

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky

**GEOINFORMATICKÉ PŘÍSTUPY PRO
ANALÝZU RETENČNÍ FUNKCE KRAJINY**

Bakalářská práce

Jan PROCHÁZKA

Vedoucí práce: doc. RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D.

Olomouc 2018

Geoinformatika a geografie

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou retenční funkce krajiny pomocí daných GIS nástrojů. Těmito nástroji jsou InVEST SDR, TerrSet, WaTEM/SEDEM a ArcGIS. Cílem je provedení výpočtů retenční funkce krajiny v každém z daných nástrojů a jejich vzájemné porovnání ve smyslu použitých algoritmů, náročnosti přípravy dat a výsledných hodnot retence. V práci jsou popsány metody a použité přístupy pro analýzu retenční funkce krajiny, popsána vstupní data a způsoby jejich přípravy, jednotlivé použité nástroje včetně jejich algoritmů a také postupy samotných výpočtů. Výsledky výpočtů v jednotlivých modelech byly mezi sebou vzájemně porovnány a zhodnoceny.

KLÍČOVÁ SLOVA

retenční funkce krajiny; eroze; analýza; InVEST; WaTEM/SEDEM

Počet stran práce: 67

Počet příloh: 6 (z toho 2 volné)

ANOTATION

This bachelor thesis deals with analysis of retention function of the landscape using given GIS tools. These tools are InVEST SDR, TerrSet, WaTEM/SEDEM and ArcGIS. The aim is to perform calculations of retention function of landscape in each of the given tools and their mutual comparison in terms of used algorithms, the complexity of data preparation and the resulting values of retention. The thesis describes the methods and approaches used for analysis of retention function of landscapes, the input data and methods of their preparation, the given GIS tools used, including their algorithms, as well as the calculations themselves. The results of the calculations in each model were compared to each other and evaluated.

KEYWORDS

retention function of landscape; erosion; analysis; InVEST; WaTEM/SEDEM

Number of pages: 67

Number of appendixes: 6

Prohlašuji, že

- bakalářskou práci včetně příloh, jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu,
- jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo,
- beru na vědomí, že Univerzita Palackého v Olomouci (dále UP Olomouc) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, bakalářskou práci užívat (§ 35 odst. 3),
- souhlasím, aby jeden výtisk bakalářské práce byl uložen v Knihovně UP k prezenčnímu nahlédnutí,
- souhlasím, že údaje o mé bakalářské práci budou zveřejněny ve Studijním informačním systému UP,
- v případě zájmu UP Olomouc uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít výsledky a výstupy mé bakalářské práce v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,
- použít výsledky a výstupy mé bakalářské práce nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem UP Olomouc, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly UP Olomouc na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Olomouci dne

Jan Procházka

Děkuji vedoucímu práce doc. RNDr. Vilému Pechancovi, Ph.D. za podněty a připomínky při vypracování práce.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan PROCHÁZKA**

Osobní číslo: **R140437**

Studijní program: **B1301 Geografie**

Studijní obor: **Geoinformatika a geografie**

Název tématu: **GEOINFORMATICKÉ PŘÍSTUPY PRO ANALÝZU
RETENČNÍ FUNKCE KRAJINY**

Zadávající katedra: **Katedra geoinformatiky**

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

Cílem bakalářské práce je analýza retenční funkce krajiny pomocí GIS nástrojů. Student provede analýzu retenční funkce zájmového území v prostředí vybraných GIS produktů (INVEST, WATM/SEDEM, TERRSET, ARCGIS). Analýze bude předcházet rešerše dané problematiky a příprava vstupních geodat. Výsledky analýzy student vyhodnotí ve dvou rovinách. V aplikační rovině budou dosažené výsledky vztahovány k aktuálním fyzicko-geografickým poměrům území. V technologické rovině student porovná použité algoritmy, způsob jejich implementace a náročnost preprocessingu dat a začlenění nástroje do širšího work-flow krajinné analýzy.

Student vyplní údaje o všech datových sadách, které vytvořil nebo získal v rámci práce, do Metainformačního systému katedry geoinformatiky a současně vytvoří zálohu údajů ve formě validovaného XML souboru. Celá práce (text, přílohy, výstupy, zdrojová a vytvořená data, XML soubor) se odevzdá v digitální podobě na CD (DVD) a text práce s vybranými přílohami bude odevzdán ve dvou svázaných výtiscích na sekretariát katedry. O diplomové práci student vytvoří webovou stránku v souladu s pravidly dostupnými na stránkách katedry. Práce bude zpracována podle zásad dle Voženílek (2002) a závazné šablony pro diplomové práce na KGI.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: max. 50 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná
Seznam odborné literatury:

Djokic, D., Maidment, D.R. (2000): Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with GIS.

Redlands: ESRI Press. 232 pp.

Guerra C. A et al. An assessment of soil erosion prevention by vegetation in Mediterranean Europe: Current trends of ecosystem service provision. Ecol. Indocator 60. 2016

Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., Iverson, L. R.: Modeling Topographic Potential for Erosion and Deposition Using GIS, In: Int. Journal of Geographical Information Science, 10(5), 1996, s. 629-641.

Singh, V. P., fiorentino, M. eds. (1998): Geographical information systems in hydrology. Water Science and technology Library. WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY LIBRARY 26 Kluwer Academic Publishers 464 pp.

Tomczyk, A., M., A GIS assessment and modelling of environmental sensitivity of recreational trails: The case of Gorce National Park, Poland , Applied Geography 31 (2011) 339-351

<http://www.crrwr.utexas.edu> - webové stránky Center for Research in Water Resources a jejich dokumenty např. Terrain Analysis.

webové stránky uvedený programů
indexované databáze

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D.
Katedra geoinformatiky

Datum zadání bakalářské práce: 15. června 2016
Termín odevzdání bakalářské práce: 5. května 2017

prof. RNDr. Ivo Frébort, CSc., Ph.D.
děkan

L.S.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA GEOINFORMATIKY
17. listopadu 50, 771 46 Olomouc
-1-

prof. RNDr. Vít Voženilek, CSc.
vedoucí katedry

V Olomouci dne 15. června 2016

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	9
ÚVOD	10
1 CÍLE PRÁCE	11
2 METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ	12
2.1 Zájmové území	12
2.2 Použitá data	14
2.3 Použité programy.....	14
2.4 Postup zpracování	14
3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	16
3.1 Problematika vodní eroze a retence sedimentů	17
3.1.1 Vstupní data a parametry	20
3.2 Použité nástroje pro modelování erozních procesů	35
3.2.1 InVEST SDR.....	35
3.2.2 Metoda USLE a SDR prostřednictvím běžných GIS.....	38
3.2.3 TerrSet	39
3.2.4 WaTEM/SEDEM.....	41
4 ANALÝZA RETENČNÍ FUNKCE KRAJINY	43
4.1 InVEST SDR.....	44
4.2 Metoda USLE a SDR prostřednictvím ArcGIS a QGIS	46
4.3 TerrSet RUSLE a SEDIMENTATION	51
4.4 WaTEM/SEDEM.....	54
5 VÝSLEDKY.....	59
5.1 Výpočty retenční funkce krajiny.....	59
5.2 Porovnání modelů v technologické rovině	64
6 DISKUZE	65
7 ZÁVĚR.....	66
SEZNAM ILUSTRACÍ	67
SEZNAM TABULEK	67
POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE	
PŘÍLOHY	

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
HPJ	hlavní půdní jednotka
BPEJ	Bonitovaná půdně ekologická jednotka
USLE	Univerzální rovnice ztráty půdy erozí
RUSLE	Revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy erozí
VÚMOP	Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy
ZABAGED®	Základní báze geografických dat České republiky
LPIS	Land Parcel Identification System (veřejný registr půdy)
SDR	sediment delivery ratio (poměr odnosu sedimentů)
DMR	digitální model reliéfu
LIDAR	Light Detection And Ranging (laserové skenování povrchu)
PTEF	parcel trap efficiency (poměr zachycení splavenin)

ÚVOD

Zemědělská půda je často nedoceneným bohatstvím Země a mělo by se na ni také tak nahlížet. Je neobnovitelným zdrojem a je základním výrobním prostředkem zemědělství a lesnictví. V současné době zrychlená vodní eroze ohrožuje asi 50 % zemědělských půd v České republice a velkým problémem je ochuzování půdy o její nejúrodnější část, kterou je ornice (Janeček, 2012). Sedimenty uvolněné při vodní erozi jsou při transportu půdy průběžně usazovány a tím způsobují znehodnocování půdy, které představuje velký problém. Jeden ze způsobů jak lze chápat retenční funkci krajiny je právě zachycení sedimentů v krajině. Porozumění toho, kde jsou sedimenty produkovány a kde usazovány je důležitým předpokladem pro zlepšení možností snížení objemu transportovaných sedimentů (Sediment Delivery Ratio Model, 2018, 2015). Modelování retenční funkce krajiny je proto důležitým parametrem, který lze sledovat v rámci modelování erozních procesů.

1 CÍLE PRÁCE

Cílem bakalářské práce je analýza retenční funkce krajiny pomocí GIS nástrojů. Student provede analýzu retenční funkce zájmového území v prostředí vybraných GIS produktů (InVEST, Watem/SEDEM, TerrSet, ArcGIS). Analýze bude předcházet rešerše dané problematiky a příprava vstupních geodat. Výsledky analýzy student vyhodnotí ve dvou rovinách. V aplikační rovině budou dosažené výsledky vztahovány k aktuálním fyzicko-geografickým poměrům území. V technologické rovině student porovná použité algoritmy, způsob jejich implementace a náročnost preprocessingu dat a začlenění nástroje do širšího work-flow krajinné analýzy.

První část práce představuje seznámení se s tématem problematiky vodní eroze a retence sedimentů a jejich výpočtů, způsoby získání vstupních dat, představení daných GIS nástrojů a jejich algoritmů a příprava vstupních geodat. Druhou částí práce je poté provedení samotné analýzy pro zájmové území v daných GIS nástrojích, vzájemné porovnání výsledků výpočtů a použitých algoritmů, porovnání náročnosti přípravy potřebných dat a celkové zhodnocení.

2 METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ

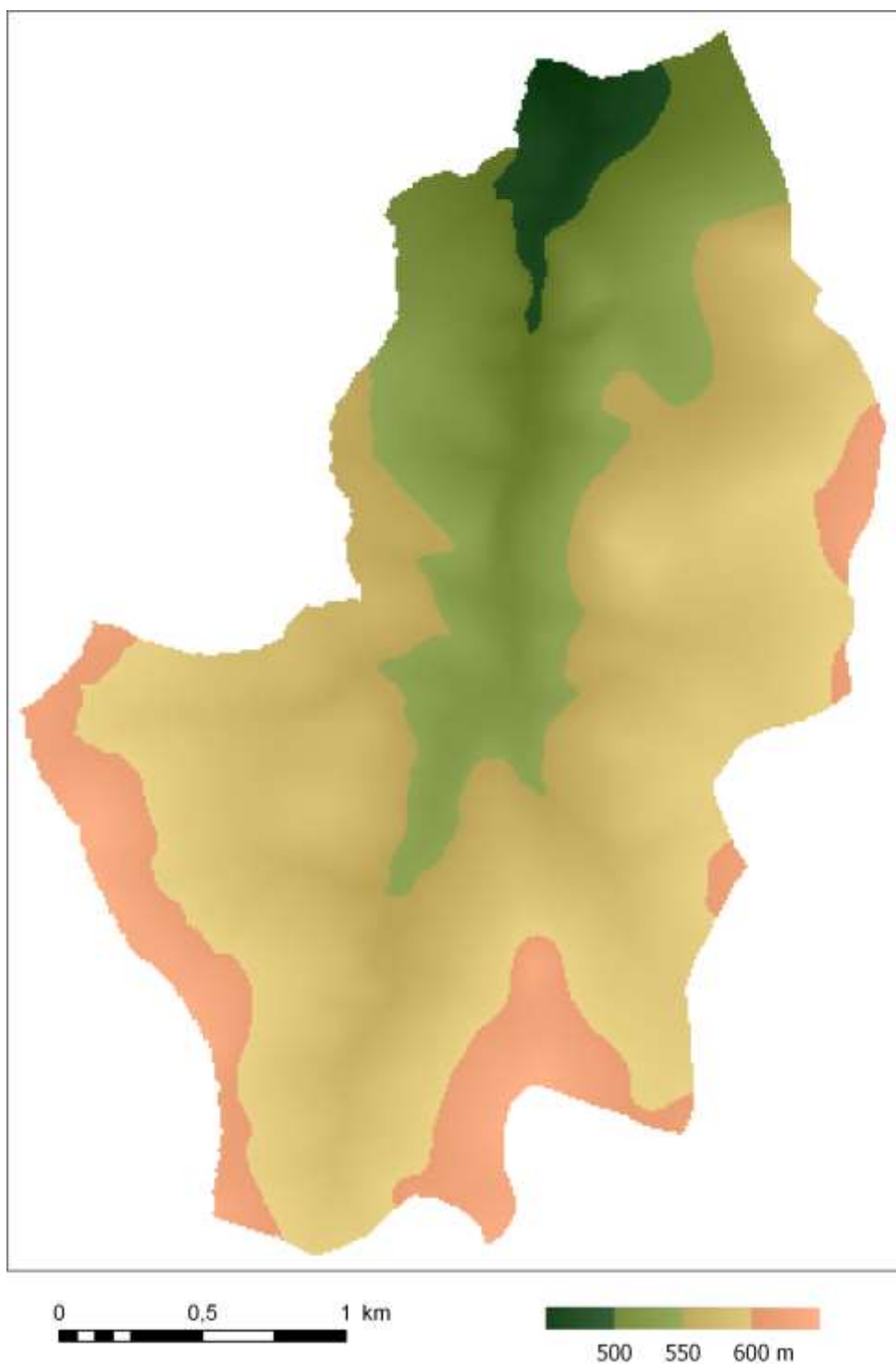
2.1 Zájmové území

Zájmové území na kterém byly prováděny všechny výpočty a porovnání je oblast o rozloze 7 km². (Obrázek č. 1) Jedná se o část povodí Kopaninského potoka rozprostírající se v okrese Pelhřimov na katastrálních územích obcí Velký Rybník u Humpolce, Chvojnov, Žirov a okrajově také Jelcovy Lhotky, Strměchy a Plevnice (Prohlížeční služba WMS pro Územní jednotky (UX), 2018).



Obrázek 1 Rozsah zájmového území (zdroj: WMS služba ZM)

Území se nachází v Křemešnické vrchovině, dle Quittovy klasifikace spadá do oblasti MT5, tedy mírně teplé klima (Quitt, 1971) a průměrná nadmořská výška je 565 m n. m. Výškové poměry území jsou zobrazeny na obrázku číslo 2. Hlavním tokem v území je Kopaninský potok, který pramení u obce Rybníček v nadmořské výšce 578 m n. m., vlévá se do Jankovského potoka a ten dále do Želivky.



Obrázek 2 Výškové poměry zájmového území (zdroj: dodaný DMR 5G)

Zkoumané území je subpovodí se závěrným profilem umístěným u vtoku Kopaninského potoka do intravilánu obce Velký Rybník, které bylo následně na okrajích území zmenšeno o 5 pixelů. Tato operace byla provedena z důvodu, že všechny použité modely potřebují pro správné provedení výpočtů digitální model reliéfu přesahující zkoumané území. Toto dodaný digitální model reliéfu nesplňoval a aby byla podmínka splněna, musel být rozsah zájmového území zmenšen o několik pixelů. Všechny výsledky jsou tedy vztažené k tomuto, zmenšenému území. Na zkoumaném území jsou zastoupeny jak zemědělské plochy, tak i lesy a intravilán, ale z důvodu dostupnosti dat BPEJ pouze pro zemědělské plochy jsou výsledky výpočtů omezeny pouze pro tyto zemědělské plochy.

2.2 Použitá data

V práci byla použita data z různých zdrojů, která sloužila jako zdrojová data pro následnou tvorbu vstupů jednotlivých modelů. Příprava vstupních dat byla podstatnou částí práce a způsoby získání a tvorby dat jsou blíže uvedeny v kapitole č. 3.1.1. Veškerá data byla pro potřeby práce poskytnuta vedoucím práce.

Základem všech analýz při modelování erozních procesů je přesný digitální model reliéfu. V této práci byl použit vyhlazený digitální model reliéfu DMR 5G ve formě rastru s prostorovým rozlišením 10×10 m, který byl dodán Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půd. Další důležitou vrstvou byla vrstva využití území, která byla vytvořena kombinací vektorové datové sady ZABAGED® a vektorové vrstvy veřejného registru půdy LPIS. Důležitou částí dat pro modelování erozních procesů jsou data o půdě, která byla získána z vektorové vrstvy jednotek BPEJ. Pro potřeby práce byly také dodány vrstvy LS faktoru a C faktoru, které ale nakonec v práci byly použity pouze pro ověření při tvorbě konečných vstupních dat.

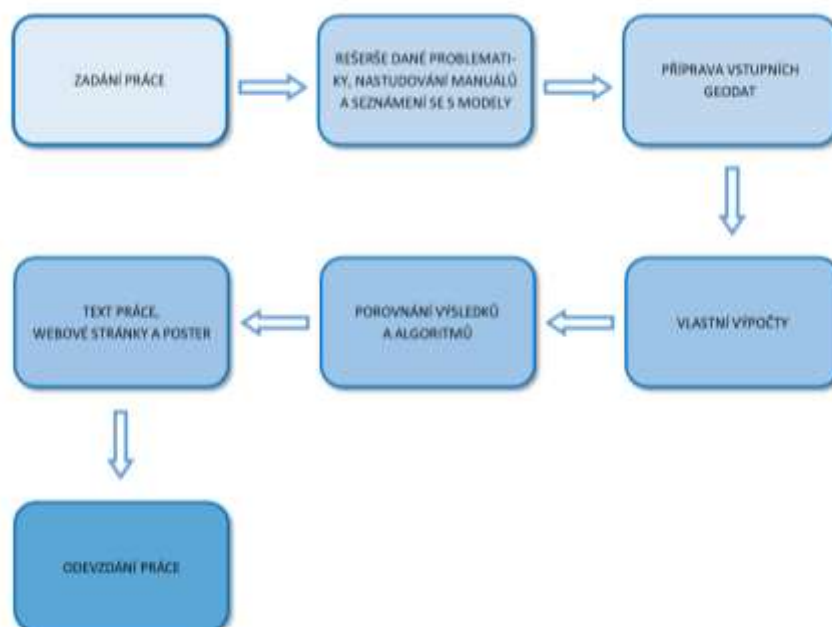
2.3 Použité programy

Pro zpracování a interpretaci dat a také pro samotné sestavení modelu a výpočet byly použity programy firmy Esri ArcGIS for Desktop 10.4 a poté ArcGIS Pro 2.1.2. Dalším použitým programem byl QGIS 2.18 a poté i verze 3.0, které byly použity pro výpočet LS faktoru pro model sestavený v ArcGIS a také jako prostředek pro konverzi dat do formátu Idrisi RST, který vyžadují programy TerrSet a WaTEM/SEDEM. Programy použité pro výpočet erozních procesů a retenční funkce krajiny byly volně dostupné nástroje InVEST SDR verze 3.3, WaTEM/SEDEM v. 2.1 a poté placený program TerrSet 18.7, který byl spuštěn ve 30 denní zkušební verzi. Pro textovou část práce byl použit Microsoft Word 2016 a pro tvorbu tabulek Microsoft Excel 2016.

2.4 Postup zpracování

Prvním krokem práce bylo nastudování potřebné literatury a zorientování se v tématu problematiky eroze. Tato fáze byla součástí všech dalších kroků. Po seznámení a zorientování se v tématu bylo provedeno seznámení s jednotlivými modely a následně pokusy se spuštěním testovacích dat, pokud byla tato data

dostupná. Následně proběhla příprava vstupních dat a průběžně vždy pokusy o spuštění jednotlivých modelů. Následně byla data odladěna do finální podoby a provedeny vlastní finální výpočty v jednotlivých modelech. Po provedení výpočtů byly výsledky interpretovány a převedeny do podoby umožňující vzájemné srovnání a výsledky vzájemně porovnány. Dále bylo provedeno srovnání použitých algoritmů, sepsána textová část práce, vytvořeny webové stránky a poster a práce odevzdána. Postup zpracování je znázorněn na obrázku č. 3.



Obrázek 3 Postup zpracování práce (zdroj: vlastní tvorba)

3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Eroze a retence sedimentů v půdě jsou přírodní procesy, které řídí koncentraci sedimentů ve vodních tocích. Tyto pojmy spolu úzce souvisí, retenci sedimentů je v této práci myšleno jejich zachycení v krajině, v důsledku jejich uvolnění z půdy vodní erozí. Vodní eroze různých typů je hlavním zdrojem sedimentů v povodí, ale ne jediným. Dynamika pohybu sedimentů v povodí je určena především klimatem (zejména intenzitou deště), půdními vlastnostmi, topografií (sklon a délka svahu) a vegetačním pokryvem spolu s antropogenními vlivy jako jsou zemědělské činnosti nebo stavba a provoz přehrad. Změna ve využívání půdy a ve způsobech obhospodařování půdy (směr orby a podobně) mohou dramaticky změnit množství sedimentů odcházejícího z povodí. Velikost této změny je primárně určena dvěma faktory. Jsou to a) hlavní zdroj sedimentů (změna ve využívání území bude hrát menší roli v povodích, kde sedimenty nepochází primárně z povrchového toku) a b) prostorové rozmístění těchto zdrojů a míst, kde se sedimenty naopak ukládají (změna ve využívání půdy bude mít menší vliv, pokud zdroje sedimentů budou chráněny vegetací) (Sediment Delivery Ratio Model, 2018, 2015).

Zvyšování celkového množství transportovaných splavenin je pozorováno na mnoha místech po světě. Retence sedimentů přírodní krajinou je oblastí velkého zájmu vodohospodářů. Porozumění, kde jsou sedimenty produkovány a kde jsou zachyceny umožňuje zlepšení strategií pro snížení objemu sedimentů. Změny objemu sedimentů mohou mít dopad na následné zavlažování, úpravu vody, rekreaci i celkové stavy vodních nádrží díky zanášení sedimenty (Sediment Delivery Ratio Model, 2018, 2015).

Retenční schopnost krajiny je tedy bezpochyby důležitý parametr, který lze sledovat, stejně jako celý proces vodní eroze půdy a transportu splavenin povodím. Tyto parametry lze poměrně jednoduše vypočítat pomocí různých empirických GIS modelů založených na bázi USLE rovnice. Do této kategorie spadají i všechny modely použité v práci, jen každý trochu odlišným přístupem.

Informace k problematice lze nalézt přímo v samotných manuálech k jednotlivým modelům, tak i ve vědeckých pracech autorů zabývajících se problematikou. Ne ke všem programům je ale zpracována dostatečná dokumentace k použitým modelům, například u TerrSet by mohly být informace o použitých algoritmech obsáhlejší. Jelikož se jedná o program se širokým spektrem využití a ne pouze specifickým software pro jeden účel (modelování eroze), není i ve velmi obsáhlém manuálu příliš informací k používaným modelům pro modelování erozních procesů. Některé informace jsou dostupné v nápovědě k modelům, ale tyto informace nejsou příliš obsáhlé.

Autorů zabývajících se problematikou vodní eroze je v České republice více, ale mezi významné určitě patří Miroslav Janeček vydávající oficiální metodiky k ochraně zemědělské půdy před erozí (Ochrana zemědělské půdy před erozí, 2012) a dále pak například Josef Krása zabývajících se problematikou modelování erozních procesů pomocí GIS přístupů ve své dizertační práci (Hodnocení erozních procesů ve velkých povodích za podpory GIS, 2004) i habilitační práci (Empirické modely vodní eroze

v ČR, 2010). Velmi podrobně je v obou pracech popsán a zpracován model WaTEM/SEDEM, včetně doporučených hodnot kalibračních parametrů.

V zahraničí je velmi významným centrem zabývajícím se problematikou vodní eroze univerzita KU Leuven v Belgii, kde působí významní vědci, kteří mimo jiné sestavili již zmiňovaný model WaTEM/SEDEM. Dále lze zmínit například práci od Lorenza Borselliho věnující se problematice propojení sedimentů s vodními toky a výpočtu indexu určujícího tuto konektivitu (index konektivity) v GIS (Borselli et al., 2008). Další významná práce je práce od Carlose A. Guerry zabývající se vlivem vegetačního pokryvu na erozi ve středomoří (Guerra, 2016).

