2.6 Vegetační pokryv

Vegetační pokryv je posledním vstupem potřebným pro stanovení odtokových poměrů. Typem pokryvu půdy může být například silnice, pole, louka, les, ale i zastavěné oblasti. Každý druh půdního krytu jinak ovlivňuje zpoždění a sílu dešťové kapky. Díky půdnímu krytu může dešťová kapka dopadnout na povrch s menší silou a s určitým zpožděním. Vegetační kryt také určuje vsakovací schopnost půdy. Množství vsaku do půdy závisí na mnoha faktorech. Nezávisí pouze na vsakovací schopnosti půdy,

ale také na množství dopadajících srážek, jelikož množství srážek ovlivňuje aktuální stav nasycení půdy (Smelík, 2016).



Obrázek 2.8 Území Třísovského potoka rozdělené podle druhů pozemků (Plic, 2023)

Data o vegetačním krytu v zájmovém území byla zjištěna z databáze LPIS (LPIS, 2023). LPIS je systém, který byl vytvořen pro čerpání dotací na zemědělskou půdu. Je tvořen geografickým informačním systémem, který eviduje využití zemědělské půdy. Na základě dat z tohoto systému, doplněným o informace z místního šetření skutečného stavu využití, bylo stanoveno využití jednotlivých pozemků.

Vegetační pokryv je dalším vstupem pro určení CN křivek. Pro vytvoření jeho vektorové vrstvy bylo potřeba připojení podkladové mapy LPIS, která byla vložena v rastrové podobě formou WMS. Následně byla založena nová vrstva, která ponese vektorové informace o vegetačním pokryvu. Údaje o vegetačním krytu byly zkontrolovány vizuální kontrolou při místním šetření a zapsány případné nesoulady se skutečností. Z těchto podkladů byly stanoveny hranice vegetačního krytu, které byly zdigitalizovány. Název vegetačního krytu byl zapsán do atributové tabulky, ve které byl pro tuto informaci vytvořen nový sloupec. Následně proběhlo přidání dalšího pole do atributové tabulky, ve kterém byly vypočteny výměry pro stanovení procentuálního zastoupení jednotlivých kultur. Z obrázku č. 2.8 je patrné, že skoro polovina zájmového území je tvořena lesními pozemky. Druhým nejvíce zastoupeným typem pozemku je trvale travní porost, a to s 36% zastoupením. Zbylé místo v území vyplňují převážně zastavěné části doplněné silnicemi a vodní plochou.

3 Výsledky a diskuse

Tato práce má za cíl porovnání odtokových charakteristik získaných z geodeticky zaměřených a z digitalizovaných dat. V rámci této diplomové práce byly vypočteny odtokové charakteristiky z obou zdrojů vstupních dat. Po vytvoření modelů CN křivek proběhlo porovnání odtokových křivek a stanovených objemů odtoků. Obě tyto hodnoty byly stanoveny pro všechny srážkové úhrny u obou modelů.

Práce se dělí na dvě části. V první části se zabývá odlišností odtokových poměrů, které jsou vypočteny z odlišných vstupních dat. Rozdíly by zde měly být nejvíce patrné převážně v intravilánu obce nebo jako malé nerovnosti v terénu. Tyto nerovnosti nejsou zaneseny v mapovém podkladu, ale mohou mít výrazný vliv na odtokové poměry v povodí.

Druhá část pracuje s podkladovými daty získanými ze ZM 10. Zdigitalizovaná data jsou doplněna o zaměřená data umělé vodoteče. Tento uměle vytvořený vodní tok rozděluje povodí Třísovského potoka. Přestože se jedná o významný prvek, který má vliv na odtokové poměry, není zanesen v mapovém podkladu. Tato nejmenovaná vodoteč byla po celé délce toku vytvořena uměle a z části je zatrubněna.

3.1 Stanovení průměrných čísel CN

Průměrná čísla CN jsou stanovena na základě dostupných tabulek. Ty stanovují hodnoty pro hydrologické skupiny půd a pro půdní kryt. Autor této práce pracuje s informacemi uvedenými v publikaci Janečka et al. (2012). Smelík (2016) potvrzuje, že za pomoci tabulky z této publikace se stanovují průměrná čísla CN. Šinka et al. (2013) doplňují tabulku o hodnoty pro jednotlivá využití podle kvality, a to jak na dobrou, tak i pro špatnou. Hodnocení kvality půdního krytu u maloplošných území doporučují provést terénním průzkumem.

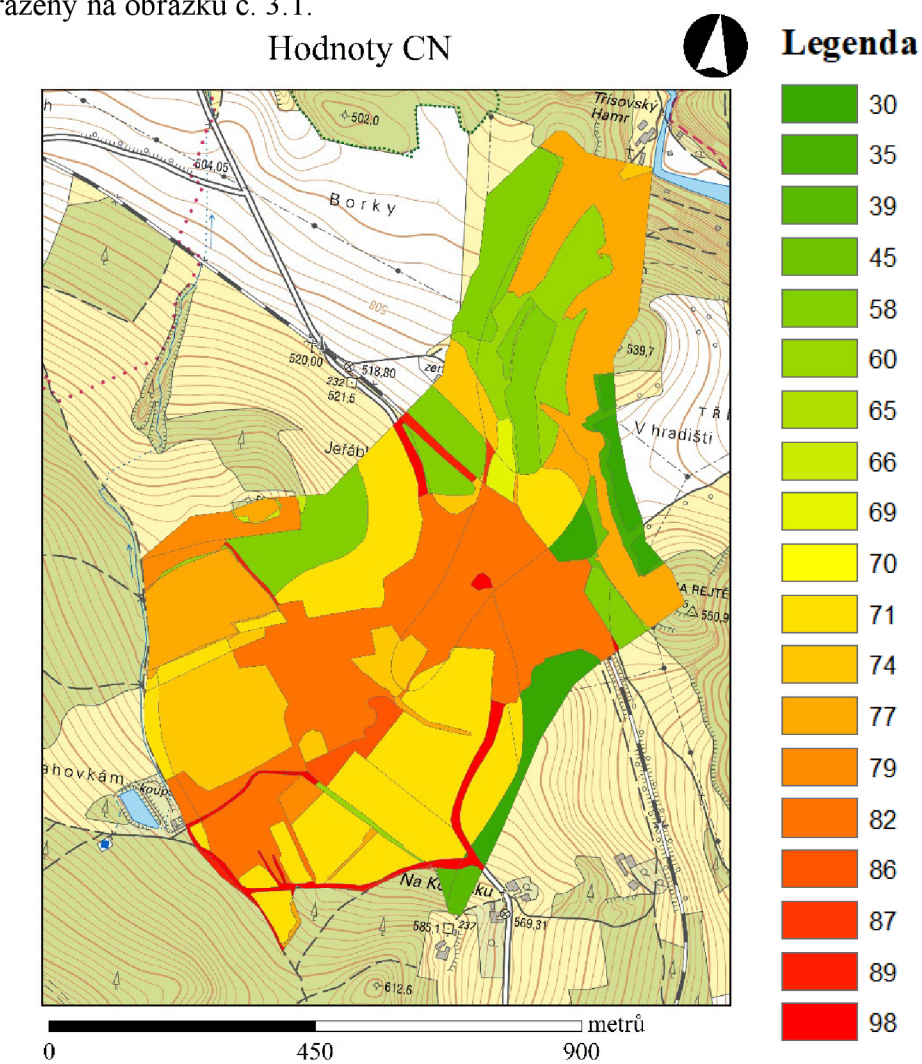
Stanovené kvality půdního krytu:

Do 50% zastoupení krytu – špatná kvalita

50 až 75% zastoupení krytu – průměrná

Nad 75% zastoupení krytu – dobrá

Pro stanovení průměrných čísel CN v programu ArcGIS bylo potřeba vytvořit topologické překrytí vrstev s vegetačním krytem a s vrstvou BPEJ. Vrstva BPEJ již obsahuje tabulku s hydrologickými vlastnostmi půd, která je potřebná. Topologické překrytí bylo vytvořeno funkcí Intersect. Tato funkce sloučila obě vrstvy do jedné. Sloučeny byly nejen atributové tabulky, ale i grafická část. Do této vrstvy byl do její atributové tabulky přidán nový sloupec. Do nově vzniklého sloupce byly dosazovány hodnoty z tabulky průměrných čísel CN. Jednotlivá čísla byla dosazována na základě využití půdy a čísel hydrologických skupin. U vodních ploch bylo počítáno s možností, že je vodní nádrž zcela naplněna vodou, a tedy nemá žádnou retenční kapacitu. K těmto plochám bylo nahlíženo jako k plochám nepropustným. Byla jim tedy přiřazena hodnota CN = 98. Po doplnění čísel CN ke všem prvkům byl tento vektorový soubor převeden do rastrové podoby, a to za pomoci funkce Polygon to Raster. Rozlišení rastru bylo stejné jako při tvorbě digitálního modelu, tedy 1 m. Výsledné hodnoty CN jsou zobrazeny na obrázku č. 3.1.



Obrázek 3.1 Stanovené hodnoty CN v povodí Trisovského potoka (Plic, 2023)

