

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství



Transport splavenin v povodí VN Vrchlice

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.

Praha, 2020

Julie Winterová

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Winterová</u>	Jméno: <u>Julie</u>	Osobní číslo: <u>458558</u>
Zadávající katedra: <u>Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Inženýrství životního prostředí</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Transport splavenin v povodí VN Vrchlice

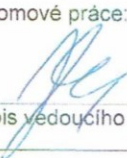
Název diplomové práce anglicky: Sediment transport in Vrchlice Reservoir Watershed

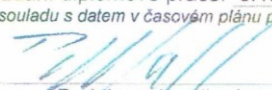
Pokyny pro vypracování:
S využitím modelu WaTEM/SEDEM určete transport splavenin do nádrží v povodí VN Vrchlice v několika časových etapách (před kolektivizací a v současné době).
Posuďte varianty možného vývoje a porovnejte výpočet s měřeným údajem o objemu sedimentu ve VN Vrchlice.
Vytipujte klíčové lokality pro návrhy opatření z pohledu ochrany VN Vrchlice před sedimentem.

Seznam doporučené literatury:
Jachymova B, Krasa J (2017) A new method for modeling dissolved phosphorus transport with the use of WaTEM/SEDEM. Environmental Monitoring and Assessment 189:365. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6082-4>
Krasa J, Dostal T, Van Rompaey A, et al (2005) Reservoirs' siltation measurements and sediment transport assessment in the Czech Republic, the Vrchlice catchment study. Catena 64:348–362. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.015>

Jméno vedoucího diplomové práce: Josef Krása, doc. Ing Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 2.10.2020 Termín odevzdání diplomové práce: 3.1.2021
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

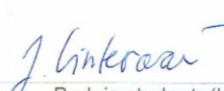
 Podpis vedoucího práce

 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 nutně 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“.

1.10.2020 Datum převzetí zadání

 Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci Transport splavenin v povodí VN Vrchlice vypracovala samostatně za použití v práci uvedených pramenů a literatury.

V Praze dne 1. ledna 2021

Julie Winterová.....

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu doc. Ing. Josefu Krásovi, Ph.D. za trpělivost, cenné rady a vždy přítomnou pomoc. Dále bych tímto chtěla poděkovat Ing. Miroslavu Bauerovi, Ph.D. za jeho ochotu a pomoc. Děkuji také rodině a blízkým lidem, kteří mě podporovali. Poděkování patří také projektům:

TC18030 - Vliv změny využití území na erozní ohroženost, transport splavenin, kvalitu vody a odtokový režim.

773903 - SHui - Soil Hydrology research platform underpinning innovation to manage water scarcity in European and Chinese cropping systems.

SGS20/156/OHK1/3T/11 - Monitoring, experimentální výzkum a matematické modelování srážko-odtokových a erozních procesů.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou vodní eroze v povodí vodní nádrže Vrchlice, která se nachází jižně od města Kutná Hora. Povodí je oblast převážně zemědělsky využívaná, proto zde dochází k produkci a transportu sedimentu. Sediment se dostává až do vodních toků a poté se usazuje ve vodních nádržích.

Skutečný objem splavenin usazených ve vodních nádržích je možné změřit různými způsoby. V rámci této práce bylo v listopadu 2020 provedeno měření sedimentu v Hamerském rybníce odpichováním sondy z loďky. Díky tomu, že stejným způsobem proběhlo měření i v roce 2002, bylo nyní možné porovnat výsledky. Hamerský rybník byl obnoven v roce 1971 a do roku 2002 se zde ukládalo průměrně 1 308 tun ročně. Nové měření ukázalo, že se v posledních 18 letech ukládal sediment s více než dvojnásobnou rychlostí, průměrně 2 860 tun ročně.

Empirickým modelem WaTEM/SEDEM byla namodelována produkce, transport a depozice sedimentu v povodí. Ke kalibraci sloužila měření sedimentu v Hamerském rybníce, kalibrovanou hodnotou byla transportní kapacita. Díky dříve zpracovaným mapám využití území bylo možné připravit vstupní data i pro historická období (rok 1983, 1954 a 1852) a porovnat výsledky se současností (2019). V průběhu let se celkové hodnoty produkce eroze a množství ve vodních tocích a nádržích zvyšují. Pro současný stav dosahují nejvyšších hodnot. Vliv na to má vyšší hodnota průměrného C Faktoru a R Faktoru. V roce 1852 je naopak eroze nízká, vlivem nízkého C FAKTORU a mozaiky. Zároveň se ale ukázalo, že velkou část sedimentu (99 %) zachytí vodní nádrže v povodí, pouze v roce 1852 se jedná o 97 %. Existence vodních nádrží hraje velkou roli při porovnání množství sedimentu zachyceného ve vodních nádržích.

Pro rok 1954 a 1852 bylo typické členění orné půdy na menší celky. Vliv takové mozaiky byl posouzen dalším výpočtem a výsledky byly podle něj upraveny. Nejvíce se lišila hodnota produkce sedimentu, tedy celkové ztráty půdy, s mozaikou klesla o 23 %. Celkové množství vstupující do vodních toků a usazené v nádržích se ale v poměru k celkové ztrátě půdy významně nelišilo. Pomocí další analýzy byly vytipovány pozemky, kde měla mozaika větší význam.

Na závěr byl změněn osevni postup na půdoochranný na těch pozemcích, které mají velkou ztrátu půdy a přispívají velkým množstvím sedimentu do přilehlých úseků toků (asi 5 % celkové orné půdy). Novým výpočtem bylo zjištěno, že množství sedimentu vstupující do těchto úseků se snížilo o 50 %, případně až o 65 %.

Klíčová slova

VN Vrchlice, vodní eroze, WaTEM/SEDEM

Abstract

This master thesis is discussing the effects of water erosion in Vrchlice reservoir watershed located south from Kutna Hora town. The land in this watershed is mostly used for agricultural purposes. This leads to sediment production, followed by its transport and deposition in rivers and ponds.

There are sufficient methods for measuring the sediment volume in reservoirs. Simple method of measuring water and sediment depth from the boat was used in Hamersky pond in November 2020. Using the same method as in 2002, it was possible to compare the results - long term year average of sediment income. In the first period, 1971 – 2002, approximately 1 803 tons per year settled. In second period, 2002 – 2020, around 2 860 ton per year settled. According to these two measurements, sediment deposition is now more than twice bigger than it was during the first period.

WaTEM/SEDEM model was used to simulate sediment production, transport and deposition. The data from pond measurements were used for calibration. Historical landuse maps were used as inputs to evaluate and compare different time periods (2019, 1983, 1954, and 1852). The amount of sediment production is increasing. In 2019, the values of sediment production are the highest. This is the result of higher C factor and R factor. The sediment production is very low during 1852, because of C Factor and land mosaic. Most of the sediment (99 %) is trapped by ponds. Only in 1852 the amount is smaller, around 97 %. This is caused by different number of existing ponds and reservoirs.

During the 1954 and 1852 most of the fields were divides into small parcels. The effect of such division was evaluated. The biggest effect was on total sediment production, around 23 %. There was no significant difference between the amounts of sedimentation in ponds compared to the total amount of sediment production. With further analysis, fields with most significant effect were recognised.

Lastly, for 5 % of arable land the average C factor was descended. As a result, total sediment production decreased by 7 %. Hillslope sediment input, in some of the river sections, decreased by 50 %, eventually 65 %.

Keywords

Vrchlice Reservoir, water erosion, WaTEM/SEDEM

Obsah

1 Úvod.....	14
2 Cíl práce.....	16
3 Charakteristika území	17
3.1 Geomorfologické poměry	17
3.2 Geologické a pedologické poměry	19
3.3 Klimatické a hydrologické poměry.....	19
3.4 Historie oblasti a vliv na krajinu a zemědělství	21
3.5 Vodní nádrž Vrchlice	22
4 Teorie - Produkce a transport sedimentu.....	24
4.1 Stanovení skutečného množství sedimentu	25
Původní dno a stávající dno	25
Mocnost sedimentu.....	25
4.2 Odhad produkce a transportu splavenin	26
4.2.1 Procesně orientované modely	26
4.2.2 Empirické modely	26
USLE	27
Poměr odnosu.....	27
Usazení v nádržích	27
WaTEM/SEDEM	28
5 Výpočet – Produkce a transport sedimentu.....	32
5.1 Stanovení skutečného množství sedimentu – Hamerský rybník.....	32
5.1.1 Metoda měření a vyhodnocení dat.....	32
5.1.2 Výsledky měření z roku 2002 a 2020	36
Vliv extrémních událostí.....	39
5.2 Odhad produkce a transportu sedimentu modelem WaTEM/SEDEM	41
5.2.1 Instalace a testovací výpočty	41
5.2.2 Příprava vstupních dat pro povodí Vrchlice	42
DEM	42
PARCEL.....	43
RIVER MAP	44
PONDS	45
K FAKTOR.....	47