Z Katedry geoinformatiky na Univerzitě Palackého v Olomouci se tématu eroze a krajinné analýzy věnuje například vedoucí této práce Vilém Pechanec. Ze studentských prací lze zmínit například bakalářské práce Antonína Bence zabývající se alternativními metodami určení C faktoru RUSLE rovnice (Benc, 2013) a nebo práce Tomáše Holčáka zabývající se stanovením rizik ohrožení půdy vodní erozí na základě modelu USPED (Holčák, 2013). Z katedry geografie na Univerzitě Palackého v Olomouci lze zmínit například práci Dagmar Babilonové, věnující se problematice vlivů zemědělských technik na erozi půdy (Babilonová, 2010).

3.1 Problematika vodní eroze a retence sedimentů

Eroze obecně je přirozený proces, který nelze zastavit a mění a rozrušuje se při něm zemský povrch v důsledku působení přírodních procesů jako je například působení větrů, vody, ledovců, ale i mnoha dalších vlivů. Pokud proces eroze probíhá v rovnováze s ostatními přírodními procesy, jedná se o tzv. erozi normální. Tato eroze probíhá pozvolna a není nebezpečná. Nebezpečná je ale tzv. abnormální eroze, která se projevuje výrazným zrychlením erozních procesů a způsobuje škody výrazným transportem půdních částic i chemických látek a také znečišťováním cílového prostředí sedimenty (Krása, 2004). Půdu, jakožto neobnovitelný zdroj ohrožuje velké množství vlivů. Mezi nejdůležitější zdroj degradace půdy ale v podmínkách České republiky patří vodní eroze (Novotný a kol., 2014).

Vodní eroze může být způsobena deštěm a nebo energií z tajícího sněhu. Dle Janečka (2012) je vodní eroze vyvolávána destrukční činností dešťových kapek a následným povrchovým odtokem a transportem uvolněných částic půdy. Největší vliv na uvolňování půdních částic mají dešťové kapky, ale s přibývajícím vzniklým povrchovým odtokem se tento vliv zmenšuje, až je nakonec úplně eliminován. Následný transport částic je poté způsoben téměř výhradně vlivem plošného a soustředěného povrchového odtoku. Nejprve vzniká plošný povrchový odtok, který se po dosažení určité vzdálenosti (obvykle je to kritická délka svahu) spojuje do soustředěného povrchového odtoku, jehož erozní účinnost je obvykle řádově větší než u plošného povrchového odtoku. Cílem řady protierozních opatření je právě zabránění soustředěného povrchového odtoku (Krása, 2004). Vodní eroze je velmi nebezpečná pro zemědělské půdy a může být ovlivněna například pěstovanými plodinami nebo způsobem obdělávání půdy. Za posledních 30 let se degradace půdy vodní erozí výrazně zrychlila vlivem intenzifikace zemědělství a změnou pěstovaných plodin a v současné době je více než 50 % zemědělské půdy ohroženo vodní erozí

(Novotný a kol., 2014). Vliv eroze lze modelovat pomocí různých modelů založených na rozličných přístupech a s rozdílnou náročností na vstupní data.

Modely používané pro modelování eroze by se z hlediska principu na kterém jsou sestaveny daly rozdělit na modely empirické a modely fyzikálně založené. Modely empirické nepopisují proces jako takový ve fyzikální podstatě, ale jsou sestaveny na základě vyhodnocení velkého množství statistických dat. Tyto modely jsou jednoduché z hlediska použití, ale měly by být používány s ohledem na data, ze kterých byly metody odvozeny. Modely fyzikálně založené popisují skutečnou fyzikální podstatu procesu, ale mají větší nároky na vstupní data, výpočetní výkon i kvalifikaci uživatele (Krása, 2010). Všechny modely použité v této práci jsou modely empirické, jelikož základem výpočtů je Univerzální rovnice pro výpočet dlouhodobé ztráty půdy erozí (USLE) dle Wischmeiera a Smithe (1978), respektive její revidovaná verze RUSLE (Renard et al., 1997), které jsou rovnicemi empirickými.

USLE a RUSLE rovnice

USLE rovnice je v České republice podobně jako v jiných zemích používána pro určení ohroženosti zemědělských půd vodní erozí. RUSLE je revidovaná verze rovnice USLE a liší se některými vstupními parametry. U této rovnice byly vstupní parametry zpřesněny, ale z důvodu špatné dostupnosti některých vstupních dat je použití úplné rovnice se všemi parametry dle RUSLE v České republice téměř nemožné. Běžné je ale kombinování některých vstupních parametrů určených pro původní metodu USLE a některých parametrů z RUSLE. Typicky je to například upravený vztah pro výpočet faktoru sklonu a délky svahu. Obě rovnice vycházejí z principu přípustné ztráty půdy erozí na jednotkovém pozemku, jehož parametry jsou definovány a odvozeny z rozměrů standardních elementárních odtokových ploch o délce 22,13 m a sklonu 9 %, jejichž povrch je po každém přívalovém dešti mechanicky kypřen ve směru sklonu svahu jako úhor bez vegetace. Hodnota přípustné ztráty půdy je definována jako maximální velikost eroze, která umožňuje trvalé a ekonomické udržení dostatečné úrodnosti půdy (Janeček, 2012). Znění USLE i RUSLE je stejné, liší se podrobností a způsobem získání některých vstupních parametrů. Přesné znění je dáno rovnicí (Janeček, 2012):

$$G = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

kde:

- G je průměrná dlouhodobá ztráta půdy ($t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$),
- R faktor erozní účinnosti dešťů, vyjádřený v závislosti na kinetické energii, úhrnu a intenzitě erozně nebezpečných dešťů,
- K faktor erodovatelnosti půdy, vyjádřený v závislosti na textuře a struktuře ornice, obsahu organické hmoty v ornici a propustnosti půdního profilu,
- L faktor délky svahu, vyjadřující vliv nepřerušené délky svahu na velikost ztráty půdy erozí,
- S faktor sklonu svahu, vyjadřující vliv sklonu svahu na velikost ztráty půdy erozí

- C faktor ochranného vlivu vegetačního pokryvu, vyjádřený v závislosti na vývoji vegetace a použité agrotechnice,
P faktor účinnosti erozních opatření.

Výsledná hodnota je dlouhodobá průměrná ztráta půdy a udává množství půdy, které se na pozemku uvolní vodní erozí, nezahrnuje však její ukládání na pozemcích či plochách ležících níže. Rovnici nelze používat pro zjišťování ztráty půdy erozí z jednotlivých srážek nebo tání sněhu (Janeček, 2012; Krása, 2010).

Poměr odnosu sedimentů SDR

Vypočítáním rovnic USLE nebo RUSLE jsou získány pouze hodnoty půdy uvolněné z dané oblasti, nikoliv ale hodnoty transportovaných splavenin, z kterých je možné dále určit hodnoty retence. Celkové množství transportovaných splavenin se označuje jako „sediment yield“ a poměr mezi množstvím splavenin a celkovým erozním smyvem se označuje jako SDR (sediment delivery ratio – poměr odnosu splavenin). SDR může nabývat hodnot mezi 0 (zachycení veškerých částic v povodí) a 1 (transport veškerých částic uvolněných erozí) (Janeček, 2012) a lze vyjádřit jako (Krása, 2010):

$$SDR = SY / A \quad (2)$$

platí tedy:

$$SY = A \cdot SDR \quad (3)$$

- kde: SY je celkový objem splavenin za časový úsek (například $t \cdot \text{rok}^{-1}$)
A celkový erozní smyv za časový úsek (například $t \cdot \text{rok}^{-1}$)
SDR poměr odnosu splavenin pro dané povodí.

Retencí je myšleno zachycení sedimentů ve sledované oblasti. Při pohybu sedimentů povodím má na zachycení sedimentů vliv vegetační pokryv, na kterém se plavené sedimenty zachytí. Jeden ze způsobů, jak tuto retenci vypočítat je porovnáním hypotetického transportu splavenin pro povodí s holou půdou (bez uvažování vlivu vegetace a ochranných erozních opatření, tedy C a P faktoru dle USLE rovnice) a skutečným transportem splavenin (sediment yield) v tomto povodí (Guerra, 2016). Výsledkem bude příspěvek vegetace do procesu transportu splavenin. Tento přístup používá model InVEST SDR a vlastní model vytvořený pro výpočet v ArcGIS Pro (InVEST SDR, 2016).

Dalším způsobem je výpočet, který je používán v programu TerrSet, konkrétně modelech RUSLE a následně SEDIMENTATION. Zde je nejprve vypočítán erozní smyv a celkový transport splavenin pro jednotlivé, co se týče parametrů reliéfu, co nejvíce homogenní plochy (pole) a mezi těmito poli je následně porovnáván transport sedimentů ve směru odtoku. Pokud je přírůstek splavenin pro dané pole donesený z pole umístěného výše větší než vypočítaný erozní smyv v daném poli, je v daném poli převládající ukládání sedimentů (retence). Pokud je naopak odnos z pole větší

než přírůstek, je v daném poli převládající eroze. Vybráním hodnot s převládajícím ukládáním sedimentů lze získat hodnoty retence (TerrSet, 2017).

Posledním použitým přístupem je výpočet použitý v modelu WaTEM/SEDEM. Zde je nejprve vypočítána ztráta půdy metodou RUSLE, stanoveny odtokové dráhy vycházející z každého elementu povodí. Zohledňovány jsou hranice pozemků, změny kulturní a rozdílné odtokové poměry území, směr orby a cestní síť. Vytvořenými odtokovými dráhami je poté půda distribuována dokud nedosáhne vodního toku. Usazování je vypočítáno na základě stanovení tzv. transportní kapacity jednotlivých elementů, která se zadává jako vstupní parametry. Výslednou retenci je poté možné opět znázornit vybráním hodnot s převažujícím ukládáním sedimentů (Krása, 2010).

3.1.1 Vstupní data a parametry

Základní principy výpočtů erozních procesů v GIS vychází z rastrové reprezentace dat. Zájmové území je tedy rozděleno na pravidelnou čtyřúhelníkovou síť (nejčastěji čtvercovou) o určité dané velikosti buňky (prostorové rozlišení) a každá buňka (pixel) nese informační hodnotu pro data nacházející se v této oblasti. Všechny výpočty jsou poté řešeny pro každou zeměpisnou pozici buňky nacházející se v jednotlivých vstupních vrstvách (Krása, 2004). Pro správné provedení všech analýz je důležité dodržení přesně shodné polohy všech buněk v rámci jednotlivých vstupních vrstev. Pro dodržení této podmínky je nutné při přípravě dat v prostředí daného GIS programu v průběhu všech operací mít nastavený tzv. snap raster, který určuje vrstvu k jejíž poloze buněk se výsledný rastr zarovná. Toto je například u ArcGIS Pro nebo ArcMap vhodné nastavit globálně pro výsledky všech prováděných operací. Všechny vstupní vrstvy by také měly mít přesně stejný rozsah, tedy stejný počet řádků i sloupců v rastru.

Digitální model reliéfu

Digitální model reliéfu (DMR) je základní vstupní vrstvou všech modelů založených na bázi USLE rovnice. Vychází z něj například výpočet faktoru sklonu a délky svahu (LS faktor), který je jedním z nejdůležitějších vstupních parametrů ovlivňujících výsledky výpočtů erozních procesů. Všechny použité modely pracují s digitálním modelem reliéfu ve formě rastru. Klíčovým parametrem ovlivňujícím přesnost výpočtů je přesnost DMR. (Janeček, 2012). Důležité je vždy upravit DMR tak, aby byl hydrologicky korektní, tedy neobsahoval prohlubně a byla zachována návaznost toků. Na území se nesmí nacházet žádná místa s bezodtokými oblastmi. Toto je možné opatřit téměř v každém běžném GIS nástroji ať už se jedná o komerční a nebo nekomerční řešení. Velmi důležité, zejména při tvorbě DMR z bodů nasnímaných metodou LIDAR, je také najít kompromis mezi nutným vyhlazením (odstranění šumu s získání kontinuity toku) a přílišným vyhlazením (které vede ke ztrátě podrobnosti a klíčových prvků reliéfu) (Janeček, 2012). Toto je potřeba zohlednit při přípravě vstupních dat a vhodný DMR připravit vhodným interpolačním nástrojem umožňujícím zachování všech těchto podmínek. Takovým nástrojem je například nástroj Topo To Raster, který je součástí komerčních produktů ArcGIS od firmy Esri. Model slouží k interpolaci vstupních dat za účelem vytvoření korektního digitálního modelu reliéfu ve formě rastru za současného

zachování některých zvolených pevně daných prvků. V nástroji je možné provést velké množství nastavení vstupních parametrů jako je zvolení typu vstupních dat (vrstevnice, body), dodání dalších známých výškových bodů, dodání terénních hran, dodání vrstev známých vodních toků nebo vodních ploch. Nástroj při výpočtu všechny tyto parametry zohlední a výsledný DMR by měl co nejvíce odpovídat realitě a zároveň být hydrologicky korektní. Dalším důležitým parametrem DMR je jeho prostorové rozlišení. Krása (2004) doporučuje DMR při tvorbě vytvořit nejprve v co největší podrobnosti z důvodu zachování reálných sklonů a tvaru reliéfu a následně převzorkovat do požadovaného nižšího rozlišení. Přílišná podrobnost není pro výpočty vhodná, optimální se pro Českou republiku jeví prostorové rozlišení buňky 10×10 m. (Krása, 2010).

Pro veškeré výpočty v rámci této práce byl použit již hotový vyhlazený digitální model reliéfu DMR 5G s prostorovým rozlišením 10×10 m, který byl dodaný VÚMOP. Tento DMR byl dodán v projektovaném souřadnicovém systému S-JTSK/Krovak East North (EPSG: 5514) a před prováděním dalších kroků byl DMR převzorkován do systému WGS 84 UTM Zone 33N. Důležité při této operaci bylo zvolení metody Nearest neighbour, díky čemuž byly co nejvíce zachovány původní hodnoty. Na



Obrázek 4 Použitý digitální model reliéfu (zdroj: dodaný DMR 5G)

základě této vrstvy se poté odvíjel rozsah a prostorové rozlišení všech ostatních vrstev vstupujících do výpočtů. Jelikož dodaná data byla dostupná také ve formě mračna bodů, ve kterém je distribuován původní DMR 5G byla v práci zvažována tvorba nového DMR, ale po vyzkoušení několika způsobů interpolace dat bylo rozhodnuto o použití původního dodaného vyhlazeného DMR.

Vrstva využití území

Další používanou vrstvou je vrstva využití území (landuse) znázorňující rozložení využívaných typů území v rámci zájmové oblasti. Z této vrstvy jsou následně odvozovány další vstupní vrstvy potřebné pro výpočty a nebo jako například u modelu WaTEM/SEDEM i hranice mezi pozemky jakožto překážky plynulého odtoku. Tuto vrstvu je možné vytvořit třemi způsoby (Krása, 2004):

- reklasifikací dat DPZ (řízená či neřízená klasifikace)
- kombinací a aktualizací digitálních vektorových dat a následným převedením na rastr
- přímou digitalizací

V práci byla použita metoda převodu z digitálních vektorových dat. Jako vstupní data pro tvorbu vrstvy byla použita data z několika zdrojů. Základním zdrojem byla datová sada ZABAGED[®], ze které byly vybrány důležité vrstvy pro vytvoření bezešvého rastru. Dalším zdrojem byla vektorová vrstva LPIS, kterou byly aktualizovány rozsahy oblastí s ornou půdou. Na výslednou vrstvu využití území by se v rámci práce dalo pohlížet z hlediska kategorií jednotlivých území ze dvou pohledů. Z pohledu InVEST SDR a z pohledu WaTEM/SEDEM. Přesný postup vytvoření vrstvy využití území byl následovný:

1. Nejprve byly rozmyšleny kategorie budoucí vrstvy využití území a vybrány vrstvy z datové sady ZABAGED[®], které budou zahrnuty do tvorby výsledné vrstvy. Jednalo se zejména o vrstvy s polygonovou geometrií. Vrstvy využití území byly potřebným vstupem pro nástroj InVEST SDR v jiné formě než pro WaTEM/SEDEM a proto bylo nutné se na tuto problematiku podívat a vybrat konkrétní kategorie a vstupní vrstvy z pohledu každého nástroje samostatně. Kategorie pro WaTEM/SEDEM jsou přesně dané a byly zvoleny dle manuálu pro tento software (B. Notebaert a kol., 2006) a kategorie pro InVEST SDR byly zvoleny po konzultaci s vedoucím práce. Konkrétní zvolené kategorie a vstupní vrstvy, které vstupovaly do tvorby jsou zobrazeny v tabulkách č. 1 a 2.
2. Vrstvám byly poté přidány atributy dle tabulky č. 2 s názvem původní ZABAGED[®] vrstvy (NazevZAB), názvem kategorie pro WaTEM/SEDEM (NazevWat) a InVEST SDR (NazevInVes). Pro zjednodušení operace a vytvoření atributu a přidání hodnot byl sestaven jednoduchý model.
3. Po vytvoření všech atributů pro rozlišení původních vrstev byly následně všechny polygonové vrstvy sloučeny do jedné bezešvé vrstvy pokrývající celé zkoumané území (nástroj Merge).
4. Ve sloučené vrstvě se ale nacházelo několik překrývajících se oblastí, což bylo zjištěno nástrojem pro kontrolu topologie. Po zjištění o jaké vrstvy se jedná byly vybrány vrstvy s větší důležitostí a tyto poté pomocí nástroje Erase od sloučené vrstvy odmazány. Tyto vrstvy, které byly použity při operaci Erase byly následně zpět spojeny se sloučenou vrstvou. Nakonec byla znovu zkontrolována topologie.

5. Dalším krokem byly aktualizovány rozsahy oblastí s ornou půdou na aktuální dle aktuálních dat LPIS. Toto bylo provedeno opět operací Erase, čímž byly od sloučené vrstvy vyříznuty oblasti dle rozsahu vrstvy LPIS. Zbytky původních polygonů orné půdy byly poté přiřazeny k okolním oblastem a převedeny do daných kategorií. Následně byla opět sloučená vrstva spojena s vrstvou LPIS pomocí operace Merge. Všechny oblasti vzniklé z LPIS byly zařazeny do kategorie orné půdy.
6. V dalším kroku byly všem kategoriím přiděleny kódy dle potřeb jednotlivých modelů a sloučená vrstva převedena na rastr. U verze pro WaTEM/SEDEM bylo nutné zachovat hranice mezi jednotlivými pozemky v rámci orné půdy a každý pozemek tedy dostal jinou hodnotu. Toto bylo vyřešeno za pomoci pole OBJECTID. Při převodu bylo nutné dodržení přesně stejného rozsahu (stejný počet řádků i sloupců) jaký měla vrstva DMR a stejného umístění buněk. Toto bylo provedeno nastavením DMR jako tzv. snap rastru (viz úvod kapitoly 3.1.1), nastavením správné velikosti buňky a rozsahu pomocí masky vrstvy.
7. Dále musela být vrstva využití území aktualizována vybranými liniovými vrstvami, jelikož tyto by při převodu spolu s polygonovými nezůstaly zachovány. Vrstvy byly spojeny do jedné (nástroj Merge), každé vrstvě byly přidány atributy s kódem přiřazujícím vrstvy k jednotlivým kategoriím využití území a bylo přidáno pole s prioritou jednotlivých vrstev pro případ konfliktů při převodu na rastr. Nejvyšší prioritu dostaly vrstvy komunikací a nejmenší liniová vegetace. Jako kódy rozlišující příslušnost k jednotlivým kategoriím byly zvoleny extrémní hodnoty, které bylo poté možno snadno identifikovat mezi ostatními hodnotami ve výsledné vrstvě. Nakonec byla vrstva převedena na rastr dle pravidel uvedených u kroku č. 6, hodnoty NoData byly převedeny na hodnotu 0 a pomocí nástroje Raster Calculator byl proveden součet vytvořené vrstvy liniových prvků se zbytkem zájmového území vytvořeným v předchozích krocích. Po součtu byly identifikovány extrémní hodnoty označující jednotlivé kategorie liniových prvků a tyto následně reklasifikovány na správné kódy dle požadavků konkrétního nástroje. Výsledkem byla finální vrstva využití území, která je zobrazena na obrázku č. 5 nebo 6. Pro výpočty v jednotlivých modelech bylo nakonec provedeno oříznutí na potřebný rozsah zájmového území a nastavena požadovaná hodnota pro NoData.

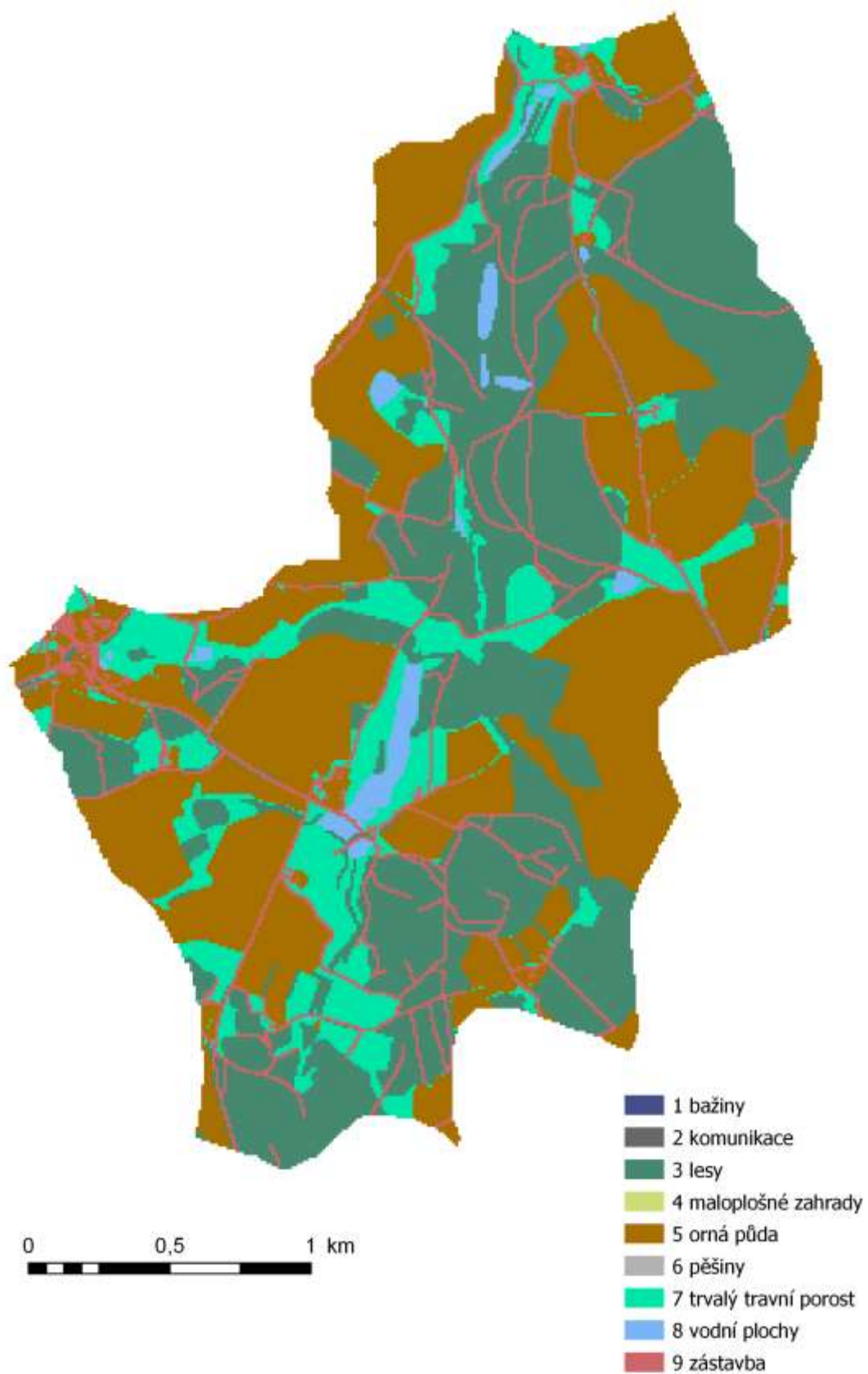
Tabulka 1 Zvolené kategorie pro výslednou vrstvu využití území