3.2 Výpočet odtokových poměrů

3.2.1 Stanovení potenciální retence

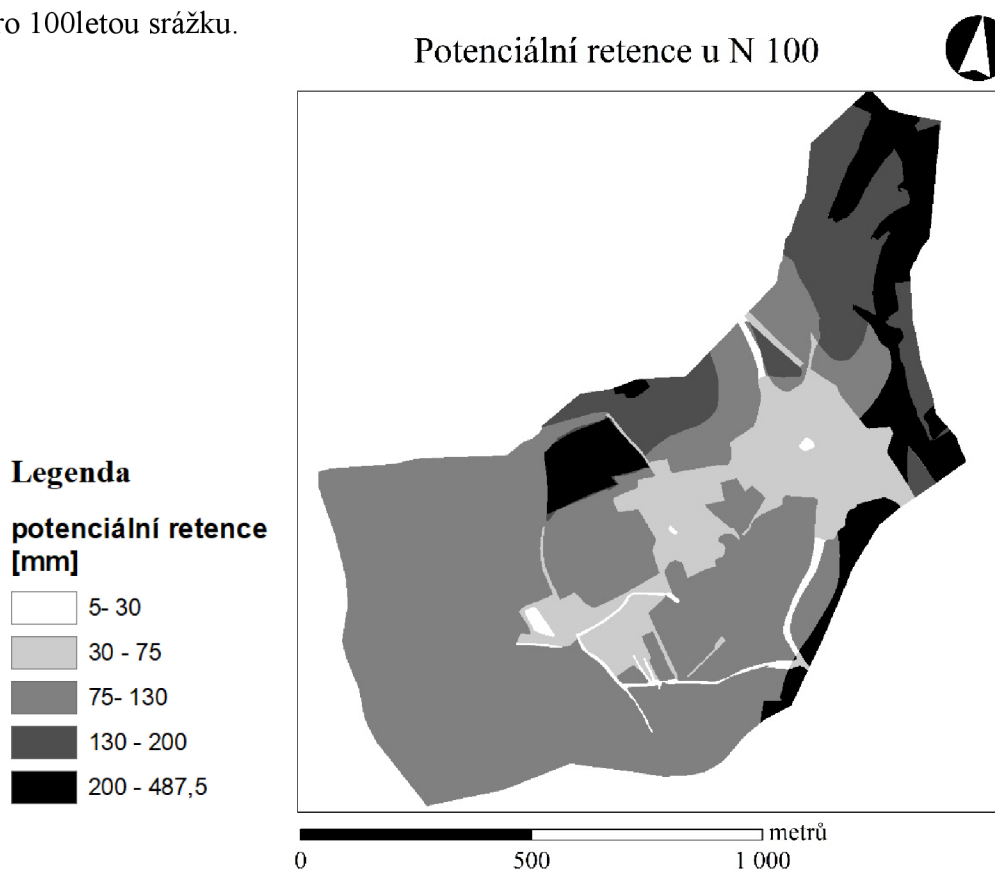
Pro stanovení CN křivek je potřeba určit hodnotu maximální potenciální retence. Určení výšky potenciální retence bylo provedeno ve výpočetní aplikaci Raster Calculator. Do této aplikace byl vložen vzorec, který byl přebrán z publikace Šinka et al. (2013), kteří se též zabývali výpočtem potenciální retence.

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

A = potenciální retence (mm)

CN = rastrová vrstva průměrných čísel CN

Základním kamenem pro výpočet této rovnice bylo stanovení hodnoty průměrných čísel CN. Po dosazení rastrové vrstvy průměrných čísel CN do vzorce v Raster Calculatoru došlo k výpočtu, jehož výstupem je nová rastrová vrstva. Vzniklá vrstva převzala atributy o rozložení a velikosti pixelů z vrstvy průměrných čísel CN. Výsledkem je stanovení hodnot potenciální retence v mm pro každý jednotlivý pixel v povodí. Každý pixel zaujímá plochu 1×1 m. Na obrázku 3.2. je zobrazena potenciální retence pro 100letou srážku.



Obrázek 3.2 Stanovení potenciální retence v zájmovém území (Plíc, 2023)

3.2.2 Výpočet výšky přímého odtoku

Výpočet výšky přímého odtoku je dalším krokem pro výpočet CN křivek. Výška nebo spíše objem přímého odtoku je stanoven prostřednictvím několika empirických rovnic, které byly vyvinuty v rámci dlouhodobého výzkumu (Smelík, 2016). Přímý odtok je pro stanovení CN křivek důležitou součástí. Je složen z povrchového a podpovrchového odtoku a je specifický především svou relativně velkou rychlostí odtoku.

Pro jeho výpočet je potřeba určit potenciální retenci a úhrn přívalové srážky. Rovnici pro výpočet uvádí Šinka et al. (2013).

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

$H_{O,P}$ = výška odtoku (mm)

$H_{D,N}$ = úhrn navrhované srážky (mm)

A = výška potenciální retence (mm)

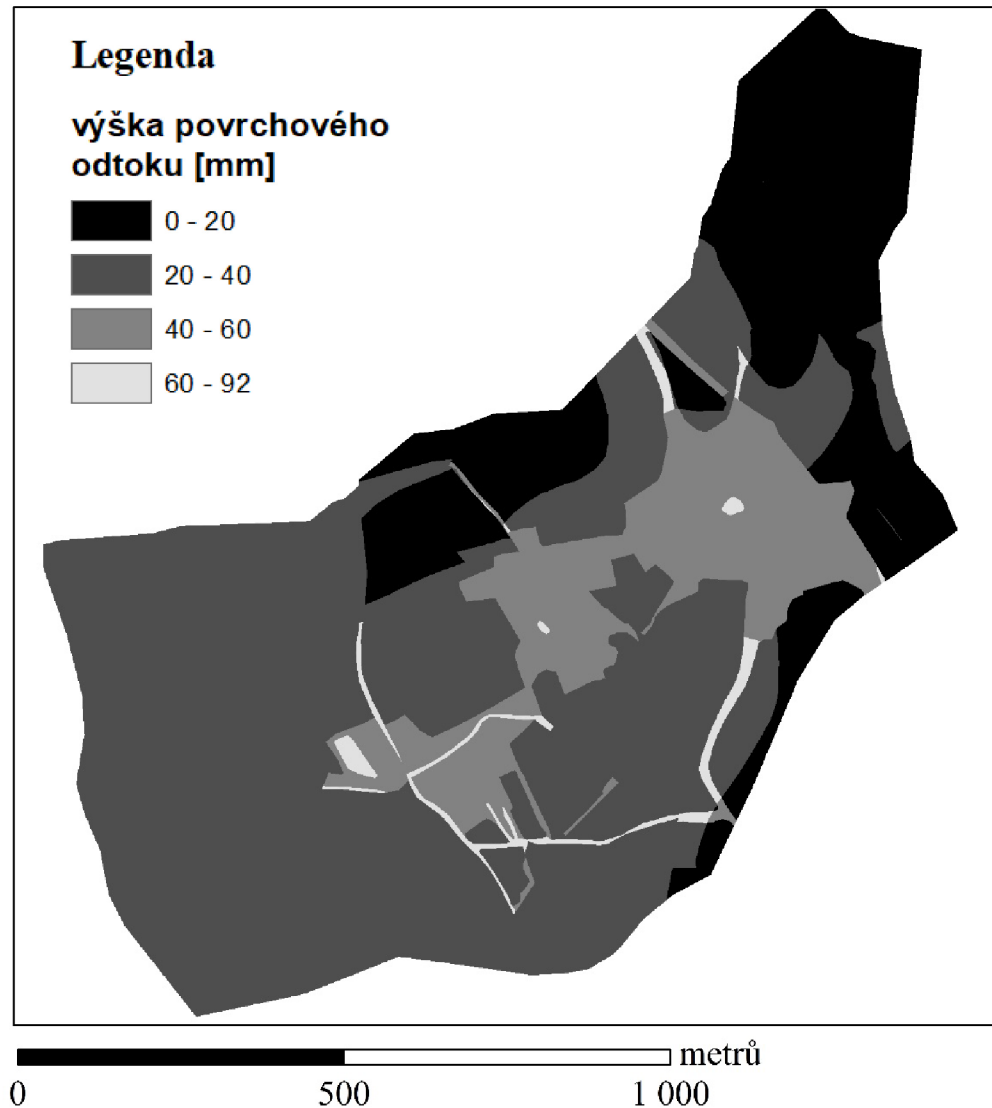
Pro výpočet výšky přímého odtoku je nutné nejprve stanovit úhrn návrhové srážky. Tento úhrn byl stanoven jako N-leté (2, 10, 20, 50, 100) srážky ze srážkoměrné stanice v Českých Budějovicích. Při výpočtu se musí zohlednit také místa s plným vsakováním vody ze srážek, jelikož v těchto místech nedochází k žádnému odtoku. Výpočet bude probíhat v rozhraní ArcGIS, proto je potřeba vytvořit polygonovou vrstvu, do které budou vloženy údaje o N-letých srážkách. Z té bude následně vytvořeno 5 rastrových vrstev. Každá vzniklá vrstva ponese jednotnou informaci o navrhované N-leté srážce. Pro určení správného množství odtoku je nutné nejprve upravit hodnoty A pro každou návrhovou srážku.

$$H_{D,N} > 0,2 A$$

V případě, že $0,2 A \geq H_{D,N}$ je $H_{O,P}$ 0. Výpočet povrchového odtoku pak proběhne v aplikaci Raster Calculator. V té byla využita funkce Con, pomocí níž bylo možné vložit příkaz, který nastaví co se stane, když $H_{D,N} < 0,2A$. Pokud tedy nastala situace, že návrhová srážka ($H_{D,N}$) byla menší, než počáteční ztráta ($0,2A$), byla návrhová srážka použitým příkazem navýšena právě na hodnotu počáteční ztráty ($H_{D,N} = 0,2A$), čímž v čitateli vzorečku pro výpočet výšky odtoku ($H_{O,P}$) vznikla nulová hodnota. Celkový výsledek je potom také nula. Proto je u těchto "upravených" pixelů nulová hodnota odtoku, protože se veškerá voda ze srážky vsákne. Výpočty jednotlivých

N-letých srážek proběhnou postupně. Výstupem získáme 5 rastrových souborů obsahujících informaci o povrchovém odtoku námi navrhovaných srážek. Výška povrchového odtoku u 100leté srážky je zobrazena na obrázku č. 3.3.

Výška povrchového odtoku u N 100



Obrázek 3.3 Výpočet výšky povrchového odtoku při 100leté srážce (Plic, 2023)

