

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA HYDROMELIORACÍ A KRAJINNÉHO INŽENÝRSTVÍ



KVANTIFIKACE ZDROJŮ EROZNÍHO SEDIMENTU
V POVODÍ VÝROVKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
BC. HANA KLÍMOVÁ

VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
ING. MIROSLAV BAUER, PH.D.

PRAHA 2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Klímová Jméno: Hana Osobní číslo: 468608

Zadávací katedra: Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství K143

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Kvantifikace zdrojů erozního sedimentu v povodí Výrovky

Název diplomové práce anglicky: Quantification of erosion sediment sources in the Výrovka watershed

Pokyny pro vypracování:

Analyzujte zadané území povodí Výrovky (po uzávěrový profil Plaňany) z pohledu erozního smyvu a transportu sedimentu včetně zanášení jednotlivých vodních nádrží. K tomu využijte model WaTEM/SEDEM. Sestavte dataset vstupních dat pro celé řešené území a proveďte výpočet. Vyhodnotte území jako celek, jednotlivá subpovodí a také kritická místa vstupu sedimentu do říční sítě.

Proveďte ověření indikovaných výpočetních odtokových drah sedimentu na historických leteckých snímkách.

Zamyslete se nad možnostmi ochrany vybraných ohrožených subpovodí, ideálně nastínt formou scénáře ochrany a kvantifikovat efekt typu opatření.

Seznam doporučené literatury:

Bauer M.; Posuzování ohroženosti vodních nádrží sedimentem s využitím modelu WaTEM/SEDEM; ČVUT v Praze, 2018

Kráska J.; Hodnocení erozních procesů ve velkých povodích za podpory GIS; ČVUT v Praze, 2004

Báčová M.; Monitoring projevů vodní eroze na zemědělských půdách; ČVUT v Praze, 2018

Janeček M. a kol.; Metodika ochrany zemědělské půdy před erozí; ČZU Praha, 2012

Janeček M. a kol.; Ochrana zemědělské půdy před erozí; ISV Praha, 2002

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Miroslav Bauer, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 29. 9. 2021

Termín odevzdání diplomové práce: 2. 1. 2022

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Poděkování:

Ráda bych poděkovala mému vedoucímu panu Ing. Miroslavu Bauerovi, Ph.D. za pomoc, cenné rady, ochotu a podporu při vytváření práce.

Dále bych ráda poděkovala Ing. Luděkovi Strouhalovi, Ph.D. a Ing. Janu Devátému, Ph.D., za podporu a jejich znalosti při přípravě datových vstupů do modelu.

Poděkování také rozhodně patří projektům SS03010332 – Modelování významnosti zdrojů znečištění fosforem a návrhy efektivních opatření k naplnění cílů Strategie ke snížení obsahu živin ve vodách v povodí Labe; SS02030027 - Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu.

Obrovský dík patří mé rodině a všem v mém okolí, kteří mě po celou dobu tvorby práce podporovali.

Hana Klímová

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vytvořila samostatně s použitím uvedené literatury a uvedených podkladů. Pro program ArcGIS Pro byla využita univerzitní licence.

Praha 1.ledna 2022

Hana Klímová

OBSAH

Abstrakt	1
Klíčová slova	1
Abstract	2
Cíl práce	3
POPISNÁ ČÁST	4
1. Úvodní slovo	4
2. Úvod do problematiky	5
2.1. Proces eroze	5
2.2. Eroze ve světě	8
2.3. Eroze v ČR	11
2.4. Negativní důsledky erozních procesů	12
2.5. Protierozní opatření	14
3. Popis zájmové oblasti	15
3.1. Charakteristika území	15
3.2. Geomorfologické poměry	16
3.3. Geologie území	16
3.4. Hydrologické poměry	17
4. Geografické informační systémy (GIS)	18
5. Metody stanovení ztráty půdy a erozní ohroženosti	20
5.1. USLE (Univerzální rovnice ztráty půdy)	22
5.2. Model Water/Sedem	23
5.3. Základní požadavky pro datové vstupy	25
5.4. Uživatelské prostředí	26
6. Vstupní data modelu Water/SEDEM	27
6.1. DMR4G (Digitální model reliéfu ČR 4. generace)	27
6.2. Mapa landuse	31
6.3. Vodní toky	38
6.4. K faktor	41
6.5. C faktor	46
6.6. Nádrže	49
6.7. PTEF (parcel trap efficiency)	51
6.8. Parcel connectivity	51

6.9. R faktor	52
6.10. LS faktor	53
VÝPOČTOVÁ ČÁST	54
7. Výsledky a výstupy z modelu	54
7.1. Celé řešené území povodí Výrovky	54
7.2. Povodí IV. řádu.....	57
7.3. Kritická místa	60
7.4. Vstup do vodních toků a nádrží.....	68
7.5. Návrh opatření	71
8. Závěr	76
9. Použitá literatura.....	79

OBSAH OBRÁZKŮ

Obrázek 1-Sedimentační kužel, vodní eroze (foto VÚMOP) (VÚMOP, 2015).....	6
Obrázek 2- Mapa míry ztráty půdy v EU pro referenční rok 2010 (Panagos, 2015)	9
Obrázek 3- Odhadovaná míra plošné a rýhové eroze (Cerdan, 2010)	10
Obrázek 4- Ukázky škod na půdách (foto: me.vumop.cz).....	11
Obrázek 5- Zájmové území na Základní mapě ČR.....	15
Obrázek 6- Průtok stanice Plaňany (ČHMÚ, 2021), Vodní stav Plaňany (ČHMÚ, 2021)	17
Obrázek 7- Pracovní prostředí ArcGIS Pro.....	20
Obrázek 8- První a druhé vstupní dialogové okno	26
Obrázek 9- Třetí vstupní dialogové okno a dialogové okno výsledků	26
Obrázek 10- Rozšíření zájmového území	29
Obrázek 11- Digitální model terénu (DMR 4G)	30
Obrázek 12-Využití území (Devátý, 2018).....	33
Obrázek 13- Mapa využití území	35
Obrázek 14- Ukázka rastrování vektorové mapy Landuse na mapu PARCEL	36
Obrázek 15- Procentuální zastoupení využití území v povodí Výrovky	37
Obrázek 16- Graf využití území.....	38
Obrázek 17- Ukázka směrování vodních toků včetně tabulky.....	39
Obrázek 18- Vodní toky	40
Obrázek 19- Zastoupení HPJ ve vrstvě K faktoru.....	43
Obrázek 20- Ukázka kódu k doplnění hodnot interpolací.....	43
Obrázek 21- K faktor před doplnění interpolací.....	44
Obrázek 22- K faktor, doplnění vrstvy interpolací.....	44
Obrázek 23- K faktor (po doplnění míst interpolací)	45
Obrázek 24- Procentuální zastoupení LPIS na uživatele	47
Obrázek 25- C faktor	48
Obrázek 26- Vodní nádrž jako samostatný úsek vodního toku s návazností na jiný tok.....	50
Obrázek 27- Eroze a depozice na celém řešeném území Výrovky	56

Obrázek 28- Transport vodními toky na jednotku plochy	59
Obrázek 29- Vybraná kritická místa	61
Obrázek 30- Významná údolnice a transportovaný sediment.....	62
Obrázek 31- Snímek z roku 2013 a snímek z roku 2004.....	62
Obrázek 32- Údolnice a kritické místo č.2	63
Obrázek 33- Současná ortofotomapa ČR a snímek z roku 2013.....	63
Obrázek 34- Snímek rok 2004 a snímek rok 2000.....	63
Obrázek 35- Údolnice a kritické místo 3; transportovaný sediment.....	64
Obrázek 36- Snímek z roku 2004 a snímek z roku 2000.....	64
Obrázek 37- Snímek z roku 2013 a snímek z roku 2007.....	65
Obrázek 38- Eroze a depozice; transportovaný sediment.....	66
Obrázek 39- Snímek z roku 2004 a snímek z roku 2000.....	66
Obrázek 40- Současná ortofotomapa ČR.....	67
Obrázek 41- Eroze a depozice; transportovaný sediment.....	67
Obrázek 42- Vstup sedimentu do daného úseku vodního toku ze svahů	69
Obrázek 43- Kritické místo vstupu sedimentu do toku.....	70
Obrázek 44- Ukázka místa před opatřením a po prvním scénáři ochrany ...	72
Obrázek 45- Ukázka změny ztráty půdy v okolí vodního toku po aplikaci prvního scénáře ochrany.....	72
Obrázek 46- Ukázka místa po 1.scénáři opatření a po 2. scénáři.....	73
Obrázek 47- Ztráta půdy po 1. a 2. scénáři opatření	74

OBSAH TABULEK

Tabulka 1- Hydrologické poměry Plaňany	17
Tabulka 2- Označení kategorií pro model WaTEM/SEDEM.....	34
Tabulka 3- Zastoupení využití území v povodí Výrovky	37
Tabulka 4- K faktor (Janeček, 2012)	42
Tabulka 5- Hodnoty C faktoru	49
Tabulka 6- Celé řešené území	54
Tabulka 7- Povodí IV. řádu	57
Tabulka 8- Povodí IV. řádu vstup do vodních toků	58
Tabulka 9- Kritické místo číslo 1	62
Tabulka 10- Kritické místo číslo 2.....	63
Tabulka 11- Kritické místo číslo 3.....	64
Tabulka 12- Kritické místo číslo 4.....	65
Tabulka 13- Kritické místo číslo 5.....	67
Tabulka 14- Hodnoty vstupu sedimentu do vodního toku	68
Tabulka 15- První scénář návrhu opatření k zabránění eroze	71
Tabulka 16- Druhý scénář návrhu opatření k zamezení eroze	74
Tabulka 17- Výsledné porovnání scénářů opatření k zamezení eroze.....	75

ABSTRAKT

Diplomová práce „Kvantifikace zdrojů erozního sedimentu v povodí Výrovky“ je zaměřena na problematiku vodní eroze v povodí řeky Výrovky. Ta pramení v okrese Kutná hora nedaleko obce Kochánov a vyhodnocovat ji budeme až po uzávěrový profil Plaňany.

V první části práce se zabýváme sběrem a analýzou dat a podkladů. Následně pomocí empirického modelu WaTEM/SEDEM namodelujeme produkci, transport a depozici v celém povodí. Území budeme vyhodnocovat jako celek, dále jako jednotlivá subpovodí IV.řádu a také vytipujeme kritická místa toku.

V práci bylo zjištěno, že na povodí Výrovky je tvořeno z velké části 64,7 % ornou půdou, naopak lesní porost, křoviny a travní porost pouhých 25,3 %. Díky tomu na území dochází k velké ztrátě půdy, i depozici. Výsledný vstup do vodních toků je 20 033 tun za rok.

Na základě zjištěných výsledků se v poslední části zaměřujeme na ověření a porovnání vytipovaných kritických míst s historickými leteckými snímky. Následně navrhne scénáře možností ochrany ohrožených území, které doložíme výpočty a zhodnotíme efekt opatření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Eroze, Výrovka, WaTEM/SEDEM, protierozní opatření

ABSTRACT

The diploma thesis "Quantification of erosion sediment sources in the Výrovka watershed" is focused on the issue of water erosion in the watershed of the Výrovka river. The river springs in the district of Kutná Hora near the village of Kochánov and we will evaluate it up to its pour point in Plaňany.

In the first part of thesis, we deal with the collection and analysis of data and documents. Next, by means of the empirical WaTEM / SEDEM model, we model production, transport and deposition in the entire river basin. We will evaluate the area as a whole, as well as subsequently its individual fourth-order sub-basins. We will also identify critical points of the stream.

It was found that 64,7% of the Výrovka watershed consists of arable land, whereas forest, shrubs and grassland represent only 25,3%. As a result, there is a large loss of land in the area, as well as deposition. The final entry into rivers is 20 033 tons per year.

Based on the results, in the last part we focus on the verification of selected critical places and their comparison with historical aerial photographs. Next, we will suggest various scenarios for the protection of endangered areas, which we will prove by calculations and subsequently we evaluate the effect of the measures.

KEYWORDS

Erosion, Výrovka, WaTEM/SEDEM, anti-erosion measures

CÍL PRÁCE

Práce si klade za cíl analyzovat zadané území Výrovky, a to až po uzávěrový profil Plaňany z pohledu erozního smyvu a transportu sedimentu. K práci bude použit empirický model WaTEM/SEDEM. Nejprve je třeba sestavit dataset vstupních dat pro celé řešené území a provést výpočet. Dále vyhodnotit území jako celek, jednotlivá subpovodí a také kritická místa vstupu sedimentu do říční sítě.

Ověření indikovaných výpočetních odtokových drah sedimentu bude provedeno na historických leteckých snímcích. Následně budou nastíněny možnosti ochrany ohrožených částí povodí, a to formou scénáře ochrany. Rovněž kvantifikujeme efekt typu opatření.

POPISNÁ ČÁST

1. ÚVODNÍ SLOVO

Půda je vyčerpateľný, nenahraditeľný a jen velice pomalu se obnovující přírodní zdroj. Je to zásobárna vody pro všechny suchozemské organismy a důležitá součást látkového koloběhu v přírodě. Představuje významnou složku životního prostředí s velkou řadou funkcí a je základem udržitelného zemědělského hospodaření. Vznik půdy je výsledkem půdotvorných procesů, které mohou probíhat stovky až tisíce let, během nichž se půda formuje a prochází řadou stupňů vývoje.

Půda je ovšem ohrožena celou řadou procesů. Ty jsou zčásti přírodní, ale zčásti vyvolané lidskou činností. Procesy, které probíhaly několik stovek až tisíců let, mohou být zmařeny během jediné srážkové události.

Eroze půdy je tedy velmi aktuální téma v republikovém, ale i v celosvětovém měřítku. V České republice je vodní erozí ohroženo kolem poloviny území, kdy během jedné erozní události může dojít k odnosu až několika cm půdy. Tato půda je nenávratně ztracená.

2. ÚVOD DO PROBLEMATIKY

2.1. PROCES EROZE

Eroze je přírodním procesem. Jedná se o normální a přirozený jev, kdy je povrch půdy narušován a půdní částice se transportují na jiné místo, kde jsou následně usazovány. Proces probíhá samovolně, nelze ho tedy zastavit. (Novotný, 2017)

Obecně můžeme erozi půdy charakterizovat jako přírodní proces při němž dochází k rozrušování povrchu, uvolnění a transportu částic, a to působením vody, větru, ledu, ale i jinými činiteli. Přestože je eroze charakterizována jako přírodní proces, je lidským faktorem výrazně posílena. Dokonce tak, že se v současné době dostala do popředí mezi aktuální problémy krajiny.

Vodní eroze půdy je přírodní proces, při kterém dochází k rozrušování půdního povrchu působením vody, transportu půdních částic na jiné místo a jejich následnému usazování. (Ministerstvo zemědělství, 2009-2021)

Průběh je složen ze tří po sobě následujících kroků.

- Uvolnění částice – nejčastěji způsobené dopadem kapek
- Transport částic – převážně povrchovým odtokem
- Ukládání částic – při poklesu transportní energie

(Dostál, 2019)

Vodní erozi můžeme rozdělit na dva různé typy, a to erozi normální a erozi zrychlenou:

Normální eroze neboli geologická probíhá přirozeně. Půdní profil je v odpovídající míře nahrazován půdním profilem z podloží. Tím, že je její průběh velice pomalý, postupný a neustále přetváří reliéf povrchu, je z hlediska lidské generace téměř nepozorovatelná.

Opakem je ale druhý typ, **eroze zrychlená**. Ta právě smývá půdní částice, a to až v tak velké míře, že nemohou být nahrazeny půdotvorným procesem, který probíhá mnohem pomaleji. (Novotný, 2017) Projevuje se nadměrným transportem půdních částic a zanášením sedimentem cílových oblastí.



Obrázek 1 - Sedimentační kužel, vodní eroze (foto VÚMOP) (VÚMOP, 2015)

2.1.1. Příčiny vodní eroze

Mezi nejvýznamnější příčiny patří určitě srážky a povrchový odtok, sklonitost pozemku v kombinaci s jeho délkou, půdní a geologické poměry, vegetační kryt půdy a uplatnění protierozních opatření. Všechny tyto složky se podílejí na celkovém odnosu půdy z povrchu a to ve vzájemné kombinaci.

Srážky lze považovat za erozně nebezpečné, pokud jejich úhrn přesahuje 12,5 mm, nebo intenzitu 6,25 mm za 15 min. Toto kritérium vychází z USLE. (VÚMOP, 2021) Za nejkritičtější část roku lze považovat měsíce červen až srpen. V této době dochází až k 80 % všech erozně nebezpečných dešťů. (Novotný, 2017) Dalším kritickým obdobím může být i časně jaro, při velkém a rychlém tání napadlého sněhu na zmrzlé půdě.

Morfologie území má na vodní erozi vliv, a to hlavně kombinací délky pozemku spolu s jeho sklonitostí po spádnicí. Podstatný je vliv nepřerušené délky svahu na velikost ztráty půdy erozí. Měří se od rozvodnice nebo od horní hrany pozemku po první přerušující prvek. Po délce se zvyšuje rychlost a dochází k vyšším formám eroze, a to od plošné, rýžkové, rýhové až po stržovou. Důležitým faktorem je i sklon svahu, což je jeden z rozhodujících faktorů pro vznik vodní eroze. Na jeho vliv je třeba brát zřetel vždy při navrhování protierozních opatření.

Půdní poměry závisí na fyzikálních vlastnostech půdy, zejména na struktuře, textuře a obsahu organické hmoty. Právě nedostatek organické hmoty v půdě je dalším faktorem zvyšujícím rozsah eroze. Díky dostatečnému množství má půda stabilnější půdní strukturu, jež zvyšuje schopnost lépe odolávat destrukčním účinkům deště. Organické látky také stmelují jednotlivé půdní částice do formy půdních agregátů. Mezi nimi vznikají póry, které mají zásadní vliv pro infiltraci vody do půdního povrchu a zamezení povrchového odtoku.

Vegetační kryt půdy napomáhá ochraně povrchu půdy před přímým dopadem dešťových kapek, tedy snižuje kinetickou energii deště dopadajícího na povrch půdy. Taktéž podporuje vsak vody do půdy a napomáhá zachycovat smytou zeminu.

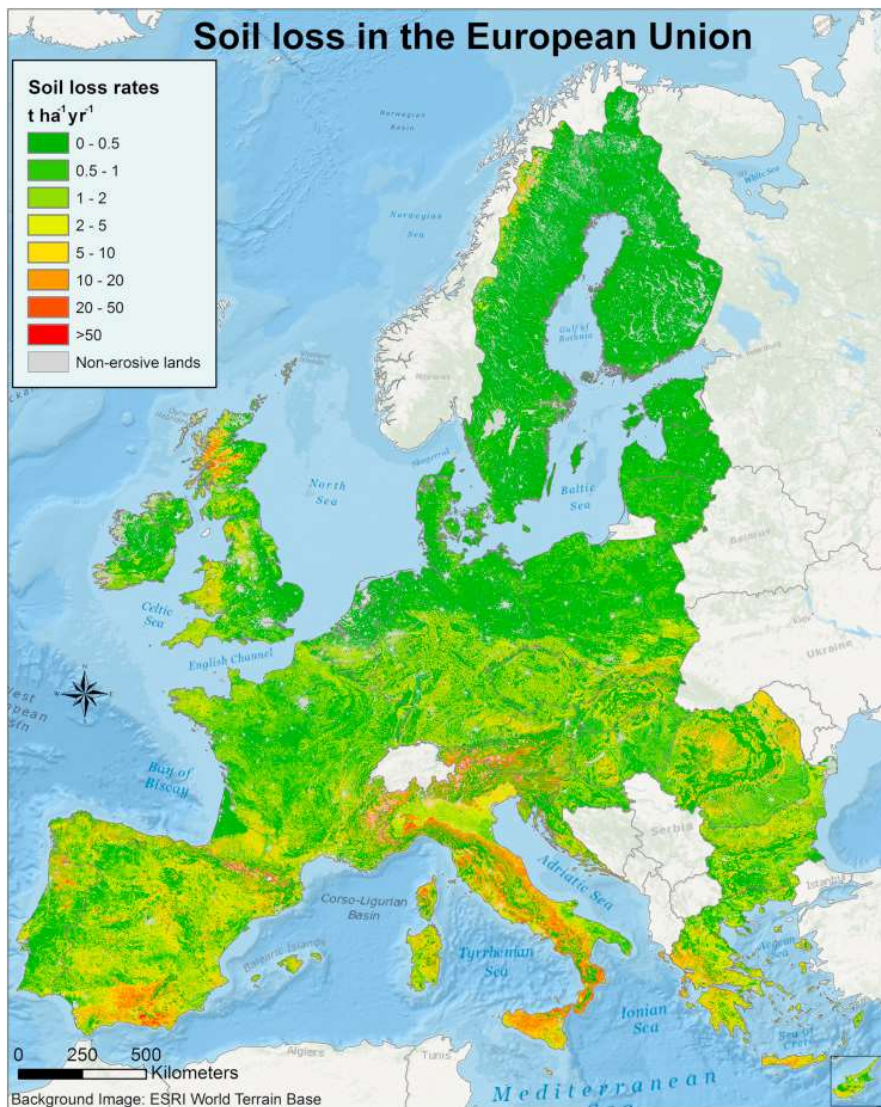
Hospodářsko – technické poměry ovlivňuje činnost člověka. Jedná se o způsob využívání území, použití protierozních opatření, rozmístění plodin, využití pozemků a samotné hospodaření.

2.2. EROZE VE SVĚTĚ

Problém eroze je problémem celosvětovým, jenž má za následek úbytek v řádech tisíců km^2 zemědělské půdy. Jde o nejvýraznějšího degradačního činitele v ČR a Evropě. (VÚMOP, 2021)

V globálním a regionálním měřítku najdeme informace o erozi půdy pouze ve formě potenciálního rizika eroze, výpočtů za použití empirických modelů potenciální ztráty půdy nebo z odborných odhadů. (Novotný, 2017) Ztrátami půdy v rámci Evropské Unie se zabýval Panagos (Panagos, 2015), který vytvořil Mapu úbytku půdy pomocí RUSLE2015 při vysokém rozlišení (100 m). V případě, že vyloučil všechny erozně neohrožené oblasti, vycházela hodnota ztráty půdy erozí $2,46 t * ha^{-1}$. Pokud tyto oblasti do výpočtu zahrnul, snížila se ztráta na $2,22 t * ha^{-1}$. (Panagos, 2015) V obou případech vychází hodnota míry ztráty půdy výrazně vyšší než průměrná hodnota míry tvorby půdy v EU, což je $1,4 t * ha^{-1} * rok^{-1}$. (Verheijen, 2009)

Pozn.: RUSLE2015 je upravená verze univerzální rovnice ztráty půdy. Jedná se o erozní model navržený k predikci dlouhodobé průměrné ztráty půdy za rok způsobené odtokem vody. Odhaduje ztráty půdy v Evropě pro referenční rok 2010, v rámci kterého jsou modelovány vstupní faktory. (Panagos, 2015)



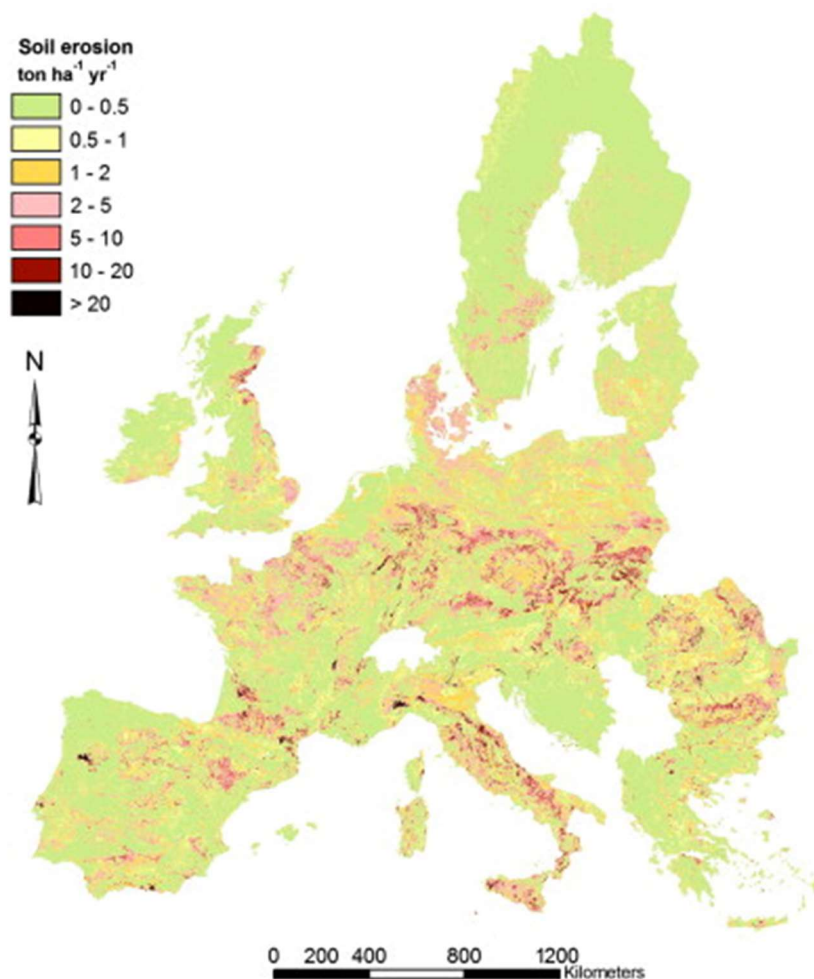
Obrázek 2- Mapa míry ztráty půdy v EU pro referenční rok 2010 (Panagos, 2015)

Na (Obrázek 2- Mapa míry ztráty půdy v EU pro referenční rok 2010) můžeme pozorovat, že největší roční ztráty jsou v oblastech Středomoří. Díky kombinaci vysokých srážek a strmých svahů má také tento fakt za následek zvýšenou ztrátu půdy v alpských oblastech, Pyrenejích, Apeninách a západním Řecku. Naopak velmi nízké hodnoty můžeme pozorovat u Skandinávských zemí a pobaltských států.