Kategorie využití území	
WaTEM/SEDEM	InVEST SDR
-2 komunikace a zastavěná území	1 bažiny
-1 vodstvo	2 komunikace
1-84 orná půda	3 lesy
10000 lesy	4 maloplošné zahrady
20000 pastviny	5 orná půda
	6 pěšiny
	7 trvalý travní porost
	8 vodní plochy
	9 zástavba

Tabulka 2 Vybrané vrstvy z datové sady ZABAGED® použité pro tvorbu finální vrstvy využití území a jejich kategorie dle nároků jednotlivých modelů

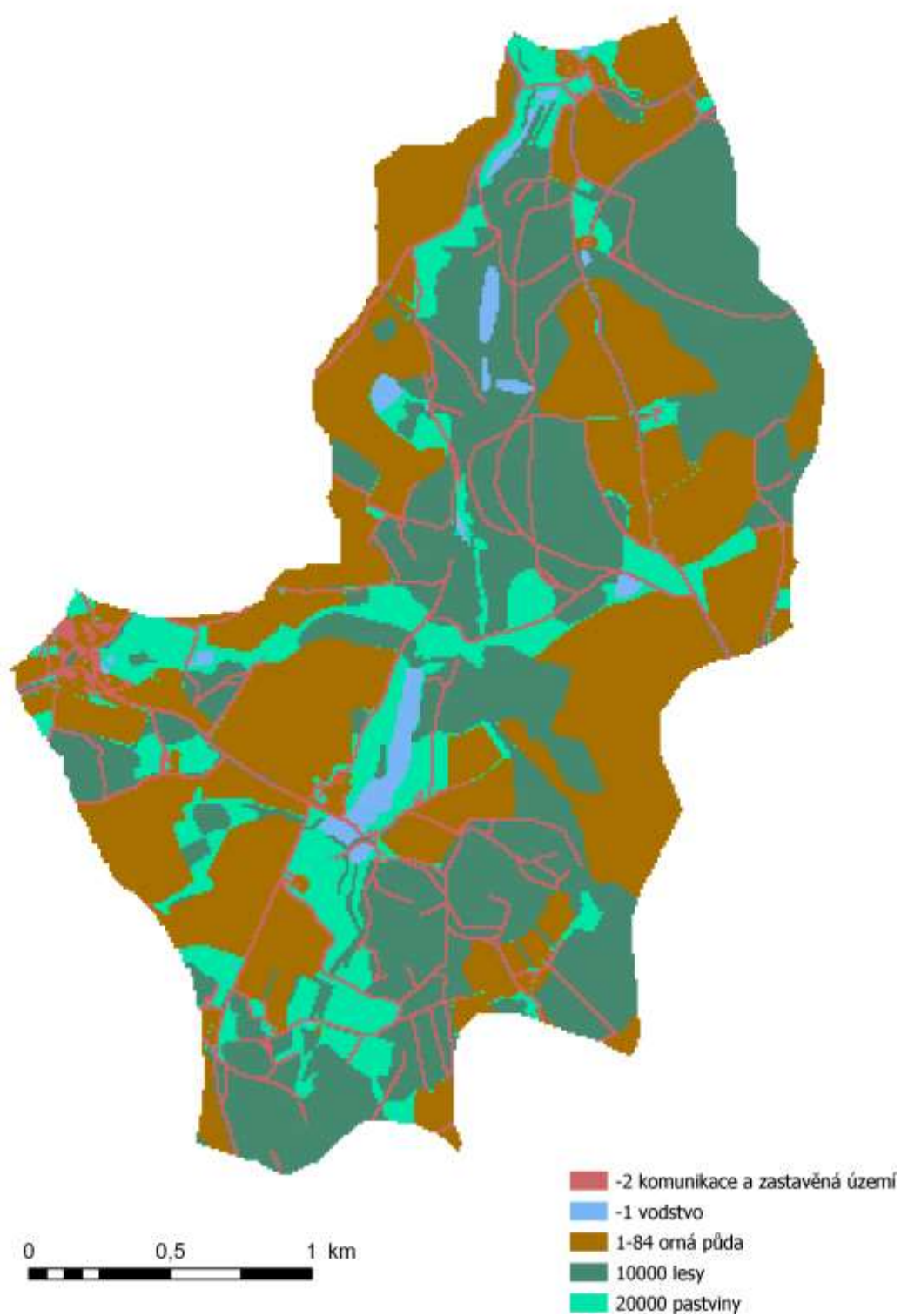
Vstupní vrstva ZABAGED ®	Kategorie využití území	
	WaTEM/SEDEM	InVEST SDR
Areál účelové zástavby	-2 komunikace a zastavěná území	9 zástavba
Bažina, močál	-1 vodstvo	1 bažiny
Budova, blok budov	-2 komunikace a zastavěná území	9 zástavba
Cesta (linie)	-2 komunikace a zastavěná území	2 komunikace
Elektrárna	-2 komunikace a zastavěná území	9 zástavba
Hřbitov	-2 komunikace a zastavěná území	4 maloplošné zahrady
Kůlna, skleník, foliovník	-2 komunikace a zastavěná území	9 zástavba
Lesní půda se stromy	10000 lesy	3 lesy
Lesní půda s křovinatým porostem	10000 lesy	3 lesy
Liniová vegetace (linie)	10000 lesy	3 lesy
Okrasná zahrada, park	10000 lesy	4 maloplošné zahrady
Orná půda a ostatní neurčené plochy	1-84 orná půda	5 orná půda
Ostatní plocha v sídlech	-2 komunikace a zastavěná území	9 zástavba
Ovocný sad, zahrada	1-84 orná půda	4 maloplošné zahrady
Pěšina	-	6 pěšiny
Silnice, dálnice (linie)	-2 komunikace a zastavěná území	2 komunikace
Silnice, neevidovaná (linie)	-2 komunikace a zastavěná území	2 komunikace
Trvalý travní porost	3 pastviny	7 trvalý travní porost
Usazovací nádrž, odkaliště	-2 komunikace a zastavěná území	9 zástavba
Vodní plocha	-1 vodstvo	8 vodní plochy

Využití území InVEST SDR



Obrázek 5 Vrstva využití území pro model InVEST SDR s uvedenými kódy jednotlivých parametrů použitých jako hodnoty rastru

Využití území WaTEM/SEDEM



Obrázek 6 Vrstva využití území pro model WaTEM/SEDEM s uvedenými kódy jednotlivých parametrů použitých jako hodnoty rastru

Jednotlivé faktory (R)USLE rovnice

Dalšími vstupy modelů založených na bázi (R)USLE rovnice jsou samotné faktory (R)USLE rovnice. Tyto parametry jsou zadávány ve formě rastru a nebo v některých případech jako konstanta pro celé zájmové území. Všechny modely použité v práci pracují na základě rovnice RUSLE, ale některé parametry nejsou pro podmínky ČR dle metodiky RUSLE použitelné z důvodu nedostatku dat. Použité rovnice jsou tedy kombinací parametrů RUSLE a USLE. Toto je možné provést díky stejnému znění rovnic. Dále bude tedy použitá rovnice zmiňována jako (R)USLE.

R faktor

R faktor je faktor erozní účinnosti přívalového deště. Vztah byl původně odvozen v USA na základě velkého množství dat o dešťových srážkách (Janeček, 2012). Výsledný faktor erozní účinnosti jednoho deště je dán vztahem:

$$R = E \cdot i_{30} / 100 \quad (4)$$

kde: R je faktor erozní účinnosti deště ($\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$),
E celková kinetická energie deště ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$),
 i_{30} maximální třicetiminutová intenzita deště ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$).

Celková kinetická energie deště E je pak dána:

$$E = (206 + 87 \log i_s) \cdot H_s \quad (5)$$

kde: i_s je intenzita deště ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$),
 H_s úhrn přívalového deště (cm).

Celková roční hodnota R faktoru se určuje z dlouhodobých záznamů o srážkách a představuje součet erozní účinnosti jednotlivých přívalových dešťů s úhrnem větším než 12,5 mm (alespoň 6,25 mm za 15 min) a oddělených mezi sebou minimálně 6 hodinami (Janeček, 2012). Dlouhodobá průměrná roční hodnota R faktoru je poté určena jako průměr ročních hodnot za celé sledované období (Krása, 2010).

Přesné určení hodnot R faktoru je podmíněno velkým množstvím dat o srážkách za dlouhý časový úsek, což je v podmínkách České republiky složité z důvodu nedostatečné hustoty sítě meteorologických stanic. Podrobněji se tématu erozní účinnosti dešťů a určení hodnot R faktoru věnoval Krása v rámci své habilitační práce (Krása, 2010). Mimo jiné se ukázalo, že dříve doporučovaná hodnota R faktoru $R = 20 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ dle metodiky Janečka (2007) je ve skutečnosti několiknásobně větší. Krása vytvořil regionalizovanou mapu R faktoru znázorňující interpolované hodnoty R faktoru pro Českou republiku, ale vzhledem k výše zmiňovanému problémům metodického a podkladového charakteru se zdá být pro většinu zemědělských ploch v ČR účelnější používat hodnotu R faktoru jako průměrnou hodnotu pro celé území doporučenou dle metodiky. Nyní doporučovaná hodnota R faktoru je $R = 40 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ (Janeček, 2012).

V této práci byl R faktor používán buď ve formě rastru s konstantní hodnotou pro celé území $R = 40 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ a nebo jako konstanta zadávaná při spuštění modelu. Tato hodnota odpovídá pro zájmové území poměrně přesně i dle výše zmiňované regionalizované mapy dle Krásky.

K faktor

K faktor je faktor erodovatelnosti půdy. Tento faktor představuje náchylnost půdy k erozi a v USLE je definován jako ztráta půdy ze standardního pozemku vyjádřená v $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ na jednotku faktoru erozní účinnosti deště $R (\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$ (Janeček, 2012).

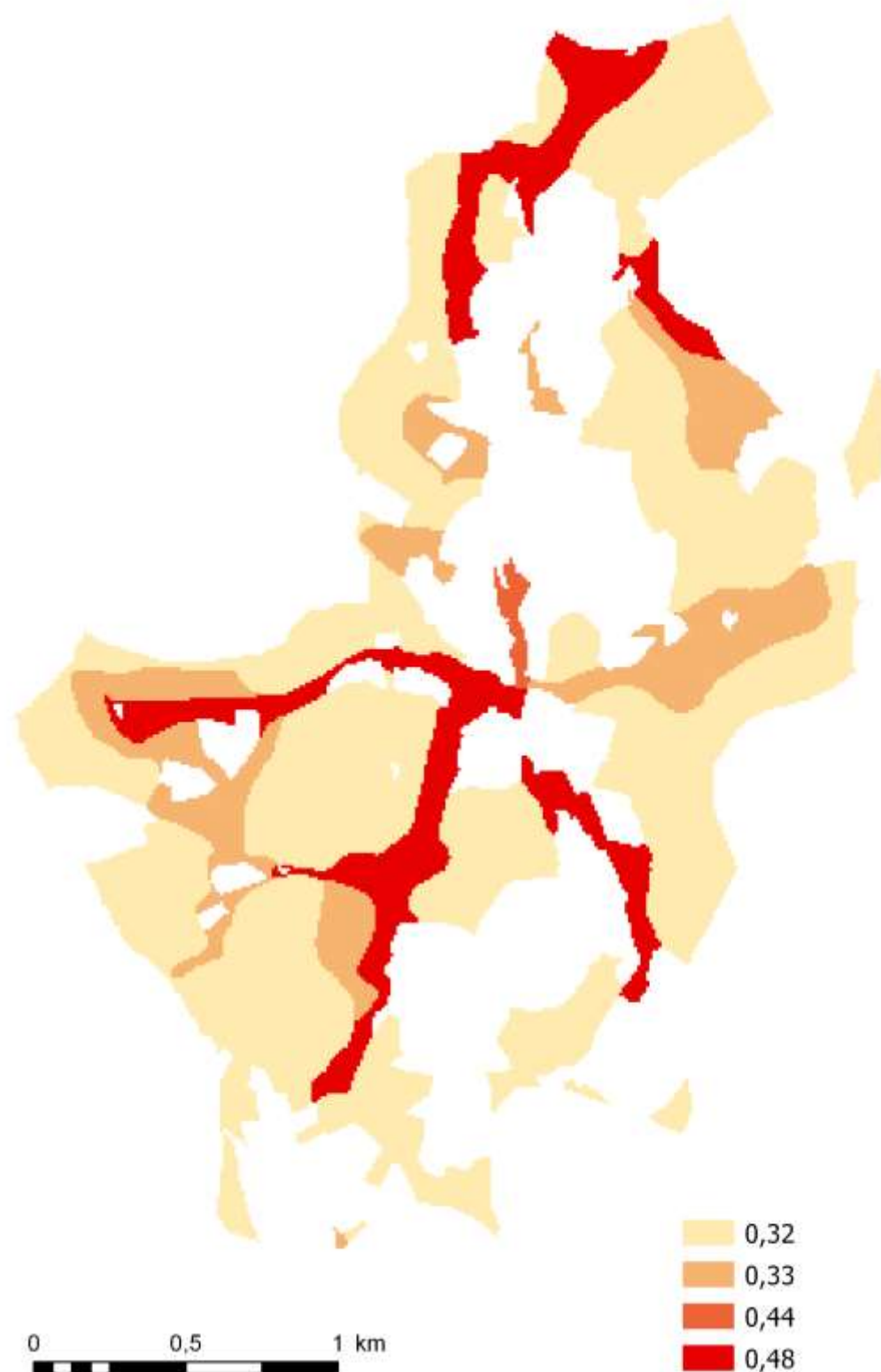
Faktor erodovatelnosti půdy lze dle Janečka (2012) určit několika způsoby:

- podle vztahu založeném na vyjádření procentického obsahu prachu, práškového písku, jílu, procentuálním obsahu humusu, třídě struktury ornice a třídě propustnosti půdního profilu. Vztah je popsán podrobně v metodice (Janeček, 2012),
- podle nomogramu uvedeného ve zmiňované metodice,
- přibližně podle hlavních půdních jednotek (HPJ) bonitační soustavy půd,
- nebo podle půdních typů, subtypů a variet Taxonomického klasifikačního systému půd ČR.

Problematika určení přesných hodnot K faktoru je složitá z důvodu potřeby přesných dat o půdách a v České republice často bývá řešena metodou přibližného určení pomocí BPEJ. Tato data jsou snadno dostupná, problémem ale může být, že se jedná pouze o data zemědělských půd, není tedy možné takto určit hodnoty K faktoru například pro oblasti lesů.

Tímto přístupem bylo řešeno určení K faktoru v rámci práce. Vektorová vrstva BPEJ byla převedena pomocí převodní tabulky uvedené v metodice (Janeček, 2012) přímo na hodnoty K faktoru a následně převedena na rastr. V zájmovém území se nacházely oblasti s hodnotami 0,32; 0,34; 0,44, 0,48. Území pro které nebylo možné data o půdě určit byly oblasti lesů. Prostorové rozložení hodnot je znázorněno na obrázku č. 7.

K faktor



Obrázek 7 Prostorové rozložení hodnot K faktoru v zájmovém území

LS faktor

LS faktor je topografický faktor neboli faktor délky (L) a sklonu (S) svahu. Je složený z faktorů L a S a při spojení dohromady je označován jako topografický faktor. Je bezrozměrný a v rámci (R)USLE rovnice se jedná o faktor, který zcela zásadním způsobem ovlivňuje výsledek výpočtů erozního smyvu (Krása, 2010).

Topografický faktor představuje poměr ztrát půdy na jednotku plochy svahu ke ztrátě půdy na standardním pozemku o délce 22,13 m a se sklonem 9 %. L faktor vyjadřuje vliv délky svahu na velikost ztráty půdy erozí a S faktor představuje vliv sklonu svahu na ztráty půdy erozí. LS faktor je dán vztahy pro L a S faktor (Janeček, 2012):

$$L = (l/22,13)^m \quad (6)$$

kde: 22,13 je délka standardního pozemku (m),
l horizontální projekce nepřerušené délky svahu (m),
m exponent sklonu svahu vyjadřující náchylnost svahu k tvorbě rýžkové eroze.

$$S = 10,8 \sin(\theta) + 0.03 \quad \text{pro sklon} < 9 \% \quad (7)$$

$$S = 16,8 \sin(\theta) - 0.50 \quad \text{pro sklon} \geq 9 \% \quad (8)$$

θ je úhel sklonu svahu v (rad nebo m/m), přičemž výpočet musí být proveden v systému radiánů.

Vztah pro LS faktor byl od prvotního sestavení rovnice dle (Wischmeier a Smith, 1978) průběžně rozvíjen a v současnosti existuje velký počet modifikací rovnice k výpočtům topografického faktoru. Rovnice byla původně sestavena pro manuální výpočty a pro výpočet v GIS byla nahrazena nepřerušená délka svahu za zdrojovou plochu odtoku (m^2), která je počítána pro každý pixel v rastru (Janeček, 2012). Správné určení této plochy je klíčové a existují velké rozdíly mezi použitím metody vícesměrného a jednosměrného odtoku. Metoda jednosměrného odtoku je jednodušší a je využívána v běžných GIS nástrojích, ale dochází k lokálnímu nadhodnocování erozního smyvu (Krása, 2010). Použití metod vícesměrného odtoku reprezentuje reálněji skutečný stav směru odtoku vody, ale problémem je například jeho použití v prostředí ArcGIS. Tato metoda je sice již v ArcGIS Pro implementována, ale její užití je problematické, jelikož jako výstup není možné použít běžné rastrové formáty (ArcGIS Pro: Tool Reference., 2018, 2017). Implementací metody vícesměrného odtoku do prostředí ArcGIS se zabýval ve své bakalářské práci Roman Hittl (Hittl, 2016). Dalším faktorem ovlivňujícím přesnost LS faktoru je dle Krásky (2010) při výpočtu zdrojové plochy zahrnout také vliv hranic pozemků místo výpočtu pro celé povodí.

Možností jak vypočítat LS faktor jako vstupní vrstvu do GIS analýz je několik. Většina nástrojů založených na bázi (R)USLE řeší výpočet LS faktoru samostatně a LS tedy není zadáván jako vstupní vrstva. V případě využití metody výpočtu erozních procesů pomocí mapové algebry v prostředí běžných GIS (ArcGIS, QGIS apod.) je ale nutné vrstvu LS faktoru vypočítat. Dříve doporučovaná metoda pro výpočet pomocí

programu USLE2D (Janeček, 2012) již není ideální, jelikož program nelze spustit na současných verzích operačních systémů Windows. Jako vhodná alternativa se zdá být využití nástroje LS factor (field based), který je implementován v SAGA GIS. Tento nástroj lze spustit pomocí programu QGIS, je v něm implementována metoda vícesměrného odtoku a je možné zvolit z několika způsobů výpočtů LS faktoru. Nástroj bere v úvahu také hranice pozemků, které jsou dodány ve formě vektorové vrstvy. Tuto vstupní vrstvu není nutné použít, v případě nedodání vrstvy počítá nástroj LS faktor pro celé najednou. Další možností výpočtu vrstvy LS faktoru je výpočet v prostředí běžných GIS za využití známých rovnic, tento postup je ale velmi komplikovaný (Krása, 2010).

V rámci práce bylo vyzkoušeno několik variant výpočtů vrstvy LS faktoru. Byly sestaveny model pro výpočet v ArcGIS Pro využívající vztahy dle Moore a Burch (Moore a Burch, 1986) a Desmet a Govers (Desmet a Govers, 1996), ale nakonec bylo od této metody upuštěno z důvodu komplikovanosti výpočtu a dostupnosti vhodnější alternativy upuštěno. Využit byl výše zmiňovaný nástroj LS factor (field based), který je v rámci SAGA GIS implementován v prostředí QGIS. Vrstva LS faktoru byla vypočítána dle metody Desmeta a Goverse (Desmet a Govers, 1996). Výsledná vrstva LS faktoru, která byla použita pro výpočet retence sedimentů u vlastního sestaveného modelu je zobrazena na obrázku č. 8.

LS faktor



Obrázek 8 Výsledná vypočítaná vrstva LS faktoru

C faktor

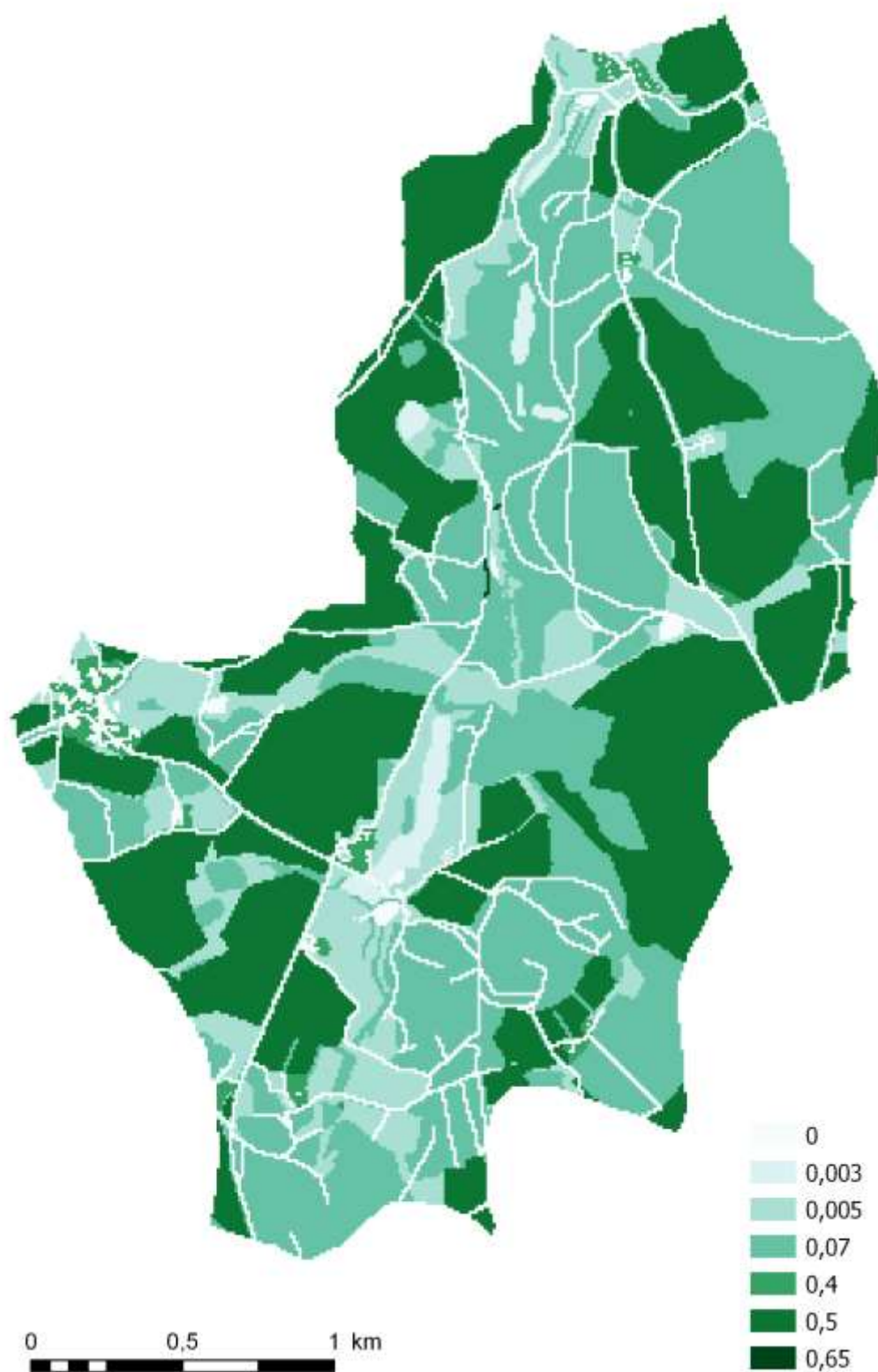
C faktor je faktor ochranného vlivu vegetace. Vegetační pokryv má značný vliv na zmírnění erozních procesů a jeho ochranný vliv je přímo úměrný pokryvnosti a hustotě porostu v době výskytu přívalových dešťů. Vegetace působí na zmírnění vlivu dopadajících dešťových kapek, ale také zpomalováním povrchového odtoku a nepřímo také působením vegetace na půdní vlastnosti (Janeček, 2012). C faktor je bezrozměrný a lze určit například z tabulky uvedené v metodice (Janeček, 2012). Dalším způsobem určení C faktoru je použití dat dálkového průzkumu Země (DPZ), čímž se podrobněji zabýval ve své bakalářské práci Antonín Benc (2013).