C FAKTOR.....	47
HODNOTY PTEF	50
PARCEL CONNECTIVITY.....	50
R FAKTOR.....	51
LS.....	51
KTC	51
Přehledná tabulka vstupních parametrů měnicích se podle období	52
5.2.3 Výsledky výpočtu modelem WaTEM/SEDEM – 2019, 1983, 1954, 1852.....	52
2019	53
1983	54
1954	54
1852	54
5.2.4 Vliv mozaiky - 1938 - povodí Opatovického potoka - 1-04-01-028.....	57
5.3 Návrh opatření na ohrožených pozemcích	60
5.3.1 Nalezení ohrožených pozemků a změna C FAKTORU.....	60
5.3.2 Výsledky návrhového výpočtu.....	63
5.4 Diskuze.....	66
6 Závěr.....	71
Reference.....	72

Seznam tabulek

Tabulka 1 Vývoj objemu sedimentu změřeného v Hamerském rybníce	37
Tabulka 2 Změna poměru zachycení se změnou zásobního objemu Hamerského rybníka dle Bruneho křivek	46
Tabulka 3 Osevní postupy poskytnuté ZOD Úmonín	48
Tabulka 4 Osevní postupy poskytnuté ZOD Úmonín	49
Tabulka 5 Osevní postupy poskytnuté ZOD Úmonín	50
Tabulka 6 Vstupní parametry měnící se podle období	52
Tabulka 7 Výsledky výpočtu pro historická období.....	53
Tabulka 8 Ukládání sedimentu ve významných nádržích - WaTEM/SEDEM, [t/rok].....	55
Tabulka 9 Srovnání podílů celkových hodnot výpočtu bez mozaiky a s mozaikou.....	58
Tabulka 10 Srovnání podílů zachycení v nádržích bez mozaiky a s mozaikou.....	59
Tabulka 11 Celkové výsledky návrhového výpočtu	63
Tabulka 12 Tabulka hodnot výpočtu pro původní a nový výpočet.....	68

Seznam obrázků

Obrázek 1 Snímek z fotopasti v povodí VN Vrchlice, 2020-08-14 15:02 (Sýkora a kol., 2020)	15
Obrázek 2 Snímek z fotopasti v povodí VN Vrchlice, 2020-08-14 19:02 (Sýkora a kol., 2020)	15
Obrázek 3: Poloha povodí nádrže Vrchlice v České republice, (ArcČR 500 verze 3.3, vlastní zpracování).....	17
Obrázek 4: Výškové poměry v povodí VN Vrchlice, (Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz , vlastní zpracování)	18
Obrázek 5: Hydrologické poměry v povodí nádrže Vrchlice, (DIBAVOD, 2007, vlastní zpracování)	20
Obrázek 6 Klenbová přehrada VN Vrchlice, (Rederer a Ferbar, 2017)	23
Obrázek 7 Bruneho křivky (Brune, 1953)	28
Obrázek 8 WaTEM/SEDEM – uživatelské rozhraní – 1. dialogové okno	29
Obrázek 9 WaTEM/SEDEM – uživatelské rozhraní – 2. dialogové okno	29
Obrázek 10 WaTEM/SEDEM – uživatelské rozhraní – 3. dialogové okno.....	30
Obrázek 11 WaTEM/SEDEM – uživatelské rozhraní - Výsledky.....	31
Obrázek 12 Schéma měření mocnosti sedimentu, vlastní zpracování	33
Obrázek 13 Rozsah měření sedimentu v roce 2002 a 2020, (ČÚZK, 2010a, vlastní zpracování)..	33
Obrázek 14 Zarůstání břehu Hamerského rybníka, (Seznam a.s., 2020a, vlastní zpracování)	34
Obrázek 15 Zanesení zbývajícího prostoru Hamerského rybníka sedimentem od roku 2002, vlastní zpracování.....	35
Obrázek 16 Fotografie z měření sedimentu na Hamerském rybníce, listopad 2020	35
Obrázek 17 Fotografie z měření sedimentu na Hamerském rybníce, listopad 2020	36
Obrázek 18 Mocnost sedimentu v roce 2002 v Hamerském rybníce, (ČÚZK, 2010a, vlastní zpracování).....	38
Obrázek 19 Mocnost sedimentu v roce 2020 v Hamerském rybníce, (ČÚZK, 2010a, vlastní zpracování).....	38
Obrázek 20 Průtoky v srpnu 2010 – přítok Malešov, vlastní zpracování.....	39
Obrázek 21 Průtoky v červnu 2013 – přítok Malešov, vlastní zpracování.....	39
Obrázek 22 Průtoky a obsah nerozpuštěných látek v roce 2010 – ústí do VN Vrchlice, vlastní zpracování.....	40
Obrázek 23 Průtoky a obsah nerozpuštěných látek v roce 2013 – ústí do VN Vrchlice, vlastní zpracování.....	40
Obrázek 24 Graf výsledků z testovacích výpočtů (vlastní zpracování).....	42
Obrázek 25 Schéma rozdělení kategorií pro mapu PARCEL, vlastní zpracování.....	43
Obrázek 26 Ukázka rastrování vektorové mapy landuse na mapu PARCEL, vlastní zpracování..	44
Obrázek 27 Výřez ze ZVM ČR 1:50 000 (VÚV TGM, v. v. i., 2020).....	47
Obrázek 28 Pozemek 8201/1 v LPIS (Ministerstvo zemědělství, 2020)	49
Obrázek 29 Pozemek 9202/13 v LPIS (Ministerstvo zemědělství, 2020)	49
Obrázek 30 Graf celkových hodnot výpočtu WaTEM/SEDEM, vlastní zpracování	53
Obrázek 31 Vývoj využití území v okolí VN Vrchlice, 1852 – 2019, vlastní zpracování.....	56
Obrázek 32 Mapa využití území s mozaikou a bez mozaiky, vlastní zpracování	57
Obrázek 33 Graf srovnání celkových hodnot výpočtu bez mozaiky a s mozaikou	58

Obrázek 34 Rozdíl v množství sedimentu přicházející do jednotlivých úseků vodních toků na 1 km délky [t/rok/km], povodí Opatovické potoka (ČÚZK, 2010a, vlastní zpracování)	59
Obrázek 35 Průměrná vodní eroze a průměrný roční vstup sedimentu ze svahu do vodních toků, na 1 km délky, v roce 2019, vlastní zpracování.....	61
Obrázek 36 Výřezy pozemků vybraných pro změnu C FAKTORU.....	62
Obrázek 37 Výřezy s pozemky s navrženou změnou osevního postupu, vlastní zpracování	65
Obrázek 38 Průběh kalibrace kTc pro rok 2019, vlastní zpracování	67
Obrázek 39 Průběh kalibrace kTc pro rok 1983, vlastní zpracování	67
Obrázek 40 Množství sedimentu vstupující do každého elementu, původní výpočet (NAZV, 2010, vlastní zpracování).....	69
Obrázek 41 Množství sedimentu vstupující do každého elementu, nový výpočet, vlastní zpracování.....	70

Seznam použitých zkratk

BPEJ	Bonitovaná půdně ekologická jednotka
BPV	Balt po vyrovnání
CENIA	Česká informační agentura životního prostředí
CO ₂	Oxid uhličitý
CN	číslo odtokové křivky
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
ČSÚ	Český statistický úřad
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
ČVUT	České vysoké učení technické
DIBAVOD	Digitální Báze Vodohospodářských Dat (databáze spravovaná VÚV TGM, v. v .i.)
COP21	Konference OSN o klimatické změně (2015 United Nations Climate Change Conference)
DEM	Digitální model terénu
DMT	Digitální model terénu
DMR4G	Digitální model území, digitální model reliéfu čtvrté generace (ČÚZK)
DMR5G	Digitální model území, digitální model reliéfu páté generace (ČÚZK)
GIS	geografický informační systém
GPS	globální polohový systém
HPJ	Hlavní půdní jednotka
KTC	koeficient transportní kapacity
KU Leuven	Katolická univerzita v Lovani
LMS	letecký měřický snímek
LPIS	veřejný registr půdy
LS	faktor délky a sklonu svahu
NAZV	Národní agentura pro zemědělský výzkum
NL	nerozpuštěné látky
PTEF	poměr zachycení pozemkem

RUSLE	Revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy
S-JTSK	Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
TTP	Trvalý travní porost
USLE	Univerzální rovnice ztráty půdy
VN	Vodní nádrž
WaTEM/SEDEM	simulační model eroze a transportu sedimentu ze zemědělské půdy
VÚV TGM, v. v. i	Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i.
VÚMOP, v. v. i	Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v. v. i.
ZABAGED	Základní báze geografických dat České republiky, digitální geografický model území České republiky (ČÚZK)
ZOD	Zemědělské obchodní družstvo
ZVM ČR	Základní vodohospodářská mapa České Republiky
4p1000	4 per 1000 Iniciativa

1 Úvod

Vodní nádrž Vrchlice (VN Vrchlice) byla postavena v roce 1971. Od té doby je důležitým vodním zdrojem pro zásobování pitnou vodou obyvatel okolních obcí a Kutné Hory. Ačkoliv pro výstavbu vodárenských nádrží jsou vhodné zalesněné a výše položené lokality, je okolí VN Vrchlice především zemědělsky využíváno a nadmořská výška povodí nepřesahuje 600 m n. m. (Chlum a kol., 1977)

Velký podíl zemědělsky využívané plochy, velké nečleněné pozemky s ornou půdou a častější a intenzivnější přívalové deště způsobují odnos sedimentu z pozemků. Vodní eroze způsobuje nejen ztrátu půdy a důležité organické hmoty na pozemcích, ale také se dostává do vodních toků a usazuje se ve vodních nádržích. Každá nádrž zachytí jiný objem sedimentu, v závislosti na jejím objemu, průměrnému ročnímu průtoku a tvaru hráze.