Výzkum zjistil, že nejvyšší průměrná roční ztráta půdy vychází v Itálii s hodnotou 8,46 t/ha. Za ní následuje Slovinsko s hodnotou 7,43 t/ha a Rakousko 7,19 t/ha. (Panagos, 2015)

Nejnižší roční ztráty půdy byly zjištěny ve Finsku, Estonsku a Nizozemsku. Ve Finsku s hodnotou 0,06 t/ha. (Panagos, 2015)

Cerdan a kol. (Cerdan, 2010) se místo modelování zaměřil na reálné měření a sestavil databázi rychlostí eroze měřených na středně velkých plochách v Evropě za přirozených srážkových podmínek. Hodnoty byly přebrány z dostupné literatury. Statistická analýza potvrdila dominantní vliv landuse, tedy využití a pokryvu půdy, na míru eroze půdy. Plošná a rýhová eroze jsou nejvyšší na holé půdě, dále na vinicích a orné půdě. Naopak půda s trvalým vegetačním pokryvem, tedy travní porosty, keře a lesy, vykazuje ztráty půdy o více jak řád nižší než na orné půdě. Na základě výsledků byla vypočtena střední míra plošné a rýhové eroze pro evropskou oblast pokrytou databází CORINE: odhadované míry rýhové a plošné eroze jsou cca $1,2 \text{ t} * \text{ha}^{-1} * \text{rok}^{-1}$ pro celou oblast CORINE a cca. $3,6 \text{ t} * \text{ha}^{-1} * \text{rok}^{-1}$ pro ornou půdu. (Cerdan, 2010)



Obrázek 3- Odhadovaná míra plošné a rýhové eroze (Cerdan, 2010)

2.3. EROZE V ČR

V současné době je na území České republiky vodní erozí ohroženo přibližně 40% zemědělských půd. (VÚMOP, 2021) Za nejohroženější oblast je považována jihovýchodní Morava. Větrnou erozí je v ČR ohroženo zhruba 10 % území a mezi nejohroženější oblasti patří opět jihovýchodní Morava nebo Litoměřicko a Lounsko. (Procházková, 2021) Převážná část těchto erozně ohrožených půd nemá žádnou systematickou erozní ochranu omezující ztráty půdy tak, aby vyhovovaly přípustným hodnotám. Eroze probíhá nejprve odnosem nejmenších a nejjemnějších půdních částic. Důsledkem je snížení vodní kapacity půdy a změny v půdní textuře a struktuře. Dochází ke snížení schopnosti vázat živiny, mizí organická složka půdy a snižuje se sorpční kapacita půdy. Výsledkem je zhoršení kvality sklizně a snížení výnosu pro zemědělce. Splachem zemědělské půdy a odnosem sedimentu dochází ke znečištění vodních zdrojů a jejich zanášení. Důsledkem jsou zvýšené nároky na kvalitu a čištění vody, a to například pro závlahy nebo vody pro rekreaci.

Hojným a intenzivním využíváním půdy pro zemědělskou výrobu a rozoráním přirozených krajinných prvků se postupem let porušil přirozený půdní kryt. Povrch půdy je díky tomu přímo vystaven působení erozivních sil. To má za následek odnos půdy a ztrátu nejurodnější svrchní části.



Obrázek 4- Ukázky škod na půdách (foto: me.vumop.cz)

Zemědělství a zemědělsky využívaná krajina prošly v České republice velkou změnou, zásadní byla kolektivizace po druhé světové válce. Ta byla spojena s vyššími výnosy, ale na druhé straně i s nepříznivými změnami ve využívání půdy a osevních zvyklostí způsobujících acidifikaci, erozi půdy, zasolování a chemické znečištění. (Bouma, 1998) Následkem kolektivizace došlo k sloučení pozemků, odstranění přirozených prvků v krajině zamezujících erozi a tím pádem k urychlení procesů. Tyto změny mají v krajině dopad až dodnes.

V porovnání se zbytkem Evropy máme největší díly půdních bloků a to díky intenzifikaci zemědělské půdy v minulosti. Zároveň jsou u nás nejmenší vlastnické pozemky na osobu. To je dáno událostmi kolem roku 1950, kdy byl zastaven trh se zemědělskou půdou. (Novotný, 2017)

2.4. NEGATIVNÍ DŮSLEDKY EROZNÍCH PROCESŮ

Za největší negativní důsledek eroze můžeme považovat ztrátu mocnosti půdy a ochuzení zemědělské půdy o její nejsvrchnější a nejúrodnější část, ornici. (Ministerstvo zemědělství, 2009-2021) Dále má eroze vliv na narušení fyzikálních i chemických vlastností půdy. Transport vodou odnášených půdních částic a na nich vázaných látek zanáší vodní toky a nádrže a snižuje jejich kapacitu.

Mezi hlavní důsledky vodní eroze patří:

Ztráta půdy ochuzuje zemědělskou půdu o nejsvrchnější a nejúrodnější část (ornici). Vodní eroze má selektivní postup, tedy nejprve odnáší nejjemnější a nejlehčí částice, což znamená organickou složku. Důsledkem je snížení schopnosti vázat živiny, snížení produkční schopnosti půd a urychlení jejich degradace.

Zanášení koryt vodních toků a zanášení nádrží je způsobeno částicemi unášenými vodou. Ty jsou transportovány až do vodních toků nebo nádrží, kde se ukládají a způsobují snížení průtočné kapacity. Mohou na nich být vázané látky (např. zbytky pesticidů, hnojiv), jejichž důsledkem je zakalení povrchových vod nebo zhoršení podmínek pro život vodních organismů.

Fyzikální (mechanické) znečištění způsobené zákalem vody, který má negativní vliv na vodní faunu a floru.

Chemické znečištění, které je způsobené transportem chemických látek do povodí. Zemědělská půda se dostává do styku se spoustou chemických látek různé toxicity (pesticidy, zemědělský odpad, průmyslová hnojiva). Živiny přinášené transportem do nádrže, primárně N a P, jsou zdrojem eutrofizace.

Povrchový odtok může způsobovat škody a to **ohrožení intravilánu měst, obcí a další infrastruktury**. Škody jsou způsobené převážně povrchovým odtokem vody ze zemědělských pozemků, ale také transportem půdy a splavenin ze zemědělských ploch.

Náklady na odstranění škod způsobených vodní erozí na území ČR jsou při nejhorším možném scénáři v současné době vyčísleny na částku 4,3 miliardy korun. Jedná se o ztrátu přibližně 21 milionů tun půdy za rok. Jde pouze o vyjádření ztráty půdy na základě ceny zeminy, nikoli o vyčíslení škod způsobených na majetku. (Novotný, 2017)

2.5. PROTIEROZNÍ OPATŘENÍ

Způsobů, jak vodní erozi předcházet, je celá řada. Hlavní zásady protierozní ochrany mohou shrnout tři základní pravidla.

1. Trvalá ochrana povrchu půdy před přímým účinkem dešťových kapek
2. Snaha zamezit soustředování plošného povrchového odtoku
3. Zajistit místa přirozeného soustředěného odtoku

(Dostál, 2019)

Samotné úpravy můžeme provádět řadou způsobů od **organizačních opatření**, jako je například protierozní rozmístění plodin nebo střídání plodin pásově. Také se jedná o zajištění optimálního tvaru a velikosti pozemku. Dalším způsobem jsou opatření **agrotechnická a vegetační**, například nejrůznější ochrany obdělávané půdy (bezorebné setí, setí do mulče, setí s podplodinou) nebo lze půdu obdělávat po vrstevnicích. Za **technické opatření** už považujeme různé terénní urovnávky, protierozní příkopy, průlehy a meze nebo ochranné nádrže a ochranné hrázky.

Kromě samotných úprav existuje i řada podnětů ze strany státu. Částečným řešením situace jsou tzv. Pravidla kontrol podmíněnosti, která kromě půdy řeší i témata krajiny a vody. Standardy dobrého zemědělství a environmentálního stavu půdy jsou v současné době v České republice podmínkou pro získání vyplácení přímých podpor a dalších dotací. Jejich zavedení si klade za cíl dosáhnout funkčního a trvale udržitelného systému zemědělství. (Novotný, 2017)

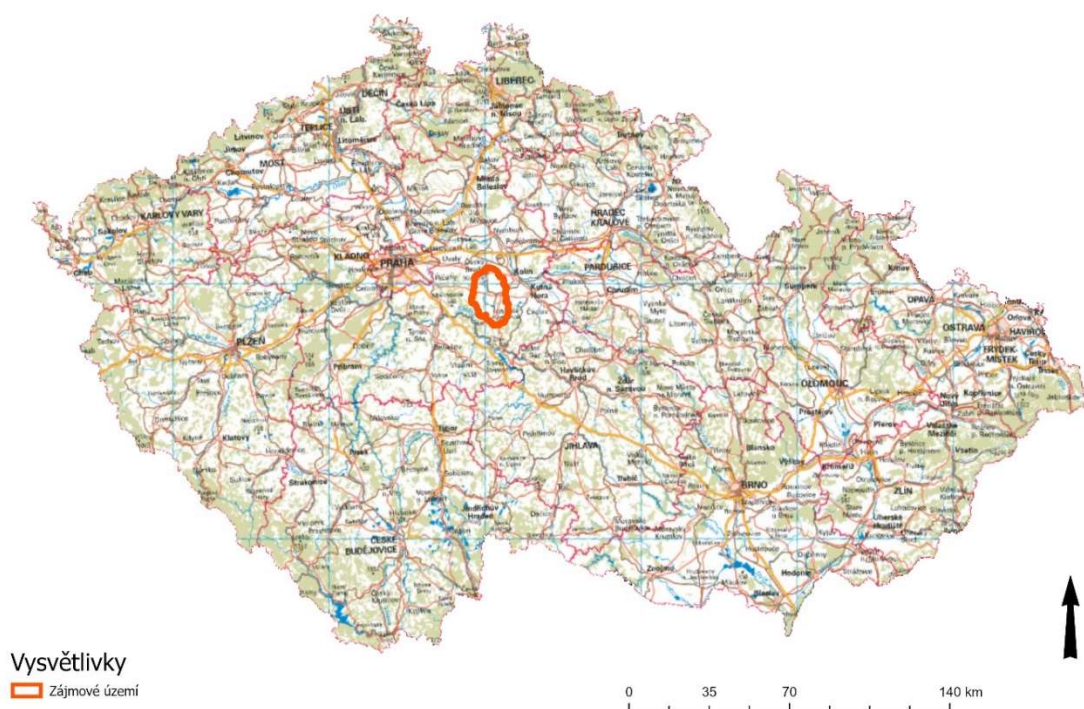
V roce 2019, s platností od roku 2020, oznámilo Ministerstvo zemědělství České republiky návrh na zpřísnění povinných požadavků na hospodaření. Součástí je i část o erozně ohrožených plochách, kdy na takovéto ploše je omezena rozloha jedné plodiny na 30 ha. (VÚMOP, 2021) Opatření si klade za cíl podpořit různorodé složení kultur na orné půdě, čímž se alespoň částečně předejde erozi a s tím spojené degradaci půdy.

3. POPIS ZÁJMOVÉ OBLASTI

3.1. CHARAKTERISTIKA ÚZEMÍ

Výrovka je řeka ve Středočeském kraji. Pramení nedaleko obce Kochánov v okrese Kutná hora v nadmořské výšce 495 metrů nad mořem. (Mladí ochránci přírody, 2019) Tok je dlouhý 61,89 kilometrů a vlévá se za obcí Kostomlátky do Labe. Celková plocha povodí, které Výrovka zabírá, činí 544,2 km^2 . Přitéká do ní řada přítoků, jako nejvýznamnější zmiňujeme zleva Bohouňovický potok, Barchovický potok a potok Šembera. Z pravostranných to bude potok Bečvárka, Blinky a Káča.

Pro účely této práce budeme řešit tok Výrovka od jejího pramene po uzávěrový profil Plaňany. Plocha řešeného povodí je 265,04 km^2 .



Obrázek 5- Zájmové území na Základní mapě ČR

Řešené území povodí Výrovky obsahuje toky o délce 362,54 km. Počet všech nádrží je 69 a jejich celková rozloha v území činí 2,23 km^2 .

3.2. GEOMORFOLOGICKÉ POMĚRY

Spodní část toku Výrovky, od pramene po asi 1 kilometr jižně od obce Toušice, zasahuje do Českomoravské vrchoviny. Severozápadní část vrchoviny tvoří Hornosázavská pahorkatina. Reliéf vrchoviny je plochý a sklání se k severu. Na suchách můžeme nalézt kryogenní jevy. (Smolová, 2005)

Druhá část toku, tedy zhruba 1 kilometr jižně od obce Toušice po vtok do Labe, je součástí Středolabské tabule. Ta je budována horninami svrchní křídy. Lokálně můžeme vidět výstup odkrytého proterozoického a permského podkladu na povrch. Úsek od obce Pečky po vtok do Labe leží v Nymburské kotlině. Úsek od obce Toušice po obci Pečky leží v Českobrodské tabuli. (Smolová, 2005)

3.3. GEOLOGIE ÚZEMÍ

Z geologické mapy 1:50 000 poskytované Českou geologickou službou, můžeme vyčíst geologické složení v okolí toku. Mapa ukazuje úsek mezi obcemi Uhlířské Janovice a Kouřim.

Pod tokem Výrovky je uložen nivní sediment, který je po většině délky toku obklopen dvojslídovým migmatitem až ortorulou. Pod obcí Kouřim je tok na levém, východním břehu, tvořen sprašem a sprašovou hlínou. Stejně geologické složení, tedy spraš a sprašovou hlínu, má i tok na levém, východním břehu nad obcí Uhlířské Janovice. V blízkosti obce Zásmuky nalezneme na levém, východním břehu, písčité slínovce až jílovce spongilitické, místy silicifikované (opuky). Pod obcí Uhlířské Janovice, až po pramen Výrovky, je už tok tvořen nivním sedimentem obklopeným dvojslídovým migmatitem až ortorulou. (BOKR, 2016)

3.4. HYDROLOGICKÉ POMĚRY

Číslo hydrologického pořadí: 1-04-06-029

Hydrologické poměry získáváme z ČHMÚ z měrné stanice v Plaňanech, což je obec v závěrovém profilu zkoumaného území. Tato stanice je vzdálená 21,5 kilometrů od pramene Výrovky.

Průměrný roční stav: 23 cm
 Průměrný roční průtok: 0,764 m³/s

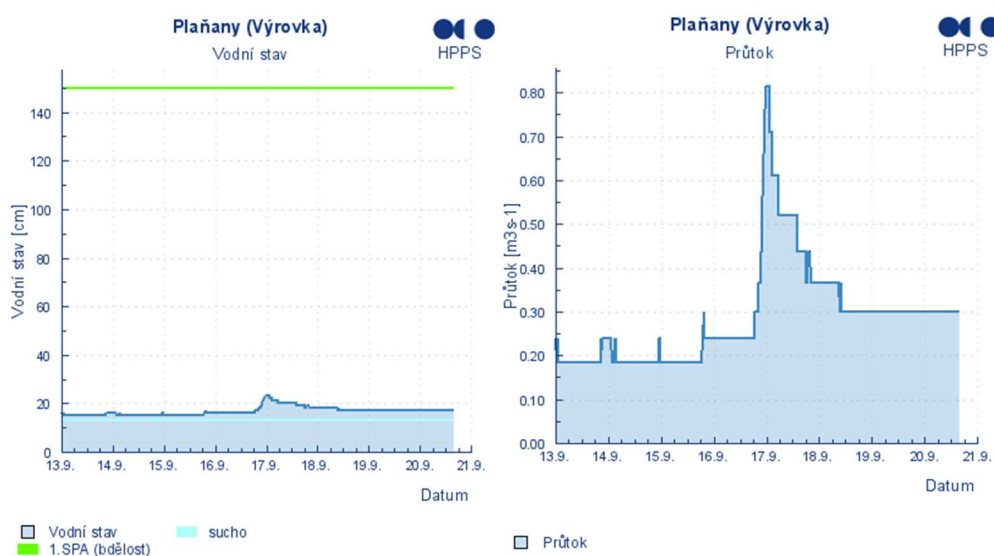
(ČHMÚ, 2021)

Tabulka 1- Hydrologické poměry Plaňany

N-leté průtoky	Q1	Q5	Q10	Q50	Q100
m ³ /s	7	21,2	30,2	58,9	75

(ČHMÚ, 2021)

Hydrologické poměry v měrné stanici Plaňany pro období od 13.9. do 21.9. nám znázorňují následující grafy. Vidíme, že jak vodní stav, tak průtok je v tomto období nižší než průměrné roční hodnoty. Je to důsledek suchého období v létě a nižšího množství srážek v tomto období.



Obrázek 6- Průtok stanice Plaňany (ČHMÚ, 2021), Vodní stav Plaňany (ČHMÚ, 2021)

4. GEOGRAFICKÉ INFORMAČNÍ SYSTÉMY (GIS)

S rozvojem počítače a počítačové technologie je úzce spjat i začátek geografických informačních systémů. V šedesátých letech minulého století začínají první výzkumy geografické informační vědy, jako je prostorová analýza a vizualizace. První GIS byl oficiálně vytvořen v roce 1963 v Kanadě pod vedením pana Rogera Tomlinsona. Jeho společnost vytvořila návrh automatizovaných počítačů pro ukládání a zpracování velkého množství dat, což mu v Kanadě umožnilo zahájit jeho národní program pro správu využití půdy. V roce 1969 vzniká ESRI (Environmental System Research Institute), jako poradenská firma pro aplikaci počítačového mapování a prostorovou analýzu. Počáteční práce společnosti ukázala hodnotu GIS pro řešení problémů. Esri pokračovala dále ve vývoji GIS mapových a prostorových analytických metod, které se dodnes používají a zdokonalují. (Esri, 2021)

V současné době můžeme najít na trhu mnoho programů distribuovaných pod hlavičkou GIS. Zmíníme-li jich jen několik, patří mezi ně:

Firma ESRI- (skupina produktů ArcGIS) Globální firma se zaměstnanci ze 73 zemí, zabývající se softwarem ArcGIS. Jedná se o geografický informační systém určený pro práci s prostorovými daty. (ARCDATA, 2010) Umožňuje je vytvářet, analyzovat a spravovat, ale také je vizualizovat.

Clark Labs, USA (IDRISI) -Nabízí velice širokou škálu základních analytických nástrojů pro analýzu GIS, primárně orientovaných na rastrová data. Obsahuje přes 300 analytických nástrojů. (Clark University, 2021)

Firma Bentley – Společnost zabývající se vývojem inženýrského softwaru pro projektování infrastruktury. Produkty Bentley jsou poskytovány buď formou licencí, nebo integrací do rozsáhlých softwarových řešení. Využívány i pro CAD systémy. (Unicorn Systems a.s., 2021)

QGIS – Jde o oficiální projekt řazený mezi Open Source Geospatial Foundation projekty. Vyvíjen byl v C++ a Pythonu. Je řízen dobrovolníky. QGIS je používán v soukromém i veřejném sektoru. (QGIS, 2021)

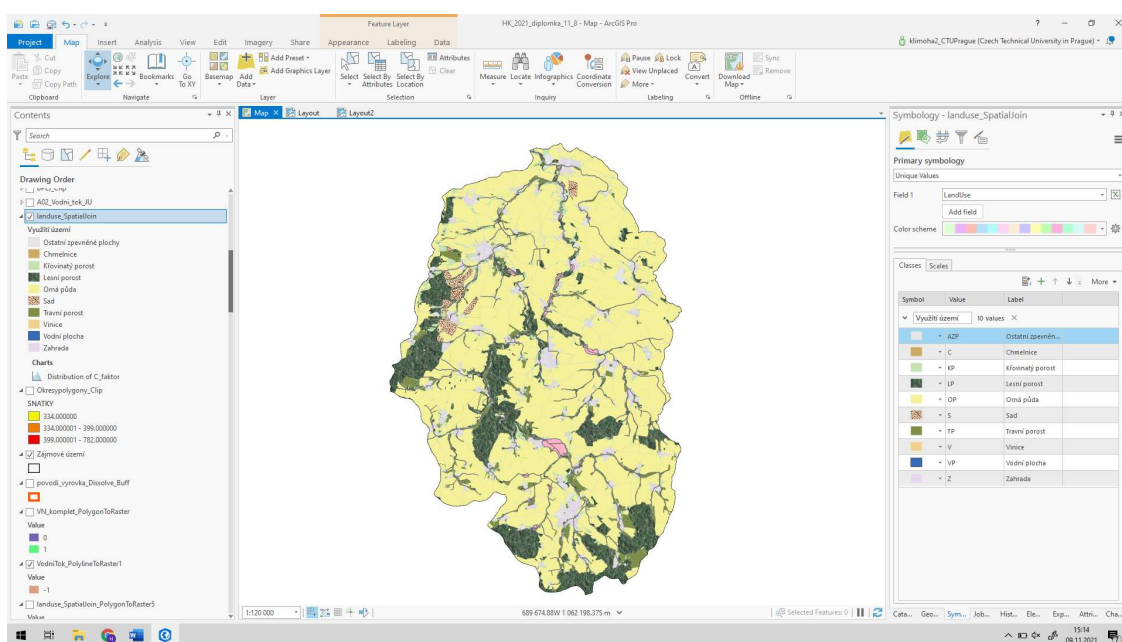
Atlas DMT – Software primárně pro geodety a projektanty. Jedná se o komplexní zpracování polohopisu, situačních výkresů a výškopisu. Program využívá vlastní grafické prostředí, k dispozici je celá řada možných modulů a aplikací a také propracovaný systém ochrany pomocí HW klíče. (ARION spol. s r.o., 2021)

TopoL Software – Otevřený obecný geografický informační systém, který může být upraven pro aplikace v mnoha oblastech, jako jsou příprava, správa a analýza dat. Používá se primárně v lesnictví. Dále také pro pozemkové úpravy, v zemědělství ale i v orgánech státní správy. (TopoL Software s.r.o., 2016)

Pro účely této práce byl použit program ArcGIS Pro 2.7. a ArcGIS Pro 2.9. od firmy ESRI. Práce začala v programu ArcGIS Pro 2.7. Díky rychlému vývoji a podpoře pokračovala a byla dokončena v nejnovější verzi ArcGIS 2.9.

Od této firmy byl dříve hojně používán software ArcMap, což je aplikace ArcGIS Desktop, jenž slouží pro všechny mapové úlohy včetně kartografie, prostorových analýz a editace dat. (ARCDATA, 2019) Od něj se postupným vývojem a zlepšováním možných funkcí přešlo na novou verzi systému a to ArcGIS Pro. Ten se oproti němu liší možnostmi publikací dat na server ArcGIS Enterprise či do cloudu ArcGIS Online, se kterými následně mohou pracovat i kolegové prostřednictvím webových a mobilních aplikací. Taktéž v něm nalezneme nástroje pro profesionální tvorbu tištěných map, tvorbu 3D vizualizací i interaktivních analytických grafů. Další zajímavou funkcí jsou různé stupně automatizace a to od pokročilého skriptování v jazyce Python po rozmanitou tvorbu standardizovaných pracovních postupů. (ARCDATA, 2019)

Na obrázku (Obrázek 7- Pracovní prostředí ArcGIS Pro) můžeme vidět pracovní plochu ArcGIS Pro 2.7. To je v mnoha oblastech velmi podobné prostředí ArcMap. Vizuálním rozdílem je určitě použití horizontálního pásu karet v horní části okna k uspořádání jednotlivých funkcí do řady záložek. Dalším rozdílem je možnost jednotlivých pohledů a to jak pro práci s mapami, tak i tabulkami, grafy, sestavami.