C faktor je z pohledu práce důležitý z důvodu, že představuje vliv člověka v procesu eroze (spolu s P faktorem) a v práci je využíváno přístupu výpočtu retence sedimentů porovnáním hodnot transportu splavenin s vlivem vegetace a pro holou půdu bez vegetace. (Guerra, 2016; Sediment Delivery Ratio Model, 2018, 2015). Hodnoty C faktoru byly pro jednotlivé kategorie využití území doporučeny vedoucím práce. Použité hodnoty jsou znázorněny v tabulce č. 3. Výsledná vrstva C faktoru byla získána reklasifikací vrstvy využití území, tak jak je znázorněno na obrázku č. 8. Území, kde neprobíhají erozní procesy zkoumané v této práci obdržely hodnotu 0.

Tabulka 3 Použité hodnoty C faktoru pro kategorie využití území

Název kategorie	Hodnota
bažiny	0,003
komunikace	0
lesy	0,07
maloplošné zahrady	0,4
orná půda	0,5
pěšiny	0,65
trvalý travní porost	0,005
vodní plochy	0
zástavba	0

C faktor



Obrázek 9 Vytvořená vrstva C faktoru

P faktor

P faktor je faktor účinnosti protierozních opatření. Jedná se o zapracování jednotlivých opatření omezujících vliv vodní eroze jako je například hrázkování a přerušované brázdování nebo rozdílný směr orby. P faktor je bezrozměrný. V případě, že nejsou použita žádná opatření proti erozi nebo nejsou pro výpočet uvažována, lze použít pro celé území hodnotu $P = 1$. Hodnoty pro jednotlivá protierozní opatření jsou uvedeny v platné metodice (Janeček, 2012). Uvedené hodnoty by při užití tohoto faktoru měly být vztaženy na celý pozemek, na který mají použitá opatření vliv. P faktor bývá často spojován s C faktorem a dohromady vyjadřují vliv člověka, tedy to, co je možné ovlivnit v procesu ztráty půdy. V práci při výpočtech nebyla uvažována žádná protierozní opatření a byla tedy použita hodnota $P = 1$.

Další vstupní parametry

U některých modelů je potřeba pro výpočet zadat další vstupní parametry nebo vrstvy, většinou se jedná o hodnoty specifické pro daný způsob výpočtu a kalibrační parametry. Tyto parametry jsou dále popsány v kapitole 3.2 u jednotlivých nástrojů.

3.2 Použité nástroje pro modelování erozních procesů

Mezi nástroji použitými v práci jsou velké rozdíly z hlediska využití. Například ArcGIS je běžný GIS s velmi širokým spektrem využití. Tento program je možné využít jak pro přípravu a interpretaci vstupních a výstupních dat, ale také pro samotné výpočty. TerrSet je program se specifitějšíším zaměřením na modelování rozličných procesů Země, které je ale stále poměrně široké. Stále je možná práce s daty i výsledky interpretovat. Naproti tomu InVEST SDR a WaTEM/SEDEM jsou programy určené pro konkrétní účel a umožňují pouze provedení této jedné specifické operace, pro kterou byly sestaveny. Data je nutné připravit a interpretovat v dalším programu jako je například ArcGIS nebo QGIS. Jednotlivé nástroje a jejich algoritmy pro provedení výpočtů retence jsou popsány v dalších kapitolách.

3.2.1 InVEST SDR

InVEST je sada velkého množství open-source nástrojů (modelů) určených k mapování a hodnocení ekosystémů a přírodních procesů. Jedná se široké spektrum nástrojů, mezi které patří například modely určené pro modelování výskytu uhlíku v krajině (model Carbon), modelování ekosystémů souvisejících s opylením plodin (model Crop Pollination), modelování transportu sedimentů (model SDR), ale také například rybolovu (Fisheries) a nebo rekreace (Recreation). Jednotlivé nástroje se instalují ve formě jednoho balíku, ale spouští se každý samostatně. InVEST je vyvíjen v rámci projektu Natural Capital Project, který je založen na partnerství mezi několika předními světovými akademickými institucemi. Je to Stanford University, Čínská akademie věd, University of Minnesota, The Nature Conservancy a World Wildlife Fund. InVEST je jako jediný z použitých nástrojů nadále vyvíjen (Natural Capital Project, 2018).

Pro výpočet retence sedimentů byl použit model InVEST SDR 3.3.0 pracující na základě výpočtu transportu splavenin v povodí vypočítaného pomocí kombinace výpočtu ztráty půdy metodou (R)USLE a výpočtu poměru odnosu sedimentů SDR na základě výpočtu indexu konektivity (Borselli a kol., 2008). Retence sedimentů je následně vypočítána porovnáním transportu sedimentů pro reálné hodnoty vegetačního pokryvu s hypotetickým stavem, kdy by bylo celé povodí pokryto pouze holou půdou (Hamel a kol., 2017). Starší verze modelu Sediment Retention (předchůdce SDR) bylo možné spustit jako ArcGIS skript, toto již ale není v současných verzích podporováno. Starší verze celého InVest je také implementována v programu TerrSet jako Ecosystem Service Modeler.

Použité algoritmy

V prvním kroku je vypočítána hodnota průměrné roční ztráty půdy erozí pro každý pixel i dle vztahu pro rovnici RUSLE:

$$usle_i = R_i \cdot K_i \cdot LS_i \cdot C_i \cdot P_i \quad (9)$$

kde R_i , K_i , LS_i , C_i a P_i jsou hodnoty R , K , LS , C a P faktorů (R)USLE rovnice pro pixel i .

R , K , C a P faktory jsou dány dle vztahů uvedených v kapitole 3.1.1 a jsou součástí vstupních dat. LS faktor je vypočítán v rámci modelu dle vztahu:

$$LS_i = S_i \frac{(A_{i-in} + D^2)^{m+1} - A_{i-in}^{m+1}}{D^{m+2} \cdot x_i^m \cdot (22,13)^m} \quad (10)$$

- kde:
- S_i je faktor sklonu svahu S pro buňku i , vypočítaný jako funkce sklonu v radiánech, samostatně dle vztahu č. 7 pro oblasti se sklony menšími než 9 % a dle vztahu č. 8 pro oblasti se sklony většími nebo rovnými než 9 %, které jsou uvedeny v kapitole 3.1.1,
 - A_{i-in} zdrojová plocha (m^2) odtoku na vstupu do buňky i , která je vypočítána metodou pro výpočet směru odtoku D_∞ ,
 - D lineární velikost buňky (m),
 - x_i je součet absolutních sinů a cosinů hodnot orientace svahů buňky i , který je dán dle vztahu $x_i = |\sin \alpha_i| + |\cos \alpha_i|$, (11)
 - m je exponent délky svahu dle RUSLE, který nabývá rozdílných hodnot dle sklonu svahu.

Exponent délky svahu m nabývá uvedených hodnot:

$m = 0,2$ pro sklony ≤ 1 %

$m = 0,3$ pro sklony > 1 % a zároveň $\leq 3,5$ %

$m = 0,4$ pro sklony $> 3,5$ % a zároveň ≤ 5 %

$$\begin{aligned}
m &= 0,5 \text{ pro sklony } > 5 \% \text{ a zároveň } \leq 9 \% \\
m &= \beta / (1 + \beta) \text{ pro sklony } > 9 \%, \\
\text{kde } \beta &= (\sin\theta/0,0896)/[3(\sin\theta)^{0.8} + 0,56].
\end{aligned}
\tag{12}$$

Dalším krokem je výpočet poměru odnosu splavenin SDR. Nejprve je vypočítán index konektivity IC:

$$IC = \log_{10} \left(\frac{D_{up}}{D_{dn}} \right) \tag{14}$$

kde D_{up} je komponenta horní části svahu, vypočítaná dle vztahu:

$$D_{up} = \bar{C} \bar{S} \sqrt{A} \tag{15}$$

kde $\bar{C}$ je průměrný C faktor přispívající plochy, $\bar{S}$ průměrný sklon na území přispívající plochy (m/m) a A je přispívající plocha (m²) vypočítána metodou směru odtoku D_{∞} ,

D_{dn} je komponenta dolní části svahu, vypočítaná dle vztahu:

$$D_{dn} = \sum_i \frac{d_i}{C_i S_i} \tag{16}$$

kde d_i je délka toku podél i-té buňky ve směru největšího sklonu směrem ze svahu, C_i a S_i jsou C a S faktory i-té buňky. Tok je opět definován metodou D_{∞} .

Hodnoty sklonu jsou před výpočtem ošetřeny přepočtem na nejnižší hodnoty poměru 0,005 m/m a nejvyšší hodnoty 1 m/m. Toto je provedeno z důvodu prevence nabývání extrémních hodnot indexu konektivity IC.

Poměr odnosu sedimentů SDR je nakonec odvozen z indexu konektivity pomocí vztahu:

$$SDR_i = \frac{SDR_{max}}{1 + \exp\left(\frac{IC_0 - IC_i}{k}\right)} \tag{17}$$

kde SDR_{max} je maximální teoretická hodnota SDR,
 IC_i je index konektivity i-tého pixelu
 IC_0 a k jsou kalibrační parametry.

Po vypočtení SDR faktoru je vypočítán celkový transport splavenin pomocí vztahu:

$$E_i = usle_i \cdot SDR_i \quad (18)$$

a následně vypočítána retence sedimentů porovnáním transportu splavenin pro reálné hodnoty vegetačního pokryvu s hypotetickým stavem, kdy by bylo celé povodí pokryto pouze holou půdou (Natural capital project, 2017). Pro výpočet je nutné znovu přepočítat celý SDR faktor, ale bez vlivu vegetace. Je nutné tedy použít upravené vztahy pro komponentu spodní a horní části svahu, kdy nebude brán v úvahu C faktor a obě dvě rovnice budou přepočítány bez tohoto parametru. Jedná se o rovnice č. 15 a 16. Takto vzniklý index konektivity je použit pro výpočet nového SDR. Výsledná retence sedimentů na pixel i je tedy vypočítána dle vztahu:

$$retence = R_i \cdot K_i \cdot LS_i \cdot SDR_{i-baresoil} - E_i \quad (19)$$

kde	R_i, K_i, LS_i	jsou parametry R, K a LS (R)USLE rovnice,
	$SDR_{i-baresoil}$	přepočítaný poměr odnosu sedimentů SDR pro holou půdu, tedy SDR vzniklý přepočítáním indexu konektivity bez vlivu vegetačního pokryvu, tedy odstraněním parametru C z rovnic č. 15 a 16,
	E_i	celkový transport splavenin.

3.2.2 Metoda USLE a SDR prostřednictvím běžných GIS

ArcGIS je komerční GIS společnosti Esri, který má široké využití. V práci byl použit jak pro přípravu veškerých vstupních dat a interpretaci výsledků, tak i jako jedna z metod použitých pro výpočet retence. Výpočet retence se může ubírat dvěma směry. Prvním je využití již sestaveného Toolboxu pro výpočet retence a druhá je sestavení vlastního modelu. Příkladem první varianty může být spuštění modelu InVEST SDR prostřednictvím skriptu pro ArcGIS. V práci byl použit druhý přístup a byl sestaven vlastní model pro výpočet retence sedimentů. Sestavený model byl založen na využití algoritmů použitých a popsanych u modelu InVEST SDR. Výsledná retence je tedy vypočítána na základě porovnání transportu splavenin pro reálné hodnoty vegetačního pokryvu s hypotetickým stavem, kdy by bylo celé povodí pokryto pouze holou půdou.

Použité algoritmy

Použité algoritmy byly převzaty a implementovány dle přístupu používaného modelem InVEST SDR. Blíže budou použité postupy specifikovány v kapitole č. 4. V následující textu bude pouze zopakován a shrnut postup popsany v kapitole 3.2.1. Jedinými rozdíly oproti algoritmům použitým v InVEST SDR je výpočet LS faktoru mimo tento model a využití metody jednosměrného odtoku D8, vyplývající z omezení programu ArcGIS. Pro výpočet LS faktoru byl využit nástroj SAGA GIS, který by spouštěn prostřednictvím QGIS. Takto vypočítaný LS faktor byl sestaven za využití

algoritmů podle Desmeta a Goverse (1996), které byly popsány v kapitole 3.2.1. Rozdíl je ale v tom, že bylo pro určení zdrojové plochy odtoku využito metody vícesměrného odtoku.

3.2.3 TerrSet

TerrSet je komerční, placený, rastrově založený software, který je zaměřený na monitorování a modelování Země, obsahující velké množství modelů. Obsaženy jsou například nástroje pro modelování vlivů změn klimatu, integruje v sobě celý soubor modelů InVEST (starší verze nástrojů) nebo například nástroje pro zpracování dat DPZ. Program je vyvíjen a distribuován společností Clark Labs spadající pod Clark University ve Worcesteru (CLARK LABS, 2018). TerrSet v sobě přímo integruje Idrisi a využívá také jeho formát souborů RST, s čímž souvisí nutnost převodu všech dat do tohoto formátu. Tuto operaci lze provést přímo v prostředí programu a nebo například pomocí QGIS nebo programu ATTA Converter vytvořeného přímo pro tento účel v rámci bakalářské práce Davida Jakeše (Jakeš, 2017). Výpočet erozních procesů a retence sedimentů lze provést prostřednictvím dvěma způsoby. Prvním způsobem je využití modelu Sediment Retention ze sady nástrojů Ecosystem Service Modeler a druhým je využití kombinace modelů RUSLE a následně SEDIMENTATION ze sady nástrojů Idrisi GIS Analysis. Vzhledem k tomu, že první způsob je přímo integrací starší, již překonané verze InVEST, nebyl důvod se tomuto způsobu věnovat. Pro výpočet retence sedimentů byly tedy zvoleny modely RUSLE a SEDIMENTATION. Všechny výpočty probíhaly v rámci 30-denní zkušební verze programu.

Použité algoritmy

Přístup použitých modelů k problematice modelování retence je zcela odlišný od přístupu ostatních použitých nástrojů. Pro výpočet je sice také používáno dat ve formě rastru, všechny analýzy jsou ale prováděny na jednotlivých co nejvíce homogenních plochách, jejichž parametry se volí při spuštění modelu RUSLE a na které je pohlíženo jako na izolované plochy (Krása, 2010). Jelikož dostupná dokumentace (zejména k modelu SEDIMENTATION) je poměrně strohá a ve velmi rozsáhlém manuálu k celému programu TerrSet (Eastman, 2016) nejsou příliš rozsáhlé informace týkající se použitých algoritmů uvedeny, budou postupy výpočtů a použité algoritmy popsány pouze obecně. Pro pochopení způsobu výpočtů jsou ale tyto informace dostačující.

Prvním krokem je výpočet ztráty půdy erozí v modelu RUSLE. Výpočet probíhá na základě rovnice (R)USLE vynásobením jednotlivých parametrů dle známého vztahu (rovnice č. 9). Uživatelem zadávanými vstupními vrstvami jsou všechny parametry rovnice (R)USLE s výjimkou faktoru LS, který je počítán v rámci výpočtu z dodané vrstvy DMR. Prvním krokem je výpočet LS faktoru, který je počítán samostatně pro L a S dle vztahu (převáděno do metrických jednotek) (Clark Labs, 2015):

$$L = (\lambda/22,13)^m \quad (20)$$

kde: λ je horizontální projekce délky svahu,
 m proměnlivý exponent sklonu a délky svahu.

Hodnoty exponentu m jsou dány pro všechny rozsahy sklonů rovnicemi č. 12 a 13., přičemž β je zde poměr rýhové a mezirýhové eroze a hodnoty β jsou ovlivněny hodnotou C faktoru.

S faktor je vypočítán dle vztahu s využitím rozdílných rovnic pro různé kategorie sklonů. Pro sklony menší než 9 % je S dané dle vztahu uvedeného v rovnici č. 7, pro sklony větší nebo rovné 9 % je S dané dle vztahu:

$$S = 10,8 \sin(\theta) - 0,50 \quad (21)$$

uvedené vztahy jsou použitelné pro svahy delší než 15 stop, pro svahy kratší než 15 stop je použita následující rovnice.

$$S = 3(\sin\theta)^{0,8} + 0,56 \quad (22)$$

Po připravení LS faktoru je vypočítána celková průměrná ztráta půdy erozí samostatně pro každý pozemek. Výsledkem je ztráta půdy erozí na zvolenou jednotku plochy. Celková ztráta půdy na pozemek je poté získána vynásobením výsledku ztráty půdy plochou pozemku.

Dalším krokem je výpočet čisté ztráty půdy (retence nebo odnosu půdy) prostřednictvím modelu SEDIMENTATION pro jednotlivé pozemky. Zde jsou vstupem výsledky modelu RUSLE – jednotlivé vytvořené pozemky a celková ztráta půdy pro jednotlivé pozemky, DMR a průměrná hodnota SDR v povodí. Postup je následovný (Clark Labs, 2015):

1. Nejprve je vypočítána průměrná nadmořská výška každého pozemku.
2. Poté jsou nalezeny pozemky s nejvyšší nadmořskou výškou v rámci povodí a pomocí relativních rozdílů v nadmořské výšce jsou určeny směry odnosu sedimentů z každého pozemku, které jsou vždy ve směru přímo ze svahu.
3. Nakonec je vypočítána čistá ztráta půdy na jednotlivých pozemcích na základě porovnání ztráty půdy pozemku umístěného výše a ztráty půdy z pozemku umístěného níže.

Množství pohybujícího se sedimentu je přímo úměrné délce společné hranice mezi horním a spodním pozemkem. Rozdíl mezi množstvím půdy putujícím z výše umístěného pozemku do nižšího pozemku představuje čistou ztrátu půdy a nebo retenci. Pokud je na pozemku převažující odnos půdy do nižšího pozemku nad příspěvkem půdy donesené z horního pozemku, je výsledkem ztráta půdy a pokud je na pozemku převažující příspěvek donesené půdy z horního pozemku nad odnosem erodované půdy do nižšího pozemku, je výsledkem retence sedimentů. Celkový transport sedimentů pro povodí je poté vypočítán aplikováním zadané hodnoty poměru odnosu sedimentů SDR na každý pozemek a následným sečtením těchto hodnot.

3.2.4 WaTEM/SEDEM

WaTEM/SEDEM je specifický program vyvinutý na univerzitě KU Leuven v Belgii, který je určen přímo pro modelování erozních a transportních procesů. Program je volně distribuován a je založen na jádře programu Idrisi a využívá také jeho formát souborů RST s čímž souvisí nutnost převodu vstupních dat. Model může být určen k určení hodnot ztráty půdy a retence sedimentů způsobených vodní erozí, ke zjištění oblastí zemědělských ploch náchylných procesům způsobených vodní erozí a nebo například k simulování vlivů různých scénářů opatření pro ochranu půdy (WaTEM/SEDEM, 2018, 2005).

Model je založen na principu výpočtu ztráty půdy metodou RUSLE probíhající na jednotlivých buňkách rastrových vstupních dat a rozvíjí tento princip dále. V úvahu jsou brány hranice pozemků a topologie sítě říčních toků, díky čemuž je vhodný i pro modelování větších povodí. Model byl použit například pro modelování transportu splavenin v povodí vodní nádrže Řimov (Krása, 2010). Retence sedimentů je v modelu vypočítána pomocí tzv. transportní kapacity jednotlivých pixelů, která určuje množství ukládajících se sedimentů při procesu transportu splavenin povodím (Krása, 2004). Pro výpočet v této práci je použit WaTEM/SEDEM verze 2004, spouštěný prostřednictvím verze z roku 2006, která v sobě sdružuje všechny dostupné verze programu pohromadě a zároveň opravuje některé jejich chyby (Notebaert a kol., 2006). Model se dále nevyvíjí a zmiňovaná verze z roku 2006 je poslední dostupnou verzí, která byla vytvořena.

Použité algoritmy

Použité algoritmy jsou uvedeny v manuálu k programu a budou popsány v následující podkapitole (Notebaert a kol., 2006). Prvním krokem výpočtů je stanovení ztráty půdy na základě metody RUSLE vynásobením jednotlivých faktorů rovnice dle vztahů uvedených v rovnici č. 9. Faktory R, K, C a P jsou zadávány uživatelem a LS faktor je vypočítán v rámci modelu. Výpočet LS faktoru je komplikovaný a je založen na algoritmu Desmeta a Govers (1996) s využitím DMR a parcelní mapy a dále rozšířen tak, aby mohly být brány v potaz také směr orby a síť komunikací, které ovlivňují směr odtoku. Do výpočtu je také zahrnut vliv tzv. parcel trap efficiency (PTEF) a tzv. parcel connectivity. PTEF je hodnota poměru zachycení sedimentů na jednotlivých typech pozemku a parcel connectivity označuje poměr zachycení na hranicích pozemku (Krása, 2004). Na základě těchto parametrů je poté upravována velikost zdrojové plochy odtoku. Do algoritmu je také integrováno několik přístupů výpočtu S faktoru a exponentu délky svahu m (Krása, 2004). Pro výpočet v rámci práce byl u obou případů zvolen přístup dle McCool a kol. (1987, 1989). S faktor je tedy počítán samostatně pro svahy se sklony do 9 % dle rovnice č. 7 a pro sklony větší nebo rovné 9 % dle rovnice č. 8. Pro svahy kratší než 4 m je S faktor vypočítán dle rovnice č. 22. Přesná rovnice použitá pro výpočet L faktoru ani jeho exponentů není uvedena.

V dalším kroku je modelován transport sedimentů a sedimentace. Model počítá množství sedimentu, které je exportováno směrem k povrchovým vodám, přičemž je zohledněno případné usazování (retence) sedimentů. Usazování sedimentů je řízeno pomocí transportní kapacity (T_c), která je vypočítána pro každý pixel.

Tato transportní kapacita je maximální množství, které může procházet jedním pixelem a je vypočítáno dle vztahu:

$$Tc = K_{TC} \cdot E_{prg} \quad (23)$$

kde: Tc je transportní kapacita
 K_{TC} kalibrační koeficient transportní kapacity
 E_{prg} potenciál náchylnosti k rýhové erozi

Potenciál náchylnosti k rýhové erozi je dán konvergencí svahu, sklonitostí, půdní texturou a vegetačním krytem a pro jeho určení jsou použity vrstvy K a C faktoru, DMR a pozemků (Krása, 2010).

4 ANALÝZA RETENČNÍ FUNKCE KRAJINY

Samotné provedení výpočtů bylo provedeno ve čtyřech zmiňovaných nástrojích za účelem porovnání výsledných hodnot a ověření metod výpočtů. Všechny výpočty byly provedeny pro zájmové území uvedené v kapitole č. 2 a se snahou o použití co nejvíce shodných vstupních dat do všech modelů. Všechny modely jsou založeny na shodném principu (R)USLE rovnice, ale tento princip je dále rozvinut u každého modelu odlišným způsobem a každý má také odlišné nároky na vstupní data. Z tohoto důvodu nebylo možné dodržet použití stejných vstupních dat do všech modelů, snahou bylo ale pokusit se data a případné zvolené metody dodržet co nejvíce shodné. V tabulce č. 4 jsou uvedeny rozdíly mezi modely z pohledu vstupních dat a potřebných formátů. Pro všechny použité modely musí data splňovat tyto podmínky:

- všechny vrstvy musí být ve stejném projektovaném souřadnicovém systému,
- všechny vrstvy kromě DMR musí mít přesně stejný rozsah (stejný počet řádků i sloupců),
- DMR musí být ošetřen tak, aby neobsahoval žádné prohlubně a byl tak hydrologicky korektní,
- DMR musí svým rozsahem přesahovat hranice povodí a rozsah všech ostatních vrstev,
- všechny buňky musí mít stejnou velikost a být zarovnaný u všech vrstev přesně na sebe (snap raster).

Kromě výše zmíněných podmínek byla všechna geodata použita v práci převedena do souřadnicového systému WGS84 UTM Zone 33N (EPSG kód 32633) a všechny rastrové vrstvy měly prostorové rozlišení 10 × 10 m. Další podmínky jsou již specifické pro jednotlivé modely a jsou uvedeny dále.