Jak dokládají fotografie z fotopastí (obr. 1 a 2), které byly instalovány v rámci projektu *Povodí nádrže Vrchlice - vodní zdroje a jejich perspektiva* (Sýkora a kol., 2020), dochází v povodí VN Vrchlice k značnému transportu splavenin vodními toky.

Aby se zamezilo nadměrnému transportu sedimentu do VN Vrchlice, byl v roce 1971 obnoven Hamerský rybník, který velkou část sedimentu (z přibližně 80 % plochy povodí) zachytává. Za stejným účelem byla také ve VN Vrchlici ponechána hráz Pilského rybníka. (Chlum a kol., 1977)

Stanovit skutečný objem sedimentu v nádrži lze různými metodami, z loďky nebo s pomocí potápěčů. Liší se časovou a finanční náročností ale i vhodností a přesností dle podmínek nádrže.

Produkcí sedimentu v povodí lze počítat a modelovat. Program WaTEM/SEDEM umožňuje výpočet produkce a transportu sedimentu, zároveň uvádí množství sedimentu zachyceného v jednotlivých nádržích. Je možné ho kalibrovat podle dostupných měření v terénu.

Produkcí sedimentu v povodí ovlivňuje využití území, osevní postupy, druh půdy, srážky, reliéf. Některé z těchto faktorů se mění v průběhu historie. Díky existenci a případné digitalizaci historických podkladů je možné využití území v historii zmapovat a provést pro něj výpočet. Lze pak porovnávat, jaký vliv má změna využití území na erozi v povodí.

Další možností, jak s modelem pracovat, je navrhnout půdoochranná opatření a sledovat jejich efekt výpočtem.

Cílem do budoucna je nalézt takový způsob hospodaření s vodou a půdou v krajině, aby bylo dosaženo udržitelného stavu.



Obrázek 1 Snímek z fotopasti v povodí VN Vrchlice, 2020-08-14 15:02 (Sýkora a kol., 2020)



Obrázek 2 Snímek z fotopasti v povodí VN Vrchlice, 2020-08-14 19:02 (Sýkora a kol., 2020)

2 Cíl práce

Cílem této práce je modelovat produkci a transport sedimentu v povodí VN Vrchlice. K tomu bude sloužit empirický model WaTEM/SEDEM, pro který budou připravena vstupní data reprezentující současný stav (2019) a také připravena data pro období v minulosti (1983, 1954 a 2. pol. 19. století - 1852). Příprava těchto dat bude vycházet z map využití území, které vznikly v rámci bakalářských prací (Winterová, 2019) a (Anýžová, 2020). Porovnáním výsledků bude zjištěno, jaký vliv má využití území na produkci a transport sedimentu, a jeho ukládání ve vodních nádržích.

Model bude kalibrován na základě 2 měření sedimentu v Hamerském rybníce, který slouží jako retenční prvek před VN Vrchlice od roku 1971. První měření proběhlo v roce 2002 a druhé měření proběhne v rámci této práce. Pro obě měření bude použita metoda odpichování bodů z lod'ky. Díky těmto měřením bude možné popsat změnu v produkci, transportu a ukládání sedimentu v povodí za posledních 49 let.

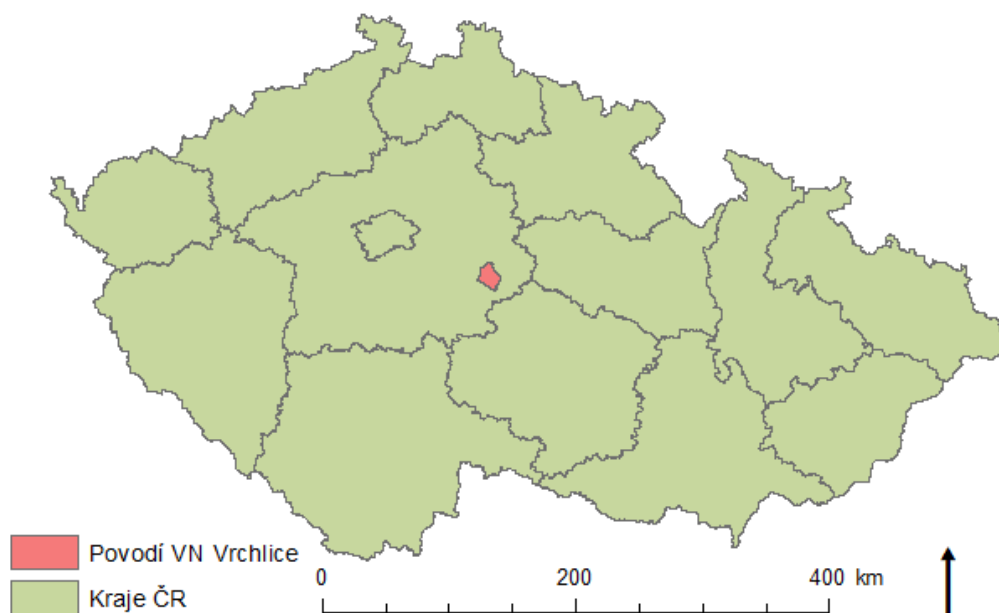
Modelovým výpočtem bude dále zjištěno, jaký vliv na procesy eroze má členění orné půdy na malé pozemky, jak bylo obvyklé před kolektivizací. Výpočet proběhne na jednom povodí IV. řádu.

Na závěr si tato práce klade za cíl nalezení pozemků, které jsou vysoce ohroženy vodní erozí a přispívají k velkému transportu sedimentu do vodních toků. Na těchto pozemcích bude navržena změna osevního postupu a její účinek bude posouzen pomocí dalšího modelového výpočtu.

3 Charakteristika území

Vodní nádrž Vrchlice se nachází ve Středočeském kraji, v okrese Kutná hora. Její povodí má celkovou rozlohu 97,65 km² a tvoří ho 11 povodí IV. řádu. (DIBAVOD, 2007)