Obrázek 7- Pracovní prostředí ArcGIS Pro

5. METODY STANOVENÍ ZTRÁTY PŮDY A EROZNÍ OHROŽENOSTI

Erozní modely slouží k simulaci chování konkrétního systému. Výsledky nám umožní ověření předpokladů, lepší pochopení a odhady budoucích stavů modelu. (Devátý, 2018)

První výzkumy eroze půdy byly zahájeny počátkem 20.století ve Spojených státech amerických. Austin Zingg je vztáhl k vyvolanému vztahu mezi vodou a erozí půdy, sklonem a délkou svahu. (Zingg, 1940) Následné rozšíření práce

a výzkumu, doplnění a rozšíření vztahu vede ke vzniku Univerzální rovnice ztráty půdy. (Wischmeier and Smith, 1978)

Ztrátu půdy můžeme stanovit celou řadou metod, především manuálním výpočtem, nebo s pomocí výpočetní techniky. Díky ohromnému pokroku ve výpočetní technice a její dostupnosti téměř kdekoli, je v dnešní době hojně využívána.

Nezbytnou součástí pro fungování modelu je přímé měření jak v terénu, tak v laboratoři. Je to základ vývoje, bez kterého není možné odvozovat matematické modely. Poskytne nám skutečné hodnoty objemu odneseného sedimentu.

Metody pro výpočet erozní ohroženosti, ztráty půdy a objemu splavenin můžeme rozdělit do dvou skupin.

Empirické metody nejsou založeny na základních fyzikálních principech. Naopak byly odvozeny na základě statistických analýz, dlouhodobých pozorování událostí a skutečných erozních procesů. Jejich použití je pro uživatele relativně nenáročné. Podstatné ale je, řídit se vždy podmínkami, za kterých byla naměřená data získána.

Výhodou empirických modelů je možnost využívat je v povodích s omezenými daty. Také nepožadují komplexní vstupní data. (Hajigholizadeh, 2018)

Mezi empirické modely patří z nejznámějších modelů určitě USLE, RUSLE, MUSLE, WATEM/SEDEM, aj.

Fyzikální modely naproti tomu řeší problematiku založenou právě na matematickém popisu skutečných fyzikálních procesů. Zohledňují také fyzikální vlastnosti, tedy geologii, využití půdy, topografii, klima nebo charakteristiky toku. Velký důraz je kladen na kvalitu vstupních dat.

Rozdělení 50 fyzikálně založených modelů eroze půdy a výnosu sedimentu můžeme nalézt v literatuře (Pandey, 2016). Z přehledu lze vyčíst, že většina modelů byla vyvinuta pro stanovení eroze a transportu na zemědělské půdě. Pouze malé množství pro louky a pastviny.

Jako příklad fyzikálního modelu můžeme zmínit EROSION3D, SMODERP, WEPP, aj.

Práce je primárně zaměřena na empirické výpočetní modely. Proto se budeme věnovat v následujících částech této skupině modelů.

5.1. USLE (UNIVERZÁLNÍ ROVNICE ZTRÁTY PŮDY)

Jde o typickou empirickou metodu pro výpočet ztráty půdy (Wischmeier a Smith 1978), která je u nás hojně rozšířena. Vychází z principu přípustné ztráty půdy na jednotkovém pozemku. Jejím výstupem je průměrná roční hodnota ztráty půdy v tunách na hektar. Je tvořena šesti základními faktory.

Rovnice 1- Univerzální rovnice ztráty půdy

$$G = R * K * L * S * C * P$$

Kde: G je průměrná dlouhodobá ztráta půdy ($t * ha^{-1} * rok^{-1}$)
R faktor erozní účinnosti dešťů, vyjádřený v závislosti na kinetické energii, úhrnu a intenzitě erozně nebezpečných dešťů ($MJ * ha^{-1} * cm * h^{-1}$)

- K faktor erodovatelnosti půdy, vyjádřený v závislosti na textuře a struktuře ornice, obsahu organické hmoty v ornici a propustnosti půdního profilu ($t * h * MJ^{-1} * cm^{-1}$)
- L faktor délky svahu, vyjadřující vliv délky svahu na velikost ztráty půdy erozí
- S faktor sklonu svahu, vyjadřující vliv sklonu na velikost ztráty půdy erozí
- C faktor ochranného vlivu vegetačního pokryvu, vyjádřený v závislosti na vývoji vegetace a použité agrotechnice
- P faktor účinnosti protierozních opatření

(Janeček, 2012)

5.2. MODEL WATEM/SEDEM

Jedná se o prostorově distribuovaný model eroze půdy a sedimentů. Byl vyvinut na KU Leuven v Belgii. Jde o model empirický. Ten na rozdíl od fyzikálně založených modelů nemá velké nároky na vstupní data. Díky tomu můžeme předpokládat jeho široké využití. (Van Rompaey, 2002)

Byl sestaven za účelem posuzování vlivu zemědělství a hospodaření na krajinu. Současně i k odhadu ztrát půdy a posuzování účinnosti protierozních opatření. Díky modelu můžeme odhadovat a předpovídat místa, kde bude probíhat sedimentace transportované erodované půdy. Zjištěné výsledky by měly napomoci při plánování osevních postupů nebo při návrzích protierozního opatření. (Van Rompaey, 2002)

Model pracuje na revidované univerzální rovnici ztráty půd (RUSLE) pro výpočet průměrných ročních hodnot ztrát půdy. Je nadstavbou softwaru GIS Idrisi32 a využívá formát jeho souborů.

Stanovení odtokových drah probíhá na základě algoritmu. V něm jsou zohledněny hranice polí, směry orby a silniční infrastruktury.

Pomocí nich je voda, současně s erodovanou půdou, transportována až po dosažení nejbližšího vodního toku. Sediment je veden podél těchto odtokových drah pomocí transportní kapacity, která je úměrná potenciální rychlosti eroze. (Van Rompaey, 2002) Pokud ale není dostatečně vysoká kapacita toku, může docházet k sedimentaci transportovaného materiálu ještě před dosažením nejbližšího toku. Hodnotu odosu sedimentu můžeme definovat jako množství sedimentu, které se dostane do vodního toku v porovnání k celkové ztrátě půdy v povodí.

Transportní kapacita jednotlivých elementů DMT (Digitální model terénu) je vztažena k náchylnosti k rýhové erozi podle následujícího vztahu:

Rovnice 2- Transportní kapacita

$$T_C = K_{TC} * E_{PR}$$

T_C	transportní kapacita ($kg * m^{-1} * rok^{-1}$)
K_{TC}	kalibrační koeficient transportní kapacity (m)
E_{PR}	potenciální náchylnost k rýhové erozi ($kg * m^{-2} * rok^{-1}$)

(Van Rompaey, 2001)

V této práci je použita verze WaTEM/SEDEM 2.1.0. Nověji byla publikována verze WaTEM/SEDEM 2006, která je zaměřena na transport dalších látek, např. těžkých kovů. Pro účel této práce nenabízí žádnou vhodnou funkcionalitu. Proto byla zvolena verze WaTEM/SEDEM 2.1.0.

5.3. ZÁKLADNÍ POŽADAVKY PRO DATOVÉ VSTUPY

Vstupní podmínkou pro správné fungování modelu, je přesné a stejné nastavení všech vrstev. Jako datový formát používáme rastr s rozlišením 10x10 metrů.

Autoři doporučují a běžně pracují s rozlišením 20x20 metrů (Notebaert Vaes Verstraeten Govers, 2006), kdy je rozlišení dostatečné podle jejich původní myšlenky modelu. V této práci jdeme do většího detailu v ČR, a to zejména z důvodu postihnutí drobnějších struktur, jako jsou silnice, vodní toky, přerušující prvky atd. Rozlišení 10x10 metrů bylo na řadě území testováno, ověřováno a na tomto rozlišení proběhla kalibrace a validace. Menší rozlišení by vyžadovalo ještě další kalibraci parametrů.

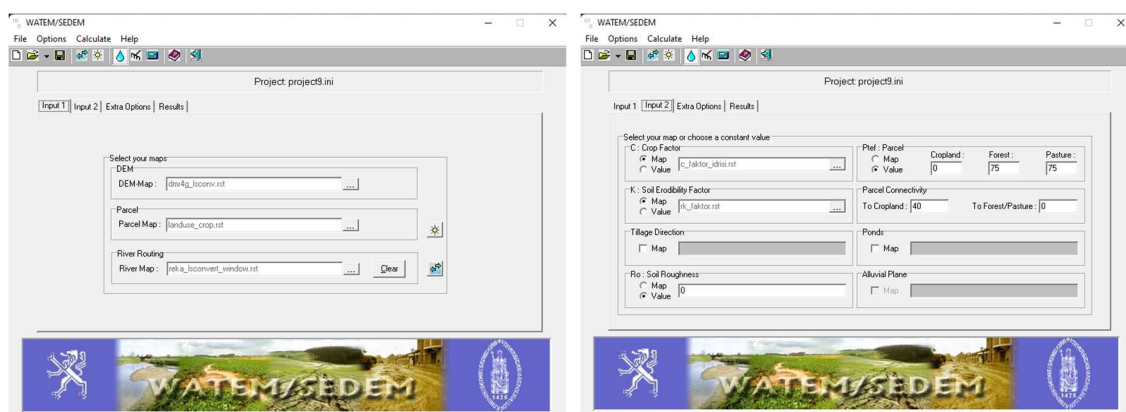
Formát 10x10 metrů volíme z důvodu vhodné kvality zobrazení pro takto velké území a postihnutí detailu. Zároveň je v tomto rozlišení doba délky výpočtu v rámci normálního časového intervalu. Jedná se tedy o vhodný kompromis mezi detailním rozlišením a dobou trvání výpočtu a vhodně vypovídajícími výsledky.

Rastr je následně pomocí převodu do ASCII transformován do textové podoby. Tu pomocí programu LS Convertor převádíme zpět do rastru, ale v podobě .rdc a .rst souboru. V .rst souboru jsou informace o rastrovém obrazu. Program WaTEM/SEDEM vyžaduje vstupní vrstvy převedené do formátu Idrisi32* .rst. (Vysloužilová, 2012)

Důležitou vstupní podmínkou je, že všechny vrstvy musí pokrývat území o stejné velikosti, mít stejné rozlišení rastru a být vytvořené ve stejných geografických systémech.

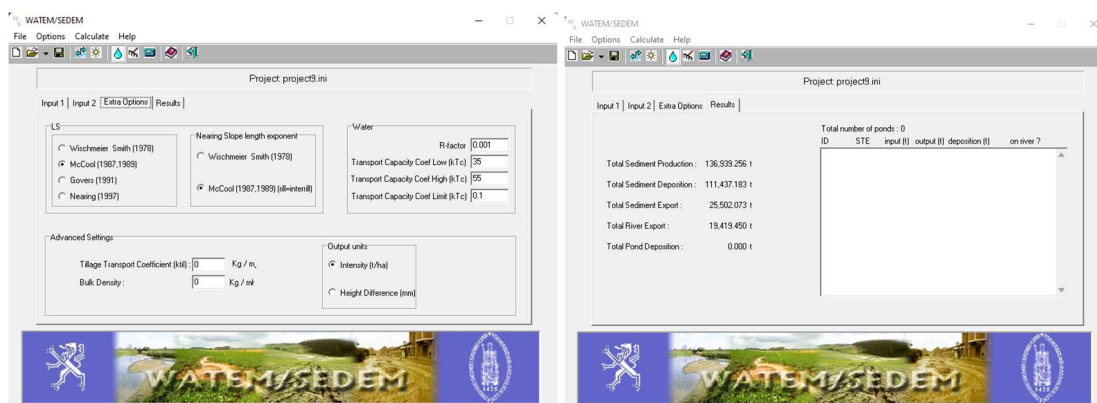
5.4. UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ

Uživatelské prostředí modelu WaTEM/SEDEM je dobře ovladatelné a přehledné. Je rozděleno na 3 vstupní okna. Nezbytnými vstupními vrstvami, které je nutno zadat ve formátu Idrisi .rst souboru, jsou mapy DMT a Parcel map. Do druhého vstupního okna můžeme zadávat buď konkrétní mapové vrstvy v Idrisi .rst souboru, nebo číselnou hodnotu pro celý výpočet. Třetím oknem (Obrázek 9- Třetí vstupní dialogové okno a dialogové okno výsledků) volíme zbývající potřebné vstupy a vybíráme rovnici, podle které bude model počítat topografický faktor.



Obrázek 8- První a druhé vstupní dialogové okno

Poslední záložka Results (Obrázek 9- Třetí vstupní dialogové okno a dialogové okno výsledků) se objeví až po úspěšném spuštění modelu. Je v podobě výsledkové tabulky celkových hodnot ztráty půdy, depozice, transportovaného množství sedimentu tokem a sedimentovaného množství materiálu v nádržích.



Obrázek 9- Třetí vstupní dialogové okno a dialogové okno výsledků

6. VSTUPNÍ DATA MODELU WATEM/SEDEM

Jako vstupní data model využívá rastrové vrstvy GIS.

1. Digitální model terénu DMR4G
2. Mapa pozemků (Landuse)
3. Vodní toky
4. C faktor
5. K faktor
6. Nádrže
7. Ptef
8. Parcel Connectivity
9. R faktor
10. LS faktor

6.1. DMR4G (DIGITÁLNÍ MODEL RELIÉFU ČR 4. GENERACE)

Tento model představuje zobrazení přirozeného nebo lidskou činností upraveného zemského povrchu v digitálním tvaru ve formě výšek diskrétních bodů pravidelné sítě (5x5 metrů). Nadmořská výška je reprezentována ve výškovém referenčním systému Balt po vyrovnání (Bpv). Model vznikl v letech 2009 až 2013 a to díky datům pořízeným metodou leteckého laserového skenování výškopisu ČR. (ČÚZK, 2010)

Samotné letecké skenování probíhá z průměrné výšky 1200 m nebo 1400 m nad střední rovinou terénu v záznamových blocích. Záznam je následně podroben robustní filtraci, jejímž cílem je separovat body, na které dopadl laserový paprsek až na terén včetně vegetace, skal, výškové překážky leteckého provozu, a při tom identifikovat chybná měření. (Brázdil, 2016)

V pravidelné síti 5x5 metrů je v každém čtverci vybrán uzlový bod s nejnižší nadmořskou výškou. Je nutno zkontrolovat, zda není bod svou výškou výrazně odlišný od ostatních v daném čtverci. Pokud tomu tak je, bod považujeme za chybný a je zvolen následující, který tomuto kritériu vyhovuje. Výsledkem je generalizovaný model reliéfu, což je soubor těchto nerovnoměrně rozložených uzlových bodů reliéfu. (Brázdil, 2016)

DMR 4G je reprezentován polohovou souřadnou soustavou S-JTSK a výškovým referenčním systémem Bpv (Balt po vyrovnání). (Brázdil, 2016)

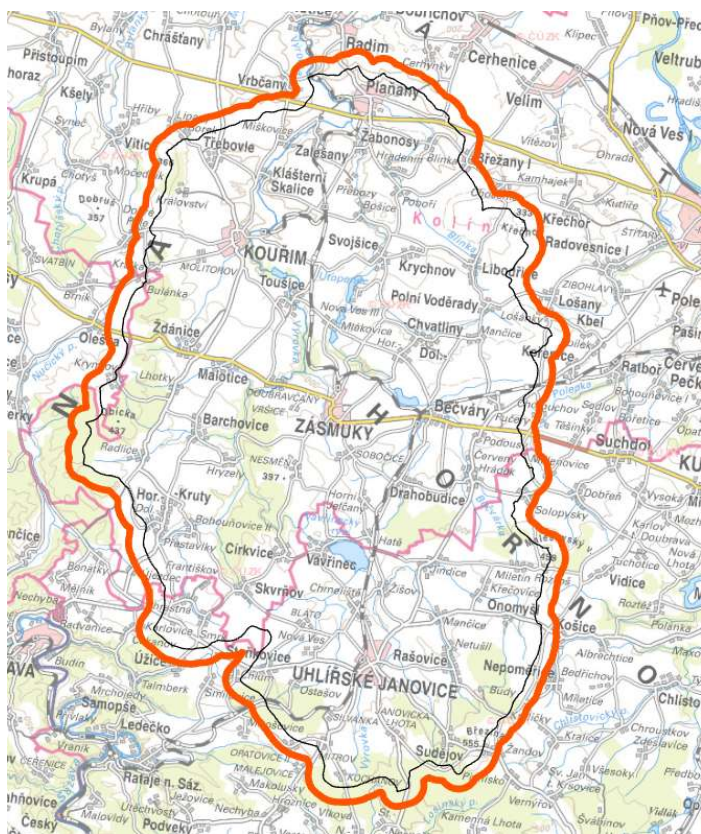
Ze získaných výsledků dosavadních zkoušek parametrů přesnosti DMR 4G je potvrzeno, že garantovaná úplná střední chyba výšky tohoto modelu reliéfu je 0,30 m v terénu bez souvislé zástavby a vegetace. Pro terén pokrytý hustou vegetací se jedná o 1 m. (Brázdil, 2016)

Dříve se digitální model terénu získával například interpolací z vrstevnic. V dnešní době hlavně pomocí laserového skenování nebo pomocí letecké fotogrammetrie. (G4D, 2013)

Příprava dat:

Vrstvu digitálního modelu terénu získáváme z ČÚZK, a byla odvozena laserovým skenováním. Pro potřeby výpočtu ve WaTEM/SEDEM je třeba vrstvu oříznout na zájmové území. To bylo nutné rozšířit po celém obvodu o 500 metrů (Obrázek 10- Rozšíření zájmového území). Hlavním důvodem bylo, aby model WaTEM/SEDEM generoval hranice na dostatečném a správném datovém podkladu. Odvozená hranice povodí je z DIBAVOD (odvozeno z podkladu Základní mapy ČR 1:10 000) a může být lokálně odlišná od DMR4G.

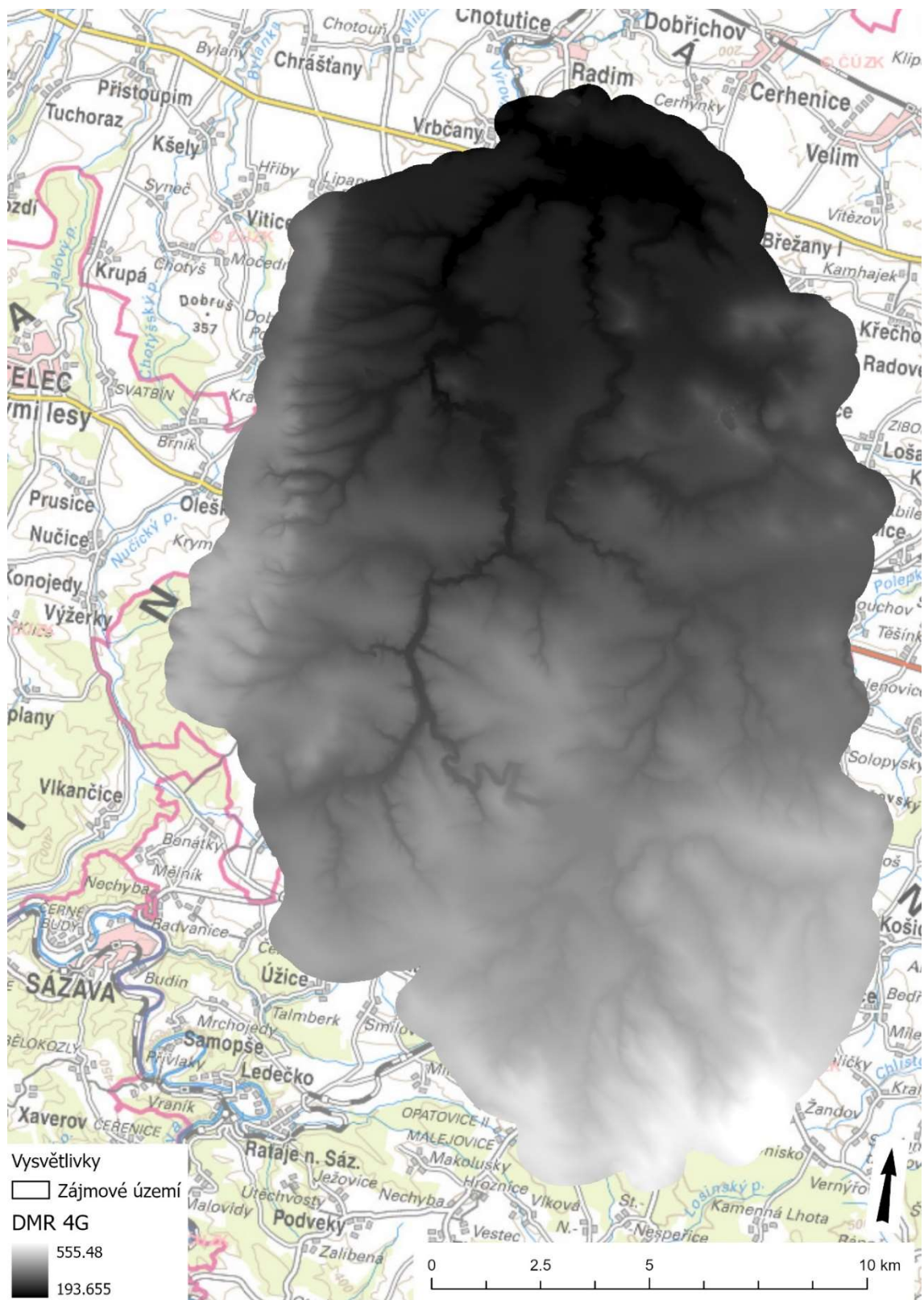
Pozn. DIBAVOD (Digitální báze vodohospodářských dat) je referenční geografická databáze vytvořená z odpovídajících vrstev ZABAGED pro tvorbu tematických kartografických výstupů s vodohospodářskou tematikou a tematikou ochrany vod nad Základní mapou ČR 1:10 000. (VÚV TGM, 2020)



Obrázek 10- Rozšíření zájmového území

Pro použití dat v modelu WaTEM/SEDEM volíme velikost rastru 10x10 metrů. Tuto a následně všechny ostatní vrstvy vstupující do modelu převádíme na tuto velikost rastru. Originál DMR4G má rozlišení 5x5 metrů, což je pro takto rozsáhlé území příliš podrobné. Z tohoto důvodu bylo nutné území převzorkovat tak, aby bylo procesovatelné.

Poslední úpravou vrstvy DMR 4G je vyplnění příkazem Fill, pomocí kterého jsou ve vrstvě vyplněny všechny prohlubně a odstraněny bezodtoké deprese. Výsledkem je hydrologicky korektní model terénu.



Obrázek 11- Digitální model terénu (DMR 4G)

6.2. MAPA LANDUSE

Mapa využití území byla vytvořena kombinací dat LPIS a ZABAGED. Výsledné rozlišení odpovídá vrstvě DMT.

LPIS – Je geografický informační systém (GIS), který je tvořen primárně evidencí využití zemědělské půdy. Hlavním účelem registru půdy je ověřování údajů v žádostech o dotace poskytované ve vazbě na zemědělskou půdu, a to bez ohledu na to, zda jde o dotace financované ze zdrojů EU nebo o národní dotační programy (Ministerstvo zemědělství, 2009)

Mimo hlavní účel plní ale i řadu vedlejších, jako například podklad pro vedení evidencí o použití přípravků na ochranu rostlin, hnojiv nebo erozní ohroženosti. Dále má cenné využití při monitoringu výskytu škodlivých organismů nebo při hledání umístění ohnisek nákazy zvířat. (Ministerstvo zemědělství, 2009)

Díl půdního bloku (DPB) neboli půdní blok (PB) je základní jednotkou LPIS. Může se jednat o louku, sad, vinici nebo pole. Podstatné je, že půdní plocha musí být v terénu zřetelně oddělená například cestou, hranicí lesa, pole nebo vodní plochou. Jedná se tedy o souvislou zemědělsky využívanou plochu s minimální výměrou 0,1 hektaru. (PERTLIK SOFTWARE, 2017)

Podle (Ministerstvo zemědělství, 2009) je pro veřejnost možné využívat 3 moduly LPIS, a to:

- Registr půdy pro farmáře (iLPIS)- aplikace pro registrované uživatele, nejstarší, mimo evidovaná data obsahuje současně nástroje pro vedení osevních postupů
- Veřejný registr půdy (pLPIS) – aplikace pro širokou veřejnost
- WMS/WFS služby

(Ministerstvo zemědělství, 2009)

ZABAGED – Základní báze geografických dat České republiky je komplexní digitální geografický model území České republiky, který je spravován Zeměměřickým úřadem ve veřejném zájmu. Je využíván jako základní informační vrstva v územně orientovaných informačních a v řídicích systémech veřejné správy ČR. Je také hlavním zdrojem informací pro tvorbu základních map ČR měřítek 1:10 000 až 1:100 000. (ČÚZK, 2010)

ZABAGED je rozčleněn na 2 základní části, a to polohopisnou a výškopisnou. Obsah tvoří 116 základních typů geografických objektů rozdělených do 8 tematických kategorií a více jak 350 typů popisných atributů.(Pressová, 2014)
Objekty rozdělujeme podle významu na 8 kategorií:

1. Sídla, hospodářské a kulturní objekty
2. Komunikace
3. Rozvodné sítě a produktovody
4. Vodstvo
5. Územní jednotky včetně chráněných území
6. Vegetace a povrch
7. Terénní reliéf
8. Geodetické body

(Pressová, 2014)

První koncepce ZABAGED byla realizována mezi lety 1994-2000 a to naskenováním existujících tiskových podkladů Základní mapy ČR 1:10 000. Od roku 1996 byl topologicky – vektorový model systematicky naplňován kapacitou 600 listů výškopisu a 1000 listů polohopisu za rok. Druhá koncepce přichází v roce 1999, kdy za hlavní byla považována aktualizace polohopisného obsahu, zpřesnění a aktualizace výškopisu a zpřesnění absolutní polohy některých typů objektů. Mezi lety 2010-2013 bylo realizováno letecké laserové skenování celé České republiky, jehož hlavním účelem byl převod z mřížkového modelu 10 x 10 m na přesnější rozlišení 5 x 5 m, tedy Digitální model terénu 4 generace. V letech 2013–2016 vznikl DMR 5G, který je charakteristický nepravidelnou sítí výškových bodů. (Šíma, 2016)

Příprava dat:

Vrstva byla vytvořena daty z vrstev ZABAGED, kterým byly přiřazeny kódy podle následující tabulky využití ploch.