Tabulka 4 Porovnání vstupních dat, parametrů a používaných formátů u jednotlivých modelů

		InVEST SDR	ArcGIS model	TerrSet RUSLE a SEDIMENTATION	WaTEM/SEDEM
DEM	základní vstupní vrstvy	rastr	rastr	rastr	rastr
R-faktor		rastr	rastr	rastr	hodnota
K-faktor		rastr	rastr	rastr	rastr nebo hodnota
LS-faktor		-	rastr	-	-
C-faktor		hodnota pro kat. landuse	rastr	rastr	rastr nebo hodnota
P-faktor		hodnota pro kat. landuse	nepočítá s touto vrstvou	rastr	nepočítá s touto vrstvou
Další vstupy		vektor. vrstva povodí (subpovodí), biofyzikální tabulka, landuse a vegetační pokryv, práh akumulace odtoku, kalibrační parametry	-	parametry terénu pro výpočet oblastí s podobnou erozí, hodnota SDR	vodní toky, využití území, Ptef, Parcel Connectivity, kalibrační koeficienty
Volitelné parametry		použití dalších odvodňovacích systémů	kalibrační parametry	hodnota NoData, použité jednotky, rozdělení území na pozemky	algoritmy výpočtu LS faktoru, záchytné nádrže, směr orby, hrubost půdy, použité jednotky
Formát geodat		běžné rastrové soubory, .SHP pro vektor, .CSV pro biofyz. tabulku	běžné rastrové soubory	Idrisi .RST	Idrisi .RST

4.1 InVEST SDR

Prvním krokem před každým provedením výpočtu je příprava dat. Popis způsobu a získání jednotlivých vrstev je popsán v kapitole 3.2.1. Všechny základní potřebné vstupní vrstvy byly prvotně vytvořeny dle potřeb modelu InVEST SDR a následně upravovány pro potřeby ostatních modelů. Rastrové vrstvy mohou mít u modelu InVEST SDR 3.3.0 formát buď Arc/Info Binary Grid, ASCII Grid a nebo GeoTIFF. Všechny použité rastrové vrstvy byly ve formátu GeoTIFF a hodnoty pro NoData byly nastaveny na -9999. Pro výpočet byla použita následující vstupní data (Sediment Delivery Ratio Model, 2018, 2015):

1. Digitální model reliéfu

Rastrová vrstva ve formátu GeoTIFF, NoData nastavena na hodnotu -9999, datový typ floating point.

2. R faktor

Rastrová vrstva ve formátu GeoTIFF, NoData nastavena na hodnotu -9999, datový typ integer. Lze použít přímo hodnoty v jednotkách používaných v ČR.

3. K faktor

Rastrová vrstva ve formátu GeoTIFF, NoData nastavena na hodnotu -9999, datový typ floating point. Lze použít přímo hodnoty v jednotkách používaných v ČR.

4. Vrstva využití území

Rastrová vrstva ve formátu GeoTIFF, NoData nastavena na hodnotu -9999, datový typ integer, zájmové území rozčleněno do 9 kategorií s hodnotami 1-9 dle tabulky č. 1, více o vrstvě viz kapitola 3.2.1.

5. Vrstva povodí

Vektorová polygonová vrstva ve formátu SHP zobrazující rozsah zkoumaného povodí, případně jednotlivých subpovodí.

6. Biofyzikální tabulka

Tabulka ve formátu CSV, obsahující informace o jednotlivých kategoriích vytvořené vrstvy využití území. Tabulka musí obsahovat minimálně tyto 3 sloupce popisující jednotlivé kategorie využití území:

- lucode – celočíselná hodnota odkazující na jednotlivé kategorie využití území tak, jak byly použity v rastrové vrstvě,
- usle_c – hodnota C faktoru pro danou kategorii využití území daná jako reálné číslo v rozsahu mezi 1 a 0,
- usle_p – hodnota P faktoru pro danou kategorii využití území daná jako reálné číslo v rozsahu mezi 1 a 0.

7. Threshold flow accumulation

Hodnota prahu akumulace odtoku, od které jsou hodnoty považovány jako tok. Výsledná vytvořená mapa toků by měla co nejvíce odpovídat skutečným tokům. Pro výpočet použita hodnota 1800, která byla ověřena výpočtem kumulace odtoku v programu ArcGIS.

8. k_b a IC_0

Hodnota kalibračních parametrů, pro výpočet použity výchozí hodnoty $k_b = 2$ a $IC_0 = 0,5$.

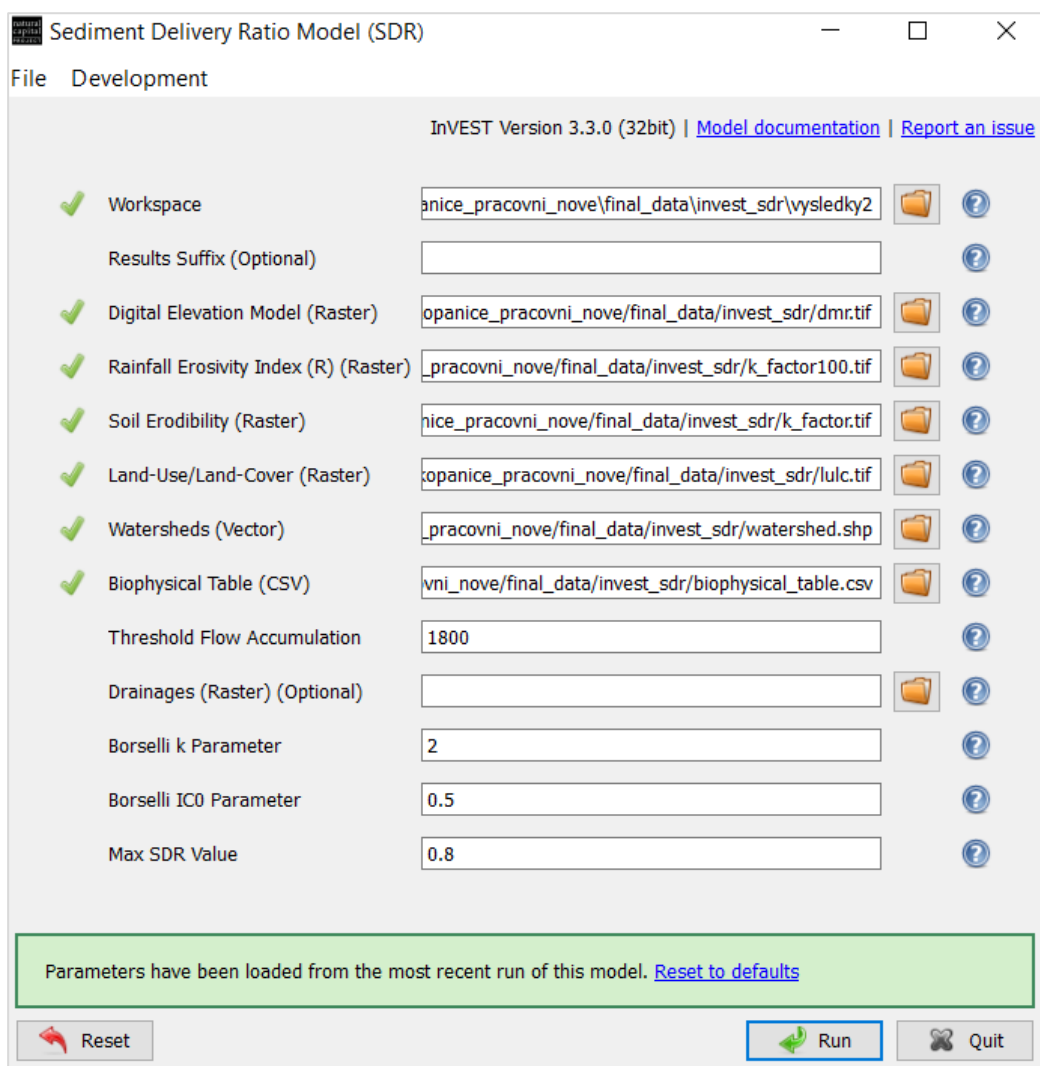
9. SDR_{max}

Maximální hodnota, kterou může SDR dosáhnout, jedná se o kalibrační parametr, pro výpočet použita výchozí hodnota $SDR_{max} = 0,8$.

Posledním možným vstupem může být volitelná vrstva odvodňovacích systémů, která v práci nebyla použita.

Výpočet retence sedimentů

Po připravení všech dat mohlo být přistoupeno k samotnému výpočtu. Po otevření modelu je zobrazeno přímo rozhraní modelu (obrázek č. 10), které tvoří jediné dialogové okno. V případě, že byl model již dříve spuštěn jsou automaticky načteny cesty k poslední použitém vstupním datům. Po vybrání pracovního adresáře a načtení všech potřebných vstupních dat mohl být přímo spuštěn výpočet.



Obrázek 10 Rozhraní modelu InVEST SDR verze 3.3.0

Výsledkem výpočtu modelu je několik rastrových vrstev a jedna vektorová vrstva povodí (subpovodí) s hodnotami transportu sedimentů a retence vztahené na danou oblast. Retence sedimentů je přímo jednou z výstupních vrstev a výstupní jednotky jsou v t/pixel, pro porovnání hodnot nemusí být tedy dále nijak upravovány ani přepočítávány.

4.2 Metoda USLE a SDR prostřednictvím ArcGIS a QGIS

Pro výpočet touto metodou bylo využito přístupu a algoritmů použitých u modelu InVEST SDR. Vstupní data byla použita stejná data jako do modelu InVEST SDR s několika malými obměnami. Na rozdíl od ostatních použitých nástrojů bylo do výpočtu nutné dodat jako vstupní vrstvu také LS faktor, který byl vypočítán externě v programu QGIS, ve kterém byl díky integraci SAGA GIS spuštěn nástroj LS factor (field based). Takto získaná vrstva LS faktoru byla použita přímo pro výpočet. Blíže je LS faktor popsán v kapitole 3.2.1. dalším rozdílem bylo překlasifikování vrstvy využití území tak, aby jednotlivé kategorie dostaly přímo hodnoty C faktoru z biofyzikální tabulky, která byla použita u modelu InVEST SDR. Pro výpočet byl sestaven model v prostředí programu ArcGIS Pro využívající integrovaných nástrojů geoprocessingu. Schéma modelu je zobrazeno na obrázku č. 11.

Postup sestavení modelu

Prvním krokem bylo provedení výpočtu USLE rovnice vynásobením jednotlivých vstupních parametrů rovnice pomocí Raster Calculatoru. Jelikož výsledek výpočtu USLE rovnice je v t/ha, bylo nutné výsledek vydělit 100 pro získání potřebných hodnot ztráty půdy na pixel.

```
"%R factor%" * "%K factor%" * "%LS factor%" * "%CP factor%" /  
100
```

V další fázi je sestavován index konektivity, jehož výpočet je inspirován postupem pro výpočet v programu ArcMap popsaného v práci Lorenza Borselliho (Borselli, 2008). Nejprve jsou vypočítány potřebné vstupy. Prvním jsou vrstvy sklonu, který je vyjádřen v procentech a ošetřen tak, aby minimální hodnoty sklonu byly 0.005.

```
(("%Slope_%" == 0)*0.005) + "%Slope_%"
```

Dalším potřebným vstupem je vrstva směru odtoku oříznutá vrstvou C faktoru, která je reklasifikována z vrstvy využití území, má tedy nastaveny nulové hodnoty pro místa kde neprobíhají modelované erozní procesy a díky tomu je možno ji použít jako masku zastavěných území a komunikací pro vrstvu směru odtoku.

```
Con("%CP factor%" == 0, 0, 1) * "%FlowDir%"
```

Ze vzniklé vrstvy je vypočítána akumulace odtoku a z té poté maska říční sítě dle nastavené prahové hodnoty, která je vstupním parametrem.

```
"%ACCMASK1%" <= %Threshold Flow Accumulation%
```

Poté je vynásobením masky zastavěného území a říční sítě vypočítána finální vrstva směru odtoku.

```
"%DIRMASK%" * "%rivermask%"
```

Z finální vrstvy směru odtoku je vypočítána akumulace odtoku, která je ošetřena proti výskytu nulových hodnot přičtením hodnoty 1. Poté je vypočítána délka toku pomocí Flow Length a může být přistoupeno k výpočtu komponenty spodní části svahu. Prvním krokem je výpočet převrácené hodnoty součinu C faktoru a připraveného upraveného sklonu svahu.

```
1/ ("%CP_factor%" * "%Slope_fin%")
```

Dále je vypočítán součin výsledku z předchozí operace a délky toku.

```
"%flowl%" * "%inv_cs%"
```

Jsou ošetřeny nulové hodnoty a výsledkem je komponenta spodní části svahu.

```
(( "%x%"==0) * "%inv_cs%") + "%x%"
```

Nyní může být přistoupeno k výpočtu komponenty horní části svahu. Nejprve je nutné provést výpočet průměrné hodnoty C faktoru zdrojové plochy a průměrného sklonu zdrojové plochy.

```
(FlowAccumulation("%DIRFINAL%", "%CP_factor%") + "%CP_factor%") /  
"%ACCFINAL%"
```

a

```
(FlowAccumulation("%DIRFINAL%", "%Slope_fin%") + "%Slope_fin%") /  
"%ACCFINAL%"
```

Poté je možno vypočítat komponentu horní části svahu.

```
"%cmean%" * "%smean%" * SquareRoot ("%ACCFINAL%" * 100)
```

Po výpočtu komponenty horní i spodní části svahu je možné provést výpočet indexu konektivity.

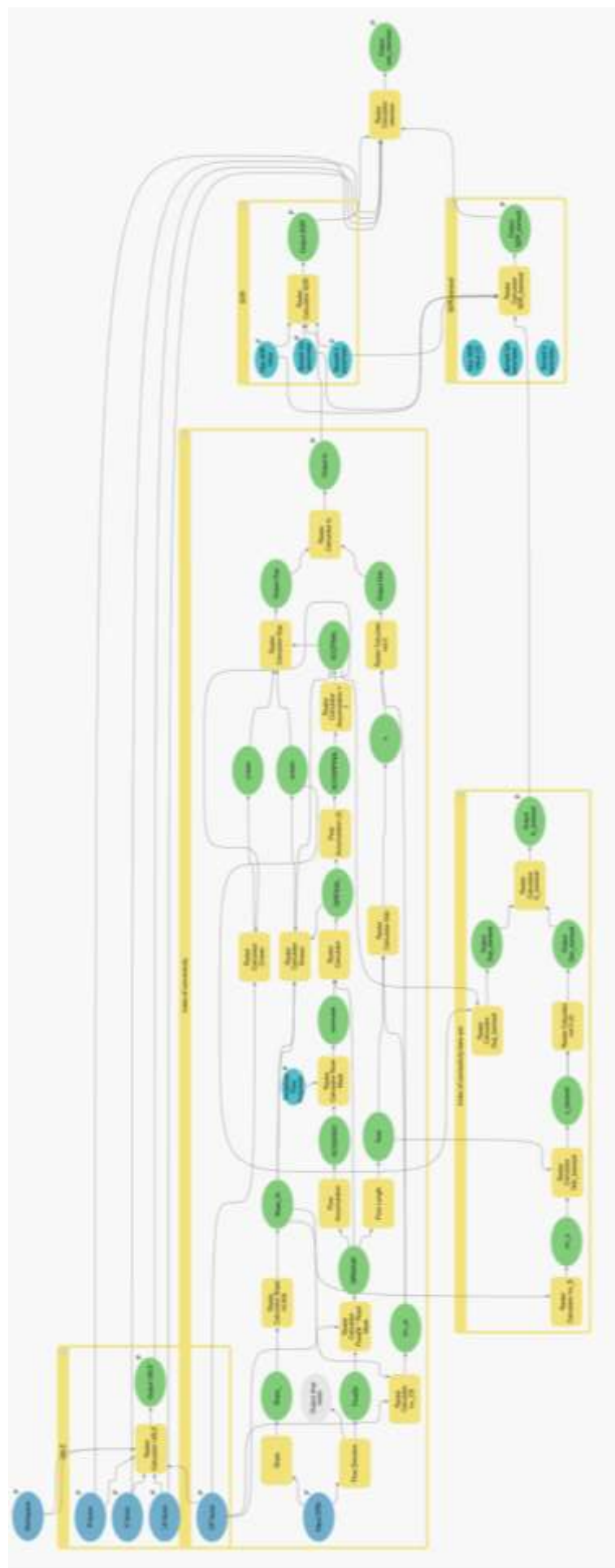
```
Log10 ("%Output_Dup%" / "%Output_Ddn%")
```

Z indexu konektivity je poté již možné vypočítat SDR.

```
float(%Max SDR Value%) / (1 + Exp(( float(%Borselli Ic0 parameter%)  
- "%Output Ic%") / float(%Borselli k parameter%) ))
```

Po vypočtení SDR je možné snadno určit celkový transport splavenin. Porovnáním skutečného transportu splavenin a transportu splavenin pro hypotetické povodí bez vlivu vegetace je možné vypočítat retenci sedimentů. Pro tento výpočet je ale nutné znovu přepočítat SDR tak, abychom získali SDR bez ovlivnění vegetačním pokryvem. Toto je provedeno vypočítáním nových komponent horní i spodní části svahu bez vrstvy C faktoru na základě vztahů uvedených výše. Poté může být přistoupeno k výpočtu retence sedimentů.

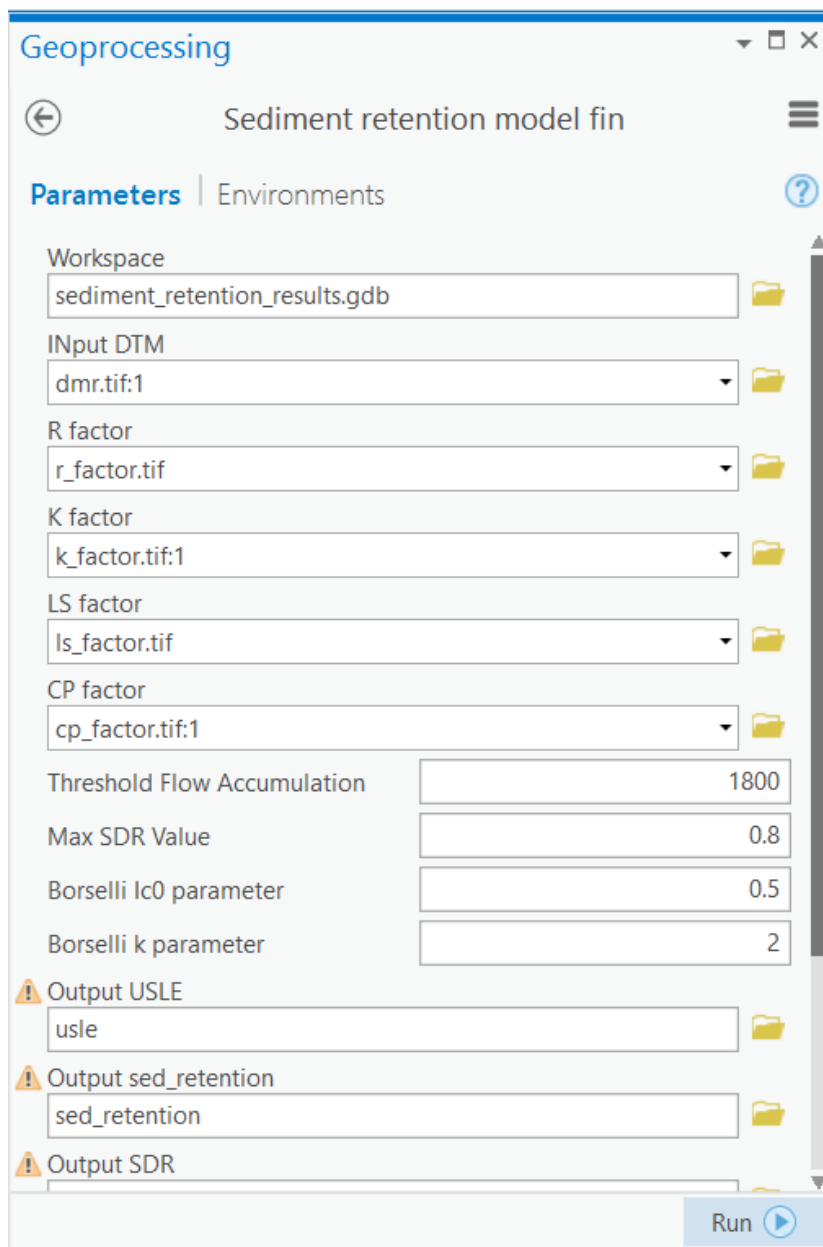
```
("%R factor%" * "%K factor%" * "%LS factor%" * "%Output SDR_baresoil%"  
/ 100) - ("%Output USLE%" * "%Output SDR%")
```



Obrázek 11 Schéma sestaveného modelu pro ArcGIS Pro

Výpočet retence sedimentů

Vytvořený model byl sestaven pro výpočty s rastry o velikosti buňky 10 ×10 m a toto je u všech vstupních dat nutné striktně dodržet. Před výpočtem bylo nutné nejprve do prostředí programu ArcGIS Pro nahrát Toolbox s modelem a poté bylo možné model otevřít. Rozhraní modelu je shodné s rozhraním nástrojů geoprocessingu (obrázek č. 12) Po nahrání všech vstupních dat a nastavení pracovní geodatabáze byl model spuštěn.



Obrázek 12 Rozhraní vytvořeného modelu

Výsledkem výpočtu jsou rastrové vrstvy. Jsou to mezivýsledky jednotlivých dílčích operací a také výsledná vrstva retence. Ta je opět přímo v t/ha a tak nemusí být pro další porovnání nijak přepočítávána.

4.3 TerrSet RUSLE a SEDIMENTATION

Prvním nutným krokem pro správné fungování programu bylo nutné nastavit v systému Windows oddělovač desetinných čísel místo desetinných čárek na desetinné tečky. Bez tohoto nastavení nebylo možné úspěšné provedení jakékoliv operace. Poté musela být všechna vstupní data převedena do formátu RST. Hodnoty NoData byly nastaveny na hodnotu -9999 u DMR a na hodnotu 0 u všech ostatních vrstev. Bylo také nutné vytvořit vrstvu P faktoru, i přesto, že tento parametr není uvažován. Toto bylo vyřešeno vytvořením konstantního rastru s hodnotou 1. Potřebná vstupní data byla následující (Clark Labs, 2015):

1. Digitální model reliéfu

Rastrová vrstva ve formátu RST, NoData nastavena na hodnotu -9999, datový typ floating point.

2. R faktor

Rastrová vrstva ve formátu RST, NoData nastavena na hodnotu 0, datový typ floating point. Lze použít přímo hodnoty v jednotkách používaných v ČR.

3. K faktor

Rastrová vrstva ve formátu RST, NoData nastavena na hodnotu 0, datový typ floating point. Lze použít přímo hodnoty v jednotkách používaných v ČR.

4. C faktor

Rastrová vrstva ve formátu RST, NoData nastavena na hodnotu 0, datový typ floating point.

5. P faktor

Rastrová vrstva ve formátu RST, NoData nastavena na hodnotu 0, datový typ floating point. Pro výpočet použít konstantní rastr s hodnotou 1 pro celé zájmové území.

6. Slope threshold

Hodnota prahu sklonu svahu v %, která bude použita pro výpočet pozemků. V práci použita hodnota 5 %

7. Maximum slope length

Maximální délka svahu, do které ještě není porchový odtok považován za soustředěný tok. Pro výpočet použita doporučená hodnota 122 m.

8. Aspect threshold

Hodnota prahu orientace svahu ve stupních, která bude použita pro výpočet pozemků. V práci použita hodnota 30°.

9. Smallest patch size

Velikost nejmenšího pozemku vytvořeného na základě předchozích třech zvolených parametrů reliéfu. V práci použita hodnota 400 m².