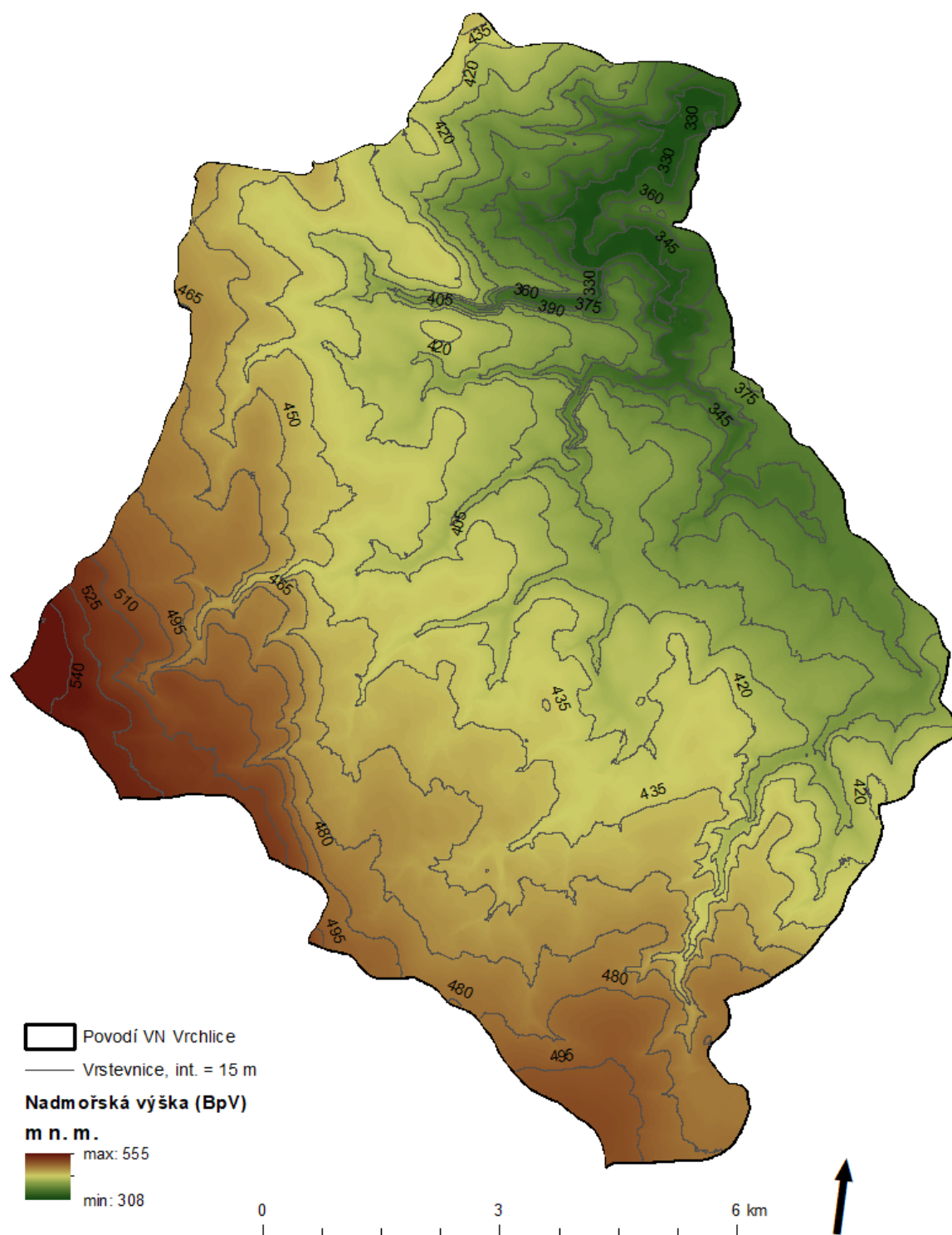
V České Republice jediná klenbová hráz je postavena na řece Vrchlici a její nejnižší bod tvoří uzávěrový profil tohoto povodí. VN Vrchlice slouží především pro zásobování pitnou vodou, proto je v seznamu vodárenských nádrží (součást vyhlášky Ministerstva životního prostředí č. 137/1999 Sb., *kteřou se stanoví seznam vodárenských nádrží a zásady pro stanovení a změny ochranných pásem vodních zdrojů*). Je součástí vodárenské soustavy Čáslav – Kutná Hora – Kolín, která zásobuje důležitou část regionu východ středních Čech. K soustavě je připojeno několik dalších měst (Zruč nad Sázavou, Sázava, Uhlířské Janovice) a téměř šedesát menších obcí. Tato vodárenská soustava je závislá na povrchové vodě z nádrže Vrchlice. (Rederer a Ferbar, 2017)



Obrázek 3: Poloha povodí nádrže Vrchlice v České republice, (ArcČR 500 verze 3.3, vlastní zpracování)

3.1 Geomorfologické poměry

Povodí leží v nížinné oblasti, nadmořské výšky se pohybují od 308 do 555 metrů nad mořem. Nejvyšším bodem povodí je hora Březina, která je součástí rozvodnice oddělující povodí Vrchlice od povodí Sázavy. (Chlum a kol., 1977)



Obrázek 4: Výškové poměry v povodí VN Vrchlice, (Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz, vlastní zpracování)

3.2 Geologické a pedologické poměry

Území se nachází v severovýchodní části Českého masívu. Horniny krystalinika jsou silně metamorfované, obsahují malé množství pórů a proto i málo podzemní vody. Vydatnost pramenů podzemní vody kolísá a při suchém období prameny vysychají. (Chlum a kol., 1977)

Dle katalogu BPEJ se v povodí vyskytují půdní typy kambizem, pseudoglej a hnědozem (VÚMOP, 2020). V povodí převažují jílovitohlinité půdy, které navazují na polabskou oblast hlinitopísčitých půd. (Chlum a kol., 1977)

Hnědozemě v okolí řeky Vrchlice jsou pozůstatky pravěkých listnatých lesů. (Valentová a Šumberová, 1999)

3.3 Klimatické a hydrologické poměry

Území se nachází v mírném pásu evropského vnitrozemí, kde panuje mírné klima s obvyklým střídáním čtyř ročních období. Dle označení BPEJ se povodí nachází v klimatickém regionu 5, mírně teplý, mírně vlhký. Průměrná roční teplota je 7 – 8 °C, průměrný úhrn srážek 550 – 650 mm. (VÚMOP, 2020).

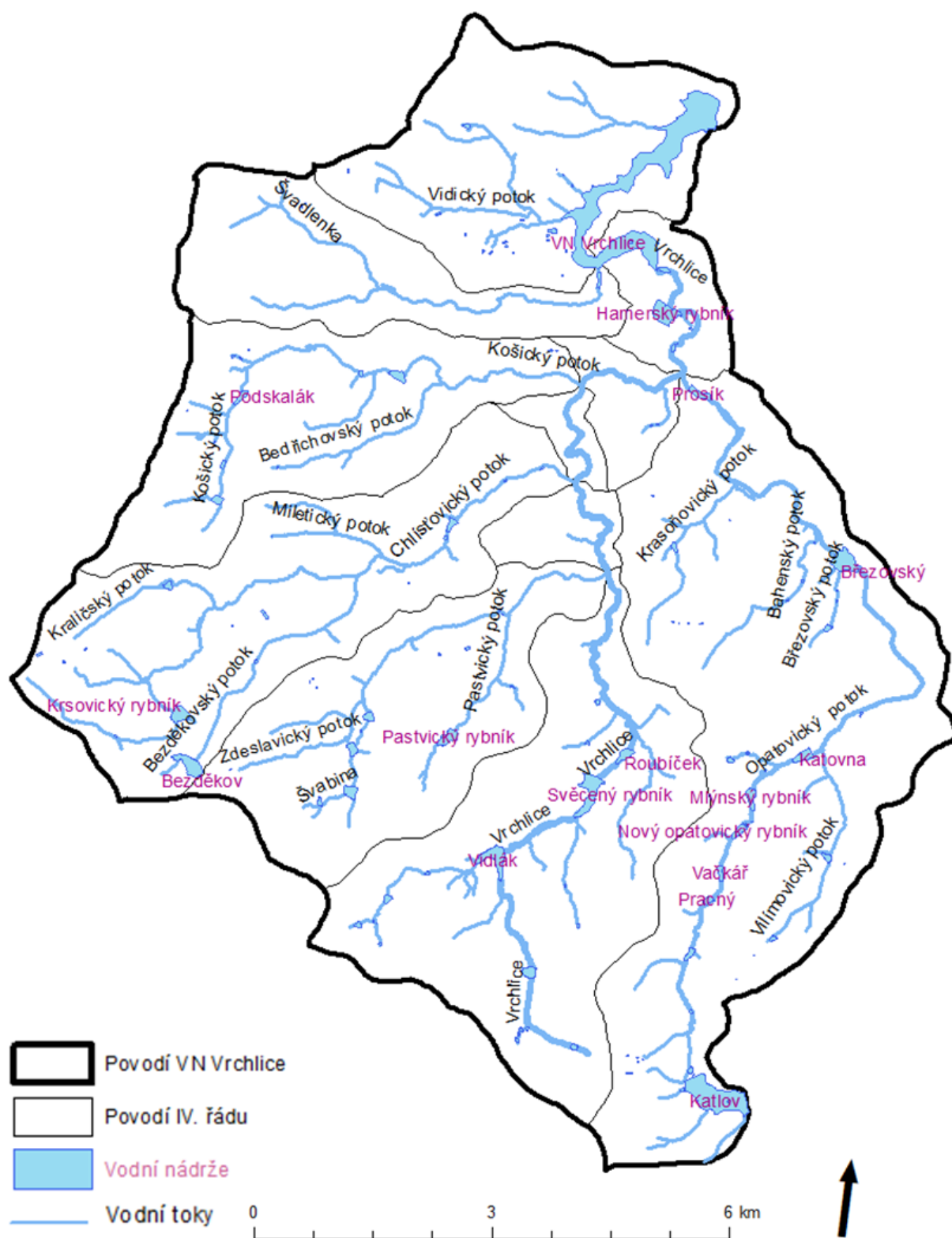
Celé povodí nádrže Vrchlice se skládá z 11 povodí IV. řádu. Největší z nich, povodí Opatovického potoka - 1-04-01-028 - má rozlohu 23,34 km² (DIBAVOD, 2007).

Nejdůležitějším přítokem do VN Vrchlice je řeka Vrchlice. Od pramene ke spodnímu profilu nádrže Vrchlice je řeka dlouhá 18,6 kilometrů, kde se nachází na kótě 292 m. n. m., výškový rozdíl je 485,00 – 292,00 = 193,00 m. Průměrný sklon řeky v úseku od pramene k nádrži je 1,03 %.