Tab. 7-2: Rozřazení zdrojových objektů do cílových kategorií využití ploch

Kód	Kategorie využití	Zařazené plochy ZABAGED®	Zařazené plochy LPIS
AZP	antropogenní a zpevněné plochy	ArealUceloveZastavby ¹ BudovaBlokBudov ² Elektrarna ² HaldaOdval ³ ChladiciVez ² Kolejiste ² KulnaSklenikFoliovnik ² Letiste ³ OstatniPlochaVSidelech ² Parkoviste ² PovrchovaTezbaLom ³ PrecerpavaciStaniceProduktovodu (PrecerpavaciStanice) ^{2,11} RozvalinaZricenina ³ RozvodnaTransformovna ² Silo ² SkalniUtvary ³ Skladka ³ ValcovaNadrzZasobnik ² ArealZeleznicniStaniceZastavky (ZeleznicniStanice) ^{2,11} plochy silnic ⁴ plochy železničních tratí ⁵	
OP	orná půda	OrnaPudaAOstatniNeurcenePlochy	standardní orná půda (R) ⁶ , úhor (U) ¹²
Z	zahrady	OvocnySadZahrada ⁷ OkrasnaZahradaPark ² Hrbitov ² ArealUceloveZastavby ¹	
S	sady	OvocnySadZahrada ⁸	ovocný sad (S)
TP	travní porost	TrvalyTravniPorost (LoukaPastvina) ^{10,11} ArealUceloveZastavby ¹	trvalý travní porost (T), tráva na orné (G)
KP	křovinatý porost	LesniPudaSKrovinatymPorostem ¹⁰ Plochy zbývající po zpracování ostatních kategorií	rychle rostoucí dřeviny (D), jiná trvalá kultura (J), jiná kultura (O), mimoprodukční plocha (M)
LP	lesní porost	LesniPudaSeStromy ¹⁰ LesniPudaSKosodrevinou ¹⁰	zalesněná půda (L), školka (K)
C	cesty	plochy cest ⁹	
VP	vodní plochy	VodniPlocha	rybník (B)
CH	chmelnice	Chmelnice	chmelnice (C)
V	vinice	Vinice	vinice (V)

Obrázek 12-Využití území (Devátý, 2018)

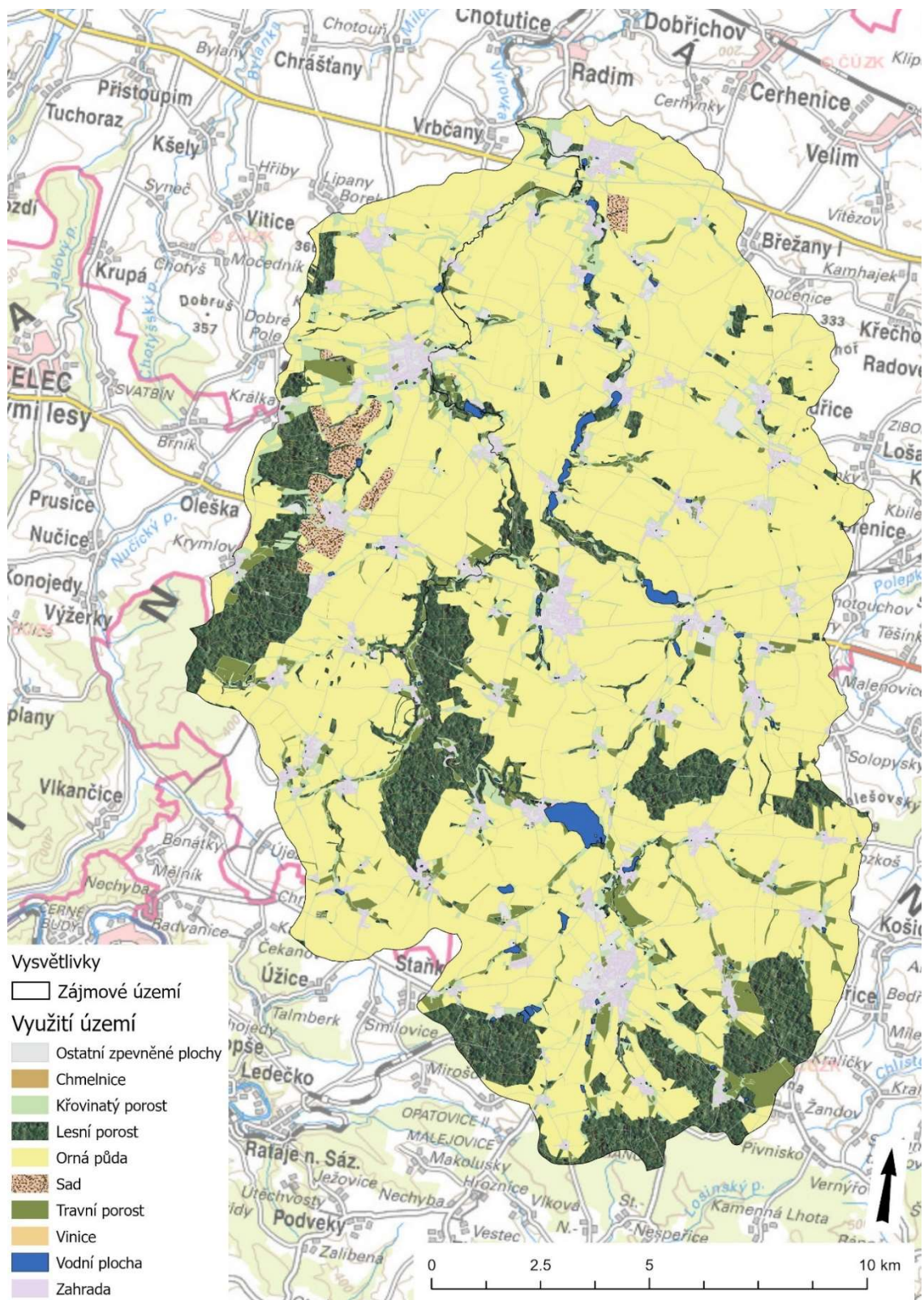
Tabulku s možnostmi využití území přebíráme (Devátý, 2018). Vytvořená mapa vrstev ZABAGED, u které došlo k velkému snížení možností využití území, byla následně překryta vrstvou LPIS. Tato vrstva určuje skutečné aktuální využití území a upřesňuje stav popisovaný základní mapou ZABAGED. V místech, kde jsou obě vrstvy, se hodnota přepíše aktuálními daty z databáze LPIS. Jelikož se ale vrstva LPIS nevyskytuje na celém území, v místech, kde vrstva chybí, zůstanou zachované původní informace z databáze ZABAGED.

Celý detailní popis vytvoření mapy Landuse je popsán v Disertační práci (Devátý, 2018).

Hodnoty jsou na závěr upraveny pro převod do programu WaTEM/SEDEM tak, aby respektovaly jeho požadavky.

Tabulka 2- Označení kategorií pro model WaTEM/SEDEM

-2	Intravilán, cestní síť a liniové prvky přerušující dráhu povrchového odtoku
-1	Vodní toky
0	Oblast mimo řešenou plochu povodí
1–9999	Zemědělské pozemky s ornou půdou
Kdy: 2	Orná půda
4	Vinice
6	Ovocné sady
8	Chmelnice
10 000	Lesní porost
20 000	Louky a pastviny



Obrázek 13- Mapa využití území

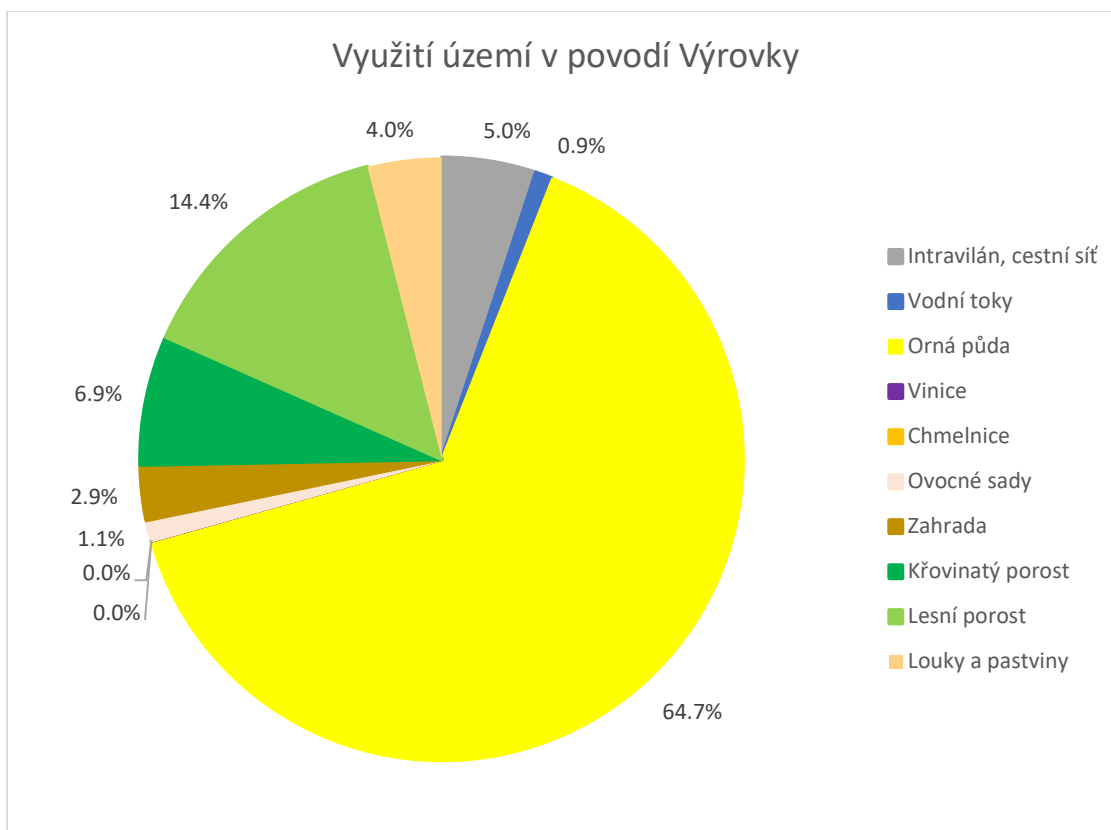
Těmito kroky je vytvořena vrstva Landuse v polygonovém tvaru. Pro výpočet ve WaTEM/SEDEM je ale třeba mapu upravit do rastru. Při převodu je nutné dávat pozor na zachování nepřerušenosti, a to jak cestní sítě, tak vodních toků.



Obrázek 14- Ukázka rastrování vektorové mapy Landuse na mapu PARCEL

Vrstvu vyrábíme převedením do rastru jako celku. Následně si vyrobíme rastrovou vrstvu cestních sítí, kdy cesty mají hodnotu -2 a oblast mimo ně 0. Pomocí příkazu Over položíme cestní síť na celkový raster Landuse a zajistíme tak kontinualitu cest. Pomocí stejných kroků si vytvoříme vrstvu vodních toků, kterou pak pomocí Over uložíme na již vytvořený raster. Vodním tokům přiřadíme hodnoty -1, zbytku území hodnoty 0. Výsledkem je rastrová vrstva se souvislou říční sítí a sítí silnic přerušenu tokem pouze v místech vzájemného křížení.

Z grafu (Obrázek 15- Procentuální zastoupení využití území v povodí Výrovky) můžeme vidět, že převážnou část zabírá orná půda s 65 %. Druhým nejvíce zastoupeným územím je lesní porost se 14 %. Zbylá pětina území je rozložena mezi ostatní typy využití území.



Obrázek 15- Procentuální zastoupení využití území v povodí Výrovky

Přehled zastoupení jednotlivých využití území, kde vyčteme i konkrétní hodnoty v hektarech, nalezneme v tabulce a grafu (Tabulka 3- Zastoupení využití území v povodí Výrovky, Obrázek 16- Graf využití území).

Tabulka 3- Zastoupení využití území v povodí Výrovky

Využití území	Rozloha [ha]	Procentuální zastoupení [%]
Intravilán, cestní síť	1335.64	5.04
Vodní toky	251.31	0.95
Orná půda	17136.61	64.66
Vinice	0.85	0.00
Chmelnice	0.00	0.00
Ovocné sady	292.25	1.10
Zahrada	781.45	2.95
Křovinatý porost	1840.23	6.94
Lesní porost	3815.18	14.39
Louky a pastviny	1050.32	3.96



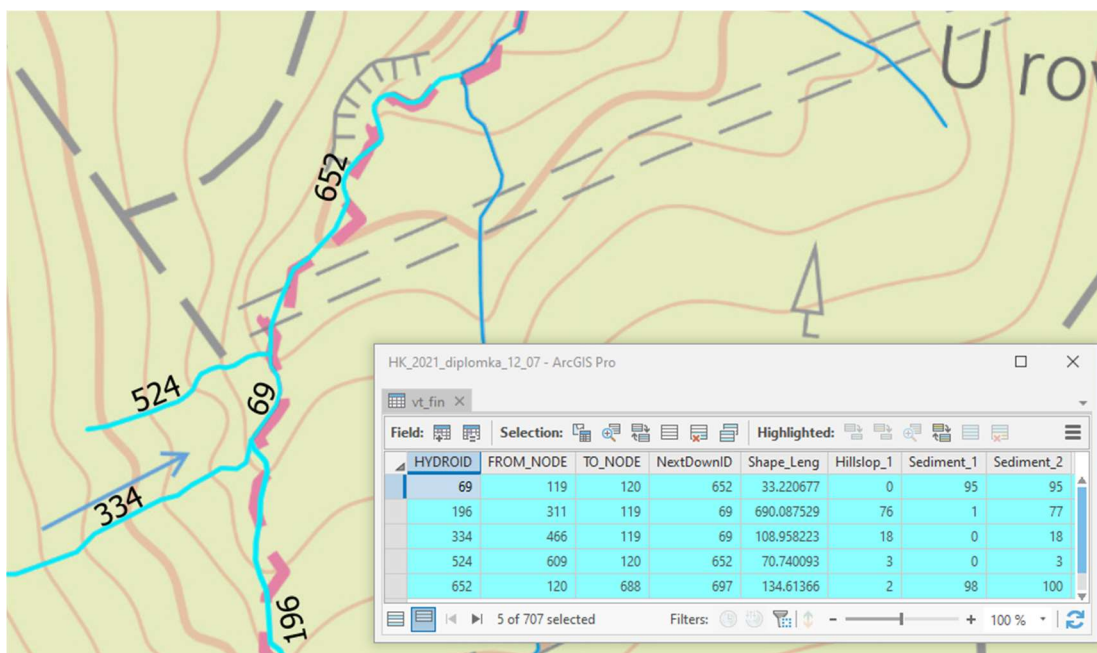
Obrázek 16- Graf využití území

6.3. VODNÍ TOKY

Vrstva vodních toků je klíčový vstup pro program WaTEM/SEDEM, který určuje polohu vodních toků v území a jejich návaznost. Nutností je zajistit kompletní síť, tedy směřování vodních toků z jednoho uzlu do druhého. Podkladem pro vznik mapy jsou data ZABAGED. Vrstva vodní toky obsahuje jednotlivé úseky toků, kde každý nese vlastní identifikátor. Taktéž v ní nalezneme vodní nádrže se jejich identifikátory.

Na výstřižku (Obrázek 17- Ukázka směřování vodních toků včetně tabulky) můžeme vidět výřez částí území s jejich identifikátorem (hydroid) a následujícím směřováním a návazností úseků toku.

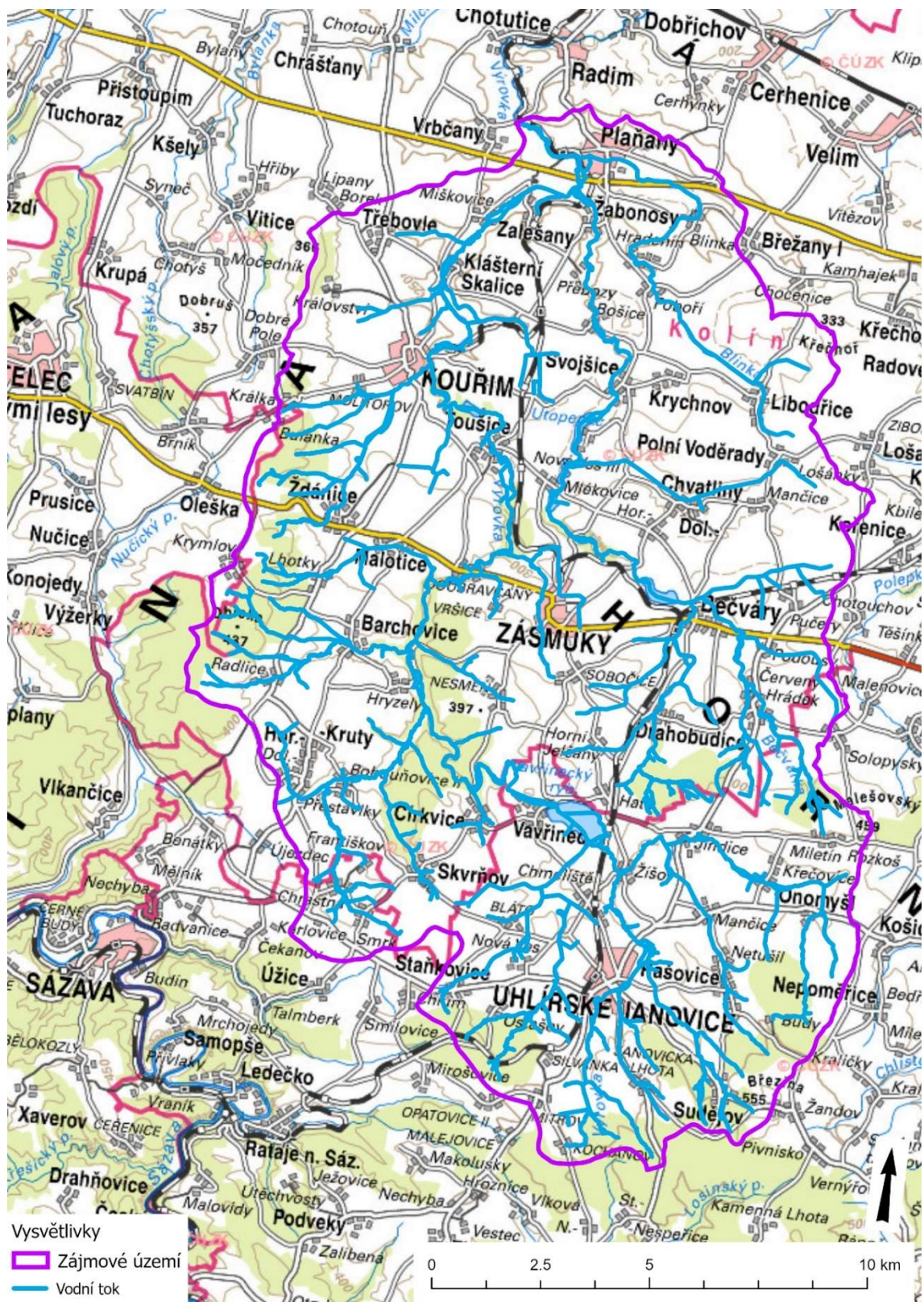
Důležité je, aby každý úsek měl právě jeden úsek následující a nedocházelo ke větvení sítě, tedy každý úsek toku musí mít právě jeden navazující.



Obrázek 17- Ukázka směrování vodních toků včetně tabulky

Mapa (Obrázek 18- Vodní toky) ukazuje polohu hlavních toků, tedy hodnota pixelu označující tok má velikost větší než nula. Naopak všechny ostatní pixely mimo říční síť mají hodnotu nula.

Detailně je postup popsán v originální literatuře k modelu (KU Leuven, 2005).



Obrázek 18- Vodní toky

6.4. K FAKTOR

Faktor erodovatelnosti půdy je podle USLE definován jako odnos půdy ze standardního pozemku v tunách na hektar na jednotku erozní účinnosti deště R ($MJ * ha^{-2} * cm * h^{-1}$). (Janeček, 2012)

Do modelu WaTEM/SEDEM je možno vrstvu zadat hodnotou nebo plošnou vrstvou.

Dle Metodiky (Janeček, 2012) lze faktor erodovatelnosti stanovit 3 způsoby:

- Nomogramy sestavené na základě uvedeného vztahu
- Vztah odvozený pro faktor K
- Přibližně na základě hlavních půdních jednotek bonifikační soustavy půd, nebo dle půdních typů a subtypů taxonimického klasifikačního systému půd ČR

V práci je použita metoda přímého převodu BPEJ na K faktor. K vytvoření používám mapu BPEJ (Bonitonovaná půdně ekologická jednotka) dostupnou na (Státní pozemkový úřad, 2021). Ta je charakterizována pětímístným kódem. První číslice vyjadřuje příslušnost ke klimatickému regionu. Druhá a třetí číslice vykazují HPJ, tedy zařazení půdy do hlavní půdní jednotky klasifikační soustavy. Čtvrtá číslice kódu uvádí příslušnou expozici pozemků ke světovým stranám a také charakteristiku sklonitosti. Pátá číslice zahrnuje skeletovitost půdního profilu a hloubku půdy. (VÚMOP v.v.i., 2019)

Na základě kódu HPJ a metodiky Ochrana zemědělské půdy před erozí (Janeček, 2012) byla stanovena hodnota K faktoru pro každou půdu.