10. Hodnota NoData

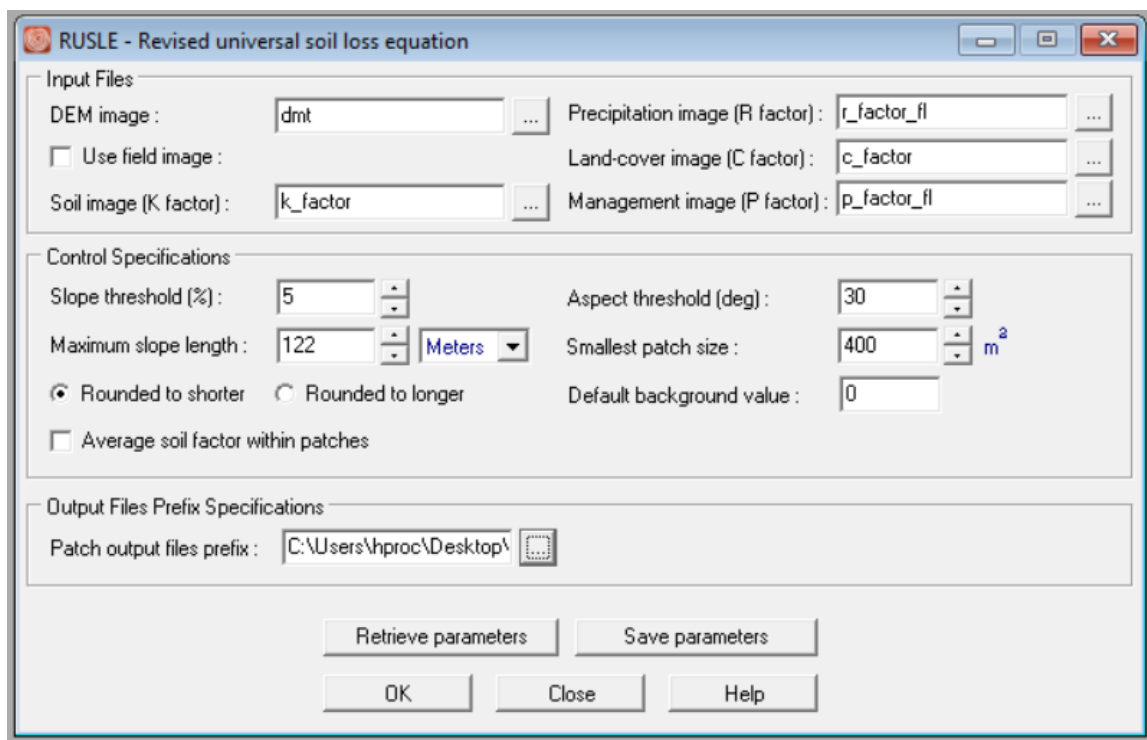
Výchozí hodnota vymezující oblasti mimo zkoumané území. Pro výpočet použita hodnota 0.

11. Hodnota SDR

Průměrná hodnota SDR pro celé řešené území. Pro výpočet použita hodnota 0.005, která byla získána jako průměrná hodnota z výpočtů modelu InVEST. V případě neznámé hodnoty SDR je doporučenou použít hodnotu 1.

Výpočet retence sedimentů

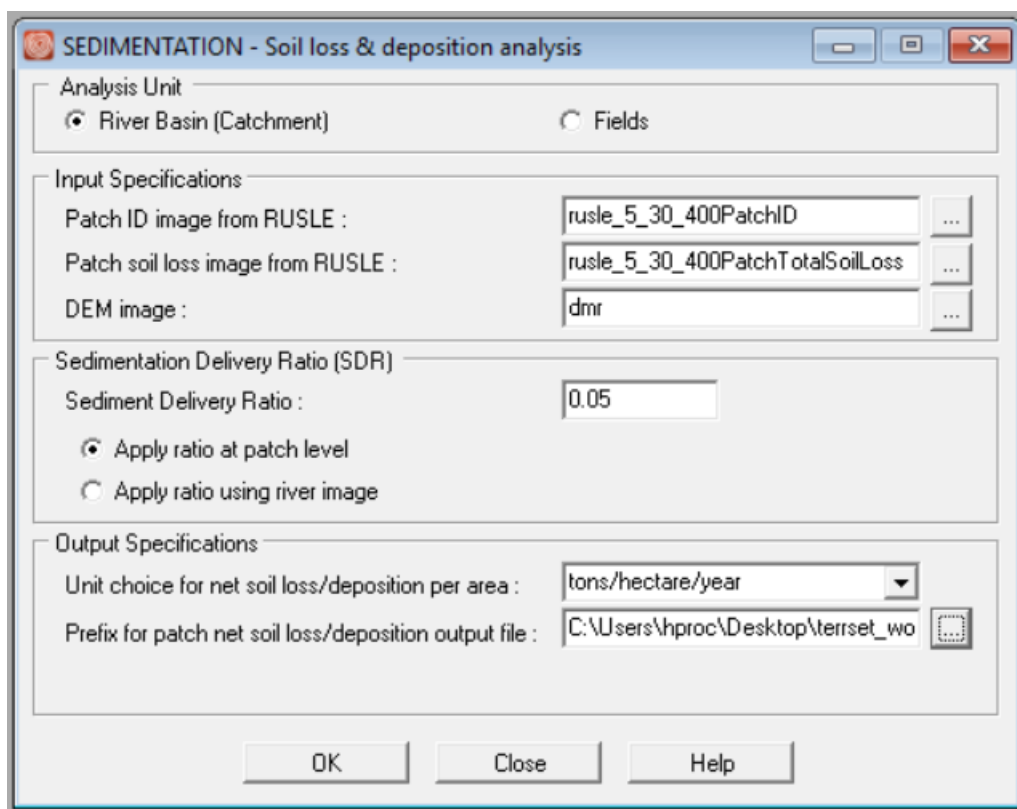
Po získání všech vstupních dat mohlo být přistoupeno k provedení výpočtu. Prvním krokem bylo vytvoření nového projektu a nastavení pracovních adresářů. Poté mohl být spuštěn model RUSLE. Byla nahrána všechna vstupní data a nastaveny potřebné parametry. Těmi byly hodnoty popisující reliéf, na základě kterých bylo při výpočtu provedeno rozdělení území na jednotlivé pozemky, na kterých byl dále proveden výpočet ztráty půdy. Bylo vyzkoušeno několik možností zadaných hodnot, ale z důvodu omezení na maximální počet 32 000 pozemků byly použity hodnoty uvedené v popisu dat výše. Rozhraní modelu a zadávané vstupní parametry jsou zobrazeny na obrázku č. 13. Následně mohl být proveden výpočet.



Obrázek 13 Rozhraní a použité vstupní parametry modelu TerrSet RUSLE

Výstupem modelu jsou rastrové vrstvy ztráty půdy pro jednotlivé pozemky, rozdělení území na pozemky a tabulka popisující jednotlivé pozemky z pohledu ztráty půdy.

Dalším krokem bylo spuštění modelu SEDMINTATION. Zde byl zvolen výpočet pro celé povodí a zadány vstupní parametry, kterými byly vrstvy rozdělení území na pozemky a celková ztráta půdy pro jednotlivé pozemky. Tyto dvě vrstvy byly vypočítané modelem RUSLE v předchozím kroku. Dále bylo nutné zadat vrstvu DMR a průměrnou hodnotu SDR. Pro výpočet bylo zvoleno aplikování zadaného SDR na celé zájmové území. Posledním parametrem bylo nastavení jednotek plochy na t/ha/rok. Rozhraní modelu a zadávané vstupní parametry jsou zobrazeny na obrázku č. 14. Po nahrání všech vstupních parametrů bylo možné provést výpočet.



Obrázek 14 Rozhraní a použité vstupní parametry modelu TerrSet SEDIMENTATION

Výsledkem výpočtu jsou rastrové vrstvy čisté ztráty půdy pro jednotlivé pozemky vztažené na oblast celého pozemku a nebo na zvolenou jednotku plochy. Výsledná čistá ztráta půdy nebo retence byla určena kladnými a nebo zápornými hodnotami. Záporné hodnoty znamenají převažující retenci a kladné hodnoty převažující ztrátu půdy z pozemku. Vrstva čisté ztráty půdy na jednotku plochy byla poté přepočítána na hodnoty čisté ztráty půdy na rozlohu pixelu. Bylo nutné převést hodnotu každého pixelu, která je v jednotkách t/ha na rozlohu pixelu (100 m²). Toto bylo provedeno vydělením celé vrstvy hodnotou 100 prostřednictvím nástroje Raster Calculator v ArcGIS Pro. Výsledná vrstva retence sedimentů, upravená tak, aby byla porovnatelná s výsledky ostatních modelů, byla poté získána přepočítáním vrstvy čisté ztráty půdy přepočítané na rozlohu pixelu. Byly vybrány buňky se zápornými hodnotami a ostatní hodnoty nahrazeny nulou. Nakonec bylo vše vynásobeno -1. Použit byl následující příkaz v nástroji Raster Calculator.

```
(Con("fin_perpix", 0, "fin_perpix", "Value >= 0") * -1)
```

4.4 WaTEM/SEDEM

Stejně jako u programu TerrSet bylo pro správné fungování modelu WaTEM/SEDEM nutné mít v systému Windows nastavené jako oddělovač místo desetinné čárky desetinnou tečku. Pro výpočet byla opět všechna vstupní data převedena do formátu RST. Hodnoty NoData byly nastaveny na hodnotu -9999 u DMR a na hodnotu 0 u všech ostatních vrstev. Potřebná vstupní data byla následující:

1. Digitální model reliéfu

Rastrová vrstva ve formátu RST, NoData nastavena na hodnotu -9999, datový typ floating point.

2. Vrstva využití území

Rastrová vrstva ve formátu RST, NoData nastavena na hodnotu 0, datový typ integer. Zájmové území muselo být rozčleněno do specifických kategorií, které bylo nutné přesně dodržet včetně jejich hodnot.

-2	síť komunikací a zastavěná území
-1	vodní plochy (vodní toky)
0	oblasti mimo řešené území
1-9999	zemědělské pozemky orné půdy
10000	lesy
20000	louky a pastviny

3. Vrstva vodních toků

Rastrová vrstva ve formátu RST, NoData nastavena na hodnotu 0, datový typ integer. Každý úsek toku musí mít unikátní hodnotu a úseky musí být rozděleny tak, aby na každém úseku toku byla umístěna maximálně jedna vodní nádrž. Musí být také správně vyřešeny obtokové kanály a malé toky musí být přiřazeny k ostatním (Krása, 2010). Pro výpočet byl použit pouze jeden hlavní tok a celý vodní tok byl tedy pouze jedním úsekem.

4. Topologie vodních toků

Topologická tabulka vodních toků ve formátu TXT. V tabulce jsou uvedeny informace o návaznosti jednotlivých úseků toků a bylo nutné ji vytvořit i při použití pouze jednoho toku. Tabulka musí obsahovat minimálně tyto sloupce (Krása, 2010):

- a. idrid
v prvním řádku uveden celkový počet úseků, dále pak identifikátory jednotlivých úseků, počínajících 1 a dále postupně vzrůstajících
- b. FNODE_
počáteční uzly jednotlivých úseků
- c. TNODE_
koncové uzly jednotlivých úseků
- d. lenght_arc_
délka jednotlivých úseků, nemusí odpovídat realitě

5. R faktor

Konstantní hodnota pro celé zájmové území, odpovídá 1/1000 hodnot používaných v ČR.

6. K faktor

Rastrová vrstva ve formátu RST, NoData nastavena na hodnotu 0, datový typ floating point. Hodnoty odpovídají stonásobku hodnot používaných v ČR.

7. C faktor

Rastrová vrstva ve formátu RST, NoData nastavena na hodnotu 0, datový typ floating point.

8. PTEF

Hodnota poměru zachcení splavenin, zadávána samostatně pro lesy, ornou půdu a trvalé travní porosty. Pro výpočet použity doporučené hodnoty pro ČR dle (Krása, 2010) a jsou uvedeny v tabulce č. 5.

9. Parcel connectivity

Hodnota poměru zachycení splavenin na hranicích pozemků, zadávána samostatně pro lesy/trvalé travní porosty a ornou půdu. Pro výpočet použity doporučené hodnoty pro ČR dle (Krása, 2010) a jsou uvedeny v tabulce č. 5.

10. K_{TC}

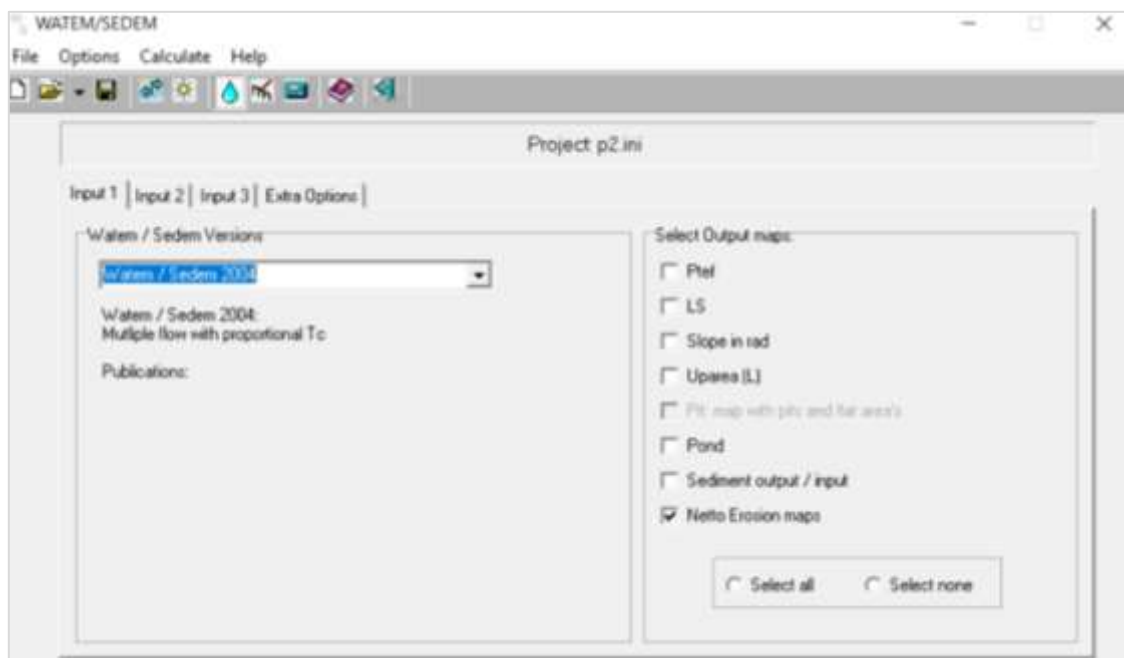
Hodnoty kalibračních koeficientů transportní kapacity. Pro výpočet použity doporučené hodnoty pro ČR dle (Krása, 2010) a jsou uvedeny v tabulce č. 5.

Tabulka 5 Doporučené hodnoty parametrů PTEF, parcel connectivity a K_{TC} (zdroj: Krása, 2010)

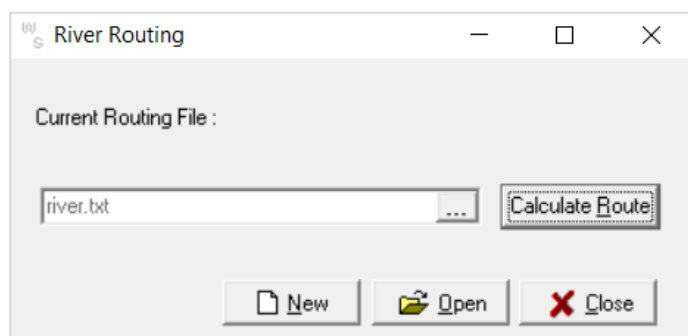
	orná půda rozmezí (doporučeno)	les rozmezí (doporučeno)	TTP rozmezí (doporučeno)
PTEF	0	60 – 100 (75)	50 – 100 (75)
Parcel connectivity	0 – 100 (40)	0 – 100 (75)	
K _{TC}	30 – 100 (35)	30 – 200 (55)	

Výpočet retence sedimentů

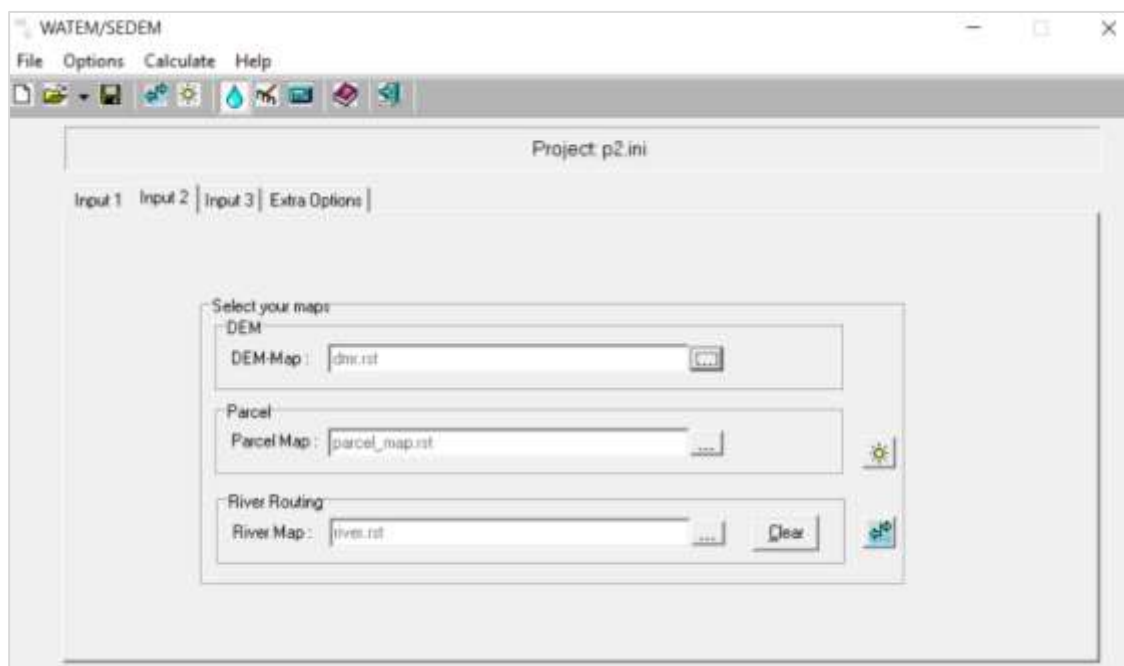
Po získání všech vstupních dat mohlo být přistoupeno k provedení výpočtu. Model WaTEM/SEDEM má specifické nároky na spuštění. Model nebylo nutno instalovat, ale pro správnou funkci bylo nutné umístit iniciační soubor do adresáře se vstupními daty. V tomto souboru jsou ukládány projekty modelu obsahující informace o zadaných parametrech, výsledcích posledního výpočtu a cestách k datům. Rozhraní modelu tvoří čtyři záložky, ve kterých jsou postupně zadávány vstupní parametry. V první záložce (obrázek č. 15) je vybrána verze modelu v které bude proveden výpočet a požadované výstupy. Pro výpočet byla zvolena verze z roku 2004. V další záložce jsou zvoleny vrstvy DMR, vrstvy využití území, vodních toků a také připravená tabulka topologie vodních toků (obrázek č. 17). Tabulka je zadána v dialogovém okně v podobě TXT souboru, který je strukturován tak, jak bylo popsáno na začátku této kapitoly. Z této tabulky je poté nutné vypočítat soubor ROU, se kterým dále model pracuje (obrázek č. 16).



Obrázek 15 První záložka rozhraní modelu WaTEM/SEDEM

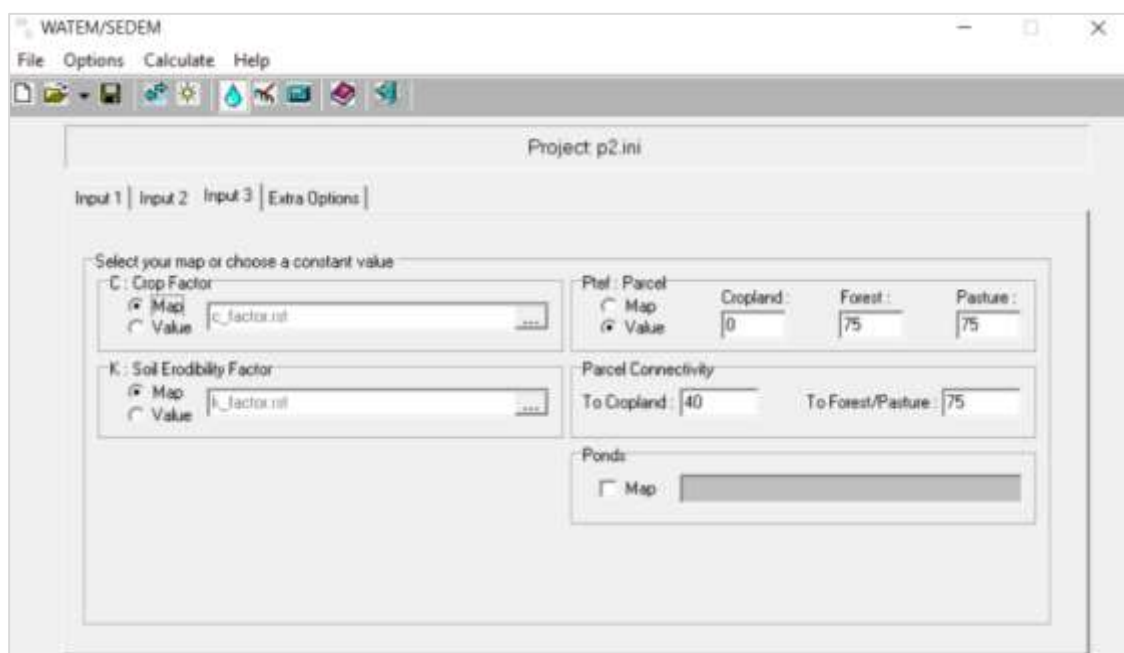


Obrázek 16 Dialogové okno pro výpočet topologie vodních toků u modelu WaTEM/SEDEM



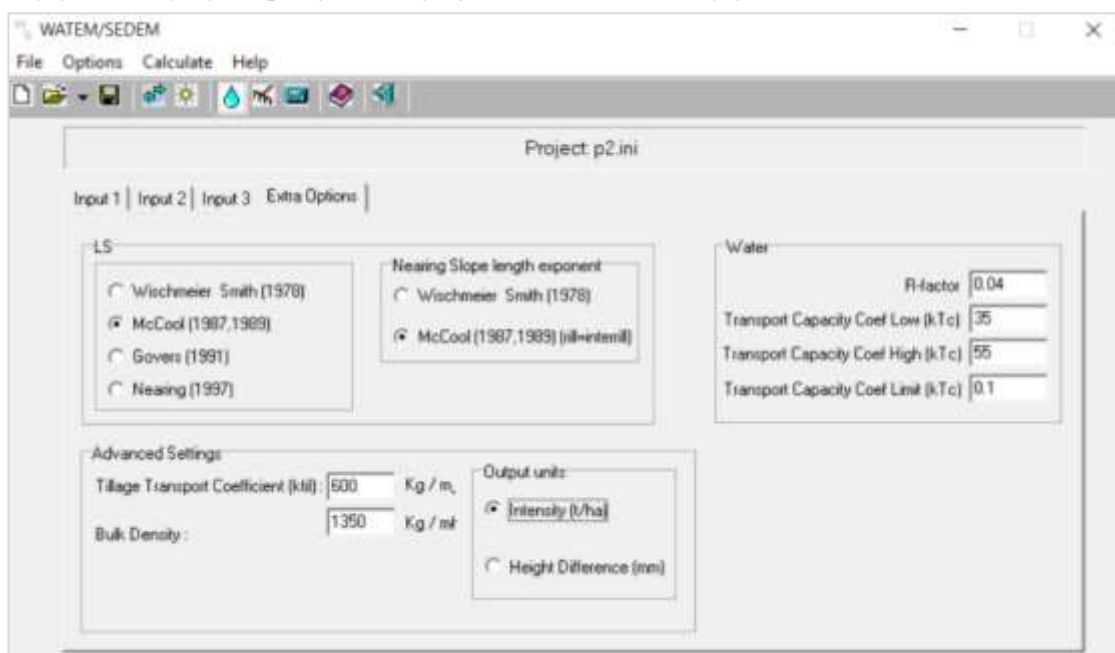
Obrázek 17 Druhá záložka rozhraní modelu WaTEM/SEDEM

V další záložce jsou zadány vrstvy C a K faktoru, které lze zadat jako hodnoty a nebo ve formě rastrové vrstvy. U obou faktorů byly použity vytvořené rastrové vrstvy. K faktor musí být stonásobkem hodnot běžně používaných v ČR. Dále jsou zde zadány hodnoty PTEF a parcel connectivity, které byly použity dle tabulky č. 5. Vzhled záložky je zobrazen na obrázku č. 18.



Obrázek 18 Třetí záložka rozhraní modelu WaTEM/SEDEM

V poslední záložce jsou zvoleny metody výpočtu LS faktoru a zadána hodnota R faktoru. R faktor musí být 1/1000 hodnot používaných v ČR. Dále jsou zde zadány hodnoty kalibračních parametrů K_{TC} , které byly použity dle tabulky č. 5. Nakonec byly zvoleny výstupní jednotky t/ha. Vzhled záložky je zobrazen na obrázku č. 19.