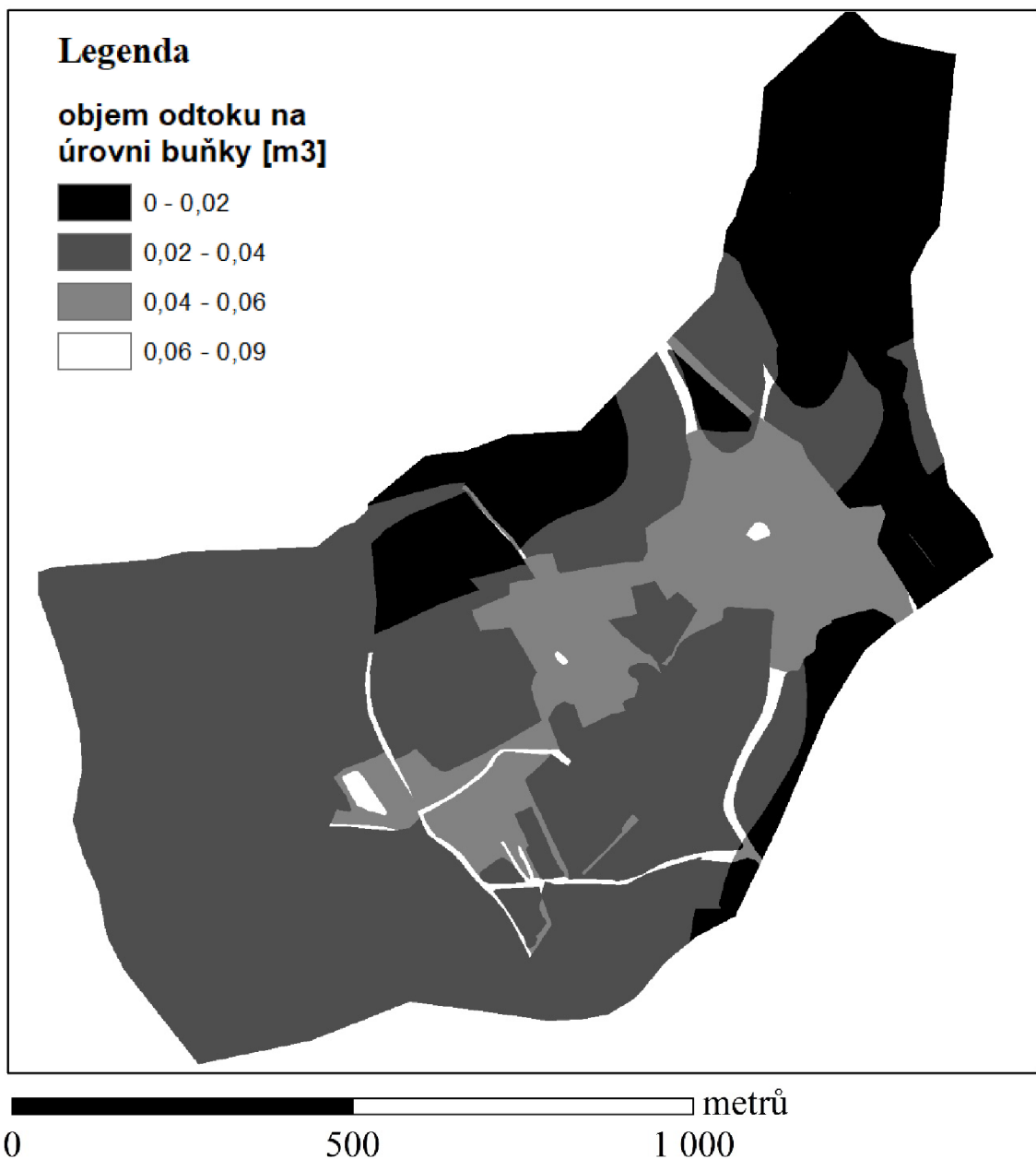
3.2.3 Výpočet objemu povrchového odtoku jedné buňky

Výpočet objemu povrchového odtoku se počítá na objem jedné buňky (jednoho pixelu). V práci je uvažováno rozlišení o velikosti pixelu 1×1 m. Obsah buňky tedy odpovídá 1 m^2 .

$$O_{buňky} = \frac{H_{O,P}}{1000} * S_{buňky}$$

Po vypočtení obsahu buňky došlo k dosazení veškerých hodnot do aplikace Raster Calculator. Pro hodnoty $H_{O,P}$ byly využity veškeré vypočtené výšky přímého odtoku, a to pro všechny N-leté srážky. Výsledkem byl vypočtený objem jednotlivých buněk pro všechny návrhové srážky. Na obrázku 3.4 je zobrazen objem jedné buňky při 100leté srážce. Po vypočtení objemu pro jednotlivé buňky došlo k vypočtení objemu povrchového odtoku celého povodí.

Objem povrchového odtoku z buňky



Obrázek 3.4 Výpočet objemu povrchového odtoku na úrovni buňky při 100leté srážce (Plíc, 2023)

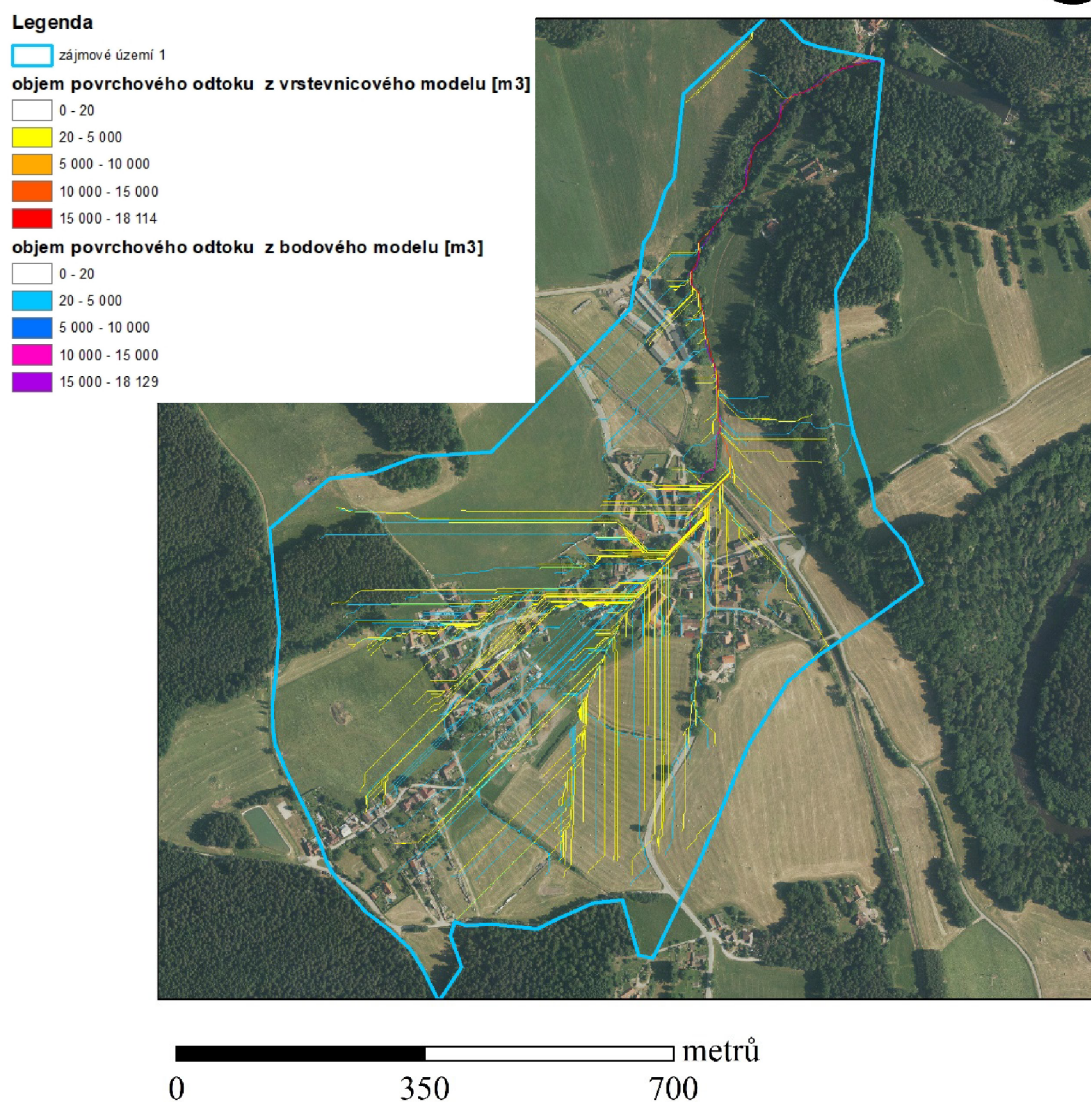
3.2.4 Výpočet povrchového odtoku z celého povodí

Dalším krokem k určení odtokových poměrů je vypočtení objemu povrchového odtoku z celého povodí.

$$O_{O,P} = \text{Flow accumulation } (O_{buňky})$$

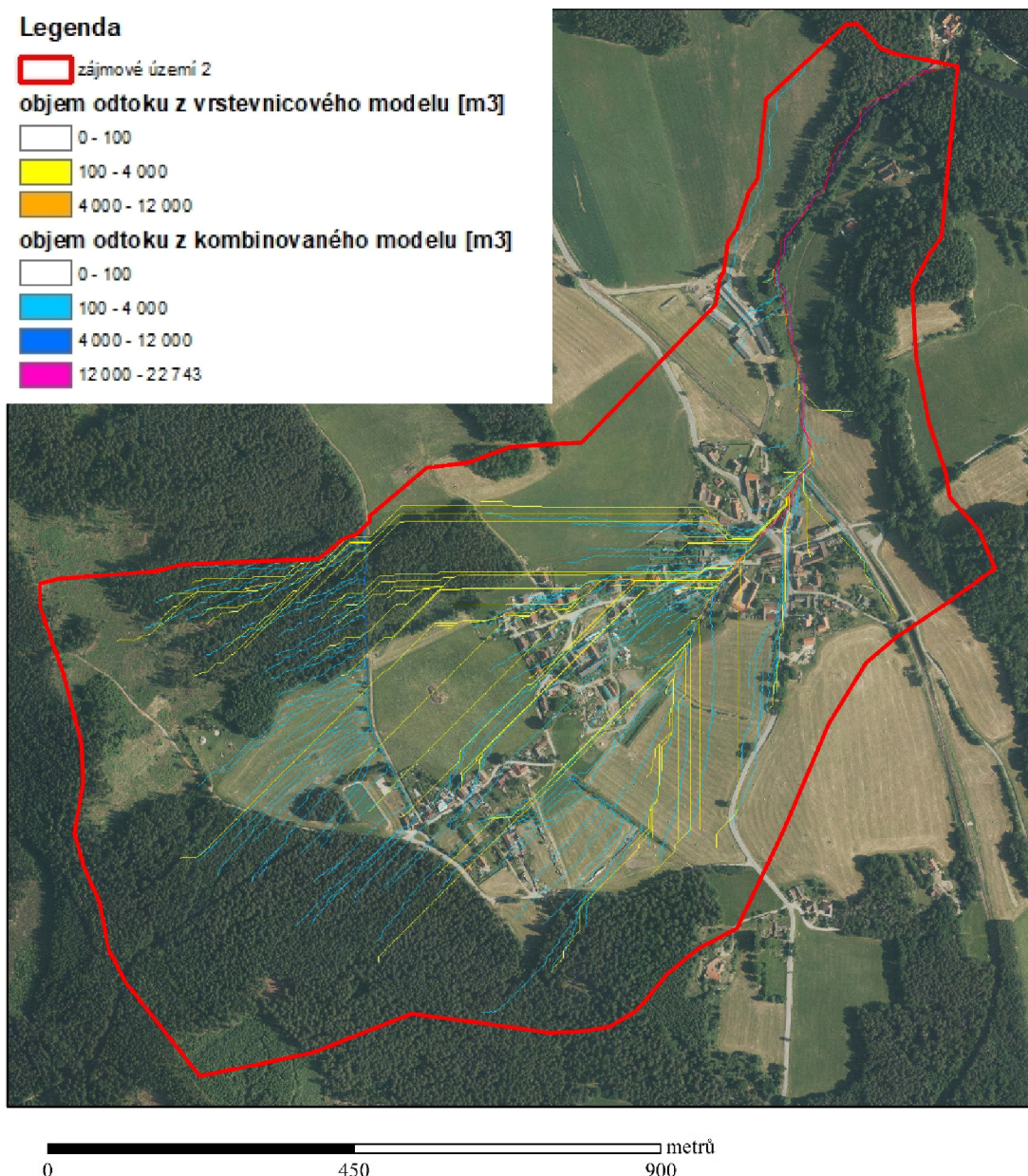
Pro dosažení hodnot do vzorce je potřeba mít vytvořený DMT, ten je jedním ze dvou vstupů. Druhým vstupem je objem povrchového odtoku na úrovni buňky. Objem odtoku na úrovni buňky slouží při výpočtu jako váha buňky. Tento výpočet je potřeba udělat pro všechny digitální modely a také pro všechny určené objemy povrchového odtoku (Šinka et al., 2013). Výsledkem jsou rastrové výkresy odtokových drah. Na obrázcích 3.5 a 3.6. jsou zobrazeny rozdíly v odtoku z celého povodí v obou částech této práce při návrhové 100leté srážce.