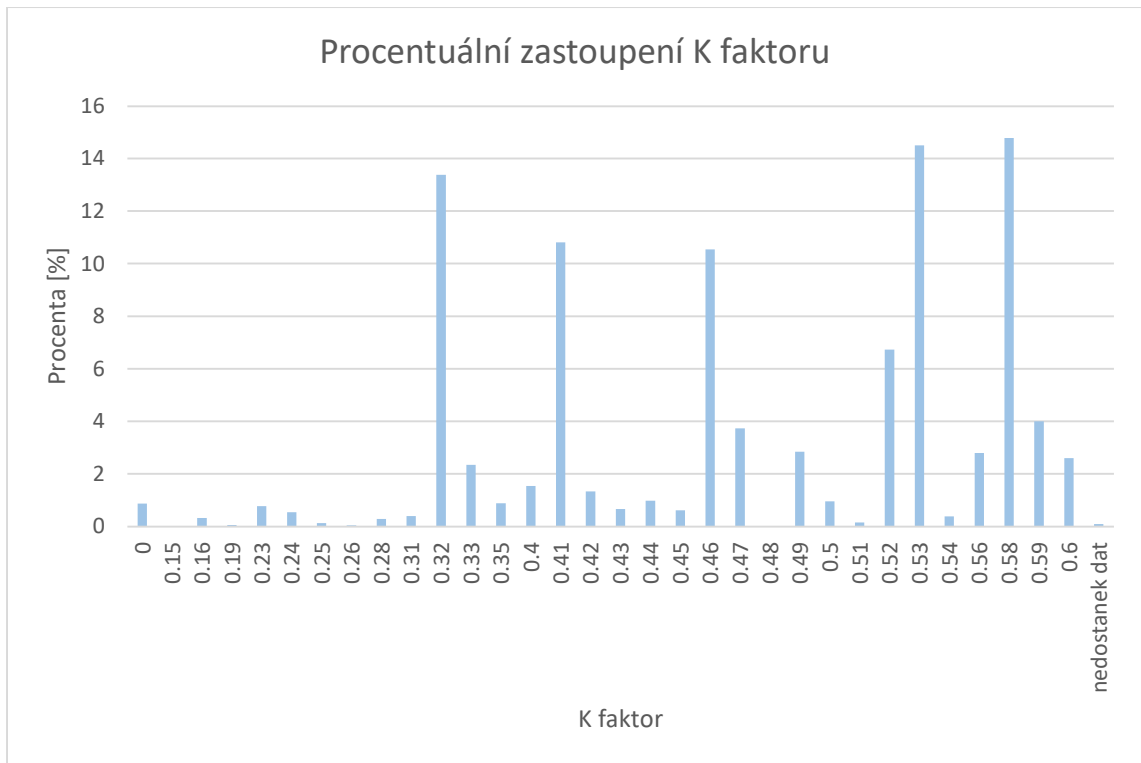
Tabulka 4- K faktor (Janeček, 2012)

HPJ	K faktor	HPJ	K faktor	HPJ	K faktor
01	0.41	27	0.34	53	0.38
02	0.46	28	0.29	54	0.40
03	0.35	29	0.32	55	0.25
04	0.16	30	0.23	56	0.40
05	0.28	31	0.16	57	0.45
06	0.32	32	0.19	58	0.42
07	0.26	33	0.31	59	0.35
08	0.49	34	0.26	60	0.31
09	0.60	35	0.36	61	0.32
10	0.53	36	0.26	62	0.35
11	0.52	37	0.16	63	0.31
12	0.50	38	0.31	64	0.40
13	0.54	39	nedostatek dat	65	nedostatek dat
14	0.59	40	0.24	66	nedostatek dat
15	0.51	41	0.33	67	0.44
16	0.51	42	0.56	68	0.49
17	0.40	43	0.58	69	nedostatek dat
18	0.24	44	0.56	70	0.41
19	0.33	45	0.54	71	0.47
20	0.28	46	0.47	72	0.48
21	0.15	47	0.43	73	0.48
22	0.24	48	0.41	74	nedostatek dat
23	0.25	49	0.35	75	nedostatek dat
24	0.38	50	0.33	76	nedostatek dat
25	0.45	51	0.26	77	nedostatek dat
26	0.41	52	0.37	78	nedostatek dat

(Janeček, 2012)

Mapa BPEJ pokrývá pouze území zemědělského půdního fondu, což je převážná většina míst, kde dochází k plošnému eroznímu odtoku, jeho modelování a popisu. Místa, kde mapa chybí, jsou hlavně území erozně neohrožená a neřešená. Neřešená, tedy že tam buď nedochází k erozním procesům (tzn. silnice, intravilán), nebo jsou to jiná, tímto modelem nepostihnutá území (lesy). Pro výpočet ve WaTEM/SEDEM je ale důležitá celistvá vrstva vyplněná hodnotami ve všech bodech.

Na částech území, kde vycházely hodnoty K faktoru jako nedostatek dat nebo tam data úplně chyběla, je vyplňujeme hodnotou 0.



Obrázek 19- Zastoupení HPJ ve vrstvě K faktoru

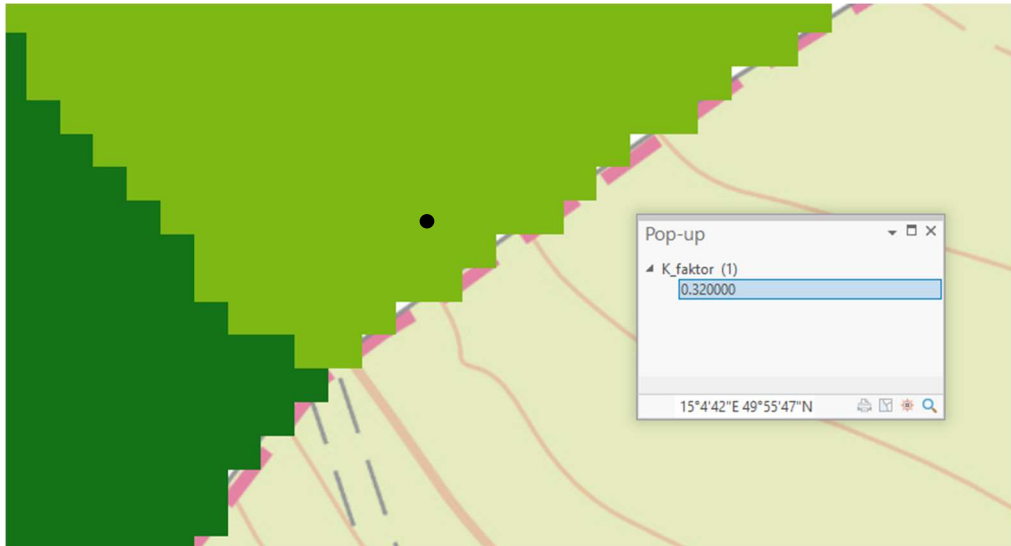
Z grafu (Obrázek 19- Zastoupení HPJ ve vrstvě K faktoru) můžeme vidět, že část, kterou jsme doplňovali interpolací (tedy s hodnotou 0 a nedostatkem dat) vychází na necelé 1% území.

Data doplňujeme pomocí nástroje Raster Calculator a prosté lineární interpolace tak, aby vrstva vstupující do Watem/SEDEM pokrývala celé území.

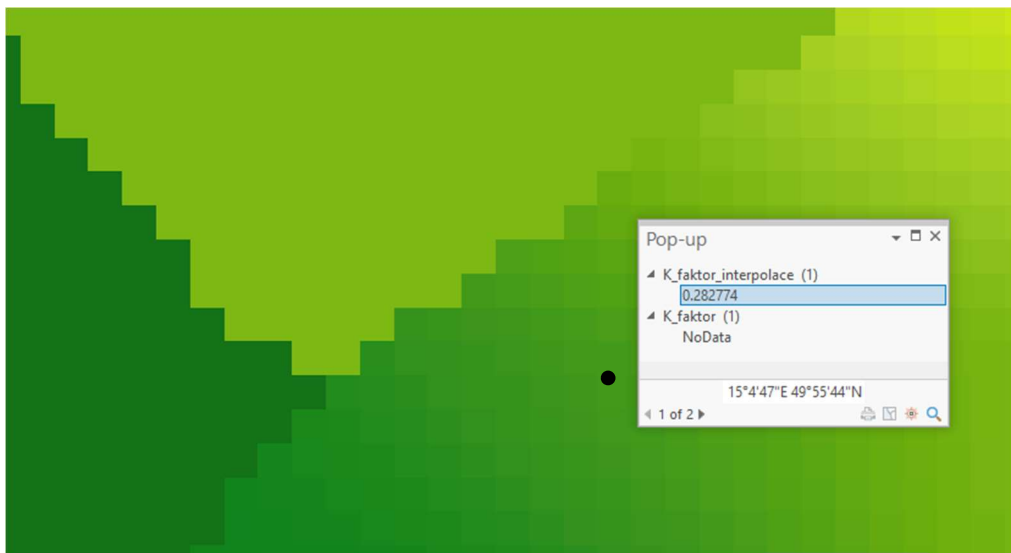
Code:

```
Con(IsNull("raster"), FocalStatistics("raster", NbrRectangle(5,5, "CELL"), "MEAN"), "raster")
```

Obrázek 20- Ukázka kódu k doplnění hodnot interpolací



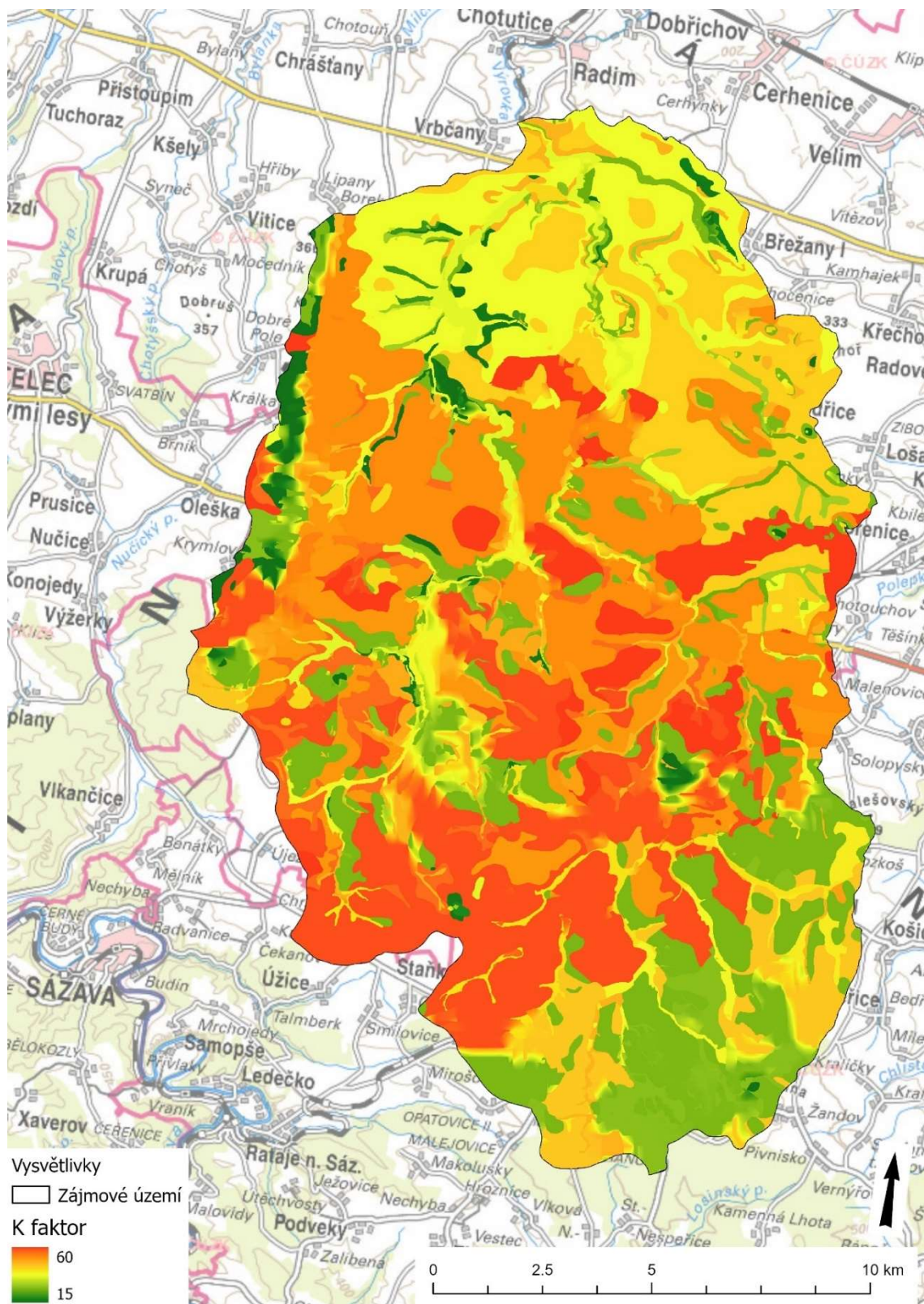
Obrázek 21- K faktor před doplnění interpolací



Obrázek 22- K faktor, doplnění vrstvy interpolací

Tímto způsobem doplnění hodnot se nejspíše dopustíme drobných chyb ve výpočtu. Zároveň to považujeme za nejlepší způsob, jak daná data doplnit a mít co nejvíc realistický výsledek výpočtu.

Výsledné rozlišení hodnot K faktoru je 100krát zvětšená hodnota. To je z důvodu výpočtu v prostředí ArcGIS, ale zároveň do modelu WaTEM/SEDEM je třeba zadávat K faktor takto převýšený, aby mohl program počítat v korektních jednotkách. K faktor rovnice RUSLE vyjádřený v $kg * m^{-2} * h * MJ^{-1} * mm^{-1}$ odpovídá 100násobku u nás běžně používaných hodnot v $t * h * MJ^{-1} * cm^{-1}$. (Vysloužilová a Kliment, 2012)



Obrázek 23- K faktor (po doplnění míst interpolací)

6.5. C FAKTOR

Faktor ochranného vlivu vegetace se projevuje přímou ochranou půdy před negativním působením dopadajících kapek a následným odnosem půdy. Také zamezuje a napomáhá zpomalování rychlosti povrchového odtoku. Nepřímo se i podílí na působení vegetace na půdní vlastnosti, jako je pórovitost nebo propustnost. (Janeček, 2012)

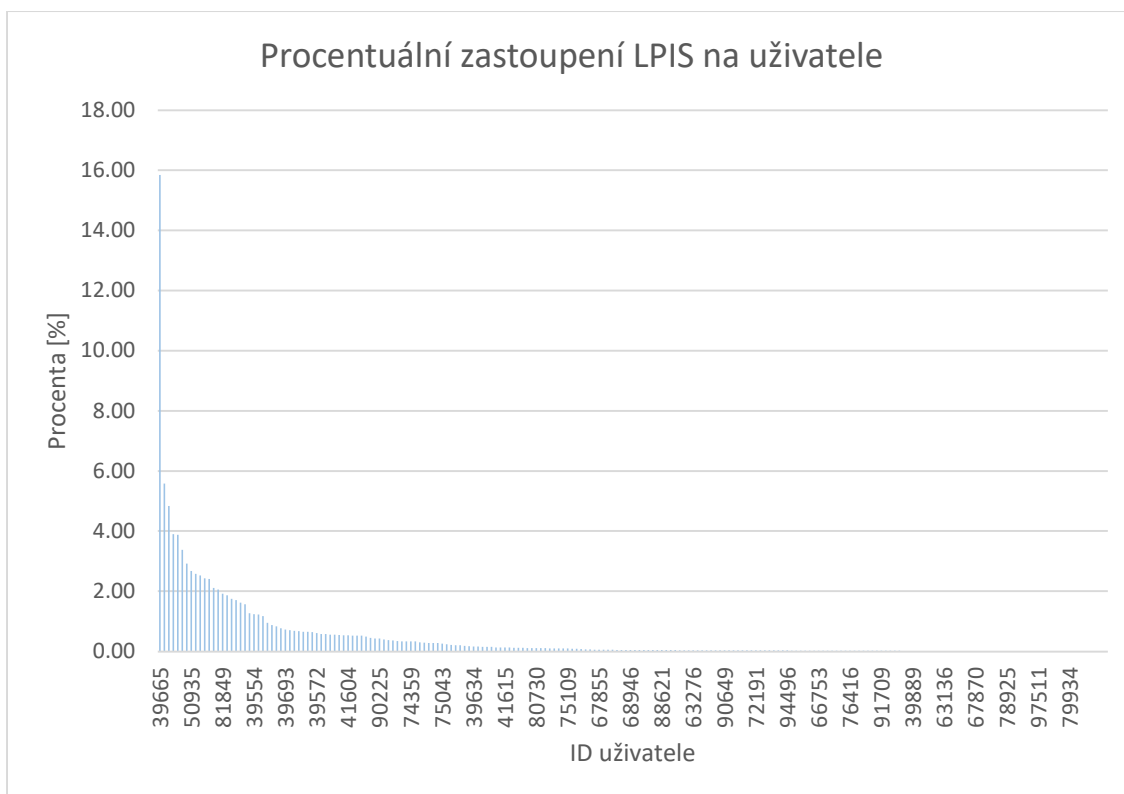
Jelikož je ochranný vliv vegetace přímo úměrný hustotě porostu při přívalových deštích, lze jako dokonalou protierozní ochranu například považovat porosty trav a jetelovin. Naopak klasickým způsobem pěstované širokořádkové plodiny jsou na ochranu půdy před přívalovými dešti nedostačující.

Do modelu WaTEM/SEDEM lze zadat jako hodnotu nebo plošnou vrstvu.

Příprava dat:

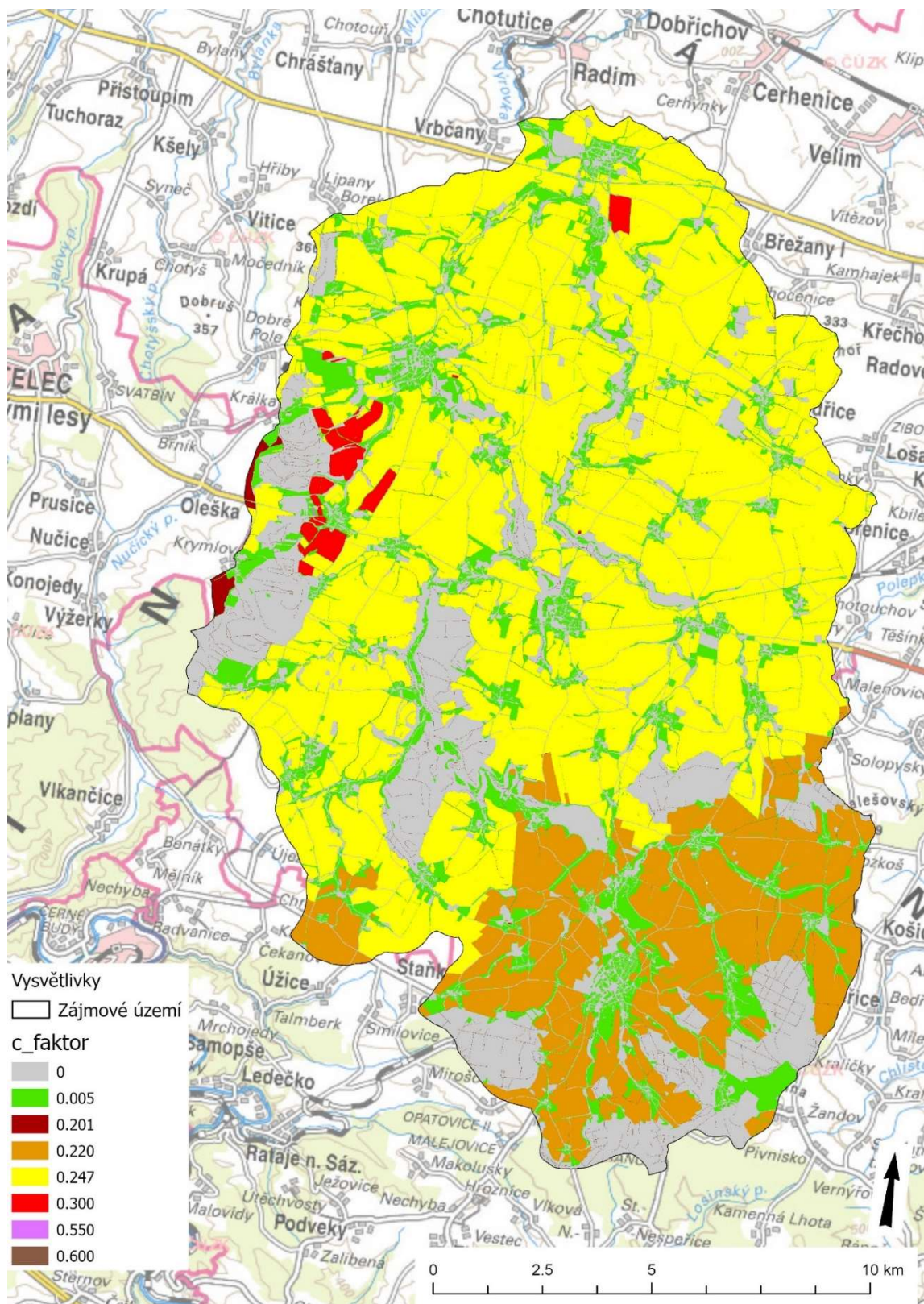
Podkladem tvorby vrstvy se stala vrstva Landuse a LPIS. Vrstvu LPIS získávám od Fakulty stavební ČVUT pro daný projekt. Pomocí atributové tabulky vrstvy LPIS vytvoříme na základě ID konkrétních zemědělců a velikosti jejich území procentuální statistiku (Obrázek 24- Procentuální zastoupení LPIS na uživatele).

V následujícím grafu můžeme vidět, že zemědělec o ID 39665 obhospodařuje necelých 16% z celkového území. Další v pořadí (ID 50935) už pouze necelých 6% a následující (ID 81849) už jen 5% z celku.



Obrázek 24- Procentuální zastoupení LPIS na uživatele

Ideální variantou by bylo získat C faktor pro dané území podle reálných osevních postupů. Takovou databázi si vede MZE, bohužel ale není veřejná. Jedinou možností by tedy bylo přímé oslovení zemědělců a tím pokrytí dostatečné plochy, tedy alespoň 50% území v rozumném prostorovém rozložení. Udělali jsme tedy analýzu LPIS podle ID uživatelů. Z grafu (Obrázek 24- Procentuální zastoupení LPIS na uživatele) můžeme vidět, že první obhospodařuje necelých 16%, druhý pouze 6% z celkového území. Abychom dostali alespoň 50%, lépe 60% obhospodařovaného území, bylo by třeba obvolat zhruba 30- 40 subjektů se stoprocentní úspěšností jejich odpovědí, což je časově nereálné. Právě proto se opíráme o statistické hodnoty na úrovni okresů, dostupné pro projekt.



Obrázek 25- C faktor

Hodnoty C faktoru pro ornou půdu získávám od VÚMOP jako vstupní data samotného projektu QK1920224 Možnosti řešení protierozní ochrany v zemědělských podnicích při vyloučení používání glyfosátu. Data byla použita pro povodí agregovaná na úrovni okresů. (Janoušek, 2021)

Z metodiky Janečka získávám hodnotu pro travní porost 0,005. Zbylé hodnoty přebírám z habilitační práce (Krása, 2010).

Z následující tabulky můžeme vyčíst hodnoty použité pro konkrétní typ využití území v dané lokalitě. Pro zbylé typy území je velikost C faktoru 0.

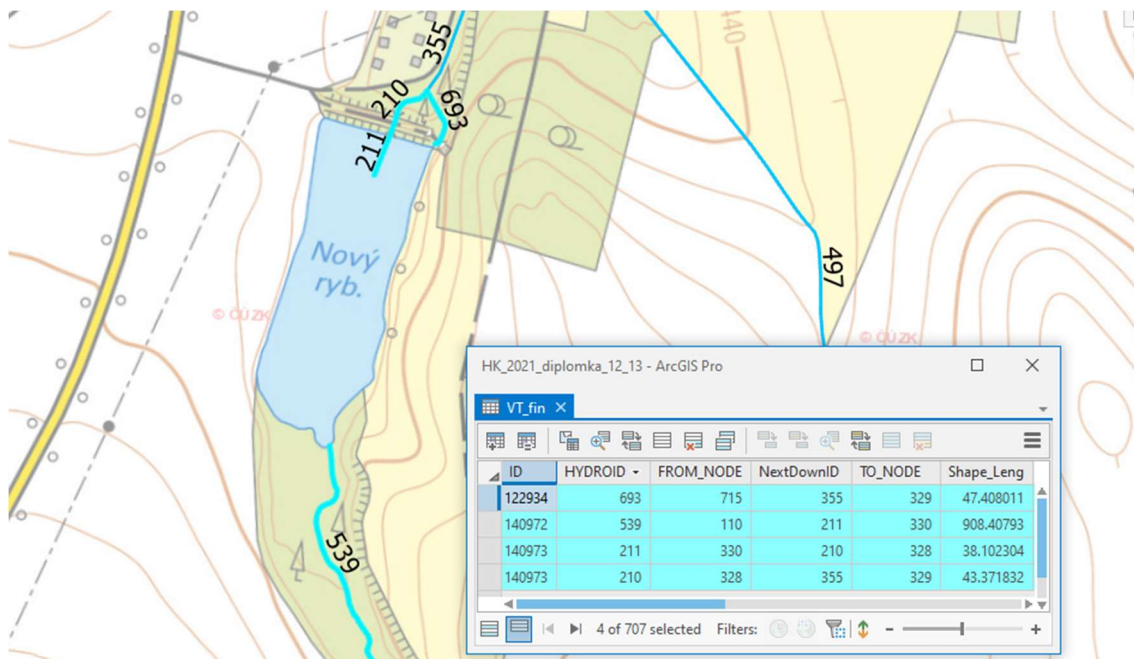
Tabulka 5- Hodnoty C faktoru

Kategorie LPIS	C faktor		
	Kutná hora	Kolín	Praha východ
Orná půda	0,220	0,247	0,201
Trvalý travní porost	0,005		
Vinice	0,550		
Ovocný sad	0,300		
Chmelnice	0,600		
Porost rychle rost. dřevin	0,005		

6.6. NÁDRŽE

Vrstva vznikla z dat ZABAGED.

Do modelu WaTEM/SEDEM lze nádrže zadat jako plošnou vrstvu. Pokud hodnota nebude zadána, nemá to žádný vliv na úspěšný chod programu. Pro naše pozorované území uvažujeme nádrže jako samostatný úsek vodního toku s návazností na jiné toky, ale s nulovým zachycením. Proto tuto vrstvu není nutné zadávat.