Obrázek 19 Čtvrtá záložka rozhraní modelu WaTEM/SEDEM

Po nahrání všech vstupních dat mohl být proveden výpočet. Výsledkem je několik vrstev. Hlavním výstupem je vrstva čisté ztráty půdy zobrazující ztrátu nebo ukládání (retenci) půdy podle toho, co je v dané buňce převažující. Záporné hodnoty označují ztrátu půdy, kladné hodnoty označují ukládání (retenci) sedimentů. Hodnoty jsou ale v jednotkách t/ha a pro porovnání s ostatními vrstvami bylo nutné tuto vrstvu převést na hodnoty vztahující se k rozloze pixelu. Toto bylo provedeno stejně jako u výsledků z modelu TerrSet vydělením vrstvy 100. Pro získání výsledné vrstvy retence bylo nejprve nutné nahradit hodnoty mimo zájmové území hodnotou NoData pomocí příkazu v nástroji Raster Calculator

```
SetNull("Wat_fin_perpix.tif" == 0, "Wat_fin_perpix.tif")
```

a poté z vrstvy čisté ztráty půdy vybrat kladné hodnoty a ostatní nahradit hodnotou 0.

```
Con("fin_perpix_null.tif", 0, "fin_perpix_null.tif", "Value <= 0")
```

5 VÝSLEDKY

5.1 Výpočty retenční funkce krajiny

Po přípravě dat byly na daném zájmovém území provedeny výpočty pomocí nástroje InVEST SDR, programu TerrSet a v něm modelech RUSLE a ArcGIS, modelu WaTEM/SEDEM a pomocí vlastního vytvořeného modelu v prostředí ArcGIS Pro. Výstupem analýzy retenční funkce krajiny byly zejména mapy retence sedimentů s průměrnými ročními hodnotami vypočítané těmito metodami. Vedlejším výstupem byl model pro výpočet retence sedimentů, který byl vytvořen pro potřeby provedení analýzy v programu ArcGIS Pro. Tento model je sestaven jako toolbox do programu ArcGIS Pro a může být použit pro výpočet retence sedimentů, ztráty půdy erozí a SDR. Výsledné mapy retence jsou zobrazeny na obrázcích č. 20, 21, 22 a 23. Pro vizualizaci byla zvolena jednotná stupnice pro všechny mapy tak, aby bylo možné porovnat rozdíly. Výstupy z modelu InVEST SDR a ArcGIS Pro byly velmi podobné včetně celkových hodnot výsledné retence, což bylo způsobeno tím, že model v ArcGIS Pro je sestaven na základě algoritmů použitých u InVEST SDR. Mezi výstupy z modelů TerrSet a WaTEM/SEDEM lze také spatřit určitou podobnost, ale model WaTEM/SEDEM vykazuje oproti všem ostatním modelům výrazně vyšší hodnoty retence. Díky odlišnému přístupu oproti předchozím dvěma výstupům jsou zde obsaženy poměrně velké oblasti s nulovými hodnotami retence, což je způsobeno tím, že modely znázorňují současně hodnoty retence i ztráty půdy. Retence tedy v těchto místech s nulovými hodnotami může probíhat, ale pokud nepřekoná hodnoty ztráty půdy, není zde znázorněna. Výsledky z modelu TerrSet jsou specifické tím, že hodnoty retence jsou stejné i pro některé poměrně velké plochy, což je způsobeno díky pozemkovému přístupu modelu k výpočtům. Z dostupných poznatků a znalostí a díky neznámým naměřeným hodnotám reálné retence nelze určit, který model počítá správně a který je nejbližší reálným hodnotám. Porovnání hodnot celkové retence za zájmové území, nejvyšších a průměrných hodnot je zobrazeno v tabulce č. 6.

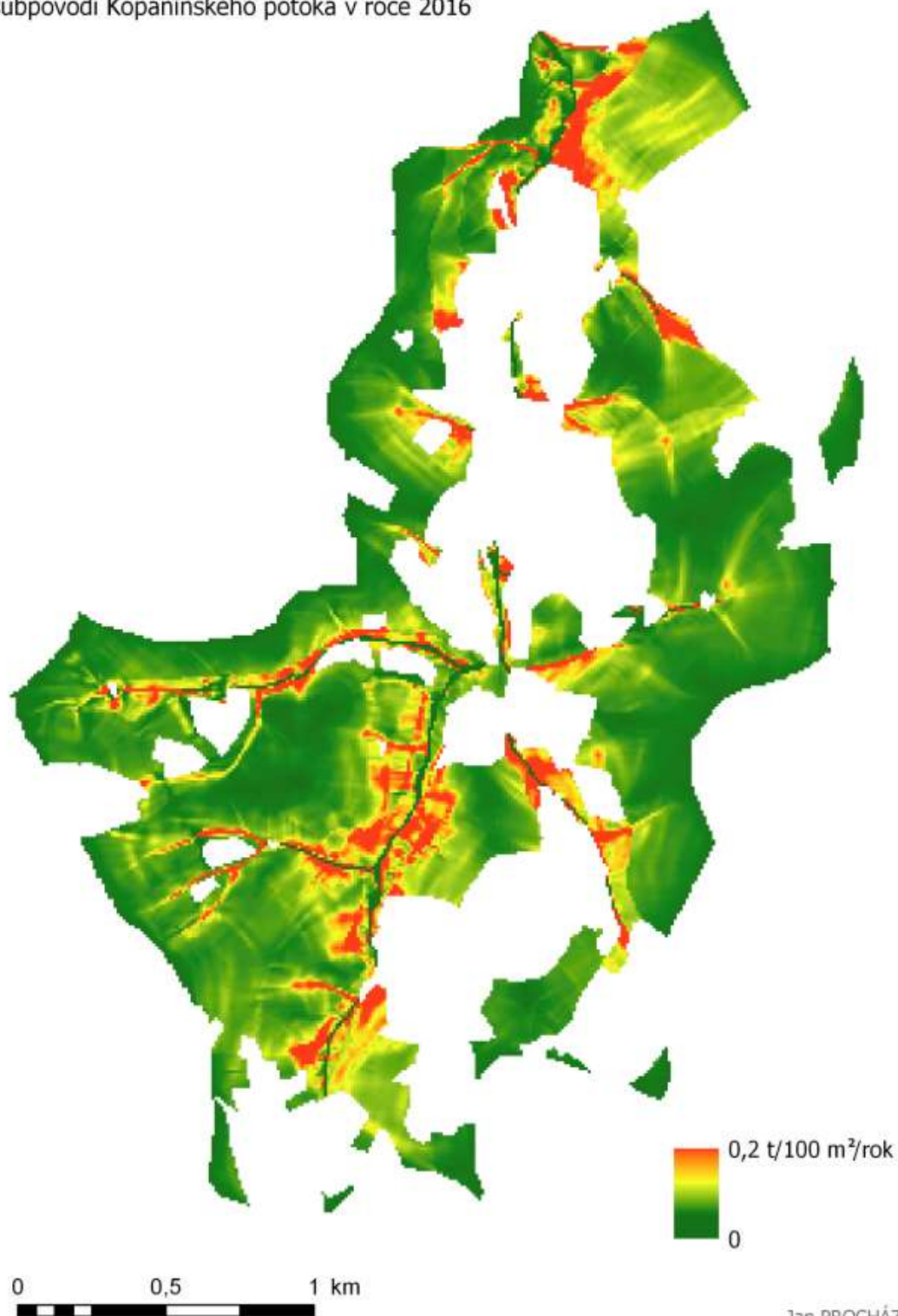
Tabulka 6 Porovnání hodnot retence dle výpočtů jednotlivých modelů

	InVEST SDR	ArcGIS	TerrSET	WaTEM/SEDEM
celková hodnota retence v záj. území (t/rok)	21,2397	22,6371	22,4154	39,6395
nejvyšší hodnota retence (t/100 m ² /rok)	2,6933	2,1322	8,7317	112,7822
průměrná hodnota retence (t/100 m ² /rok)	0,0603	0,0689	0,0647	0,1133

RETENCE SEDIMENTŮ DŮSLEDKEM ZTRÁTY PŮDY EROZÍ

výsledek výpočtu v modelu InVEST SDR

v subpovodí Kopaninského potoka v roce 2016

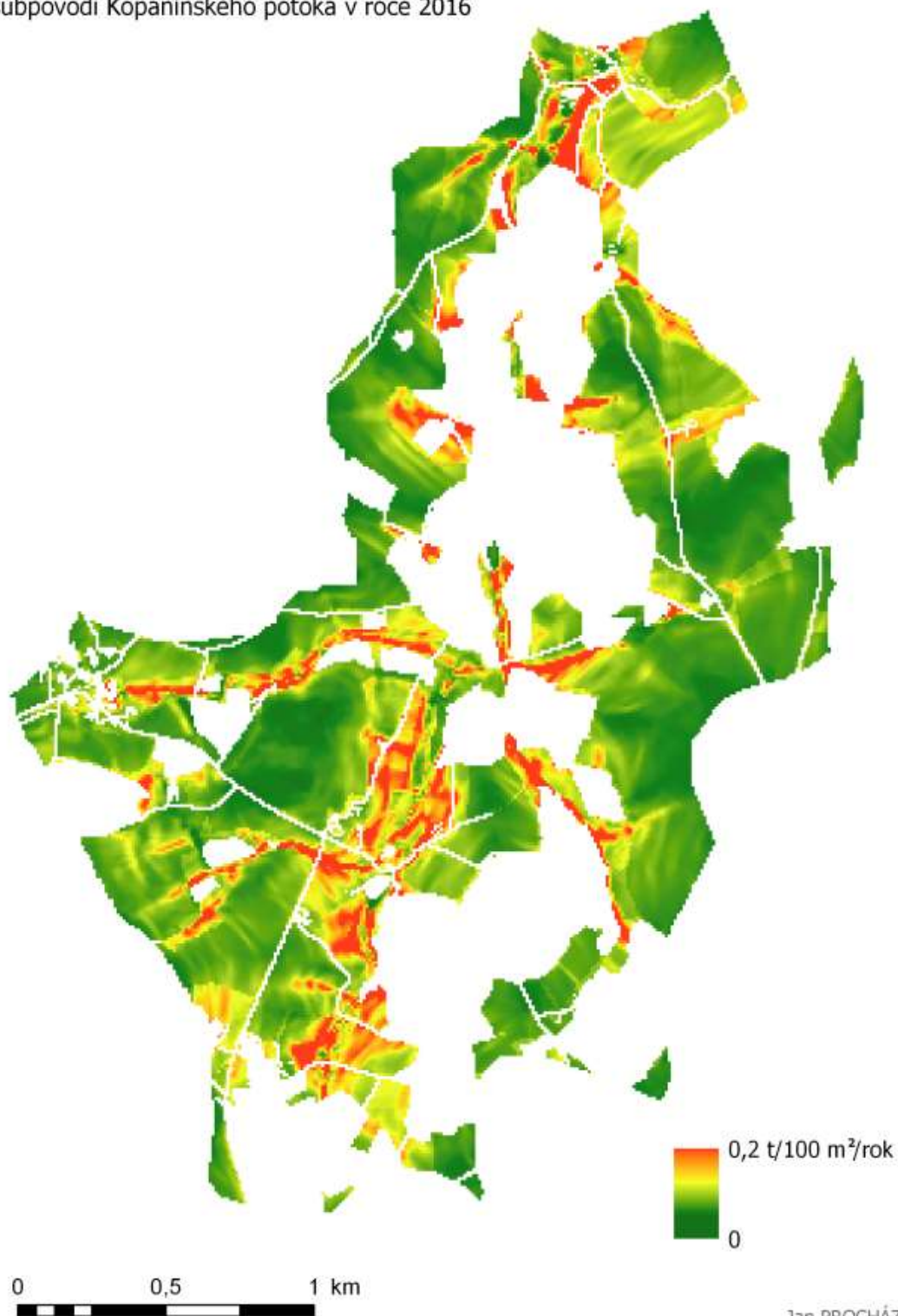


Obrázek 20 Výsledná mapa retence sedimentů vypočítaná v InVEST SDR

RETENCE SEDIMENTŮ DŮSLEDKEM ZTRÁTY PŮDY EROZÍ

výsledek výpočtu modelu v ArcGIS Pro

v subpovodí Kopaninského potoka v roce 2016

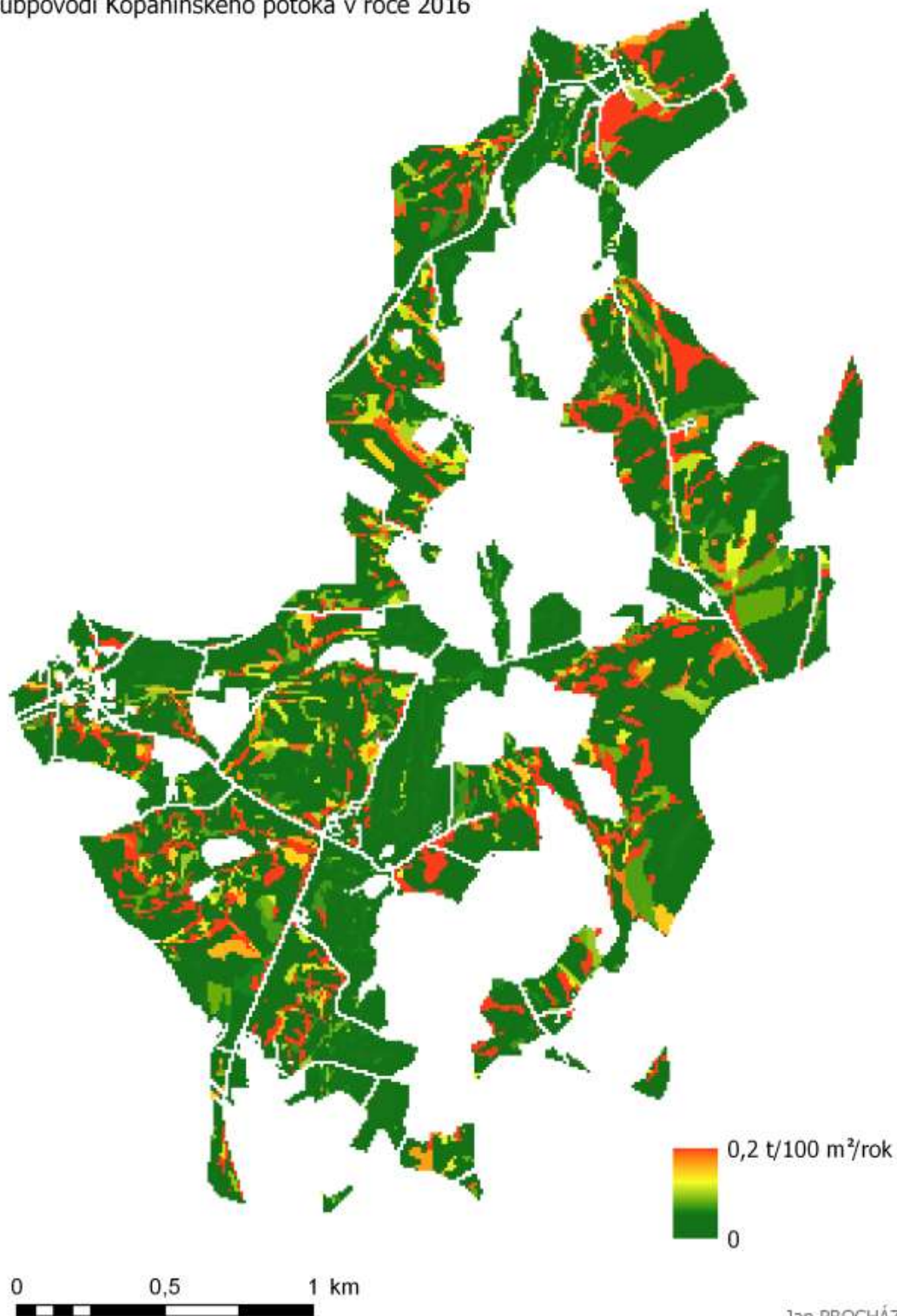


Obrázek 21 Výsledná mapa retence sedimentů vypočítaná v ArcGIS Pro

RETENCE SEDIMENTŮ DŮSLEDKEM ZTRÁTY PŮDY EROZÍ

výsledek výpočtu v TerrSet SEDIMENTATION

v subpovodí Kopaninského potoka v roce 2016

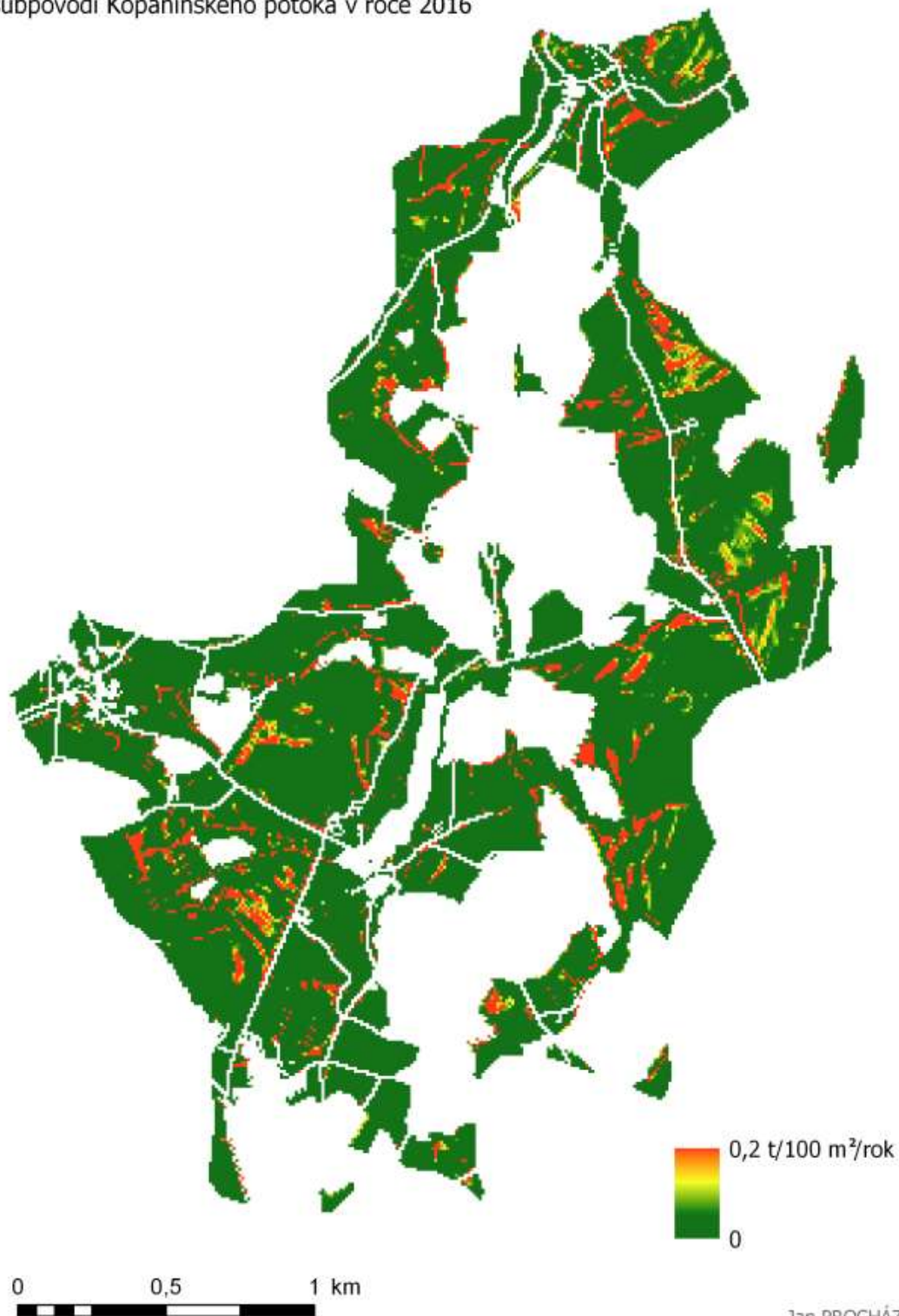


Obrázek 22 Výsledná mapa retence sedimentů vypočítaná v TerrSet a modelu SEDIMENTATION

RETENCE SEDIMENTŮ DŮSLEDKEM ZTRÁTY PŮDY EROZÍ

výsledek výpočtu v modelu WaTEM/SEDEM

v subpovodí Kopaninského potoka v roce 2016



Jan PROCHÁZKA
Olomouc 2018

Obrázek 23 Výsledná mapa retence sedimentů vypočítaná v WaTEM/SEDEM

5.2 Porovnání modelů v technologické rovině

Model InVEST SDR a výpočet v programu ArcGIS Pro jsou založeny na stejných algoritmech. Založeny jsou na principu předpokladu zachycení sedimentů při erozních procesech vegetačním pokryvem, což je také spolu s faktorem účinnosti ochranných opatření jediný faktor z USLE rovnice, který má možnost člověk ovlivnit. Retence je zde počítána porovnáním transportu splavenin pro reálné využití území a přepočítaným transportem splavenin pro holou půdu, bez vegetačního pokryvu.

Modely RUSLE a SEDIMENTATION z programu TerrSet počítají retenci zcela odlišným způsobem. Výpočet je založen na principu rozdělení území na pozemky, co možná nejvíce homogenní plochy, na kterých je vypočítána ztráta půdy izolovaně. Následně je porovnávána ztráta půdy mezi jednotlivými nad sebou se nacházejícími pozemky tak, jak půda postupuje ze svahu směrem k vodnímu toku. Zjištění hodnot retence je založeno na základě porovnání hodnot půdy donesené z vyššího pozemku a hodnot půdy odnesené do nižšího pozemku.

Model WaTEM/SEDEM počítá retenci na základě vypočtení ztráty půdy a odtokových drah pomocí stanovení tzv. transportní kapacity jednotlivých kategorií využití území a poměru zachycení na hranicích pozemků zadávaných jako vstupní parametr. Tímto je určena schopnost zachycení sedimentů pro každý pixel a porovnáním se ztrátou půdy určena buďto čistá ztráta půdy nebo retence.

Z hlediska náročnosti preprocessingu a přípravy dat byla nejsložitější metoda tvorby vlastního modelu v programu ArcGIS Pro. Bylo důležité nejenom připravit data pro provedení výpočtu tak, jako u ostatních modelů, ale zejména rozmyslet a zvolit metody a vhodné algoritmy a následně najít způsob jak je implementovat. Z hlediska náročnosti přípravy dat bylo náročnější připravit data do programu TerrSet a modelu WaTEM/SEDEM, jelikož data musela splňovat specifické nároky a musela být převedena do formátu RST, který není běžně používán. Jako uživatelsky nejprívětivější a zároveň nejméně náročný na podobu vstupních dat, jelikož podporuje běžně používané formáty, se ukázal být model InVEST SDR. Tento nástroj je nejnovější a v současné době také jediný z použitých, který je stále vyvíjen.

6 DISKUZE

Přesnost všech výpočtů přímo závisí na kvalitě vstupních dat. Toto je ale v mnoha případech velmi složité dodržet. Všechny použité metody jsou založeny na bázi RUSLE rovnice, ale některé parametry byly zadávány dle metody USLE. Jedná se například o data o půdách, u kterých je použití dle RUSLE pro území České republiky téměř nemožné. Běžně je tedy v České republice používána metoda orientačního určení K faktoru z jednotek BPEJ, které ale často nemusí zcela vystihovat realitu. Problematické je také určení přesné hodnoty R faktoru, které je prozatím v České republice nemožné díky malému množství dat o dlouhodobých přívalových srážkách. Orientační určení K faktoru pro obecné kategorie využití území také nemusí zcela odpovídat realitě, jelikož reálná hodnota je určena i druhem plodiny a její vyvojovou fází což pro obecné kategorie, jako jsou orná půda nebo trvalé travní porosty nemůže být splněno. Digitální model reliéfu může být zase ovlivněn přílišnou podrobností a nebo naopak přílišným zhlazením. Klíčové je tedy nalezení správného kompromisu tak, aby byla zachována co největší možná podrobnost. Pokud se tyto všechny vlivy spojí dohromady, mohou být výsledky výpočtů velmi odlišné od skutečného stavu. Konkrétní hodnoty výsledných vrstev by tedy měly brát spíše orientačně a posouzeny možné vlivy, které toto mohly ovlivnit.