Rozdíly v odtokových drahách při N100



Obrázek 3.5 Rozdíly v odtokových drahách způsobené různými digitálními modely na zájmovém území 1 (Plíc, 2023)

Objem povrchového odtoku z povodí



Obrázek 3.6 Rozdíly v odtokových drahách vzniklé využitím různých digitálních modelů na zajímavém území 2 při N100 (Plíc, 2023)

3.3 Rozdíl v odtokových poměrech v závislosti na kvalitě vstupujících dat

Popis území

Povodí Třísovského potoka je charakterizováno velkým množstvím zásahů lidskou činností. Mezi největší zásahy do povodí lze zajisté zařadit železniční koridor, který mění vlastnosti v povodí kvůli vysokým násypům či výkopům. Další velmi výrazný prvek, který ovlivňuje odtokové poměry, je uměle vytvořený tok. Ten kvůli své

nepřirozené dráze rozděluje dříve jedno povodí na dvě a vytváří tak jižní hranici povodí Třísovského potoka.

Námi zkoumané odtokové poměry se rozprostírají na území o rozloze 66 ha. Povodí začíná uzávěrovým profilem, který byl zvolen u soutoku Třísovského potoka a Křemžského potoka. Poté povodí po obou stranách kopíruje přirozenou rozvodnici. Na části území je ovšem rozvodnice upravena, a to z důsledku zásahu povodí do větších lesních celků, které nebyly zaměřeny. Povodí je z vrchu ohraničeno umělým vodním tokem, který vede souběžně s vrstevnicemi a rozděluje přirozené povodí.

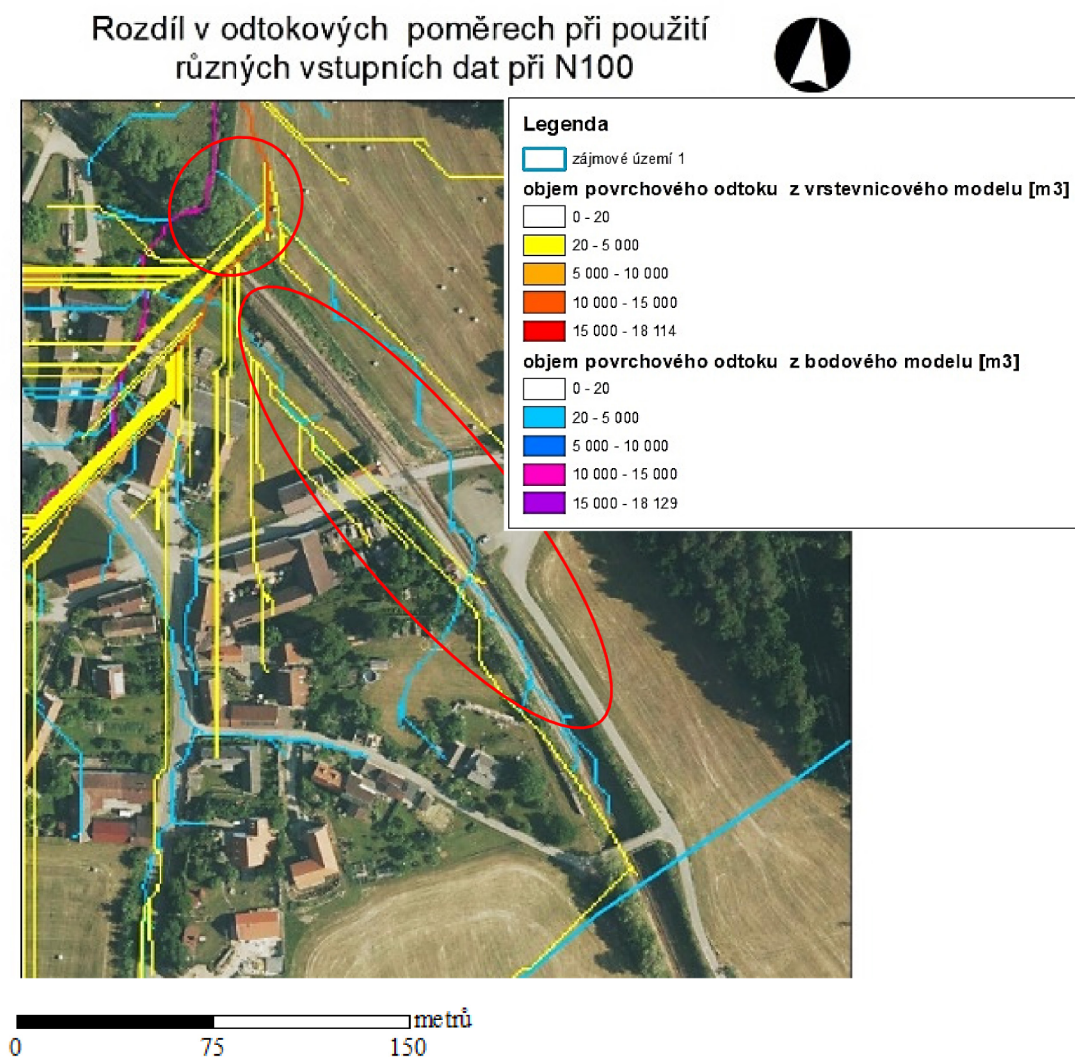
Porovnání modelů odtokových poměrů z povodí

Při porovnání modelů dochází také k porovnání dvou různých interpolačních technik. Použití různých interpolačních technik mělo také vliv na odtokové dráhy z povodí, ovšem největší rozdíly vznikaly z důvodu nízké kvality vrstevnicových dat. To potvrzují i Polidori a Hage (2021), kteří souhlasí, že interpolace má malý vliv na výsledný DMT, pokud je použito velké množství bodů. Při využití pouze řídké bodové vrstvy, interpolace může odtokové poměry zásadně ovlivnit. Dostál et. al. (2014) také tvrdí, že interpolace má zásadní vliv na odtokové poměry v případě, že je zvolena špatná interpolační metoda.

Rozdíly v odtokových drahách jsou patrné například u náspů či výkopů u dopravních komunikací, kde je zřejmá generalizace vrstevnicového DMT. Odtokové dráhy zde protékají skrze svahy a nerespektují menší terénní úpravy, které samozřejmě ve vrstevnicovém modelu nejsou zobrazeny. Meles et al. (2019) potvrzují, že při použití vstupních dat s vyšším rozlišením může docházet k přehlédnutí drobných prvků, jako jsou příkopy a silnice, což ovlivňuje algoritmus pro vytváření odtokových drah.

Největší rozdíly jsou však patrné v části kolem železnice. Přestože vrstevnice mají informaci o náspech a výkopech kolem železnice, model nedokáže správně vykreslit skutečný stav terénu. Drážní těleso přetíná povodí pomocí několikametrových náspů či výkopů. Trasa železnice začíná z jihu území výkopem, který se přibližně uprostřed území mění na násep, který pokračuje až do konce povodí. Jediné místo, které je v rovině je železniční přejezd. Odtokové dráhy z vrstevnicového modelu ovšem tento přejezd převážně ignorují a protékají i skrz okolní násypy. Největší problém ve stanovení odtokových drah nastal v překonání velkého náspu, kde je potok zatrubněn. To potvrzuje i Dostál et. al. (2014), kteří dodávají, že propustky pro tvorbu digitálního modelu