Obrázek 26- Vodní nádrž jako samostatný úsek vodního toku s návazností na jiný tok

Poměr zachycení v nádržích TE (%)

Zadržení sedimentu ve vodních nádržích je v simulačních modelech řešeno nejčastěji empirickými přístupy. Ty sledují závislost mezi morfologií nádrže a poměrem zachycení na průtokových charakteristikách. Nejčastěji citované metody jsou Brownova metoda (BROWN, 1943), metoda Bruneho křivek (BRUNE, 1953) a metoda popsaná Churchillem (CHURCHILL, 1948). Za nejvýhodnější z nich bývá nejčastěji považována Bruneho metoda.

Pro aplikaci v GIS pro rozsáhlá povodí s velkým počtem nádrží je doporučováno analytické vyjádření Bruneho křivky, které sestavil Dendy. (DENDY, 1978)

Rovnice 3- Poměr zachycení v nádržích

$$TE = 100 * 0,97^{0,19 \log \left(\frac{C}{I} \right)}$$

- Kde: TE poměr zachycení (%)
 C zásobní objem nádrže (m^3)
 I roční průměrný průtok nádrží ($m^3 * rok^{-1}$)

(Krása, 2013)

Ke stanovení poměru zachycení, tedy C/I je potřeba znát dlouhodobý průměrný průtok nádrží a taktéž její objem. (Krása, 2013)

6.7. PTEF (PARCEL TRAP EFFICIENCY)

Kalibrační koeficient, který řeší poměr zachycení sedimentu jednotlivými pozemky. Rozpětí hodnot je mezi 0 a 100.

Hodnoty zadáváme doporučené:

Orná půda	0
Les	75
Trvalý travní porost	75

(Krása, 2010)

Hodnoty, vstupy a jejich určení jsou podrobně rozepsány v disertaci (Krása, 2004). Od té doby ale proběhla řada výzkumů v dalších povodích (Dostál, 2007) a za doporučené jsou považovány následující hodnoty, které přebíráme.

6.8. PARCEL CONNECTIVITY

Poměr zachycení sedimentu na hranicích pozemků v případě, že přechází odtok z jednoho druhu využití území na jiný. Rozpětí hodnot je mezi 0 a 100. Celková zdrojová plocha elementu je při vstupu na pozemek redukována danou hodnotou.

Hodnoty zadáváme doporučené:

Orná půda	40
Les	75
Trvalý travní porost	75

(Krása, 2010)

V disertaci (Krása, 2004) můžeme najít konkrétní hodnoty a vstupy a jejich určení. Po řadě dalších výzkumů na jiných povodích (Dostál, 2007), jsou za doporučené hodnoty považovány následující, které přebíráme.

6.9. R FAKTOR

Vztah R faktoru, tedy erozní účinnosti deště, byl odvozen v USA z velkého množství dat o dešťových srážkách. (Janeček, 2012)

Rovnice 4- Faktor erozní účinnosti deště

$$R = E * i_{30}/100$$

Kde: R	je faktor erozní účinnosti deště / $MJ * ha^{-1} * cm * h^{-1}$ /
E	celková kinetická energie deště / $J * m^{-2}$ /
I30	max. 30minutová intenzita deště / $cm * h^{-1}$ /

(Janeček, 2012)

V USLE a to pro naprosto převažující plochu zemědělské půdy České republiky se aktuálně používá průměrná roční hodnota R faktoru $40 MJ * ha^{-1} * cm * h^{-1}$. (Janeček, 2012)

Dříve se přebraná hodnota R faktoru z Metodiky Janeček často používala a neregionalizovala se přímo na konkrétní území, ale brala se pro celou Českou republiku průměrná. To je v dnešní době již překonáno a R faktor se také díky lepším podkladovým mapám a charakteristikám většinou snažíme stanovit pro konkrétní místo, ideálně plošnou, distribuovanou formou.

Příprava dat:

Hodnoty přebíráme jako aktuální regionalizovanou vrstvu, vytvořenou v roce 2015 pro MŽP (Ministerstvo životního prostředí). (ROŽNOVSKÝ, 2015) R faktor je s pomocí vztahu (Wischmeier and Smith, 1978) vyhodnocen za období 30 let. Z hodnocení jsou vyřazeny deště menší než 12,5 mm, jejichž časové oddělení od okolních dešťů je delší než 6 hodin a pokud se jejich intenzita nedostala na 6,25 mm za 15 min.

6.10. LS FAKTOR

Výpočet topografického faktoru je možný čtyřmi rovnicemi:

- Wischmeier Smith (1978)
- McCool (1987,1989)
- Govers (1991)
- Nearing (1997)

Charakteristiky exponentu délky svahu můžeme stanovit na základě rovnic:

- Wischmeier Smith (1978)
- McCool (1987,1989)

Všechny uvedené možnosti využívají pro výpočet LS faktoru shodné algoritmy, vytvořené na základě zdrojových ploch, jako program USLE2D.

Pro výpočet byl zvolen postup pomocí McCool (Mc Cool, 1989) jakožto doporučená kombinace.

VÝPOČTOVÁ ČÁST

7. VÝSLEDKY A VÝSTUPY Z MODELU

Model WaTEM/SEDEM nám po úspěšně dokončeném výpočtu ukazuje výsledky hned několika způsoby. Jednak v podobě výsledkové tabulky, kde můžeme vyčíst základní statistiky. Také ale v podobě rastrových souborů IDRISI32 (.rst a .rdc). V neposlední řadě generuje několik textových souborů *.txt.

Z těchto všech možných výsledků je možné vyčíst a vizualizovat směry toků, množství odneseného sedimentu, produkci sedimentu i depozici.

Napomáhá nám také při identifikaci kritických míst na toku. Každé místo je určitým způsobem specifické a pomocí modelu a výsledků můžeme tato místa odhalit a zkusit erozi předcházet protierozní ochranou.

7.1. CELÉ ŘEŠENÉ ÚZEMÍ POVODÍ VÝROVKY

Z následující tabulky můžeme vyčíst základní statistiky (Tabulka 6- Celé řešené území) pro kompletní řešené území.

Tabulka 6- Celé řešené území

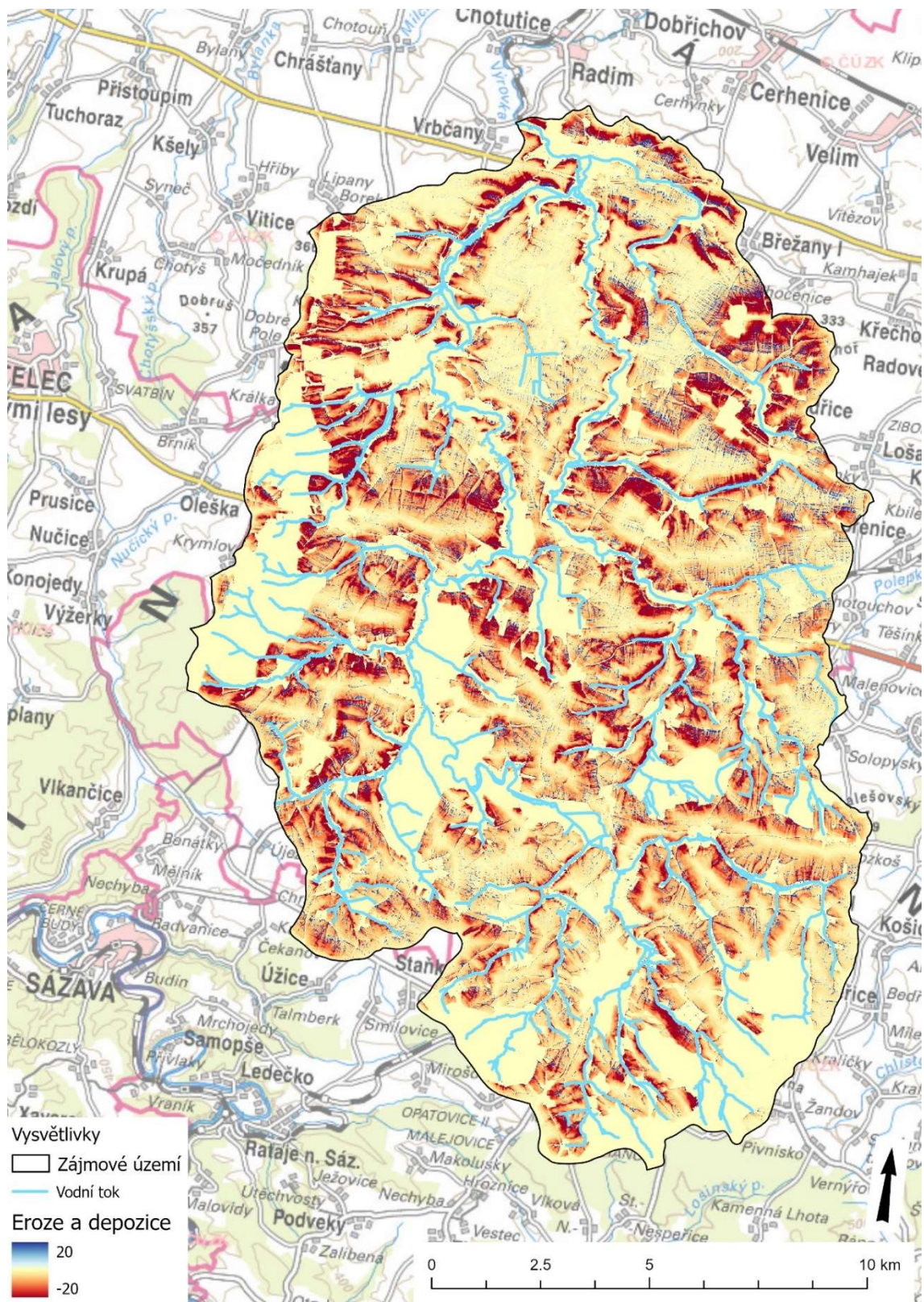
Povodí Výrovky		
Rozloha	265.04	km ²
Minimální nadmořská výška	205.44	m. n. m.
Maximální nadmořská výška	555.48	m. n. m.
Celková délka toků	362.54	km
Celková ztráta půdy	131 871	t
Celková depozice sedimentu	111 838	t
Celkový export	20 032	t

Povodí Výrovky zabírá rozlohu 265,04 km^2 , z čehož je 64,7% orná půda, 14,4% lesní porost a 6,9 % porost křovinatý. Markantní část území tedy zabírá orná půda. Ta je mnohem náchylnější k vodní erozi, jelikož není trvale chráněna pokryvem (na rozdíl od lesa, křovin, travin atp.) před destruktivními účinky kapek.

Vypočtené hodnoty jsou na bázi rovnice USLE, která počítá průměrnou dlouhodobou ztrátu půdy. Program WaTEM/SEDEM mimo to počítá transport sedimentu, vyhodnotí výsledky pro ztrátu půdy, depozici a odnos sedimentu vodními toky.

Z výsledkové tabulky vidíme opravdu velkou ztrátu půdy a depozici. Výsledný vstup do vodních toků vychází na 20 033 tun za rok.

Na základě obrázku (Obrázek 27- Eroze a depozice na celém řešeném území Výrovky), vybíráme do další části práce kritická místa.



Obrázek 27- Eroze a depozice na celém řešeném území Výrovky

7.2. POVODÍ IV. ŘÁDU

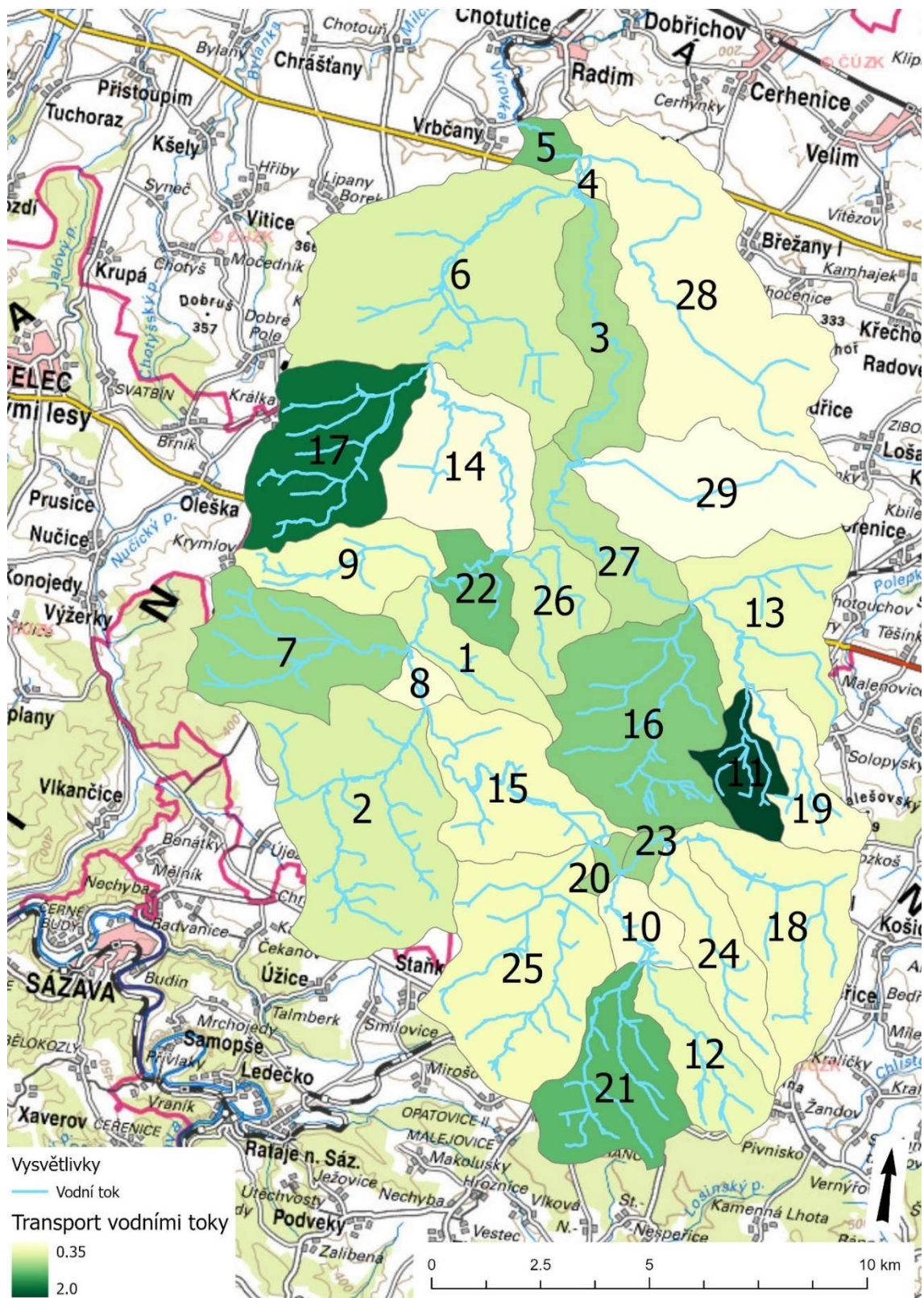
Pro zpřesnění a detailnější vizualizaci výsledků a výpočtů necháváme výsledky zobrazit pro každé povodí IV. řádu. Jedná se o území ohraničené rozvodnicí, z něhož veškerý povrchový odtok směřuje sítí toků k jednomu konkrétnímu místu. To může být například soutok s jiným tokem.

Tabulka 7- Povodí IV. řádu

Povodí IV. řádu	Hydro ID toku	Rozloha [ha]	Minimální nadmořská výška [m. n. m.]	Maximální nadmořská výška [m. n. m.]
1	1-04-06-013	510	289.12	410.85
2	1-04-06-010	2 134	313.92	436.43
3	1-04-06-026	810	214.12	312.92
4	1-04-06-027	42	209.86	238.64
5	1-04-06-029	145	208.24	263.70
6	1-04-06-019	2 800	213.24	371.56
7	1-04-06-012	1 121	300.47	450.88
8	1-04-06-011	140	300.47	390.97
9	1-04-06-014	656	289.17	440.80
10	1-04-06-003	302	388.58	453.70
11	1-04-06-020	379	338.71	459.98
12	1-04-06-002	662	406.13	555.48
13	1-04-06-022	1 162	311.17	377.47
14	1-04-06-017	1 050	237.07	336.05
15	1-04-06-009	1 046	314.15	419.77
16	1-04-06-023	1 606	310.46	444.01
17	1-04-06-018	1 249	237.24	434.14
18	1-04-06-004	1 223	400.10	555.46
19	1-04-06-021	490	338.71	465.46
20	1-04-06-007	88	386.22	405.87
21	1-04-06-001	995	406.45	534.18
22	1-04-06-015	367	272.07	398.56
23	1-04-06-006	91	388.58	437.04
24	1-04-06-005	649	400.10	555.39
25	1-04-06-008	1 728	386.22	512.57
26	1-04-06-016	566	272.84	406.61
27	1-04-06-024	640	265.23	353.97
28	1-04-06-028	2 509	209.86	350.81
29	1-04-06-025	1 345	265.23	356.52

Tabulka 8- Povodí IV. řádu vstup do vodních toků

Hydro ID toku	Rozloha [ha]	Ztráta půdy [t]	Depozice sedimentu [t]	Vstup do vodních toků [t]	Transport vodními toky na jednotku plochy [t/ha]
1-04-06-013	510	-1 852	1 517	335	0.66
1-04-06-010	2 134	-11 208	9 644	1 564	0.73
1-04-06-026	810	-3 440	2 667	773	0.95
1-04-06-027	42	-161	140	21	0.50
1-04-06-029	145	-778	608	170	1.18
1-04-06-019	2 800	-15 219	13 204	2 015	0.72
1-04-06-012	1 121	-5 640	4 485	1 155	1.03
1-04-06-011	140	-139	78	61	0.43
1-04-06-014	656	-3 513	3 142	371	0.57
1-04-06-003	302	-991	854	137	0.45
1-04-06-020	379	-2 307	1 558	749	1.98
1-04-06-002	662	-2 034	1 623	411	0.62
1-04-06-022	1 162	-4 140	3 447	693	0.60
1-04-06-017	1 050	-5 779	5 347	433	0.41
1-04-06-009	1 046	-3 187	2 625	562	0.54
1-04-06-023	1 606	-10 290	8 493	1 797	1.12
1-04-06-018	1 249	-8 434	6 302	2 132	1.71
1-04-06-004	1 223	-3 780	3 122	658	0.54
1-04-06-021	490	-1 465	1 243	222	0.45
1-04-06-007	88	-280	192	89	1.00
1-04-06-001	995	-3 523	2 263	1 260	1.27
1-04-06-015	367	-2 664	2 224	440	1.20
1-04-06-006	91	-483	390	93	1.02
1-04-06-005	649	-2 385	2 043	342	0.53
1-04-06-008	1 728	-5 467	4 493	975	0.56
1-04-06-016	566	-2 927	2 518	409	0.72
1-04-06-024	640	-3 852	3 303	550	0.86
1-04-06-028	2 509	-17 471	16 319	1 152	0.46
1-04-06-025	1 345	-8 463	7 996	466	0.35



Obrázek 28- Transport vodními toky na jednotku plochy

Vyhodnocení můžeme vidět v soupise (Tabulka 8- Povodí IV. řádu vstup do vodních toků), kde území, ve kterém dochází k největšímu transportu sedimentu vodními toky vychází plocha povodí 17 s Hydro ID 1-04-06-018. Na tomto území vstupuje do vodních toků 2 132 tun sedimentu za rok. Další v pořadí bude území 6 s Hydro ID 1-04-06-019 se vstupem do vodních toků hodnotou 2 015 tun sedimentu za rok.

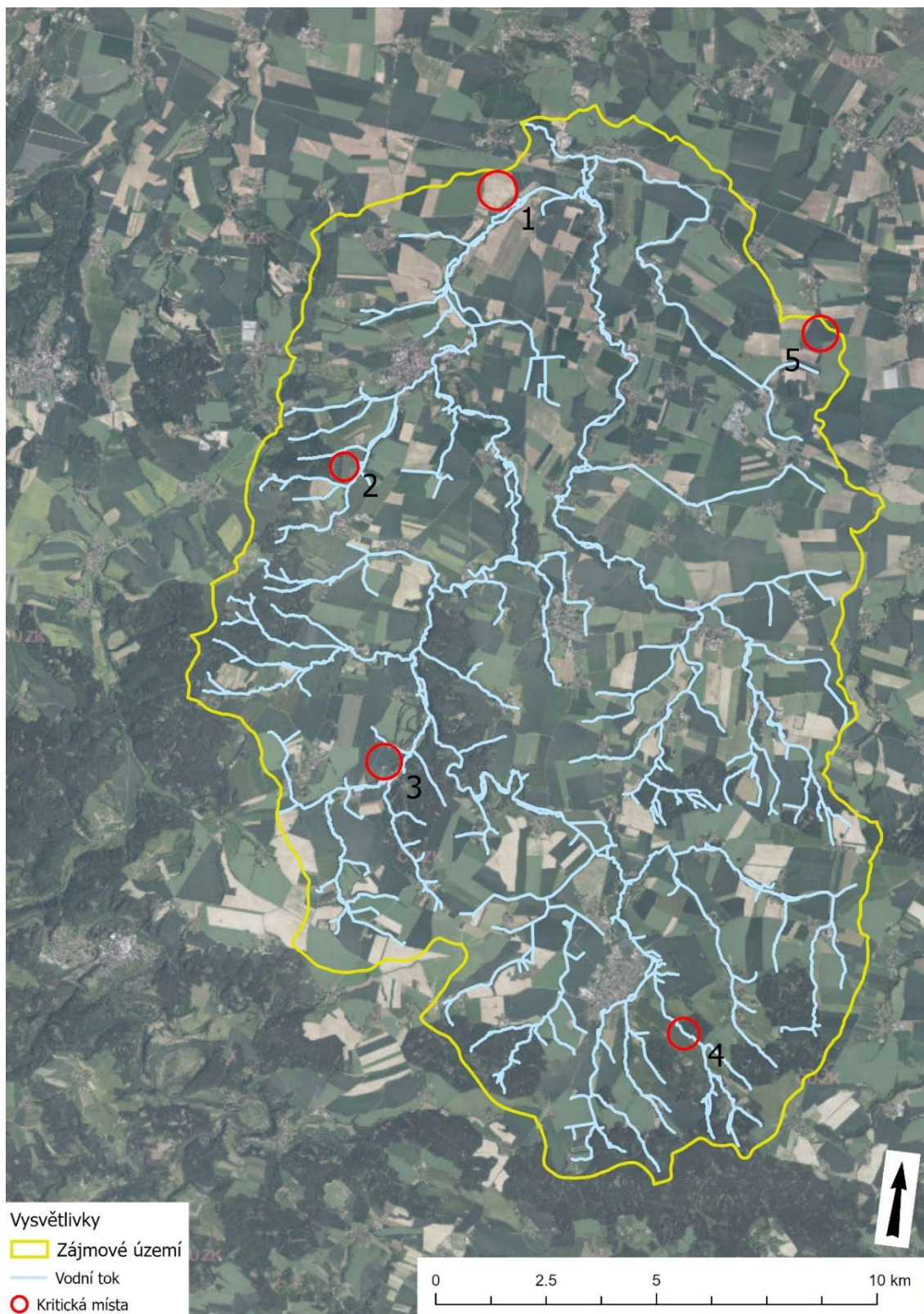
Pokud ale vztáhneme výpočet na jednotku plochy (Obrázek 28- Transport vodními toky na jednotku plochy), vychází jako nejkritičtější území 11 s Hydro ID 1-04-06-020 a odnosem 1.98 tun/ha/rok. Území 17 s Hydro ID 1-04-06-018, kde jsme mohli pozorovat největší transport sedimentu, je při přepočtu na jednotku území v pořadí druhé. Odnos sedimentu zde vychází 1.71 tun/ha/rok.

7.3. KRITICKÁ MÍSTA

Zajímavých míst je na povodí nespočet. Pro ukázkou jich vybíráme 5 rozmístěných po všech částech území, takže na nich uvidíme erozi a depozici v různých místech a v různých fázích toku.

Kritická a zajímavá místa jsou vybrána na pozemcích, kde dochází ke vzniku významné údolnice, tedy vysoké erozi i místy také k depozici. Každé místo je jiné, s jiným problémem. Výběr kritického pozemku byl kombinován a porovnáván s historickými ortofoto snímky, na kterých již můžeme problém vidět. Nejedná se tedy o záležitost současnosti, ale můžeme ji pozorovat i na starších mapách. Proto tato místa považujeme za kritická.