Levostrannými přítoky řeky Vrchlice jsou potoky Zdeslavický, Chlístovický, Košický, Švadlenka a Bylanka. Z pravé strany přitéká Opatovický potok (Chlum a kol., 1977).

V povodí je v současnosti mnoho nádrží (137), v minulosti však nádrží bylo méně. Některé v průběhu 20. století zanikly a byly znovu obnovené. Významná kaskáda rybníků je vystavěna v jihovýchodní části povodí na Opatovickém potoce, začíná rybníkem Katlov a před ústím do řeky Vrchlice se nachází 7 významných rybníků (Pracný, Vačkář, Nový Opatovický, Mlýnský, Katovna, Březovský, Prosík). Za ústím Opatovického rybníka do řeky Vrchlice je Hamerský rybník, který je posledním před nádrží Vrchlice a pomáhá tak zachytit splaveniny. Na řece Vrchlici je téměř 10 rybníků, z nich významnější svou velikostí je Vidlák, Svěcený rybník a Roubíček. (DIBAVOD, 2007)

„V povodí Vrchlice funguje zcela běžným způsobem srážko-odtoková bilance běžné intenzivně využívané zemědělské krajiny. Ve srážkově bohatých obdobích jsou vodní toky dostatečně vodné, s přísuškem jejich vodnost klesá až ke stavu sucha.“ (Sýkora a kol., 2020)



Obrázek 5: Hydrologické poměry v povodí nádrže Vrchlice, (DIBAVOD, 2007, vlastní zpracování)

3.4 Historie oblasti a vliv na krajinu a zemědělství

V této kapitole je stručně popsána historie povodí. Zmíněné události měly vliv na podobu krajiny a zemědělství.

Od pradávna se obyvatelé usazovali v okolí řek, které pro ně měly velký význam. U řeky Vrchlice se usadil v neolitu člověk. (Valentová a Šumberová, 1999).

Následovalo osidlování Čech Kelty a později germánské a slovanské kmeny. (Vachuda, 2017)

V 10. století byl na území dnešní Kutné Hory postaven hrad Malín, důležitý bod pro obchod na cestě z Polabí na jih. Území bylo v té době pokryto bažinami a hlubokými lesy. (Chlum a kol., 1977)

Zásadní rozkvět oblasti přišel s těžbou stříbra. Ta měla zásadní vliv na vývoj Kutnohorské oblasti, došlo k jejímu významnému poddolování, což později ovlivnilo i výstavbu nádrže. Řeka Vrchlice sloužila jako hranice, podle níž byly stříbrné hory mezi městy Čáslav a Kolín rozděleny mezi měšťany. Nejhlubší důl dosáhl hloubky 550 metrů, což činilo z oblasti území s nejhlubšími doly na evropském kontinentu. Po povodních v letech 1533 a 1541 došlo k úpadku těžby vlivem zatopení významných dolů. (Chlum a kol., 1977)

Na přelomu 15. a 16. století šlechta započala podnikat v rybníkářství a pivovarnictví. Třicetiletá válka měla zásadní vliv na zemědělství, hospodářské dvory postavené ze dřeva v nížinách byly většinou vypalovány.

Nová síť hospodářských, barokních dvorů byla vystavěna na nových místech: *„Tyto dvory byly zakládány často plánovitě v určitých vzdálenostech tak, aby v nich bylo možno racionálně hospodařit. Byly i vzájemně propojeny sítí cest a celkově byly zakomponovány do barokní krajiny“* (Novák, 1999).

Na rozdíl od okolních větších měst, v kutnohorské oblasti nedocházelo k rychlému rozvoji průmyslu v 18. a 19. století. Oblast byla především zemědělsky využívána (Štroblová, 2000)

Další vývoj v povodí byl ovlivněn děním v celých Čechách. Nevolnictví bylo zrušeno v roce 1781. Docházelo k rozšiřování orné půdy na úkor lesů. Od poloviny 19. století již k rozšiřování orné půdy nedocházelo, změny byly prováděné pouze ve vnitřní struktuře zemědělských pozemků. (Beranová a Kubačák, 2010)

Se začátkem 19. století se začaly zavádět nové osevnické postupy, nové plodiny jako brambory a řepa cukrovka a nové stroje. (Novák, 1999).

Pozemková reforma ve 20. letech 20. století přinesla přerozdělení majetku (velkostatky nad 1000 hektarů), především toho, který do roku 1918 držela šlechta. Jednalo se téměř o 30 % zemědělské půdy. Po druhé světové válce určil komunistický režim maximální výměru na jednoho vlastníka 50 hektarů. Proběhla kolektivizace, industrializace a intenzifikace zemědělství. Slučování družstev zvýšilo celkovou produkci. (Beranová a Kubačák, 2010).

Ve výsledku ale orné půdy v Čechách poměrně zásadně ubylo, od roku 1948 do 1990 o 16 %, ubylo ale i luk a pastvin. K tomu významně přispěla také urbanizace. (Bičík a Jančák, 2005)

Po roce 1989 došlo dalšímu vývoji v zemědělství a využívání krajiny: Restituce, pokles zaměstnanosti a s tím spojený odliv pracovníků ze zemědělství, otevření zahraničního obchodu, zavedení péče o krajinu jako celek, zastavění půdy, intenzifikace.

3.5 Vodní nádrž Vrchlice

Již v roce 1905 byl zpracován první návrh na stavbu vodní nádrže na řece Vrchlici, avšak její realizace byla odmítána kvůli poddolování oblasti těžbou ve středověku. Jelikož se ale v oblasti stále zvyšovala potřeba po pitné vodě, zvítězil v roce 1965 návrh klenbové přehradní hráze se zásobním objemem 7,9 mil. m³.

Výstavba byla zahájena v roce 1966 a ukončena v roce 1970, dílo pak bylo do provozu uvedeno v roce 1973. Byla tak postavena první klenbová hráz na území České republiky. Pitnou vodou zásobuje přibližně 50 tisíc obyvatel. (Rederer a Ferbar, 2017)

Součástí vodního díla je silnice v koruně hráze se šířkou 7,50 metrů. Okolí zátopy je zalesněno v šířce 80 až 100 metrů, napojuje se na původní lesní porosty. Vysázený smíšený les zabraňuje povrchovému odtoku do zátopy a zachycuje nečistoty. Aby nedocházelo k padání listů do vody, je 20 metrový přilehlý pruh tvořený pouze jehličnany. Vrbový porost u hráze brání břeh od účinku vln. Povodí nádrže je poměrně osídlená, zemědělsky využívaná a nízko položená oblast, nachází se v něm 38 obcí, přibližně třetinu obyvatel tvoří chalupáři a rekreanti. To má vliv na druh a množství látek, které se do nádrže dostávají, odpadní vodou i pesticidy z polí.

Nádrž má velký objem a řeka Vrchlice je malá říčka, doba zdržení je dlouhá. Díky tomu je poskytnut dostatek času k usazení sedimentu a k rozkladu organické hmoty nebo spotřebování úživných látek. Z VN Vrchlice se odebírá voda ze tří různých horizontů, nejčastěji z toho středního, v hloubce asi 15 metrů.

V zátopové oblasti nádrže Vrchlice byla ponechána hráz původního Pilského rybníka. Je tak vytvořen sedimentační prostor a jsou zde eliminovány polutanty. Díky dlouhé vzdálenosti od posledního vtoku až k odběrovému místu je koncentrace při odběru nízká.

Ochranu vodního zdroje zajišťuje pásmo I. a II. stupně. Ochranné pásmo I. stupně zahrnuje plochu nádrže a okolní lesy, do Ochranného pásma II. stupně spadají lesy, louky, zemědělská půda a část obce Malešov. (Rederer a Ferbar, 2017)



Obrázek 6 Klenbová přehrada VN Vrchlice, (Rederer a Ferbar, 2017)

Více k charakteristice a historii oblasti povodí Vrchlice je v bakalářské práci Posouzení změn využití území v povodí VN Vrchlice a jejich vlivu na retenci srážek (Winterová, 2019).

4 Teorie - Produkce a transport sedimentu

Eroze je přirozený proces uvolňování, transportu a ukládání půdních částic, který v krajině vždy probíhal a působil tím rozrušování a přeměnu zemského povrchu. Ať už se jednalo o erozi vodní, větrnou, nebo ledovcovou, probíhala většinou v rovnováze s ostatními přírodními procesy. Tedy tak, že množství půdy odnesené z půdního profilu bylo vyváženo probíhajícími půdotvornými procesy. Takové erozi se říká normální. Dnes můžeme ale pozorovat erozi zrychlenou (abnormální), kvůli které dochází k nadměrnému odnosu půdních částic a následnému zanášení prostředí sedimentem. Vinu na tom nese především intenzivní hospodaření v krajině.