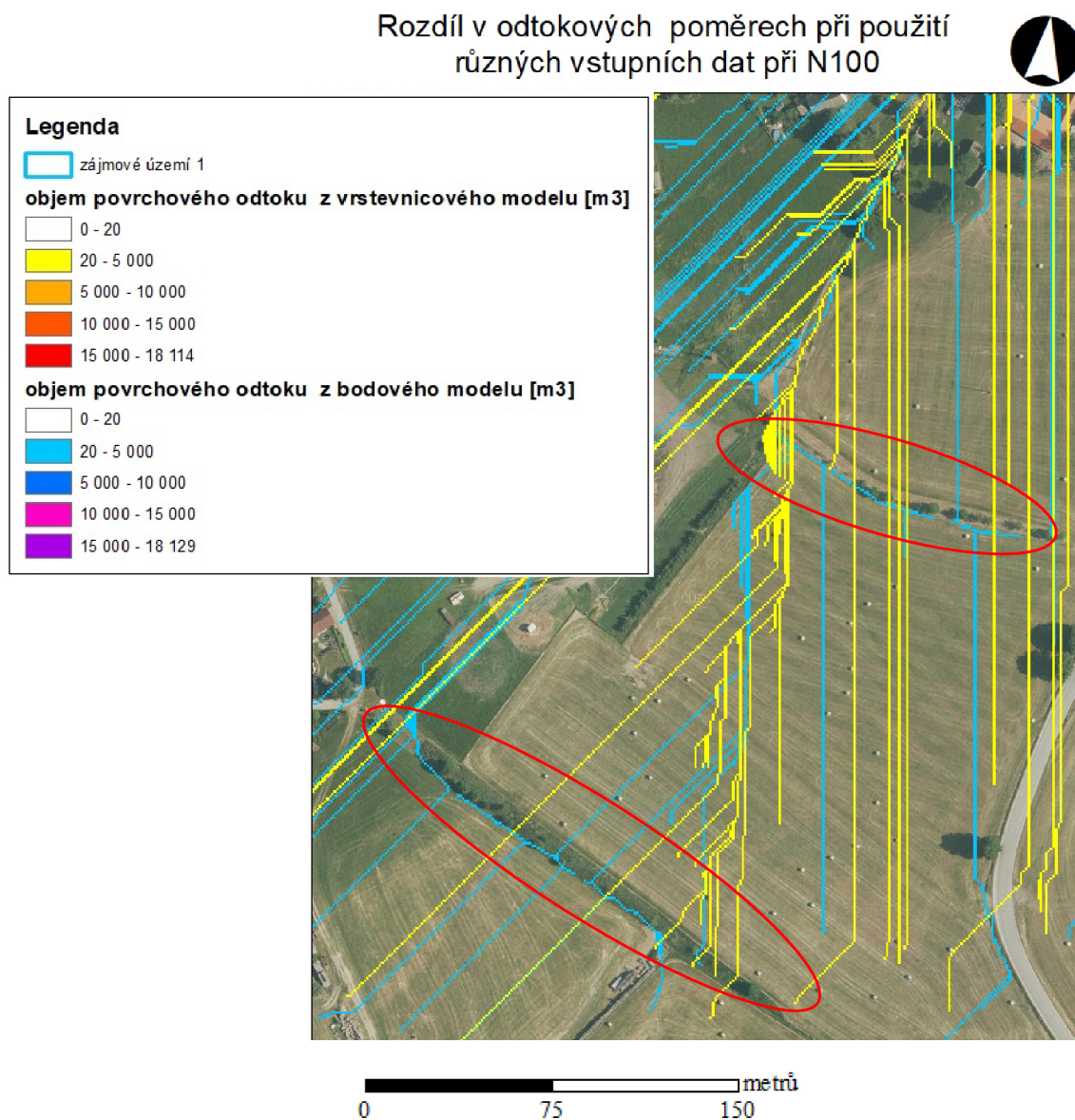
se musejí geodeticky zaměřit, jelikož vrstevnicový model nedokáže zohlednit zatrubnění. Bez zobrazení zatrubnění toku není možné vytvoření reálných odtokových drah. V tomto případě nastává situace, že voda překonává násep, což je patrné na obrázku 3.7. Násep tvoří nejméně 3 metrovou bariéru, což by v reálných podmínkách nebylo možné překonat.



Obrázek 3.7 Porovnání rozdílů odtokových drah (Plic, 2023)

Další rozdíl v odtokových drahách nastal na svahu pod Jiříčkovým vrchem. Jedná se o svah, který je trvale zatravněn a má délku 491 m. Zde v rámci společných zařízení po pozemkové úpravě byly vystavěny dvě protierozní meze, které přerušily svah na tři kratší svahy, které jsou v rozmezí 120 až 190 m. Tyto protierozní meze nejsou zobrazeny ve vrstevnicovém modelu. Meze byly realizovány jako protipovodňové meze. Jejich součástí jsou i protierozní průlehy, které odvádějí zadržanou vodu, která je mezi zpomalena. Na následujícím snímku č. 3.8 můžeme vidět, jak odtokové dráhy z bodového modelu narážejí na vytvořené protierozní prvky a překonávají je obtečením

či průtokem naakumulovaného většího množství odtékající vody ve snížených místech. U vrstevnicového modelu tato informace o protierozních prvcích není zahrnuta, takže odtokové dráhy překonávají tyto prvky přímo, bez jakéhokoliv zpomalení nebo odvedení zadržené vody.



Obrázek 3.8 Porovnání rozdílů odtokových drah (Plic, 2023)

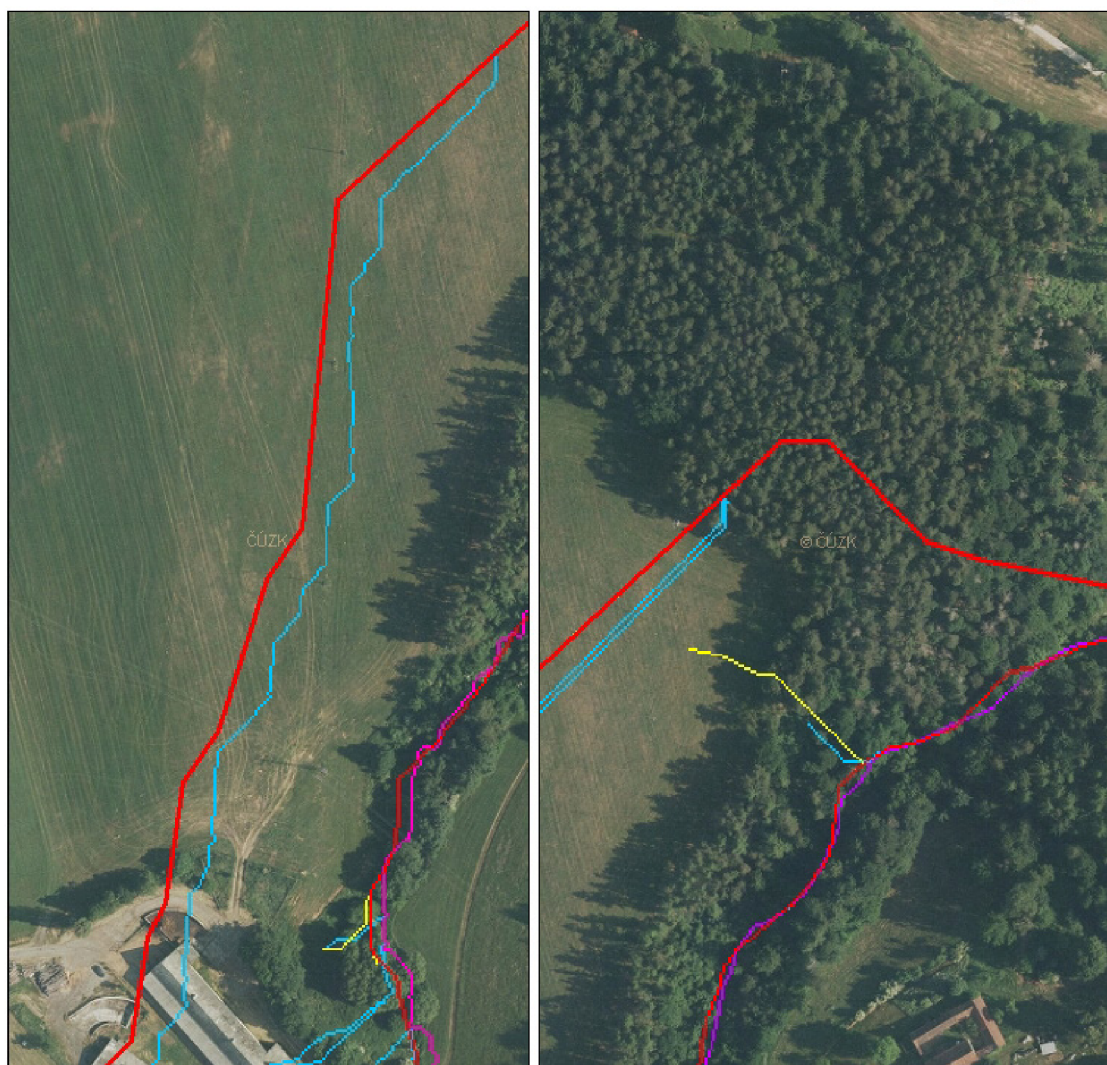
Jak uvádí Janeček et al. (2012) vliv protierozních opatření na pozemcích je značný. Využitím technických opatření dochází ke zmenšení délky svahu a tím i ke snížení eroze půdy. Lze tedy předpokládat, že jak protierozní prvky, tak veškeré terénní hrany, jako například násypy či výkopy mají vliv na odtokové dráhy. V případě, že nejsou tyto

svahy zaneseny nebo správně vykresleny v podkladových datech a zpracovatel neprovedl průzkum terénu a nedoměřil tyto prvky, může při tvorbě DMT docházet k vytvoření modelu bez těchto prvků. Což je při výpočtu odtokových charakteristik, jako jsou například odtokové dráhy, eroze nebo doba odtoku, zdrojem nepřesností a chyb, které vedou ke zkreslení výsledků, které neodpovídají skutečnosti. Dostál et. al. (2014) dodávají, že vlastní zaměření pomocí geodetických metod je optimální zdroj dat z pohledu přesnosti. Avšak pro větší území je finanční i časová náročnost na sběr těchto dat tak vysoká, že se od této metody obvykle ustupuje. Pro větší povodí se využívá méně náročných metod, které jsou dostatečně přesné pro další hydrologické práce s digitálním modelem povodí.

Objem odtoku z povodí

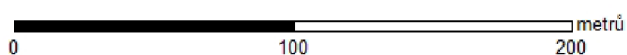
Model CN nepracuje s časem, za jakou dobu voda do uzávěrového profilu doteče, proto by v obou modelech měl být při všech návrhových srážkách stejný odtok z obou povodí. Tomu však tak není. Rozdíl v objemu odtoku je způsoben přesností měření jednotlivých metod. Jelikož povodí bylo vymezeno za pomoci vrstevnic, díky vyšší přesnosti měření, a také kvůli nerovnosti terénu je zřejmé, že při vymezení povodí z bodového DMT by mělo v některých částech jiný průběh. Toto tvrzení potvrzuje i studie Šťovíčka (2022), který zkoumal vliv vstupních dat při tvorbě rozvodnic a dospěl k závěru, že s odlišnou přesností měření se velikost povodí mění. Na obrázku č. 3.9 je patrné, že část odtoku z DMT ze zaměřených bodů odtéká již do vedlejšího povodí. To nastává v situacích, kde je povodí vytvořené pomocí vrstevnic značně širší, než by mělo být ze zaměřených bodů. Avšak v území je možné najít i situace, kde by povodí mělo být rozšířeno pro bodovou vrstvu. To nastává v situacích, kdy odtok vystupuje směrem z povodí a po určité době se do povodí opět navrácí. Jelikož došlo k ořezu povodím, je tento odtok rozpojen a ve vytvořeném modelu jsou brány jako dvě různé odtokové dráhy, kdy jedna jde směrem do povodí a druhá z něj vystupuje.