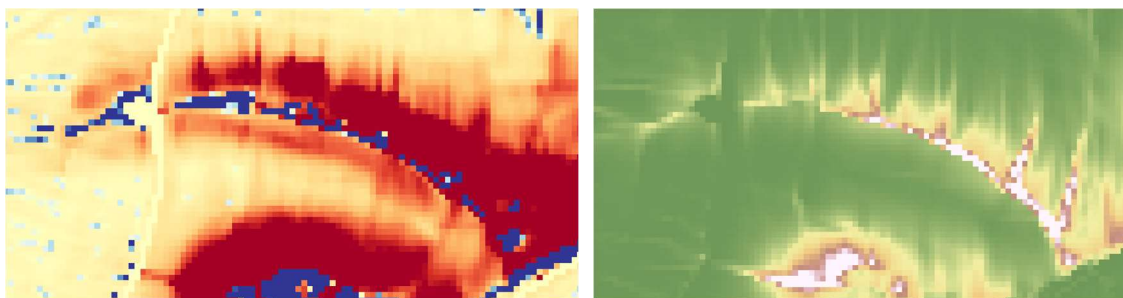
Právě i na těchto místech můžeme v kapitole (7.5. Návrh opatření) vidět jednoduchý návrh opatření pro snížení odtoku sedimentu.



Obrázek 29- Vybraná kritická místa

Místo číslo 1

Tento pozemek se nachází na severu sledovaného území, téměř u konce toku. Můžeme zde vidět významnou údolnici (Obrázek 30- Významná údolnice a transportovaný sediment), která je pozorovatelná už na snímcích z minulých let (Obrázek 31- Snímek z roku 2013 a snímek z roku 2004).



Obrázek 30- Významná údolnice a transportovaný sediment

Tabulka 9- Kritické místo číslo 1

Místo číslo	1	
Délka odtokové dráhy	650	m
Převýšení odtokové dráhy	22	m
Množství transport. sedimentu (konec údolnice)	31	t



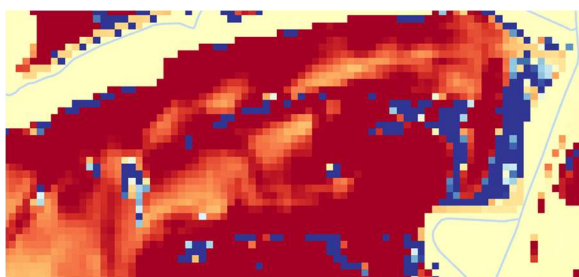
Obrázek 31- Snímek z roku 2013 a snímek z roku 2004

Z obrázku 30 (Obrázek 30- Významná údolnice a transportovaný sediment) můžeme vyčíst, jak se transportovaný sediment ukládá přímo po délce údolnice. Je celá řada scénářů, jak můžeme erozi zabránit. Jedním z nich je i zatravnění nejkritičtějších míst, které aplikujeme v části (7.5. Návrh opatření).

Místo číslo 2

Druhé místo je vybráno na západní straně území na drobném přítoku do Výrovky. Jedná se o sad v kopci, kde dochází ke vzniku výrazné údolnice, a to hlavně na starších snímcích (Obrázek 34- Snímek rok 2004 a snímek rok 2000).

Od roku 2013 můžeme pozorovat systematické střídání plodin po vrstevnici a přerušující prvek. Ze snímků seřazených časově postupně vidíme, že po použití těchto opatření údolnice z velké části vymizela. Stále zde ale dochází k erozi, proto i toto místo volíme jako kritické.



Obrázek 32- Údolnice a kritické místo č.2

Tabulka 10- Kritické místo číslo 2

Místo číslo	2	
Délka odtokové dráhy	350	m
Převýšení odtokové dráhy	22	m
Množství transport. sedimentu (konec údolnice)	10	t



Obrázek 33- Současná ortofotomapa ČR a snímek z roku 2013



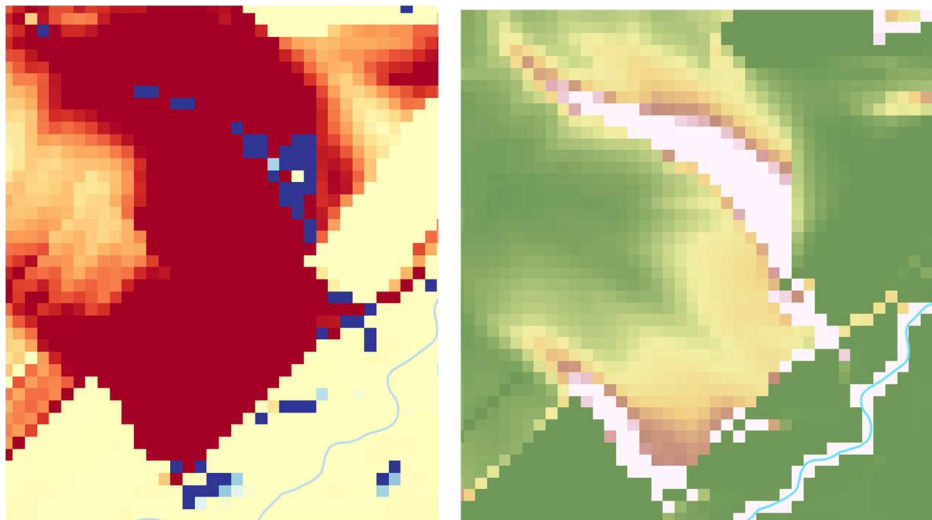
Obrázek 34- Snímek rok 2004 a snímek rok 2000

Místo číslo 3

Jako třetí kritické místo volíme pozemek s ornou půdou, který je umístěn v kopci. Na snímcích můžeme vidět výraznou údolnici ve spodní části svahu (Obrázek 36- Snímek z roku 2004 a snímek z roku 2000). Problém lze pozorovat již na snímku z roku 2000. Za jeden z možných scénářů řešení navrhujeme v kapitole (7.5. Návrh opatření) nejkritičtější místa zatravnit.

Tabulka 11- Kritické místo číslo 3

Místo číslo	3	
Délka odtokové dráhy	200	m
Převýšení odtokové dráhy	15	m
Množství transport. sedimentu (konec údolnice)	24	t



Obrázek 35- Údolnice a kritické místo 3; transportovaný sediment



Obrázek 36- Snímek z roku 2004 a snímek z roku 2000

Místo číslo 4

Území se nachází v jižním cípu řešeného území, jedná se o pozemek orné půdy v poměrně velkém sklonu. Převýšení je 18 metrů a délka svahu 200 metrů. Z obrázků můžeme vidět, že na tomto pozemku je údolnic hned několik. Ve spodní části pozemku dochází k vysoké depozici. Můžeme sledovat účelné využití travního pásu v okolí vodního toku. Ten zabraňuje přímému styku odneseného sedimentu s vodním tokem. Samotný odnos sedimentu tokem už není tak velký.

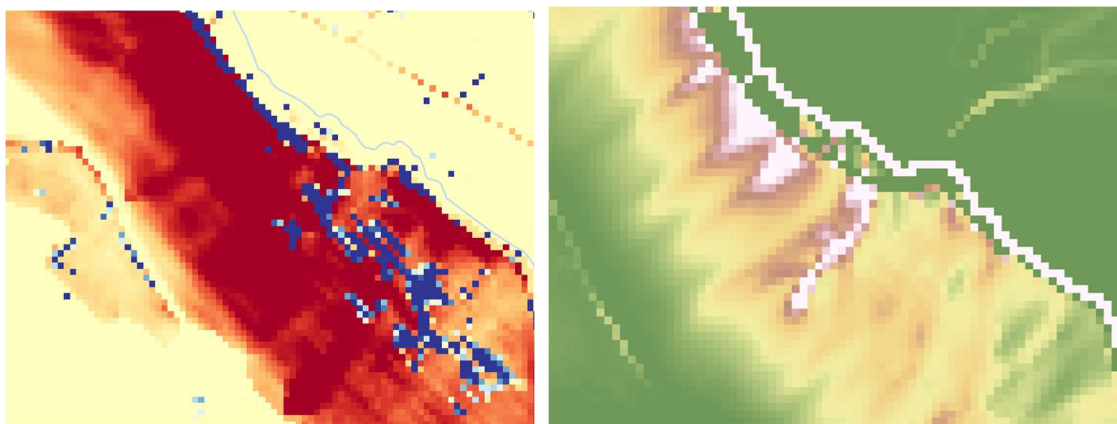
Stále ale, jak je možno vidět na snímku 38 (Obrázek 38- Eroze a depozice; transportovaný sediment) dochází v místech údolnice k vysoké ztrátě půdy. Proto toto místo vybíráme jako jedno z kritických.



Obrázek 37- Snímek z roku 2013 a snímek z roku 2007

Tabulka 12- Kritické místo číslo 4

Místo číslo	4	
Délka odtokové dráhy	200	m
Převýšení odtokové dráhy	18	m
Množství transport. sedimentu (konec údolnice)	24	t



Obrázek 38- Eroze a depozice; transportovaný sediment

Místo číslo 5

Poslední místo se nachází v severovýchodním cípu řešeného území. Jedná se o pozemek s ornou půdou v kopci, na kterém je možno sledovat snížení odnosu sedimentu přerušujícím prvkem, konkrétně drobným pásem lesa. Údolnice a ukládání sedimentu jsou na pozemku stále viditelné, ale můžeme pozorovat, že údolnice začínají až pod přerušujícím prvkem. Názorně je to vidět na historických snímcích (Obrázek 39- Snímek z roku 2004 a snímek z roku 2000) a místa, kde se ukládá sediment na obrázku 41 (Obrázek 41- Eroze a depozice; transportovaný sediment).



Obrázek 39- Snímek z roku 2004 a snímek z roku 2000

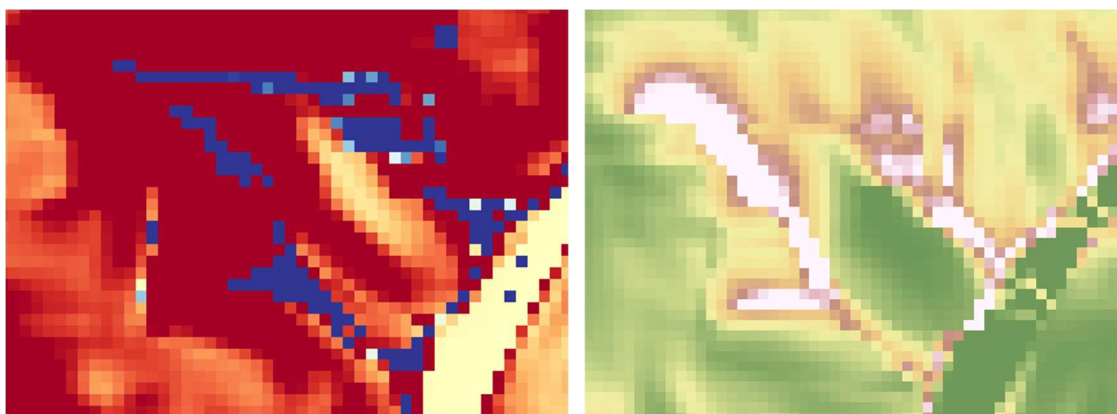


Obrázek 40- Současná ortofotomapa ČR

Tabulka 13- Kritické místo číslo 5

Místo číslo	5	
Délka odtokové dráhy	300	m
Převýšení odtokové dráhy	20	m
Množství transport. sedimentu (konec údolnice)	22	t

Údolnice pod přerušujícím prvem je stále významná, proto vybíráme i toto místo jako kritické. Jedním z možných řešení návrhu opatření pro snížení odnosu sedimentu je zatravnění údolnice.



Obrázek 41- Eroze a depozice; transportovaný sediment

7.4. VSTUP DO VODNÍCH TOKŮ A NÁDRŽÍ

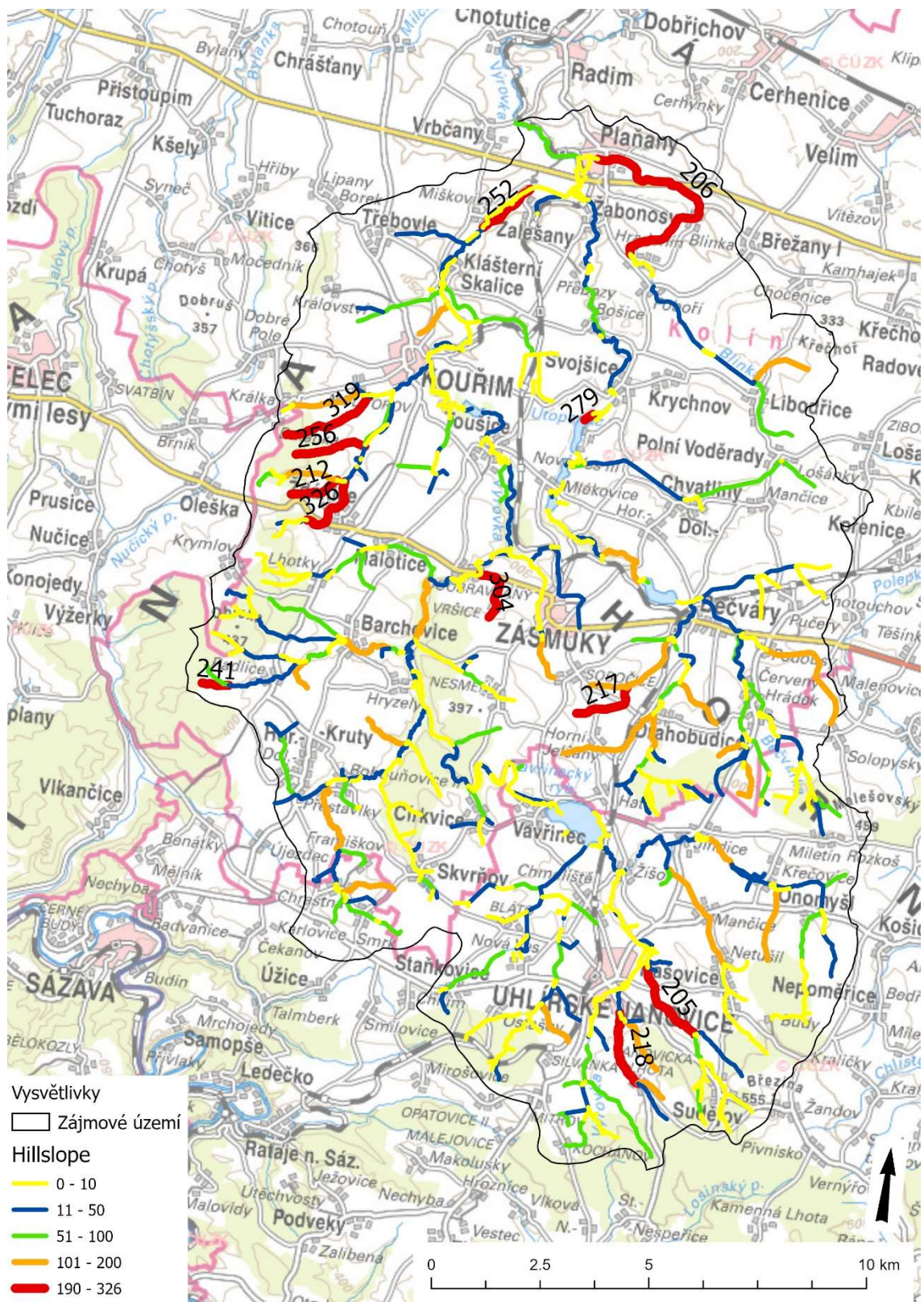
Množství sedimentu, který je pomocí vodní eroze transportován až do vodních toků, se v určité míře dostává do vodních nádrží po proudu toku. V této práci nádrže uvažujeme jako samostatný úsek vodního toku s nulovým zachycením.

Jedním z výstupů programu WaTEM/SEDEM jsou hodnoty Hillslope zobrazené v mapě (Obrázek 42- Vstup sedimentu do daného úseku vodního toku ze svahů). Hodnota Hillslope nám udává celkové množství sedimentu vstupující do daného úseku toku ze svahu. Pomocí jednoduchého rozdělení a barevné vizualizace můžeme z mapy vyčíst, kde bude docházet k nejkritičtějším vstupům.

Tabulka 14- Hodnoty vstupu sedimentu do vodního toku

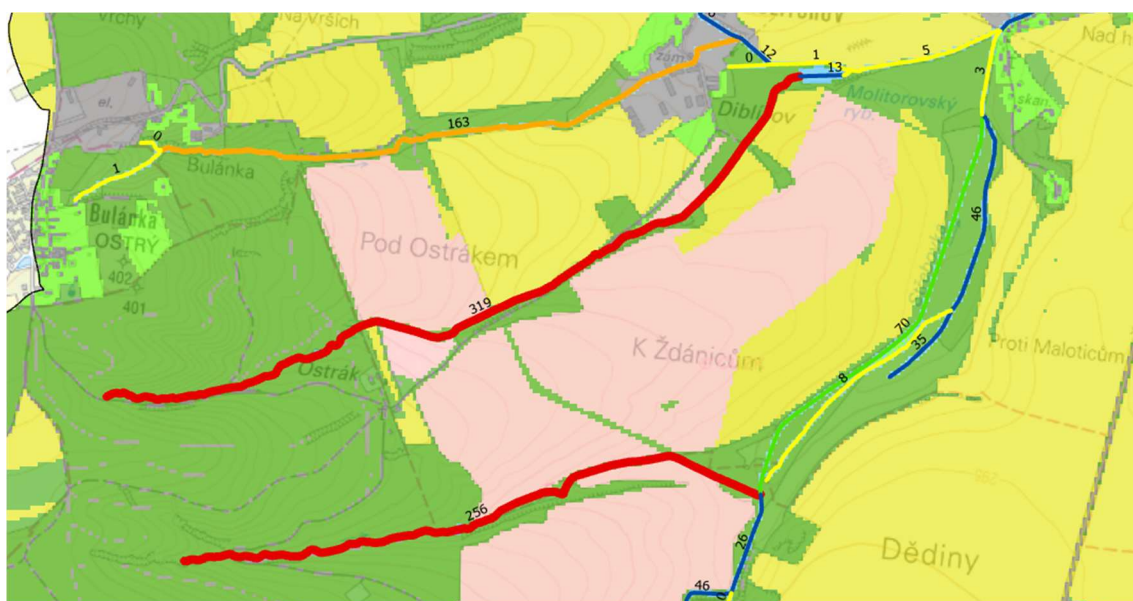
Hydro ID	Délka úseku [m]	Hillslope [t]
150	1781.91	326
343	2302.96	319
106	1448.29	304
169	236.42	279
263	1703.25	256
283	1456.23	252
439	636.02	241
600	2019.78	218
207	1559.80	217
647	1199.74	212
403	5353.84	206
603	2116.05	205

Ze shrnutí (Tabulka 14- Hodnoty vstupu sedimentu do vodního toku) můžeme vyčíst a porovnat hodnoty délky úseku a hillslope, pro nejkritičtější červené části toků, dle (Obrázek 42- Vstup sedimentu do daného úseku vodního toku ze svahů).



Obrázek 42- Vstup sedimentu do daného úseku vodního toku ze svahů

Jedno z těchto míst můžeme vidět na západní straně řešeného území (Obrázek 43- Kritické místo vstupu sedimentu do toku). Jedná se o 2 úseky toku, které leží v poměrně příkrém kopci. Oba toky pramení na území lesa a následně protékají sady. Nejkritičtější částí toku je právě tato část skrz ovocný sad, z něhož oba toky přecházejí zpět do lesního porostu a napojují se na další úsek toku.



Obrázek 43- Kritické místo vstupu sedimentu do toku

7.5. NÁVRH OPATŘENÍ

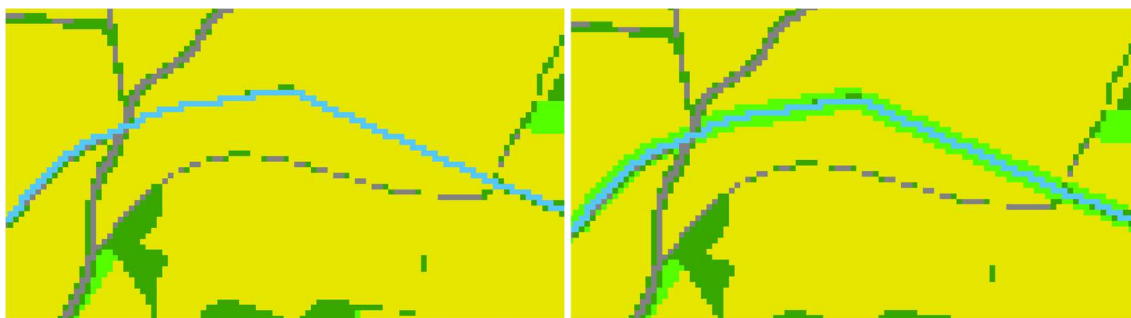
Možností, jak omezit odnos sedimentu z území, je celá řada. V této kapitole aplikujeme 2 scénáře a to současně. Jedná se spíše o teoretické ukázky, jak by zatravnění určitých částí území napomohlo snížení odnosu sedimentu. K reálnému použití by bylo třeba tyto teoretické návrhy převést do praxe a zaměřit se i na reálnou proveditelnost, smysluplnost, účelnost a finanční stránku problému.

Prvním scénářem volíme zatravnění půdy v blízkém okolí toku (konkrétně 20 metrů na každou stranu toku). Zatravnění aplikujeme na území orné půdy, vinic, chmelnic a sadů.

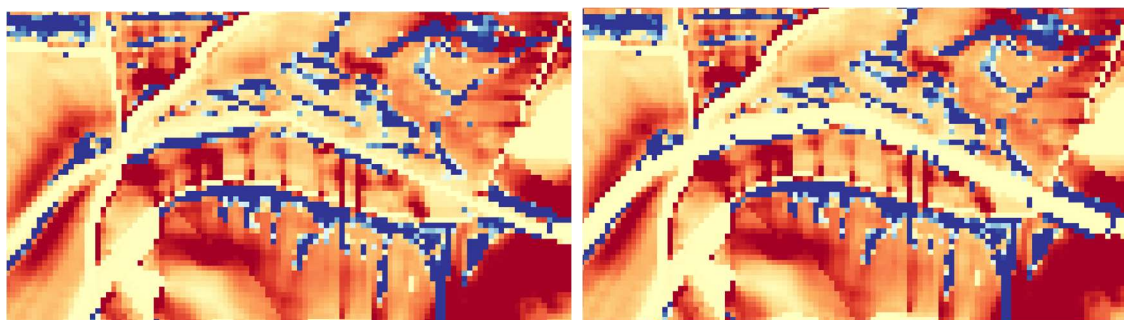
Tabulka 15- První scénář návrhu opatření k zabránění eroze

Celé řešené území povodí Výrovky				
	Bez scénáře	1.scénář ochrany	Rozdíly	Jednotky
Celková ztráta půdy	131 871	131 451	420	t
Celková depozice sedimentu	111 839	114 698	-2 860	t
Celkový export	20 033	16 753	3 280	t

Z porovnání (Tabulka 15- První scénář návrhu opatření k zabránění eroze) můžeme vidět drobný rozdíl ve snížení ztráty půdy. Naopak velký rozdíl můžeme pozorovat u celkového exportu, kdy travní porost v okolí vodního toku účinně zapůsobil a nedocházelo tolik k exportu sedimentu přímo do toku. Díky tomu lze vidět, že depozice významně narostla a export tokem se výrazně snížil.



Obrázek 44- Ukázka místa před opatřením a po prvním scénáři ochrany



Obrázek 45- Ukázka změny ztráty půdy v okolí vodního toku po aplikaci prvního scénáře ochrany

Ukázka změny (Obrázek 44- Ukázka místa před opatřením a po prvním scénáři ochrany, Obrázek 45- Ukázka změny ztráty půdy v okolí vodního toku po aplikaci prvního scénáře ochrany) je na pozici 5. kritického místa, kde jsme mohli pozorovat významné údolnice již na historických snímcích.

Jelikož ale není mnoho toků přímo v kontaktu s těmito typy území, není snížení odnosu sedimentu tak významné. Navrhujeme proto ještě druhý scénář, který přidáváme současně k prvnímu navrhovanému. Pomocí reklasifikace vrstvy Inflow zatravníme části území. Vrstva Inflow je jedním z mapových výstupů modelu WaTEM/SEDEM a udává nám pro každý pixel ve studované oblasti množství sedimentu v tunách, který se dostane dovnitř do buňky.

Model nám pomocí této vrstvy poskytuje dobrý a ucelený přehled o tocích sedimentů probíhajících v krajině. Často jsou tato místa údolnice. Některá místa dokumentujeme i pomocí historických ortofoto snímků v kapitole (7.3. Kritická místa). Navrhujeme proto tato místa zatravnit a tím snížit transport a zpomalit odtok.