Uvolňování půdních částic je zapříčiněno rychle tajícím sněhem nebo působením dešťových kapek. Účinek vodních kapek je maximální, dokud nenastane plošný povrchový odtok. Vrstva vody snižuje účinek kinetické energie kapek na půdní částice. Povrchový odtok má ovšem na vyšších sklonech také velký erozivní účinek.

Transport částic způsobuje povrchový odtok, ke kterému dochází při překročení vsakovací schopnosti půdního profilu. Dochází k transportu především jemných částic, na které je vázáno více živin. V místě eroze zůstává hrubozrnnější materiál, který má za následek vysychání profilu. (Krása, 2004)

Vodní eroze má také velký „off-site“ efekt. Mohou jí být poškozeny vodní nádrže, vodní toky, pozemky a infrastruktura. (Borelli et al., 2018)

K následnému ukládání částic dochází při snížení odtokové rychlosti, které způsobí změna sklonu terénu nebo terénní překážka. Částice ale mohou doputovat až do vodních toků. K jejich sedimentaci pak dochází při zpomalení proudění, což nastává ve vodních nádržích.

Ukládání sedimentu ve vodních nádržích způsobuje problémy mnoha způsoby. Především se zmenšuje zásobní objem nádrže. Zvýšený obsah živin způsobuje eutrofizaci. Dochází pak k nadměrnému zarůstání břehů, případně k vzniku ostrovů tvořených sedimentem a zákalu vody. Příisun toxických látek negativně ovlivňuje kvalitu vody. (Krása, 2004)

To vše má vliv i na rybářskou činnost a rekreaci. Odbahnění je poté velice nákladné, protože se může jednat o tisíce tun materiálu.

Zajímavý pohled přináší také fakt, že půda je třetím největším zásobníkem organického uhlíku na Zemi, po oceánech a litosféře. Odhaduje se, že je v půdě uloženo 3x větší množství organického uhlíku, než je v atmosféře. Jak uvádí (Borelli et al., 2018), nebylo dosaženo jednotného názoru, zda eroze půdy přispívá k zvyšování či snižování emisí CO₂. Zde může záležet na využití území a způsobu hospodaření, zda půda bude sloužit jako zdroj nebo jako úložiště CO₂. Během COP21 v Paříži vznikla iniciativa (4p1000, 2018), která je postavena na hypotéze, že malé každoroční zvýšení obsahu uhlíku v půdě by mohlo představovat potenciální úložiště a zastavit tak růst CO₂ v atmosféře. (Borelli et al., 2018)

Příčiny vzniku a následky eroze jsou velice komplexní procesy a je ve veřejném zájmu jak regionálním tak celosvětovým, aby se vrátily do své přirozené a udržitelné podoby. V této práci se dále zabývám stanovením skutečného množství sedimentu ve vodních nádržích a modelováním produkce a transportu splavenin v povodí.

4.1 Stanovení skutečného množství sedimentu

Stanovení skutečného množství sedimentu pomáhá s validací, verifikací a kalibrací modelových výpočtů. Metod, které lze k tomu použít, je několik. Může jít o přímé měření v polích, měření koncentrace sedimentu ve vodních tocích, měření objemu sedimentu ve vodních nádržích. (Krása et al., 2005)

Zvolení metody záleží na velikosti povodí, dále časových a finančních možnostech. Některé metody měření neposkytují dlouhodobé průměrné hodnoty. Z tohoto pohledu, jak uvádí (Krása et al., 2005), je pro poměry v České republice nejvýhodnější měřit objem sedimentu v nádržích. Náklady na měření jsou přijatelné a výsledky poskytují dlouhodobý průměr. Metody lze rozdělit podle toho, zda známe původní dno nádrže. Pokud ano, stačí změřit stávající dno. Pokud ne, je potřeba měřit mocnost sedimentu.

Původní dno a stávající dno

Pro určení usazeného objemu je potřeba znát **původní dno** nádrže. To lze získat z dokumentace, k té ovšem nemusí být snadné získat přístup nebo nemusí vůbec existovat. Pokud původní dno známe, stačí zaměřit **stávající dno**. Pro obě se vytvoří digitální modely terénu a ty se pak od sebe odečtou.

Měření stávajícího dna může probíhat:

- přímo na povrchu, pokud je nádrž prázdná,
- nepřímě z hladiny vody, pokud je nádrž napuštěná (hloubkoměrem).

K určování polohy bodů lze použít GPS nebo klasické geodetické metody. (Dostál et al., 2002)

Mocnost sedimentu

Mocnost sedimentu lze také změřit vpichy nebo vrty, kdy vpichovou sondou narazíme na původní dno a zaznamenáme mocnost sedimentu. Měření může probíhat:

- zaražením latě do sedimentu, pokud je nádrž prázdná,
- zaražením latě z loďky do vody a ponořením hloubkoměru, pokud je nádrž napuštěná,
- použití sonaru z vodní hladiny,
- zaražení latí s pomocí potápěčů, ve větších hloubkách. (Krása et al., 2005)

Metoda nevyžaduje dostupnost historických dokumentů, je ale omezená například tím, kolik bodů lze při jednom měření zaměřit. Dále předpokládá, že uložený sediment má jemnozrnné složení, a proto ho lze odlišit při zaražení sondy od původního dna. Změřené mocnosti se potom

převádějí do GIS a interpolují. Poloha bodů se určuje pomocí GPS nebo lze použít klasické geodetické metody.

Použití sonaru, který pracuje na základě vysílání a příjmů signálu, je nákladné a složité zajistit tak, aby výkonný přístroj byl vhodný k manipulaci na lod'ce. (Dostál et al., 2002)

4.2 Odhad produkce a transportu splavenin

Přímé měření v terénu nám poskytne skutečné hodnoty objemu sedimentu. Není však časově a finančně možné měření provést v celém povodí. Proto využíváme modely, které počítají produkci a transport splavenin.

Modely lze obecně rozdělit na:

- procesně orientované (fyzikální), které matematicky popisují fyzikální procesy uvolnění, transportu a ukládání půdních částic v povodí. Tyto modely jsou díky přesnému popisu procesů přesnější, kladou však velké nároky na vstupní data, proto se jejich použití musí zvážit dle rozsahu území a dostupnosti dat,
- empirické, které využívají dlouhodobá měření a sledování procesů v povodí (Dostál et al., 2002);

4.2.1 Procesně orientované modely

Simulační modely jsou založené na matematickém popisu fyzikálních procesů probíhajících při vodní erozi. Rovnice popisují 4 dílčí procesy:

1. uvolnění půdních částic deštěm,
2. přemístění půdních částic deštěm,
3. uvolnění půdních částic povrchovým odtokem,
4. transport půdních částic povrchovým odtokem.

Základní rovnice pro tyto procesy jsou rovnice kontinuity a pohybová řešení pohybu půdních částic. Rozdíl potenciálu transportu celkově uvolněných částic a transportní kapacitou odtoku určuje intenzitu eroze. Pro model je potřeba znát plošný a časový průběh srážek a povrchové odtoku. Jedná se tedy o spojení hydrologického a erozního simulačního modelu. (Dostál, et al., 2002)

4.2.2 Empirické modely

Jelikož empirické metody vycházejí z dlouhodobého sledování procesů, bývají výsledky uváděny jako dlouhodobé průměry, nejčastěji roční. Metoda k odhadnutí produkce splavenin a jejich zanesení do vodních nádrží je složena ze tří fází. Nejprve je spočtena průměrná roční ztráta půdy, ta je poté redukována tzv. poměrem odnosu, a následně je transportované množství sedimentu redukováno zachycením ve vodních nádržích, tzv. poměrem zachycení. (Dostál et al., 2002)

USLE

K určení ohroženosti zemědělských pozemků vodní erozí a účinností návrhu protierozních opatření se nejvíce používá *Univerzální rovnice ztráty půdy*. Vychází z principu přípustné ztráty půdy na jednotkovém pozemku. Tato hodnota určuje největší možnou ztrátu půdy při zachování úrodnosti půdy. Rovnice vypadá následovně:

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

kde	G	je průměrná roční ztráta půdy [t.ha ⁻¹ .rok ⁻¹]
	R	faktor erozní účinnosti deště [MJ · ha ⁻¹ · cm · h ⁻¹]
	L	faktor délky svahu [m]
	S	faktor sklonu svahu [%]
	K	faktor erodovatelnosti půdy [t*h*MJ ⁻¹ *cm ⁻¹]
	C	faktor ochranného vlivu vegetace [-]
	P	faktor účinnosti protierozních opatření [-]

Rovnice udává dlouhodobou průměrnou roční ztrátu půdy, tedy uvolněné množství, nezohledňuje však ukládání sedimentu na pozemku či pod ním. (Janeček a kol., 2012)