Rozdíly ve velikosti povodí




Legenda


 zájmové území 2



objem odtoku z vrstevnicového modelu [m³]

 0 - 100

 100 - 4 000


 4 000 - 12 000

objem odtoku z kombinovaného modelu [m³]

 0 - 100

 100 - 4 000

 4 000 - 12 000

 12 000 - 22 743

Obrázek 3.9 Rozdíly ve velikosti povodí (Plíc, 2023)

Rozdíly v objemu odtoku nerostou konstantně, ale jsou proměnlivé. Celkový přímý odtok z povodí se pak lišil v průměru o 0,16 %. Výsledné odtoky při N letých srážkách jsou pro jednotlivé modely sepsány v níže uvedené tabulce č. 3.1.

Tabulka 3.1 Celkový odtok ze zájmového území (Plíc, 2023)

| N – leté srážky | 2 | 10 | 20 | 50 | 100 |
|--------------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Vrstevnicový model [m ³] | 2 004 | 7 548 | 10 572 | 14 644 | 18 114 |
| Bodový model [m ³] | 2 000 | 7 544 | 10 572 | 14 652 | 18 129 |

Z tabulky 3.1 je patrné, že se nejedná o velké rozdíly v celkovém odtoku z povodí. Z výstupních dat je tedy zřejmé, že rozdíly při tvorbě povodí z vrstevnicových dat jsou při takto malém povodí, které zaujímá pouze plochu 66 ha zanedbatelné.

Výsledky této části diplomové práce reflektují, že DMT v zásadě nemá vliv na množství vody, která doteče do uzávěrového profilu, avšak má významný vliv na odtokové dráhy. Dostál et al. (2014) dodávají, že směřování odtoku závisí na použitém DMT, kdy je potřeba rozlišovat nedostatky v DMT od skutečné morfologie terénu. Při potřebě co nepřesnějších odtokových drah je důležité zajistit DMT s odpovídající přesností. Je patrné, že DMT z vrstevnic nemá dostatečnou přesnost například pro projekci vodohospodářských anebo technických protierozních opatření. Jelikož DMT zanedbává již vytvořené protierozní opatření, nerespektuje drobné svahy a násypy a celkově z vrstevnic vytváří velmi generalizovaný model, který by byl spíše vhodný pro užití ve velkých povodích. Při zkoumání odtokových poměrů v malém povodí, jako je tomu v této diplomové práci, tato metoda není vhodná. Pro práce v malém povodí je vhodné nejprve provést terénní průzkum společně se zaměřením. To potvrzují i Kadlec et al. (2014), kteří dodávají, že pro návrh technických protierozních opatření při výpočtu univerzální rovnice ztráty půdy hraje klíčovou roli výškopisné zaměření terénu a jeho následné převedení do DMT.

3.4 Vliv umělé vodoteče na odtokové poměry v povodí

V druhé části diplomové práce byla vytvořena rozvodnice pro celé území Třísovského potoka. Digitální model byl vytvořen ze zdigitalizovaných vrstevnicových dat. Kromě těchto vrstevnicových dat byly do modelu přidány body, které zachycovaly umělou vodoteč, která ve vrstevnicových datech nebyla zobrazena. Zaměřeno bylo dno a oba

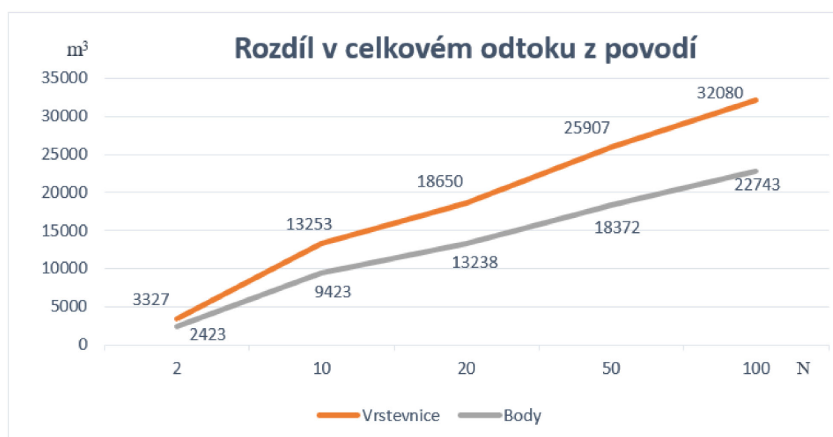
svahy. Celkem byly zaměřeny 3 body na příčném profilu toku. Jednotlivé příčné profily byly vzdálené přibližně 10 m. Převýšení toku je 21,15 m na délce toku 425 m, což činí necelý 5% průměrný sklon toku. Tok začíná vyústěním z umělé vodní nádrže, využívané převážně jako koupaliště s částečným využitím místního hasičského sboru. Tok dále pokračuje souběžně s polní cestou a po 210 m vstupuje do lesa, kde posléze opouští povodí Třísovského potoka. Tato umělá vodoteč má tedy svůj uzávěrový profil mimo povodí Třísovského potoka. Díky čemuž je množství odtoklé vody z povodí Třísovského potoka sníženo o množství vody, kterou tato umělá vodoteč zachytí.

Je pravděpodobné, že při 100leté srážce by vzniklý přímý odtok překročil maximální průtočnou kapacitu umělé vodoteče. Část vody by nebyla odvedena vodotečí pryč, ale pokračovala by v odtoku po svahu níže. Ovšem v digitálním modelu je patrné, že veškerá voda zachycena je. Jak uvádí ARCGIS⁴ (2023), program pracuje pouze s daty, která vyhodnocují váhu buněk, které tečou do níže položené buňky. Dále také dodává, že výstup z Flow Accumulation reprezentuje množství vody, které proteče danou buňkou, u které se předpokládá, že pojme veškeré dopadnuté srážky. Použitím funkce Flow Accumulation se kterou pracuje metoda CN křivek v aplikaci ArcGIS nedokážeme zhodnotit, jestli dojde k přeplnění a následnému přetečení koryta, protože se jedná pouze o modelovou situaci, která pracuje pouze s rastrovými daty. V práci jsou tedy uvedena modelová data, při kterých dochází k situaci, že veškerá protékající voda byla umělým tokem zadržena a odvedena. Výsledné celkové odtoky z jednotlivých modelů jsou zobrazeny v tabulce 3.2.

Tabulka 3.2 Celkový odtok ze zájmového území 2 (Plíc, 2023)

| N – leté srážky | 2 | 10 | 20 | 50 | 100 |
|--------------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Vrstevnicový model [m ³] | 3 327 | 13 253 | 18 650 | 25 907 | 32 080 |
| Kombinovaný model [m ³] | 2 423 | 9 423 | 13 238 | 18 372 | 22 743 |

Jak je patrné z tabulky 3.2. u 100leté vody se odtok liší o necelých 10 000 m³ odtékající vody, což tvoří více než 29 % celkového odtoku.



Obrázek 3.10 Celkový odtok ze zájmového území 2 (Plic, 2023)

Na obrázku 3.10 je patrné, že se přímky s postupně se zvyšujícími srážkami od sebe vzdalují. Jejich vzdalování je přibližně konstantní a pohybuje se lehce pod 30 %. Po analýze dat celkového odtoku z povodí je možné říct, že uměle vytvořená vodoteč slouží jako protierozní prvek i prvek protipovodňový (chrání níže položené nemovitosti před zaplavením), a to díky umístění, sklonu a natočení ke svahu.



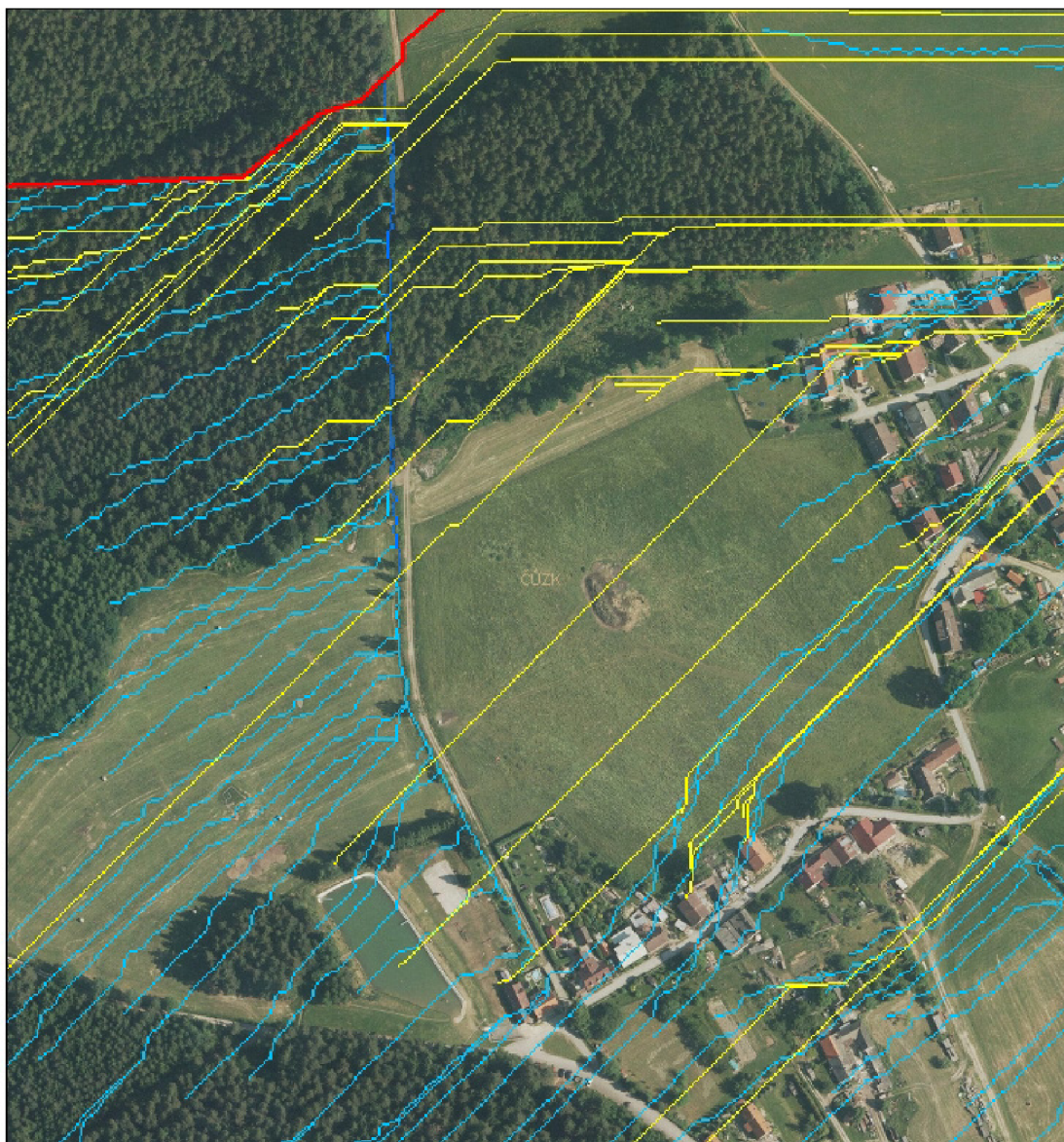
Obrázek 3.11 Fotografie umělé vodoteče (Plic, 2022)

Umělá vodoteč neslouží pouze jako prvek ke zpomalení odtoku, jako je to například u protierozních mezí, které se vyskytují v druhé polovině území, ale díky sklonu

u vybudovaného koryta dochází i k transportu vody, a to mimo námi zkoumané povodí. Průběh námi zkoumané vodoteče je zobrazen na obrázku 3.11, který zachycuje počátek umělé vodoteče těsně po vyústění výtoku z umělé vodní nádrže. Umělá vodoteč po překročení hranice povodí pozvolně sestupuje do vlastního uzávěrového profilu, který je obdobně jako u Třísovského potoku v Křemžském potoce.