Přesnost výpočtů může také ovlivnit nedostatečná dokumentace daného nástroje a nebo její špatná interpretace. Například u modelu TerrSet RUSLE není uvedeno, jak by měly být ideálně voleny jednotlivé parametry pro výpočet rozdělení území na pozemky a jak toto nastavení může ovlivnit výsledné hodnoty ztráty půdy. U výsledků tedy může nastat značná nejistota.

Problémy může také způsobit špatné nastavení desetinných oddělovačů, které by měly být nastaveny na desetinnou tečku místo čárky. Uživatel si přitom tohoto problému nemusí být vědom.

Dalším zmíněným problémem může být špatná interpretace výstupů a používaných jednotek. Typicky toto může nastat opět u programu TerrSet, kde jsou hodnoty jednotlivých buněk uvedeny pro celé pozemky a ne pro danou buňku. Pokud si uživatel tento problém neuvědomí, může dojít k chybné interpretaci dat. Logičtější by tento přístup byl v případě, že by jednotlivé pozemky byly převedeny na vektor a hodnota pro daný pozemek by byla uvedena v atributové tabulce.

V případě sestavení vlastního modelu na základě algoritmů určených původně pro manuální výpočty může být problémem jejich správná implementace do prostředí GIS. Nejasné může být také při implementaci algoritmů určení správného způsobu vyjádření sklonu svahu buďto procenty a nebo pomocí stupňů nebo radiánů.

7 ZÁVĚR

Cílem práce bylo provedení analýzy retenční funkce krajiny pro zadané zájmové území Kopaninského potoka prostřednictvím vybraných GIS nástrojů. Těmito nástroji byly InVEST SDR, TerrSet, WaTEM/SEDEM a ArcGIS. V první části práce byla zpracována rešerše popisující jednotlivé metody výpočtů, vstupní data a použité modely a jejich algoritmy. Vstupní data byla popsána včetně uvedení alternativ jejich získání. Dále byly popsány použité způsoby získání dat pro potřeby výpočtů.

Praktickou částí práce byla příprava vstupních dat a provedení samotných výpočtů retenční funkce krajiny prostřednictvím zadaných nástrojů a jejich vzájemné porovnání. Pro potřeby výpočtu prostřednictvím programu ArcGIS byl sestaven model umožňující výpočet retence sedimentů, ztráty půdy erozí a poměr odnosu sedimentů, který byl založen na algoritmech použitých u modelu InVEST SDR. Při přípravě vstupních dat bylo také vyzkoušeno několik způsobů získání vrstvy LS faktoru.

Hlavním výsledkem práce byly mapy retence sedimentů dle jednotlivých použitých nástrojů, kterými byly vypočítány. Výsledky z modelu InVEST SDR a z ArcGIS byly velmi podobné, což bylo také očekáváno díky tomu, že byly oba modely založeny na stejném principu. Tímto byla také ověřena správnost sestaveného modelu. U výsledků výpočtů z programu TerrSet a WaTEM/SEDEM lze také spatřit určitou podobnost, ale hodnoty vypočítané retence jsou u modelu WaTEM/SEDEM výrazně vyšší než u všech ostatních modelů. Pro porovnání byly také určeny hodnoty celkové retence pro celé zájmové území a hodnoty průměrné a maximální retence. Hodnoty celkové retence byly u modelů InVEST SDR, ArcGIS a TerrSet téměř totožné (21-22 t/rok), zatímco u modelu WaTEM/SEDEM byla tato hodnota téměř dvojnásobná (39 t/rok).

Nakonec byly zhodnoceny jednotlivé použité nástroje z hlediska náročnosti a preprocessingu dat. Nejsložitější metodou bylo sestavení vlastního modelu pro výpočet v prostředí ArcGIS, uživatelsky nejpřívětivější a s nejmenšími nároky na vstupní data byl poté model InVEST SDR.

SEZNAM ILUSTRACÍ

- Obrázek 1 Rozsah zájmového území (zdroj: WMS služba ZM 25)
- Obrázek 2 Výškové poměry zájmového území (zdroj: dodaný DMR 5G)
- Obrázek 3 Postup zpracování práce (zdroj: vlastní tvorba)
- Obrázek 4 Použitý digitální model reliéfu (zdroj: dodaný DMR 5G)
- Obrázek 5 Vrstva využití území pro model InVEST SDR s uvedenými kódy jednotlivých parametrů použitých jako hodnoty rastru
- Obrázek 6 Vrstva využití území pro model WaTEM/SEDEM s uvedenými kódy jednotlivých parametrů použitých jako hodnoty rastru
- Obrázek 7 Prostorové rozložení hodnot K faktoru v zájmovém území
- Obrázek 8 Výsledná vypočítaná vrstva LS faktoru
- Obrázek 9 Vytvořená vrstva C faktoru
- Obrázek 10 Rozhraní modelu InVEST SDR verze 3.3.0
- Obrázek 11 Schéma sestaveného modelu pro ArcGIS Pro
- Obrázek 12 Rozhraní vytvořeného modelu
- Obrázek 13 Rozhraní a použité vstupní parametry modelu TerrSet RUSLE
- Obrázek 14 Rozhraní a použité vstupní parametry modelu TerrSet SEDIMENTATION
- Obrázek 15 První záložka rozhraní modelu WaTEM/SEDEM
- Obrázek 16 Dialogové okno pro výpočet topologie vodních toků u modelu WaTEM/SEDEM
- Obrázek 17 Druhá záložka rozhraní modelu WaTEM/SEDEM
- Obrázek 18 Třetí záložka rozhraní modelu WaTEM/SEDEM
- Obrázek 19 Čtvrtá záložka rozhraní modelu WaTEM/SEDEM
- Obrázek 20 Výsledná mapa retence sedimentů vypočítaná v InVEST SDR
- Obrázek 21 Výsledná mapa retence sedimentů vypočítaná v ArcGIS Pro
- Obrázek 22 Výsledná mapa retence sedimentů vypočítaná v TerrSet a modelu SEDIMENTATION
- Obrázek 23 Výsledná mapa retence sedimentů vypočítaná v WaTEM/SEDEM

SEZNAM TABULEK

- Tabulka 1 Zvolené kategorie pro výslednou vrstvu využití území
- Tabulka 2 Vybrané vrstvy z datové sady ZABAGED® použité pro tvorbu finální vrstvy využití území a jejich kategorie dle nároků jednotlivých modelů
- Tabulka 3 Použité hodnoty C faktoru pro kategorie využití území
- Tabulka 4 Porovnání vstupních dat, parametrů a používaných formátů u jednotlivých modelů
- Tabulka 5 Doporučené hodnoty parametrů PTEF, parcel connectivity a K_{TC} (zdroj: Krása, 2010)
- Tabulka 6 Porovnání hodnot retence dle výpočtů jednotlivých modelů

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

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

Antonín Benc *Geoinformatické alternativy stanovení C-faktoru modelu RUSLE*. Olomouc, 2013. 53 s., Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra geoinformatiky. Vedoucí práce RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D.

Josef Krása *Hodnocení erozních procesů ve velkých povodních za podpory GIS*. Praha, 2004. 176 s., Dizertační práce. České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Pretl, CSc.

Prohlížecká služba WMS pro Územní jednotky (UX). *Geoportál ČÚZK: Přístup k mapovým produktům a službám resortu* [online]. 2010, 2013-09-29 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z:
[http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(4m4s1frftbdz0uqnsbwxscx\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=wms.verejne&metadataID=CZ-00025712-CUZK_WMS-MD_UX&metadataXSL=metadata.sluzba&head_tab=sekce-03-gp&menu=3128](http://geoportal.cuzk.cz/(S(4m4s1frftbdz0uqnsbwxscx))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=wms.verejne&metadataID=CZ-00025712-CUZK_WMS-MD_UX&metadataXSL=metadata.sluzba&head_tab=sekce-03-gp&menu=3128)

GUERRA, Carlos A., Joachim MAES, Ibse GEIJZENDORFFER a Marc J. METZGER. An assessment of soil erosion prevention by vegetation in Mediterranean Europe: Current trends of ecosystem service provision. *Ecological Indicators* [online]. 2015 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.043>

Josef Krása *Empirické modely vodní eroze v ČR nástroje, data, možnosti a rizika výpočtů*. Praha, 2010. 159s., Habilitační práce. České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství.

Tomáš Holčák *Stanovení rizika ohrožení vodní erozí na základě modelu USPED*. Olomouc, 2013. 40 s., Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra geoinformatiky. Vedoucí práce RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D.

B. Notebaert a kol. *WaTEM/SEDEM version 2006 Manual* [online], 2006. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z:
http://geo.kuleuven.be/geography/modelling/erosion/watemsedem2006/manual_watemsedem.pdf

BORSELLI, Lorenzo, Paola CASSI a Dino TORI. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *CATENA* [online]. 2008 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816208000982?via%3Dihub>

Sediment Delivery Ratio Model. *Natural Capital Project* [online]. 2018, 2015 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: http://data.naturalcapitalproject.org/invest-releases/documentation/3_3_0/sdr.html

Natural capital project [online]. 2017 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.naturalcapitalproject.org/>
SDR model v.s. Sediment retention model. *Natural capital project* [online]. 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://forums.naturalcapitalproject.org/index.php?p=/discussion/1066/sdr-model-v-s-sediment-retention-model%20-%205.%20p%C5%99%C3%ADsp%C4%9Bvek%20Perrine%20Hamel>

WaTEM/SEDEM Homepage. *KU LEUVEN: DEPARTEMENT AARD- EN OMGEVINGSWETENSCHAPPEN* [online]. 2018, 2005 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://geo.kuleuven.be/geography/modelling/erosion/watemsedem/index.htm>

CLARK LABS [online]. USA, 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://clarklabs.org/about/>

ArcGIS Pro: Tool Reference. *ArcGIS Desktop* [online]. 2018, 2017 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/flow-direction.htm>

David Jakeš *Program pro vzájemnou konverzi dat mezi produkty ArcGIS a TerrSet*. Olomouc, 2017. 47 s., Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra geoinformatiky. Vedoucí práce Ing. Zdena Dobešová, Ph.D.

NOVOTNÝ, Ivan. *Příručka ochrany proti vodní erozi: [aktualizované znění - leden 2014]*. 2., aktualiz. vyd. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2014. ISBN 978-80-87361-33-7.

QUITT, Evžen. Klimatické oblasti Československa: Climatic regions of Czechoslovakia. Brno: Geografický ústav ČSAV, 1971. *Studia Geographica*.

Dagmar Babilonová *Přehled zemědělských technik a principů obhospodařování krajiny ve vazbě na erozi půdy*. Olomouc, 2010. 82 s., Diplomová práce. Univerzita

Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra geografie. Vedoucí práce
RNDr. Aleš LÉTAL, Ph.D.

J. RONALD EASTMAN *TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System
MANUAL*. Clark University, 2016.

WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D., 1978: Predicting Rainfall Erosion Losses – A
guide Book to Censervation Planning. Agr. Handbook No. 537, US. Dept. of
Agriculture, Washington.

Renard, K., Foster, G., Weesies, G., McCool, D., Yoder, D., 1997. Predicting Soil
Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the revised soil loss
equation

Clark Labs, *TerrSet 18.07 Help*, 2015

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Vázané přílohy:

- Příloha 1 Mapa retenční funkce krajiny vypočítaná pomocí InVEST SDR
- Příloha 2 Mapa retenční funkce krajiny vypočítaná pomocí ArcGIS Pro
- Příloha 3 Mapa retenční funkce krajiny vypočítaná pomocí TerrSet
- Příloha 4 Mapa retenční funkce krajiny vypočítaná pomocí WaTEM/SEDEM

Volné přílohy

- Příloha 5 Poster
- Příloha 6 DVD

Struktura DVD

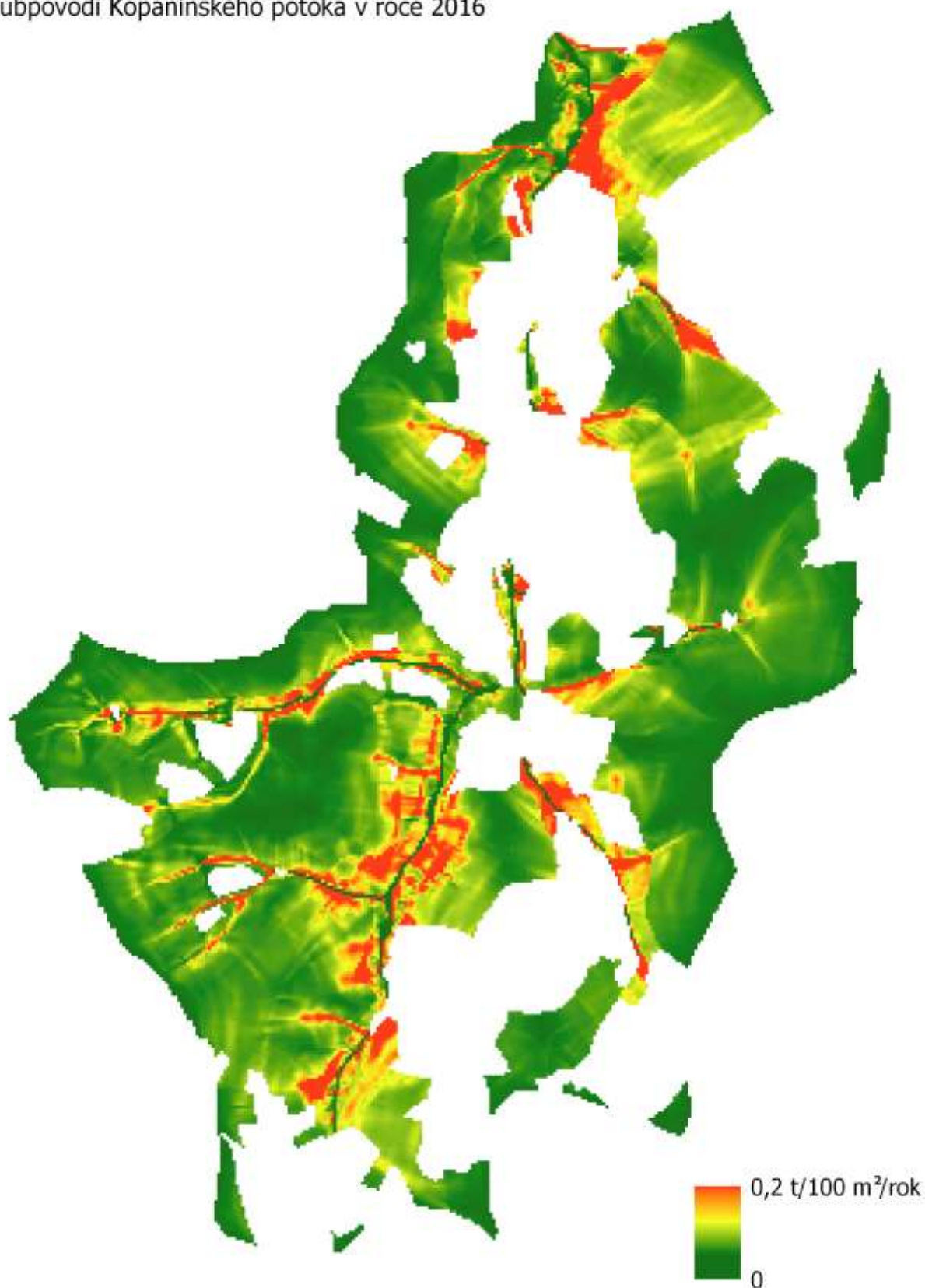
Adresáře:

- text_prace
- poster
- web
- model_arcgispro

RETENCE SEDIMENTŮ DŮSLEDKEM ZTRÁTY PŮDY EROZÍ

výsledek výpočtu v modelu InVEST SDR

v subpovodí Kopaninského potoka v roce 2016



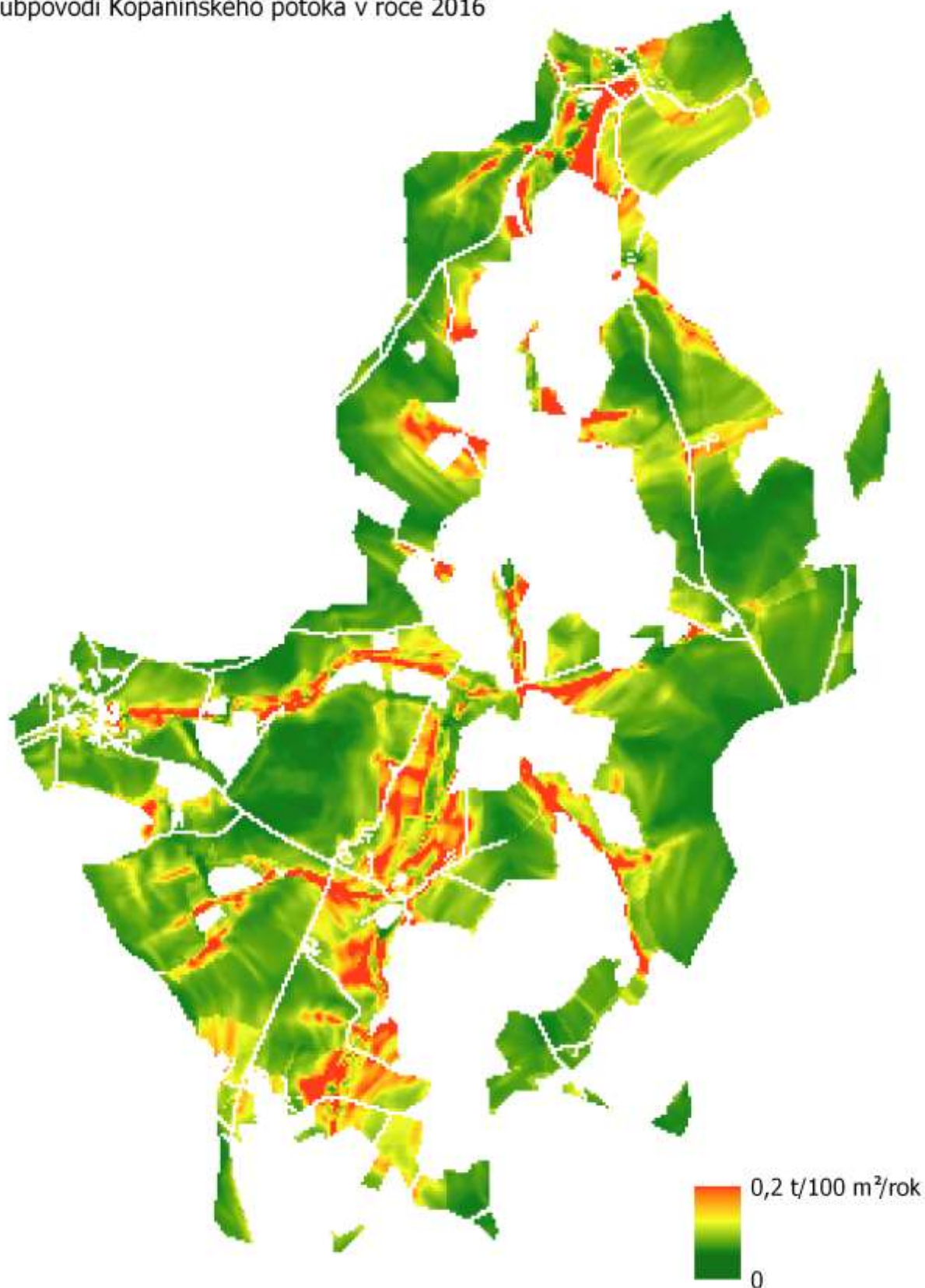
0 0,5 1 km

Jan PROCHÁZKA
Olomouc 2018

RETENCE SEDIMENTŮ DŮSLEDKEM ZTRÁTY PŮDY EROZÍ

výsledek výpočtu modelu v ArcGIS Pro

v subpovodí Kopaninského potoka v roce 2016



0 0,5 1 km

Jan PROCHÁZKA
Olomouc 2018

RETENCE SEDIMENTŮ DŮSLEDKEM ZTRÁTY PŮDY EROZÍ
výsledek výpočtu v TerrSet SEDIMENTATION
v subpovodí Kopaninského potoka v roce 2016



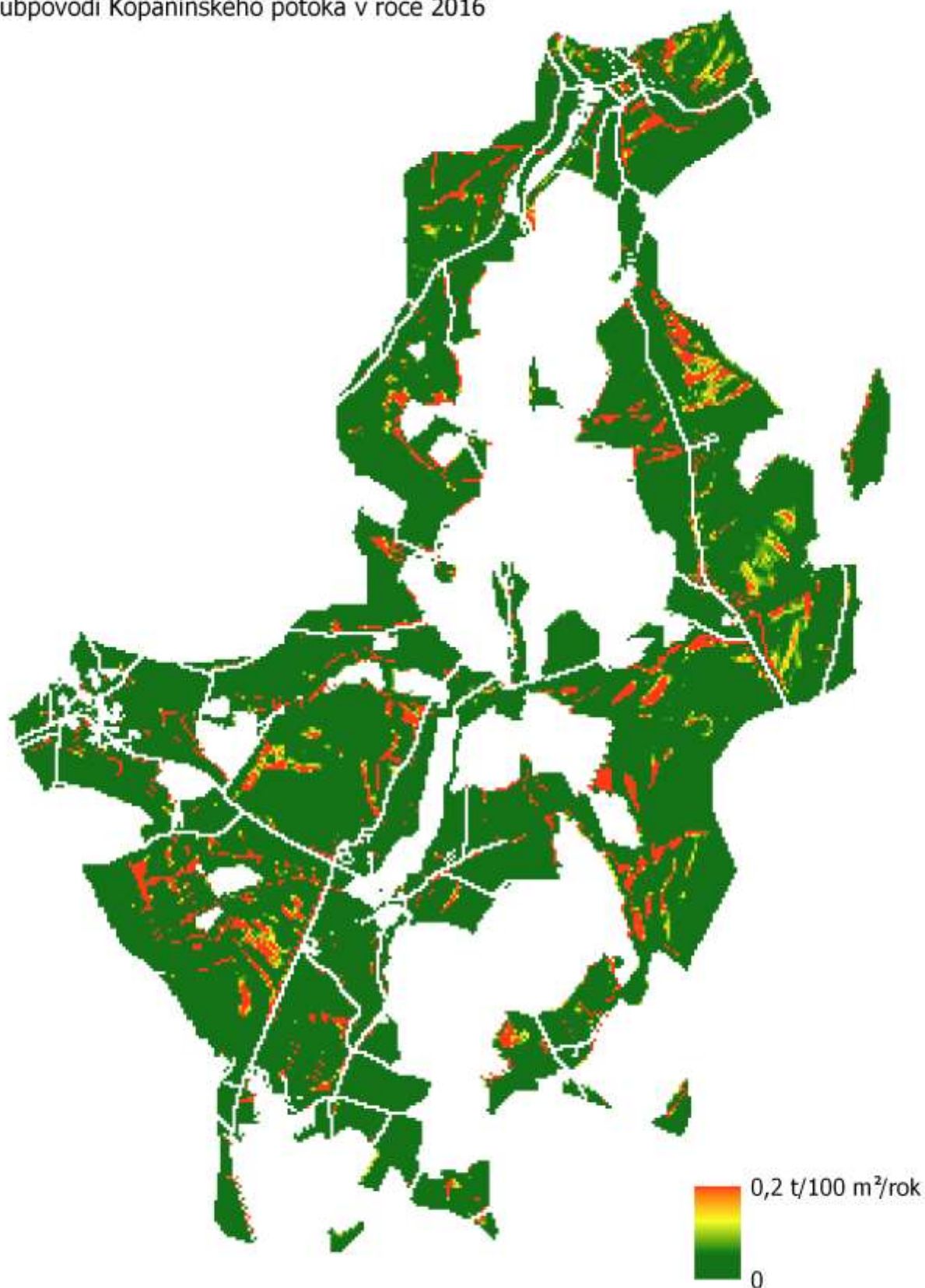
0 0,5 1 km

Jan PROCHÁZKA
Olomouc 2018

RETENCE SEDIMENTŮ DŮSLEDKEM ZTRÁTY PŮDY EROZÍ

výsledek výpočtu v modelu WaTEM/SEDEM

v subpovodí Kopaninského potoka v roce 2016



0 0,5 1 km

Jan PROCHÁZKA
Olomouc 2018