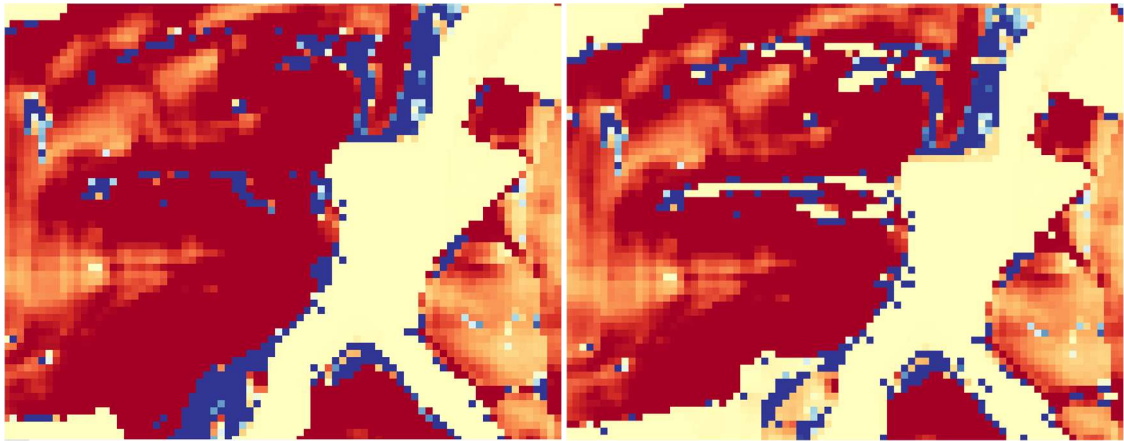
Vrstvu rozdělíme hodnotou Inflow 10 tun a překlasifikujeme tak, že na všechny buňky nad tuto hranici budeme aplikovat scénář zatravnění. Hranici rozdělení 10tun volíme jako vhodný kompromis pro tento zjednodušený scénář. Do výpočtu byla testována hranice 5 tun, 10 tun a 50 tun. Pro hranici 50 tun výsledky ukazovaly samotné vodní toky a v nich kumulovaný odtok. Naopak hranice 5 tun ukazovala údolnice velice přesně, což je pro aplikaci zatravnění prostorově a finančně nemožné.

Samotné zatravnění potom navrhujeme a aplikujeme na území orné půdy, vinic, chmelnic a sadů.

Pro ukázkou aplikace 2. scénáře opatření vybíráme druhé kritické místo, což je sad umístěný v kopci na západní straně území na drobném přítoku do Výrovky.



Obrázek 46- Ukázka místa po 1.scénáři opatření a po 2. scénáři



Obrázek 47- Ztráta půdy po 1. a 2. scénáři opatření

Tabulka 16- Druhý scénář návrhu opatření k zamezení eroze

Celé řešené území povodí Výrovky				
	Bez scénáře	2.scénář ochrany	Změny	Jednotky
Celková ztráta půdy	131 871	127 310	4 561	t
Celková depozice sedimentu	111 839	110 067	1 771	t
Celkový export	20 033	17 243	2 790	t

Z výsledků vidíme výrazné snížení ztráty půdy, což jsme očekávali na základě zatravnění erozně problematických míst. Zároveň vyčteme, že i depozice a celkový export se snížily.

Na základě výsledků (Tabulka 16- Druhý scénář návrhu opatření k zamezení eroze) považujeme druhý návrh opatření spíše jako testovací na úrovni logiky modelu. Dobře odstraní extrémní místa, ale zároveň odstraní depozice, tedy na výsledek efektu celkového exportu do toků druhý návrh opatření nepomáhá. Tento model ale určitě navrhujeme k identifikaci a dalším možným úpravám, například k testování hranice, rozšiřování navrhované údolnice atp.

Porovnání opatření

Ve shrnutí výsledků (Tabulka 17- Výsledné porovnání scénářů opatření k zamezení eroze) nalezneme srovnání ztrát jednotlivých opatření. Nejefektivněji zamezí ztrátám půdy scénář číslo 2, kdy zatravníme mimo 20 metrů pásu kolem toků ještě místa s vysokým transportem sedimentu. Toto opatření však na základě výsledků považujeme za testovací, ale určitě s ním navrhujeme dále pracovat.

Scénář 1 má skvělý efekt na snížení celkového exportu pomocí toků. Jeho plošný rozsah není velký, ale to jsme mohli vidět už při vytváření jednotlivých vrstev, tedy tento efekt ani nebyl vyžadován.

Tabulka 17- Výsledné porovnání scénářů opatření k zamezení eroze

Celé řešené území povodí Výrovky				
	Bez scénáře	1.scénář ochrany	2.scénář ochrany	Jednotky
Celková ztráta půdy	131 871	131 451	127 310	t
Celková depozice sedimentu	111 839	114 698	110 067	t
Celkový export	20 033	16 753	17 243	t

8. ZÁVĚR

V práci byla provedena kvantifikace zdrojů erozního sedimentu v povodí Výrovky. V úvodu práce jsme nejprve představovali řešenou problematiku vodní eroze, její příčiny a následky. V dalších kapitolách shrnujeme všechna dostupná data pro následný výpočet.

Ten probíhal pomocí empirického modelu WaTEM/SEDEM, který je postavený na metodě stanovení ztráty půdy dle USLE se zahrnutím některých postupů ohledně směřování odtoku z RUSLE. Model WaTEM/SEDEM navíc oproti USLE dokáže stanovit hodnoty depozice, respektive rovnice transportní kapacity, a tedy i další směřování odnosu sedimentu.

Povodí Výrovky je tvořeno převážně ornou půdou, která zabírá 64,7 % celého území. Orná půda je erozi velmi náchylná, hodnota průměrného K-faktoru na ní je $0,47 t * h * MJ^{-1} * cm^{-1}$. Lesní porost, křoviny a travní porost dohromady tvoří pouhých 25,3 % rozlohy.

Pomocí modelu byly hodnoceny zdroje erozního sedimentu. Některé vybrané rizikové lokality a místa byly dokumentovány na historických ortofoto snímcích. Důvodem byla částečná validace dat, čímž dokazujeme funkčnost modelu. Dále nám model také dobře ukazuje poškození půdy, což můžeme vidět i z leteckých snímků.

Povodí Výrovky jsme zhodnotili z hlediska eroze a transportu splavenin jako celek, dále ale také na povodích IV.řádu. Na nich jsme viděli rozložení ztráty půdy transportem vodními toky, kdy nejvíce ohrožené povodí s rozlohou 378,6 hektaru mělo nejvyšší jednotkový transport 1.98 tun/ha/rok.

Následně jsme pomocí 2 zjednodušených scénářů navrhli ochranu půdy. Důvodem návrhu je, že výsledná čísla vycházejí extrémní, tedy vhodnými opatřeními je můžeme redukovat a ukázat jednu z možných cest, jak je snížit. Výhodou modelu je, že návrh scénáře můžeme vhodně měnit a obměňovat až téměř do ideální formy. Efekt opatření zkoumáme na různých úrovních; lokálně na konkrétním pozemku, jeho části nebo části vodního toku. Dále na povodích, tedy vybraných problematických povodích IV. řádu. Výpočet provádíme i pro celé povodí, tedy zkoumáme efekty na celém sledovaném území.

Prvním scénářem byl pás zatravnění 20 metrů na každý břeh podél všech toků. Zatravnění bylo aplikováno na zemědělskou půdu. Z výsledků můžeme vidět, že velikost plochy travního porostu se oproti velikosti bez opatření zvýšila o 0,7 %, což vychází zhruba o 1,8 km^2 travního porostu více. Eroze se naopak zmenšila průměrně o 420 tun/rok.

Vzhledem k tomu, že značná část toků není přímo v kontaktu se zemědělskou půdou, nemá tento scénář velký plošný efekt, což jsme ale ani neočekávali. Naopak má výrazný lokální efekt, tedy v místech nevhodných podmínek, jako je např. velký sklon, orba až na hranu vodního toku atd. má velký význam v ochraně před přímým vstupem sedimentu do vodního toku.

Pro získání většího plošného efektu navrhujeme současně aplikaci druhého scénáře. Na základě jednoduché analýzy byla stanovena hranice 10 tun. Všechny lokality nad tuto hranici představují místa, kde se hodně transportuje sediment (často jsou to koncentrované údolnice), a proto byly navrženy k zatravnění.

Po tomto opatření jsou výsledky zřetelnější. Travní porost se zvýšil o 1,17 %, tedy zatravnili jsme zhruba o 3 km^2 území více. Eroze klesla průměrně o 4561 tun/rok. Zároveň ale tento scénář považujeme za testovací a navrhujeme ho k dalším možným úpravám.

Obě tato opatření jsou spíše teoretického charakteru a napomáhají k identifikaci erozně ohrožených míst, návrhům a úpravám možných scénářů. Pro praktické využití by bylo určitě potřebné návrh logicky, prostorově a finančně rozmyslet tak, aby bylo výsledné opatření účinné, ale zároveň efektivní.

Navrhování protierozních opatření určitě smysl má. Jak lze vidět z výsledků této práce, i drobným zatravněním části území kolem toků nebo údolnic, kde dochází k vysokému transportu sedimentu, můžeme napomoci erozi předcházet. Jak můžeme sledovat v současné literatuře, eroze je velkým problémem jak u nás, tak celosvětově, takže každá, i když drobná protierozní ochrana je malým krůčkem ke zlepšení celkové situace.

9. POUŽITÁ LITERATURA

ARCDATA ARCDATA PRAHA [Online]. - 2010. - 12. 5 2020. - <https://www.arcdata.cz/produkty/arcgis>.

ARCDATA PRAHA ARCDATA PRAHA [Online] // Desktopový GIS. - 2019. - 3. 11 2021. - <https://www.arcdata.cz/produkty/arcgis/desktopovy-gis/arcmap>.

ARCDATA PRAHA ARCDATA PRAHA [Online] // Desktopový GIS, ArcGIS Pro. - 2019. - 3. 11 2021. - <https://www.arcdata.cz/produkty/arcgis/desktopovy-gis/arcgis-pro>.

ARION spol. s r.o. ATLAS [Online] // Atlas DMT. - 2021. - 9. 11 2021. - <https://www.atlasltd.cz/dmt/>.

Bauer Ing. Miroslav, Ph.D. Posuzování erozní ohroženosti vodních nádrží sedimentem s využitím modelu WATEM/SEDEM [Online]. - 2018. - 10 2021. - <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/75684>.

BOKR Pavel Geologická mapa 1:50 000 [Online] // Česká geologická služba: Mapová aplikace, verze 1B.2. - 2016. - 2. 12 2021. - http://www.geology.cz/app/ciselniky/lokalizace/show_map.php?mapa=g50&y=669200&x=998700&r=3500&s=1&legselect=0.

Bouma Johan , G. Varallya, Niels H. Batjes Principal land use changes anticipated in Europe [Online]. - February 1998. - 15. 9 2021. - https://www.researchgate.net/publication/223756783_Principal_land_use_changes_anticipated_in_Europe.

Brázdil CSc. Ing. Karel Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 4.generace DMR4G [Online] // Zeměměřičský úřad vojenský, geografický a hydrometeorologický úřad. - Prosinec 2016. - 22. 11 2021. - https://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_4G.pdf.

BROWN C.B. The control of reservoir silting [Online] // United states department of agriculture, Washington, D.C.. - 8 1943. - https://books.google.cz/books?id=OJY_AAAAIAAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false.

BRUNE G.M. Trap efficiency of reservoirs [Online]. - červen 1953. - 11 2021. - <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/TR034i003p00407>.

Cerdan O., G. Govers, Y. Le Bissonnais, Van Oost, J. Poesen, N. Saby, A. Gobin, A. Vacca, J. Quinton, K. Auerswald, A. Klik, F.JPM Kwaad, D. Raclot, I. Ionita, J. Rejman, S. Rousseva, T. Muxart, M.J.Roxo, T. Dostál ScienceDirect [Online] // Rychlosti a prostorové variace eroze půdy v Evropě: Studie založená na údajích o erozi. - 23. 7 2010. - 1. 12 2021. - <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X10002813#bib57>.

Clark University CLARK LABS, [Online] // TerrSet 2020 Geospatial Monitoring and Modeling Software. - Clark Labs, Clark University 950 Main St., Worcester MA 01610 USA, 2021. - 9. 11 2021. - <https://clarklabs.org/terrset/>.

ČHMÚ Hlásná a předpovědní povodňová služba [Online] // Český hydrometeorologický ústav. - 19. 9 2021. - 19. 9 2021. - https://hydro.chmi.cz/hpps/popup_hpps_prfdyn.php?seq=307024.

ČÚZK Geoportál ČÚZK [Online] // DMR 4G. - 2010. - [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(riwaotyqhvuadhbzbvjdyImd\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR4G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=301](https://geoportal.cuzk.cz/(S(riwaotyqhvuadhbzbvjdyImd))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR4G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=301).

ČÚZK Geoportál ČÚZK [Online] // ZABAGED- polohopis- úvod. - 2010. - 12. 5 2020. - [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(ao5zz3jkaw1ftjgzzbas001i\)\)/default.aspx?mode=TextMeta&text=dSady_zabaged&side=zabaged&menu=24](https://geoportal.cuzk.cz/(S(ao5zz3jkaw1ftjgzzbas001i))/default.aspx?mode=TextMeta&text=dSady_zabaged&side=zabaged&menu=24).

DENDY f.e. & CHAMPION, W.A., Sediment deposition in US reservoirs [Online]. - 1978. - 12 2021. - https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=DtKAYefXXbkC&oi=fnd&pg=PR2&dq=Sediment+deposition+in+US+reservoirs&ots=0AWP3xhgf2&sig=j91zExdhH_ZeksOgJp41IIIHxGM&redir_esc=y#v=onepage&q=Sediment%20deposition%20in%20US%20reservoirs&f=false.

Devátý Ing. Jan Klasifikace území pro erozní modely pomocí GIS a veřejně dostupných datových zdrojů [Online]. - ČVUT, Stavební inženýrství, Inženýrství životního prostředí, 2018. - 11 2021. - <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/75682>.

Dostál doc.Ing. Tomáš 2.přednáška [Online]// Katedra Hydromeliorací a krajinného inženýrství, Fakulta Stavební, ČVUT v Praze. - 2019. - 15. 9 2021. - [https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/YOPO/eroze%2002_klasifikace\(1\).pdf](https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/YOPO/eroze%2002_klasifikace(1).pdf).

Dostál T. et a Metody a způsoby predikce povrchového odtoku, erozních a transportních procesů v krajině, výzkumná zpráva projektu COST 634 [Online]. - 2007. - 11 2021.

Esri Esri [Online]// Historie GIS. - 2021. - 13. 10 2021. - <https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/history-of-gis>.

G4D G4D [Online]// Digitální modely terénu (DMT). - 2013. - 11. 12 2021. - <https://www.g4d.cz/digitalni-3d-modely/digitalni-modely-terenu>.

Hajigholizadeh Mohammad , Assefa M Melesse, Hector R Fuentes National Library of Medicine [Online] // Erosion and Sediment Transport Modelling in Shallow Waters: A Review on Approaches, Models and Applications. - 14. 3 2018. - 11. 11 2021. - <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29538335/>.

Holý M. Eroze a životní prostředí [Kniha]. - Praha : ČVUT, 1994.

CHURCHILL M. A. . Discussion of 'Analysis and use of reservoir sedimentation data', by L.C. Gottschalk [Oddíl knihy]// Proceedings of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference. - Denver, Colorado, 1948. - Sv. pp. 139-140.

Janeček Miroslav Ochrana zemědělské půdy před erozí- Metodika [Online]. - 2012. - http://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/YPEO/Metodika__PEO__novelizace%20upravene%2025__1__2012.pdf.

Janoušek Zbyněk a Martin Mistr Mapa erozně ohrožených ploch se zohledněním zemědělské produkce v období 2020+ Specializovaná mapa s odborným obsahem [Online]. - Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., 2021. - 14. 12 2021.

Krása Ing. Josef Hodnocení erozních procesů ve velkých povodích za podpory GIS [Online] // ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství. - 2004. - 11 2021. - https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/osobni%20stranky/Krasa%20Josef/Dizertace_krasa.pdf.

Krása Josef a kolektiv Hodnocení ohroženosti vodních nádrží sedimentem a eutrofizací podmíněnou erozí zemědělské půdy [Online]. - 1 2013. - 11 2021. - https://www.researchgate.net/publication/345743281__Hodnoceni_ohrozenosti_vodnich_nadrzi_sedimentem_a_eutrofizaci_podminenou_erozi.

Krása Ph.D. Ing. Josef Empirické modely vodní eroze v ČR [Online] // Habilitační práce. - ČVUT v Praze, 2010. - 27. 10 2022. - https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/osobni%20stranky/Krasa%20Josef/habilitace_krasa_2010.pdf.

KU Leuven WaTEM/SEDEM: Online manual [Online]. - 2005. - 11. 12 2021. - <https://ees.kuleuven.be/geography/modelling/watemsedemhome/index.html>.

Mc Cool D.K., Foster, G.R., Mutchler, C.K., Meyer, L.D. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation [Online]. - 1989. - 12 2021. - <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=31192>.

Ministerstvo zemědělství eAGRI [Online] // Půda. - 2009-2021. - 14. 9 2021. - <http://eagri.cz/public/web/mze/puda/ochrana-pudy-a-krajiny/degradace-pud/vodni-eroze-pudy/>.

Ministerstvo zemědělství eAGRI [Online] // Portál farmáře. - 2009. - 28. 10 2021. - <http://eagri.cz/public/web/mze/farmar/LPIS/>.

Mladí ochránci přírody z.s Národním registr pramenů a studánek [Online]. - 2019. - 17. 9 2021. - <https://www.estudanky.eu/12676>.

Notebaert Vaes Verstraeten Govers WaTEM/SEDEM Homepage [Online] // WaTEM/SEDEM version 2006 Manual. - 2006. - 17. 12 2021. - https://ees.kuleuven.be/geography/modelling/watemsedem2006/manual__watemsedem__122011.pdf.

Novotný Ing. Ivan Příručka a ochrany proti erozi zemědělské půdy [Online] // Kontrola podmíněnosti. - 2017. - https://eagri.cz/public/web/file/293635/MZE__prirucka__ochrany__proti__erozi__zemedelske__pudy__2017.pdf.

Panagos Panos, Panos Panagos ISMC [Online] // RUSLE2015. - 2015. - 9. 12 2021. - <https://soil-modeling.org/resources-links/model-portal/rusle2015>.

Panagos Panos, Pasquale Borrelli, Jean Poesen, Cristiano Ballabio, Emanuele Lugato, Katrin Meusburger, Luca Montanarella, Christine Alewell ScienceDirect [Online] // Nové hodnocení ztráty půdy vodní erozí v Evropě. - 25. 8 2015. - 1. 12 2021. - <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901115300654>.

Pandey Ashish Sushil K. Himanshu, S.K.Mishra, Vijay P. Singh ScienceDirect [Online] // Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. - 8 2016. - 11. 11 2021. - <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816216303137#b1300>.

PERTLIK SOFTWARE s.r.o.. Česká půda [Online] // Kdo hospodaří na mém pozemku?. - Česká půda s.r.o., 2017. - 23. 11 2021. - <https://www.ceska-puda.cz/blog/LPIS-kdo-hospodari-na-mem-pozemku.html>.

Pressová RNDr. Jana Katalog objektů ZABAGED [Online]. - Zeměměřičský úřad, 2014. - 2.5. - 22. 11 2021. - <https://docplayer.cz/1694699-Katalog-objektu-zabaged.html>.

Procházková Ing. Eva , Ing. Dominika Kobzová Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i. [Online] // Problematika eroze v ČR. - 2021. - 1. 12 2021. - http://www.czba.cz/files/ceska-bioplynova-asociace/uploads/files/21_VPBPS2011__prochazkova.pdf.

QGIS QGIS [Online]. - 2021. - 9. 11 2021. - <https://qgis.org/en/site/>.

ROŽNOVSKÝ J. a kol. Zpracování podkladů pro výpočet [Časopis]. - Brno: Český hydrometeorologický ústav : [Rožňovský J. a kol, 2015. - Sv. 24s.

Smolová Ph.D., doc. RNDr. Irena Katedra geografie, Přírodověděcká fakulta UP [Online] // Česko-moravská soustava. - 15. 12 2005. - 21. 9 2021. - <https://geography.upol.cz/soubory/lide/smolova/GCR1/text%20ceskomoravska.pdf>.

Státní pozemkový úřad Celostátní databáze BPEJ [Online]. - Státní pozemkový úřad, 2021. - 10. 12 2021. - <https://www.spucr.cz/bpej/celostatni-databaze-bpej>.

Šarapatka Bořivoj , Šárka Chovancová Přírodověděcká fakulta [Online] // Dnes si připomínáme Mezinárodní den půdy. - 5. 12 2018. - 9. 12 2021. - <https://www.prf.upol.cz/nc/zprava/clanek/dnes-si-pripominame-mezinarodni-den-pudy/>.

Šíma CSc. Doc, Ing. Jiří Základní báze geografických dat [Online]. - Geodetický a kartografický obzor, 2016. - ročník 62/104, 2016, číslo 4. - 22. 11 2021. - https://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/gako_2016_04_ZABAGED.pdf.

TopoL Software s.r.o. TopoL Software [Online] // GIS a fotogrammetrie. - 2016. - 9. 11 2021. - <http://www.topol.eu/articles/software>.

Unicorn Systems a.s. UNOCORN [Online] // Bentley. - 2021. - 9. 11 2021. - <https://unicornsyste.ms.eu/geoinformatics/cs/bentley>.

Van Rompaey A., Govers, G. & Poesen, J. Van Oost, K., Verstraeten, G., KU Leuven [Online] // WaTEM/SEDEM. - 2002. - 24. 9 2021. - <https://ees.kuleuven.be/geography/modelling/watemsedem/>.

Van Rompaey Anton J.J., Gert Verstraeten, Kristof van Oost, Gerard Govers, Jean Poesen MODELLING MEAN ANNUAL SEDIMENT YIELD USING A DISTRIBUTED APPROACH [Online]. - 2001. - 12 2021. - https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/esp.275?casa__token=oXljTC9_hCkAAAAA:QueCF4ErhWY9yZXw8OubJOUmDmJuuQND04ikvTWIDFQWf4GgZvGCq5xchwaycONBbInJtN1__vKVT1sl.

Vašová D. Kovář P. FZP.CZU [Online] // Autorizovaný software. - 2014. - <http://r.fzp.czu.cz/vyzkum/software.html>.

Verheijen FGA, R.JA Jones, R.J. Rickson, C. J. Smith ScienceDirect [Online] // Tolerovatelné versus skutečné míry eroze půdy v Evropě. - 3 2009. - 1. 12 2021. - <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001282520900035X>.

Vodní eroze Vodní eroze [Online]. - 20. 6 2006. - 30. 11 2021. - <http://eroze.sweb.cz/>.

VÚMOP Naše voda, informační portál o vodě [Online] // Půdy ohrožené vodní erozí v ČR neustále přibývá. - 10. 11 2015. - 30. 11 2021. - <https://www.nase-voda.cz/pudy-ohrozene-vodni-erozi-cr-neustale-pribyva/>.

VÚMOP v.v.i. Půdní služba Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i. [Online] // eKatalog BPEJ. - 2021. - 10. 12 2021. - <https://bpej.vumop.cz/>.

VÚMOP v.v.i. Půdní služba Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i. [Online] // eKatalog BPEJ. - 2019. - <https://bpej.vumop.cz/>.

VÚMOP v.v.i. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i. [Online] // Oddělení pedologie a ochrany půdy. - 2021. - 30. 11 2021. - <http://www.organicahmota.cz/#/Puda>.

VÚV TGM Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.Masaryka, veřejná výzkumná instituce - Odbor ochrany vod a informatiky [Online] // DIBAVOD. - 2020. - 10. 12 2021. - <https://www.dibavod.cz/>.

Vysloužilová a Kliment Barbora, Zdeněk Geografie [Online] // MODELOVÁNÍ EROZNÍCH A SEDIMENTAČNÍCH. - 2012. - číslo 2. - 11. 12 2021. - https://geografie.cz/media/pdf/geo_2012117020170.pdf.

Vysloužilová Barbora ,Zdeněk Kliment MODELOVÁNÍ EROZNÍCH A SEDIMENTAČNÍCH PROCESŮ V MALÉM POVODÍ (str. 170-191) [Online]. - GEOGRAFIE, 2012. - číslo 2. - 5. 12 2021. - https://geografie.cz/media/pdf/geo_2012117020170.pdf?fbclid=IwAR2RO-GAywsMRVWT4hHK9T-RDRFq4YMa_30vPQrwWvCQGFmCnqJCa3My2cU.

Wischmeier and Smith D.D., W.H. Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning. [Online]. - 12 1978. - 11 2021. - <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>.

Zingg A.W., ScienceDirect [Online] // Degree and length of land slope as it affects soil loss in run-off. - 1940. - Agric. Eng., 21 (1940), pp. 59-64. - 9. 12 2021. - <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816216303137#b1300>.