Tato část diplomové práce jasně ukazuje, že provedení přesnějšího geodetického zaměření, byť jen jednoho protierozního prvku, zcela změnilo odtokové poměry v povodí, jelikož zabránilo opomenutí umělé vodoteče, která nebyla vůbec zobrazena ve vrstevnicovém modelu. Jak je patrné z obrázku 3.12, kde jsou porovnány odtokové dráhy z obou vstupních digitálních modelů, v případě doplnění jednoho prvku doměřeného geodetickým zaměřením se odtokové poměry značně změnil. Což potvrzuje i Ahmadi-sani et al. (2022), kteří uvádějí, že odtok a jeho odtokové dráhy jsou často pozměněny vlivem protierozních opatření.

Rozdíl v odtokových poměrech při zanesení umělé vodoteče



Legenda

zájmové území 2

objem odtoku z vrstevnicového modelu [m³]

0 - 100

100 - 4 000

4 000 - 12 000

objem odtoku z kombinovaného modelu [m³]

0 - 100

100 - 4 000

4 000 - 12 000

12 000 - 22 743

0 100 200 metrů

Obrázek 3.12 Porovnání rozdílů odtokových drah (Plíc, 2023)

Závěr

Tato diplomová práce zhodnotila tvorbu digitálních modelů, které se využívají při konstrukci odtokových modelů. Práce porovnává geodetické zaměření terénu oproti digitalizovaným datům z vrstevnic na modelech CN křivek v programu ArcGIS.

Práce se v literární části věnuje seznámení se s odtokem vody z krajiny a se všemi vlivy, které na odtok působí a které je potřeba zohlednit při tvorbě odtokových křivek. Dále práce popisuje jednotlivé srážko-odtokové modely, metody sběru dat pro DMT a využitelné interpolační metody.

V kapitole „Materiál a metody“ byla nejprve popsána veškerá podkladová data, ze kterých byly vytvořeny rastrové vrstvy využitě v programu ArcGIS. Po vytvoření veškerých vstupních vrstev proběhl výpočet potenciální retence, výpočet výšky přímého odtoku a výpočet objemu povrchového odtoku jedné buňky. Výsledkem bylo stanovení celkového odtoku z povodí. Tyto výpočty byly počítány pro všechny vstupní DMT a všechny návrhové srážky.

Výsledná data byla mezi sebou porovnána. V první části výsledků byly porovnány modely z vrstevnicového a z geodeticky zaměřeného DMT. Zde bylo překvapivé, jak byl DMT z vrstevnic nepřesný v odtokových drahách. Zatímco celkový odtok byl skoro totožný, odtokové dráhy zde nerespektovaly násypy či výkopy, a to i u těch, o kterých měl DMT informace. Výsledkem tohoto porovnání odtokových modelů je, že DMT z vrstevnic je pro tvorbu odtokových modelů v malých povodí značně nepřesný a je potřeba získat přesnější podkladová data pro DMT.

Druhá část výsledků této práce porovnávala DMT z vrstevnic, do kterého byla vložena geodeticky zaměřená umělá vodoteč. Tuto informaci ovšem DMT z vrstevnic neměl. Výsledkem tohoto porovnání byl zjištěný rozdíl celkového množství odtoku o necelých 30 %.

Výsledky práce tedy naznačují, že při výzkumu odtokových poměrů v malém povodí je potřeba využívat co nejpřesnější informace o morfologii terénu, jelikož i malé změny, jako například příkopy či násypy mohou mít významný vliv na odtok vody z povodí.

Seznam použité literatury

Seznam klasické literatury

AHMADI-SANI, N. et al. (2022). *Effect of Land-Use Change on Runoff in Hyrcania*. Land 11(2), 220 s.

BEVEN, K. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. John Wiley & Sons, Lancaster University, United Kingdom, Lancaster, 449 s.

BÍNOVÁ, L. et al. (2017). *Metodika vymezení územního systému ekologické stability*. Ministerstvo životního prostředí, Praha, 186 s.

BORGA M. et al. (2000). *On the use of real-time radar rainfall estimates for flood prediction in mountainous basins*. Journal of Geophysical Research: Atmosphere. 2(105). s. 2269-2280. ISSN 2269–2280

DAŇHELKA, J. (2007). *Hydrologické modely a nejistota předpovědi, Sborník prací Českého hydrometeorologického ústavu*. Operativní hydrologie, ČHMÚ, Praha, 104 s. ISBN 978-80-86690-48-3.

DAVIE, T. (2008). *Fundamentals of Hydrology*. 2. vydání. Routledge Fundamentals of Physical Geography, New York, 200 s. ISBN 0-415-39986-6.

DOSTÁL, T. (2014). *Využití dat a nástrojů GIS a simulačních modelů k navrhování TPEO: metodika*. 1. vyd. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, Praha, 69 s. ISBN 978-80-87361-30-6.

DUB, O., a Němec, J. (1969). *Hydrologie – technický průvodce 34 SNTL*. Nakladatelství technické literatury, Praha, 378 s.

HALL, F. R. (1968). *Base-Flow Recessions – a Review*. *Water Resources Research*, American Geophysical Union, 4(5). s. 973-983. ISSN 1944-7973.

CHILDS, C. (2004). *Interpolating surfaces in ArcGIS spatial analyst*. ESRI Education Services. ArcUser, July-September, **3235**(569), s. 32-35.

JANEČEK M. et al. (2007). *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, Praha, 76 s. ISBN 978-80-254-0973-2

JANEČEK M. et al. (2012). *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. Fakulta životního prostředí, Česká zemědělská univerzita Praha, Praha, 117 s.

JEDLIČKA, K. et al. (2003). *Úvod do geografických informačních systémů*. Západočeská univerzita, Plzeň, 116 s.

JENSON, S. K. a DOMINGUE, J. O. (1988). *Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis*. Photogrammetric engineering and remote sensing, **54**(11), s. 1593-1600.

JEŽEK, J. (2015). *Geostatistika a prostorová interpolace*. Karolinum, Praha, 200 s. ISBN 978-80-246-3104-2.

KADLČÍKOVÁ, J. (2007). *Testování a výběr interpolačních metod DMR v závislosti na typu georeliéfu*. Geomorphologia Slovaca et Bohemica, Geografický ústav SAV, Bratislava, 2, s. 14-18. ISSN 1337-6799.

KADLEC V. et al. (2014). *Navrhování technických protierozních opatření*. Metodika. 1. vyd. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, Praha, 100 s. ISBN 978-80-87361-29-0

KEMEL, M. (1996). *Klimatologie, meteorologie, hydrologie*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 286 s. ISBN 80-01-01456-8

KIRKHAM, M. B. (2014). *Principles of soil and plant water relations*. Academic Press, Kansas State University, Kansas, 579 s. ISBN: 978-0-12-420022-7.

KLIMÁNEK, M. (2006). *Digitální modely terénu*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno, 85 s. ISBN 978-80-7157-982-3.

KRAVKA, M. et al. (2009). *Základy lesnické a krajinářské hydrologie a hydrauliky*. Vyd. 1. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, 113 s. ISBN 978-80-7375-338-2

KUČEROVÁ, H. (2018). *Pojem modelu a pojmový model v informační vědě*. Knihovna: knihovnická revue, **29**(2). 5-32. ISSN 1801-3252

KULHAVÝ, Z. a KOVÁŘ, P. (2000). *Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí*. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, Praha, 123 s.

KVÍTEK, T. (2018). *Retence a jakost vody v povodí vodárenské nádrže Švihov na Želivce*. Povodí Vltavy, státní podnik, Praha, 44-58 s. ISBN: 978-80-270-5244-8

KVÍTEK, T. et al. (2006). *Zemědělské meliorace*. Jihočeská univerzita, Zemědělská fakulta, České Budějovice, 165 s. ISBN 80-7040-858-8

KVÍTEK, T., TIPPL, M., (2003). *Ochrana povrchových vod před dusičnany z vodní eroze a hlavní zásady protierozní ochrany v krajině*. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, Praha, 53 s.

LI, Z. et al. (2018). *An Adjusted Inverse Distance Weighted Spatial Interpolation Method*. Advances in Computer Science Research, Atlantis press, 65, s. 128-132.

LIU, J. et. al. (2018). *The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multidimensional structure analysis and scale characteristics*. Since Press, **28**(1), s. 59-78.

MAGUIRE, D. J. (1991). *An overview and definition of GIS*. Geographical information systems: Principles and applications, **1**(1), s. 9-20.

MELES, M. B. et al. (2019). *Wetness index based on landscape position and topography (WILT): Modifying TWI to reflect landscape position*. Journal of Environmental Management, 249 s.

MICOVIC, Z. (2005) *Application of GIS in the determination of probable maximum flood*. In: 2005 ESRI user conference proceedings.

MUSASHI, J. et al. (2018). *Comparison of Inverse Distance Weighted and Natural Neighbor Interpolation Method at Air Temperature Data in Malang Region*. Cauchy - jurnal matematika murni dan aplikasi, Department of Statistics, Brawijaya University, Malang, **5**(2), s. 48-54. ISSN 2477-3344.

PACINA, J. a BREJCHA, M. (2014). *Digitální modely terénu*. Univerzita J.E. Purkyně, Ústí nad Labem, 73 s. ISBN 978-80-7414-815-4.

POLIDORI, L. a EL HAGE, M. (2021). *Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review*. Remote Sensing, **12**(21), s. 3522.

ROSE, S., a PETERS, N. E. (2001). *Effects of urbanization on streamflow in the Atlanta area (Georgia, USA): a comparative hydrological approach*. Hydrological processes, **15**(8), s. 1441-1457.

ROŽNOVSKÝ, J. (2013). *Voda, půda a rostliny*. Sborník abstraktů z mezinárodní konference. 1. vyd. Nakladatelství Českého hydrometeorologického ústavu, Praha, 47 s. ISBN 978-808-7577-172.

RUDA, A., (2014). *Klimatologie a hydrogeografie pro učitele*. Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity, Brno, 257 s.

SÁRKÖZY, F. (1999). *GIS functions - interpolation*. Periodica Polytechnica Civil Engineering, Department of Surveying Technical University Budapest, Budapest, **43**(1), s. 63-86.

SERRANO, S. E. (1997). *Hydrology for Engineers, Geologists and Environmental Professionals*. HydroScience, Lexington, KY, 452 s. ISBN 0-9655643-9-8.

SCHROEDER, E. (2003). *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*. University of California, California, USA, s. 721-751. ISBN 9780122274107

SMELÍK, L. (2016). *Analýza změn odtokových poměrů pro Českou republiku*. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, **58**(4), s. 7–12. ISSN 0322-8916.

STARÝ, M. (2005). *Hydrologie*. Učební text, Vysoké učení technické v Brně, Stavební fakulta, Praha, 213 s.

STAŠEK, J. et al. (2018). *Vliv pěstovaných plodin na formování povrchového odtoku*. Hospodaření s vodou v krajině, Česká bioklimatická společnost, Praha, s. 133-143. ISBN 978-80-87361-83-2

ŠAMAJ, F. et al. (1985). *Denné úhrny srážok s mimoriadnou vydatnosťou v období 1901-1980*. Zborník Prác SHMÚ. Alfa, Bratislava, 113 s.

ŠEFRNA L. et al. (2018). *Pedologické a hydropedologické charakteristiky půd*. In: KVÍTEK, T. et al. *Retence a jakost vody v povodí vodárenské nádrže Švihov na Želivce*. Povodí Vltavy, státní podnik, Praha, s. 45-60. ISBN: 978-80-270-5244-8

ŠINKA, K., MUCHOVÁ, Z., KONC, L., (2013). *Aplikácie geografických informačných systémov v pozemkových úpravách*. Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, Nitra, 243 s. ISBN 978-80-552-1128-2

ŠŤOVÍČEK, V. (2022). *Automatické vymezení povodí na území Česka v ArcGIS Pro*. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, **64**(1), s. 4–9. ISSN 0322-8916.

TACHECÍ P. et al. (2018). *Cesty a velikost odtoku povrchových a podpovrchových vod*. In: Kvítek, T. et al. *Retence a jakost vody v povodí vodárenské nádrže Švihov na Želivce*. Povodí Vltavy, státní podnik, Praha, s. 179-188. ISBN: 978-80-270-5244-8.

TUČEK, J. (1998). *Geografické informační systémy principy a praxe*. Computer Press, Praha, 438 s. ISBN 80-7226-091-X.

URBAN, F, PÁCL, J. (2011). *Přírodě blízká protipovodňová opatření a protipovodňová opatření v pramenné části povodí Hovorčovického potoka: ČÁST A Studie odtokových poměrů v zastavěném území obce Hovorčovice*. Vodohospodářský rozvoj a výstavba, a.s., Praha, 70 s.

URBAN, J. (1991). *Digitální model terénu 1*. České vysoké učení technické, Praha, 60 s. ISBN 80-01-00553-4

VOŽENÍLEK, V. (2001). *Integrace GPS/GIS v geomorfologickém výzkumu*. Univerzita Palackého, Olomouc, 185 s. ISBN 80-244-0383-8

VYSOUDIL, M. (2013). *Základy fyzické geografie I.: Meteorologie a Klimatologie*. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 110 s. ISBN 978-80-244-3892-4

XUE, D. et al. (2021). *Impacts of climate change and human activities on runoff change in a typical arid watershed, NW China*. Ecological Indicators, 121, 107013.

Seznam legislativy

Vyhláška č. 357/2013 Sb. Vyhláška o katastru nemovitostí (katastrální vyhláška), kterou se provádí zákon č. 359/2013 Sb. Zákon o katastru nemovitostí

Zákon č. 254/2001 Sb. Zákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon)

Vyhláška č. 31/1995 Sb. Vyhláška Českého úřadu zeměměřického a katastrálního, kterou se provádí zákon č. 200/1994 Sb., o zeměměřictví a o změně a doplnění některých zákonů souvisejících s jeho zavedením.

Seznam internetových zdrojů

ARCGIS¹, (2023). *How Kriging works*. [online] [cit. 29.11.2022]. Dostupné také z: <https://desktop.ArcGIS.com/en/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm>

ARCGIS², (2023). *How Topo to Raster works*. [online] [cit. 29.11.2022]. Dostupné také z: <https://pro.ArcGIS.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-topo-to-raster-works.htm>

ARCGIS³, (2023). *Fill (Spatial Analyst)*. [online] [cit. 29.11.2022]. Dostupné také z: <https://pro.ArcGIS.com/en/pro-app/3.0/tool-reference/spatial-analyst/fill.htm>

ARCGIS⁴, (2023). *How Flow Accumulation works*. [online] [cit. 29.11.2022]. Dostupné také z: <https://pro.ArcGIS.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.htm>

ČUZK¹, (2023). *Nahlížení do KN*. [online] [cit. 10.3.2023]. Dostupné také z: <https://nahliznidokn.cuzk.cz/>

ČUZK², (2023). *ZABAGED*. [online] [cit. 10.3.2023]. Dostupné také z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(wqzayrmzqvel2yuunkrwckxq\)\)/default.aspx?mode=Text-Meta&text=dSady_zabaged&side=zabaged&menu=24](https://geoportal.cuzk.cz/(S(wqzayrmzqvel2yuunkrwckxq))/default.aspx?mode=Text-Meta&text=dSady_zabaged&side=zabaged&menu=24)

FORMZ, (2012). *Terrain model*. [online] [cit. 6.3.2021]. Dostupné také z: http://www.formz.com/manuals/formz7/!SSL!/WebHelp/10325_Terrain_Model.html

JAPAN ASSOCIATION OF REMOTE SENSING, (1996). *Digital Terrain Data*. [online] [cit.25.2.2021]. Dostupné také z: http://sar.kangwon.ac.kr/etc/rs_note/rs-note/cp6/cp6-10.htm

LPIS, (2023). *Veřejný registr půdy – LPIS*. [online] [cit. 10.3.2023]. Dostupné také z: <https://eagri.cz/public/app/lpisext/lpis/verejny2/plpis/>

SAFE SOFTWARE, (2021). *17 Ways to be a raster master*. [online] [cit. 4.3.2021]. Dostupné také z: <https://www.safe.com/blog/2014/07/raster-master/>

SPU, (2023). *Aktuální databáze BPEJ*. [online] [cit. 10.3.2023]. Dostupné také z: <https://www.spucr.cz/bpej/celostatni-databaze-bpej/aktualni-databaze-bpej-ke-sta-zeni.html>

UHUL, (2022). *Webové mapové služby*. [online] [cit. 10.3.2023]. Dostupné také z: <https://www.uhul.cz/portfolio/webove-mapove-sluzby/>

VÚMOP, (2022). *eKatalog BPEJ*. [online] [cit. 29.11.2022]. Dostupné také z: <https://bpej.vumop.cz/>

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1.1 Srážko odtokový proces (Schroeder, 2003)..... | 17 |
| Obrázek 1.2 DMT zobrazen polyedrickým modelem (sar.kangwon.ac.kr, 1996)..... | 26 |
| Obrázek 1.3 DMT zobrazen rastrovým modelem (www.safe.com, 2021) | 26 |
| Obrázek 1.4 DMT zobrazen plátovým modelem (www.formz.com, 2012) | 27 |
| Obrázek 2.1 Fotografie obce Třisov (Plic, 2022)..... | 29 |
| Obrázek 2.2 Rozvodnice Třisovského potoka zobrazeny na mapě ZM 10 (Plic, 2023) | 29 |
| Obrázek 2.3 Dokončená digitalizace dat v povodí Třisovského potoka (Plic, 2023) | 32 |
| Obrázek 2.4 Fotografie z měření výškopisu (Plic, 2022)..... | 35 |
| Obrázek 2.5 Doměření bodů totální stanicí (Plic, 2022)..... | 36 |
| Obrázek 2.6 Body využité k tvorbě DMT (Plic, 2023)..... | 37 |
| Obrázek 2.7 Povodí Třisovského potoka rozdělené na jednotlivé hydrologické skupiny (Plic, 2023)..... | 41 |
| Obrázek 2.8 Území Třisovského potoka rozdělené podle druhů pozemků (Plic, 2023) | 42 |
| Obrázek 3.1 Stanovené hodnoty CN v povodí Třisovského potoka (Plic, 2023) | 45 |
| Obrázek 3.2 Stanovení potenciální retence v zájmovém území (Plic, 2023)..... | 46 |
| Obrázek 3.3 Výpočet výšky povrchového odtoku při 100leté srážce (Plic, 2023).... | 48 |
| Obrázek 3.4 Výpočet objemu povrchového odtoku na úrovni buňky při 100leté srážce (Plic, 2023)..... | 49 |
| Obrázek 3.5 Rozdíly v odtokových drahách způsobené různými digitálními modely na zájmovém území 1 (Plic, 2023) | 50 |
| Obrázek 3.6 Rozdíly v odtokových drahách vzniklé využitím různých digitálních modelů na zájmovém území 2 při N100 (Plic, 2023) | 51 |
| Obrázek 3.7 Porovnání rozdílů odtokových drah (Plic, 2023)..... | 53 |
| Obrázek 3.8 Porovnání rozdílů odtokových drah (Plic, 2023)..... | 54 |
| Obrázek 3.9 Rozdíly ve velikosti povodí (Plic, 2023)..... | 56 |
| Obrázek 3.10 Celkový odtok ze zájmového území 2 (Plic, 2023)..... | 59 |
| Obrázek 3.11 Fotografie umělé vodoteče (Plic, 2022) | 59 |
| Obrázek 3.12 Porovnání rozdílů odtokových drah (Plic, 2023)..... | 61 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 2.1 Ukázka protokolu vyhotoveného GNSS stanicí (Plic, 2022)..... | 35 |
| Tabulka 2.2 Úhrny návrhových N-letých srážek (Plic, 2023) | 39 |
| Tabulka 3.1 Celkový odtok ze zájmového území (Plic, 2023) | 57 |
| Tabulka 3.2 Celkový odtok ze zájmového území 2 (Plic, 2023) | 58 |