Rovnici USLE lze spočítat manuálně nebo v prostředí GIS. Manuální výpočet umožňuje výpočet průměrné hodnoty G pro jednotlivé pozemky. Výpočet v GIS probíhá naopak na malých elementech (např. buňky – pixely), ze kterých je poté provedena analýza (součet, průměr, atd.) (Krása, 2004)

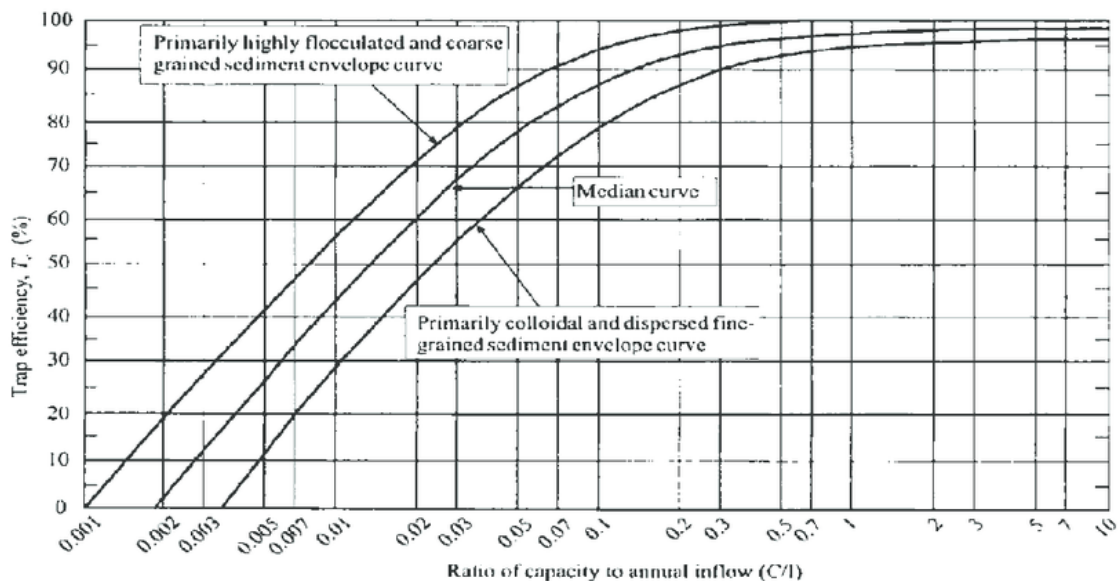
Poměr odnosu

Samotná rovnice USLE určuje pouze uvolněné množství. K odhadu, kolik sedimentu se na pozemku usadí a pokračuje do vodních toků, slouží poměr odnosu. Lze použít vztah odvozený (Williams, 1977) z plochy povodí, reliéfového poměru a čísla odtokových křivek CN. Jedná se o procento půdy, které není zachyceno v povodí a je odneseno vodním tokem do nádrže. (Krása, 2004)

Usazení v nádržích

Pro určení množství sedimentu transportovaného do uzávěrového profilu povodí je nutné určit poměry zachycení sedimentu ve vodních nádržích. Výhodným způsobem je použití Bruneho křivek (Brune, 1953). Tato metoda vyžaduje znalost objemu vodní nádrže a průměrného ročního průtoku nádrží.

Objem nádrže lze v ČR zjistit například ze ZVM 1:50 000 (VÚV TGM, v. v. i., 2020), nebo vypočítat zjednodušeným vzorcem $V = (1/3) \times S \times H$, kde S je plocha vodní hladiny a H je hloubka vody u hráze. Průměrný roční průtok v dané nádrži lze odhadnout pomocí metody přepočtu plochy povodí. Z jejich poměru lze poté odečíst poměr zadržení. (Dostál et al., 2002)



Obrázek 7 Bruneho křivky (Brune, 1953)

Tyto tři popsané části výpočtu (USLE, Poměr odnosu a poměr zachycení) je možné provést jednotlivě v prostředí GIS, v této práci byl ale k výpočtu použit model WaTEM/SEDEM.

WaTEM/SEDEM

Jedná se o distributivní model erozních a transportních procesů vyvinutý výzkumným týmem KU Leuven v Belgii. Je to model empirický, proto neklade příliš vysoké nároky na vstupní data a lze ho uplatnit ve větších územích. (Van Oost a kol., 2000), (Van Rompaey a kol., 2001), (Verstraeten a kol., 2002)

K výpočtu průměrné roční ztráty půdy využívá program rovnici RUSLE (Renard et al. 1997). Z morfologie terénu jsou stanoveny odtokové dráhy, kterými je sediment distribuován, až dokud nedosáhne vodního toku. Bere přitom v potaz hranice pozemků, změny kultur, směr orby, cestní síť. Část splavenin se usazuje v povodí, každý pixel má svou transportní kapacitu. Množství sedimentu, které do vodních toků dosáhne, v porovnání k celkové ztrátě půdy v povodí stanoví hodnotu poměru odnosu. Poté sediment počítá se zachycením sedimentu ve vodních nádržích, určeným poměrem zachycení, a díky návaznosti vodních toků je zbylé množství sedimentu dopraveno až k uzávěrovému profilu povodí. (Krása, 2004).

Algoritmy, s kterými WaTEM/SEDEM počítá, lze přečíst v manuálu k programu (B. Notebaert et al., 2006). Program WaTEM/SEDEM počítá na základě vstupních rastrových map a konstant. Je nutné, aby tyto rastrové mapy měly stejné rozlišení. To by mělo odpovídat velikosti řešeného území a také tomu, v jakém rozlišení jsou data dostupná.

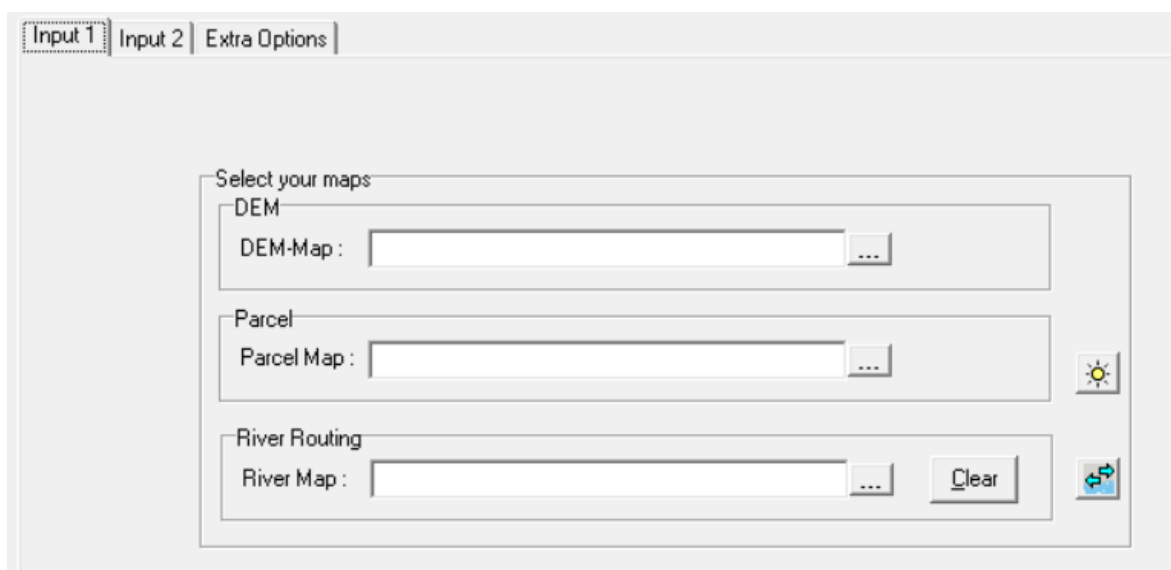
Do výpočtu vstupují rastrové mapy a konstantní hodnoty. Program vyžaduje formát rastrových vrstev GIS Idrisi32. Do modelu **vstupuje**:

- digitální model terénu (DEM),
- mapa využití území (PARCEL),

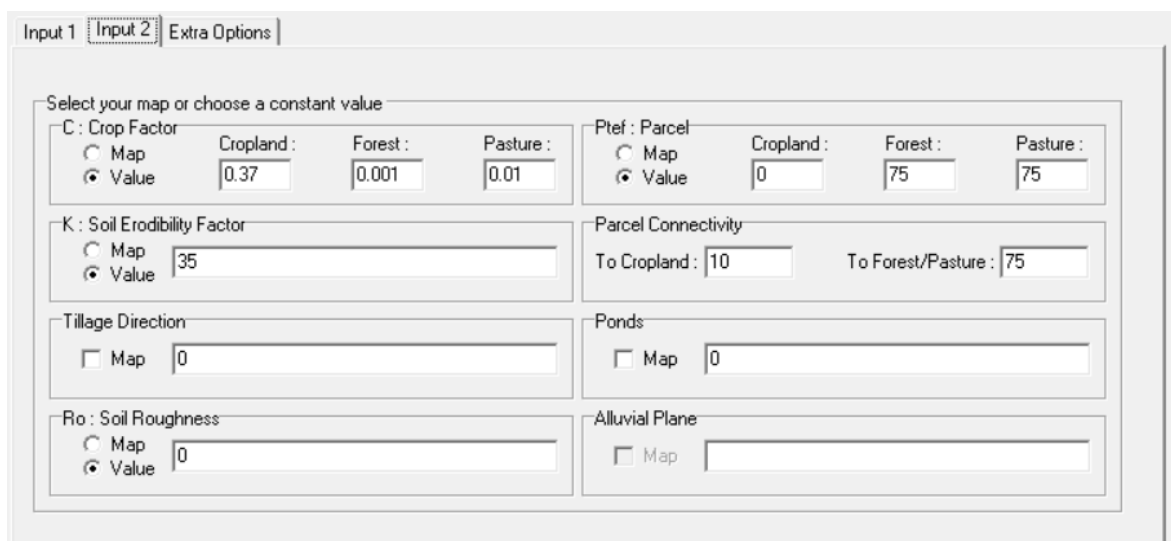
- mapa úseků vodních toků + tabulka vodních toků (RIVER MAP),
- faktor ochranného účinku vegetace (C - Crop FACTOR – mapa nebo konstanta),
- faktor erodovatelnosti půdy (K – Soil Erodibility FACTOR – mapa nebo konstanta),
- mapa vodních nádrží – s poměry zachycení (PONDS),
- erozní účinnost deště a povrchového odtoku (R FACTOR – mapa nebo konstanta).

Dále se zadávají parametry:

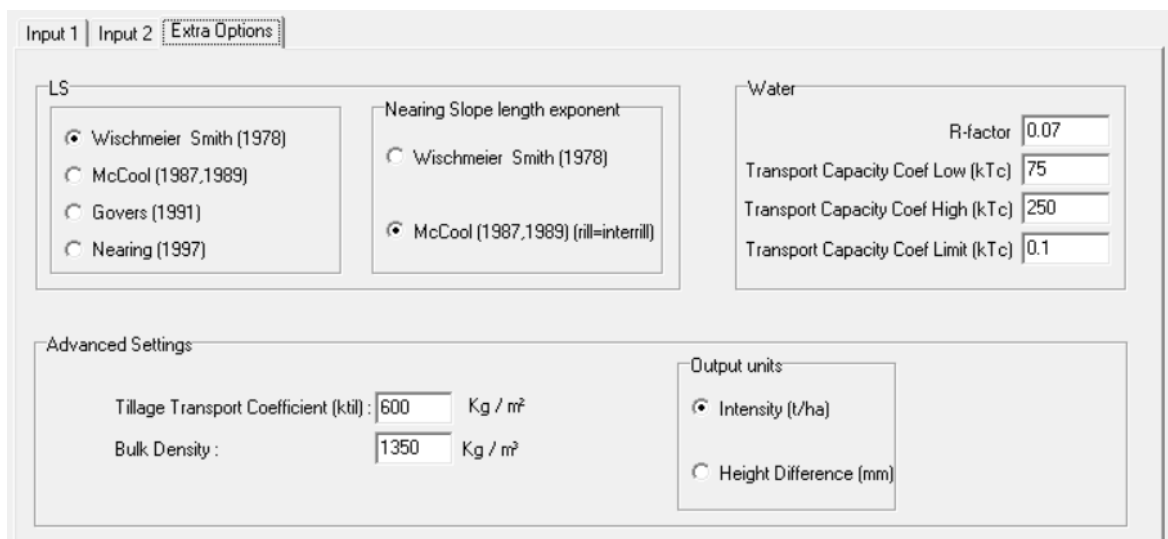
- způsob odvození LS faktoru,
- transportní kapacita (kTc Low, kTc High, kTc Limit),
- poměr zachycení odtoku různými typy pozemků (Ptef),
- poměr zachycení odtoku na hranicích pozemků (Parcel Connectivity),
- jednotky výstupů.



Obrázek 8 WaTEM/SEDEM – uživatelské rozhraní – 1. dialogové okno



Obrázek 9 WaTEM/SEDEM – uživatelské rozhraní – 2. dialogové okno



Obrázek 10 WaTEM/SEDEM – uživatelské rozhraní – 3. dialogové okno

Jako **výstupní data** vrátí model celkové hodnoty, tabulky a mapy. Celkové hodnoty popisují celkové množství sedimentu a jeho průchod povodím:

- Total Sediment Production – celkové množství ztráty půdy v zájmovém území,
- Total Sediment Deposition – celkové množství sedimentující v území před vstupem do vodních toků,
- Total Sediment Export – celkové množství vstupující do vodních toků,
- Total River Export – celkové množství transportované uzávěrovým profilem povodí,
- Total Pond Deposition – celkové množství zachycené v nádržích.

Tabulky, které jsou výstupem modelu:

- Piddata – seznam a pozice bezodtokých míst,
- Pond Sediment Deposition – množství sedimentu v nádržích,
- Ponddata – Seznam a očíslování nádrží,
- Project River Sediment – úseky toků a množství sedimentu.

Výstupní mapy jsou:

- Pit – umístění bezodtokých míst,
- Pondnr – nádrže s očíslováním,
- Uparea – velikosti zdrojových ploch elementů – pixelů,
- LS – vypočtené hodnoty LS,
- InflowTon – množství sedimentu vstupující do jednotlivých elementů – pixelů,
- OutflowTon – množství sedimentu vystupující z jednotlivých elementů – pixelů,
- Netto water erosion in ton per ha – Ztráta půdy (-) nebo depozice (+) v jednotlivých elementech - pixelech [t/ha/rok].

		Total number of ponds : 137					
		ID	STE	input (t)	output (t)	deposition (t)	on river ?
Total Sediment Production :	59 670.789 t	1	82	1	0	1	TRUE
		2	100	0	0	0	TRUE
		3	100	0	0	0	TRUE
Total Sediment Deposition :	43 718.257 t	4	100	1	0	1	TRUE
		5	10	4	3	0	TRUE
Total Sediment Export :	7 958.100 t	6	10	18	16	2	TRUE
		7	100	1	0	1	TRUE
Total River Export :	608.405 t	8	100	0	0	0	TRUE
		9	100	0	0	0	TRUE
Total Pond Deposition :	7 994.433 t	10	10	0	0	0	TRUE
		11	10	1	0	0	TRUE
		12	100	0	0	0	TRUE
		13	100	0	0	0	TRUE
		14	100	0	0	0	TRUE
		15	100	0	0	0	TRUE
		16	100	0	0	0	TRUE

Obrázek 11 WaTEM/SEDEM – uživatelské rozhraní - Výsledky

Z těchto výstupních dat je možné určovat erozí ohrožené pozemky, pozemky s erozí blízko vodního toku, nejvíce zanášené nádrže, místa s největší depozicí sedimentu a jiné.

Podrobný popis vstupních a výstupních dat uvádí ve své dizertační práci (Krása, 2004).

5 Výpočet – Produkce a transport sedimentu

V rámci projektu *Povodí nádrže Vrchlice - vodní zdroje a jejich perspektiva* (Sýkora a kol., 2020) byly instalovány fotopasti, na kterých lze pozorovat množství transportovaného sedimentu. Ze zachycených snímků (Obr. 1 a 2) je patrné, že v povodí Vrchlice dochází k produkci a transportu sedimentu vodními toky do vodních nádrží.

V Hamerském rybníce, který slouží jako významný retenční prvek zachycující významný podíl sedimentu před vstupem do vodní nádrže Vrchlice, bylo dvakrát provedeno měření sedimentu z loďky (Dostál et al., 2002). Tím byl změřen přírůstek zachyceného sedimentu a bylo možné podle něj kalibrovat model WaTEM/SEDEM. Pro model byla připravena vstupní data pro současný stav (2019) a následně i pro rok 1983, 1954 a 1852. Výsledky z let 1954 a 1852 jsou upraveny podle vlivu mozaiky, který je vyhodnocen na povodí Opatovického potoka. Výsledky z modelu za historická období jsou v závěru kapitoly srovnány. Na jejich základě je potom navržena změna osevních postupů, která by snížila produkci a transport sedimentu v povodí VN Vrchlice.

5.1 Stanovení skutečného množství sedimentu – Hamerský rybník

V povodí VN Vrchlice byl pro zaměření skutečného objemu sedimentu vybrán Hamerský rybník. Díky své poloze slouží jako důležitý retenční prvek v povodí a tvoří uzávěrový profil cca 80 % plochy celého povodí VN Vrchlice. V roce 2002 na něm proběhlo měření, které lze díky zvolené metodě považovat za spolehlivé a bylo ho možné zopakovat v roce 2020. Je tak možné určit průměrné roční přírůstky sedimentu. Rybník je rovněž svou velikostí – plocha hladiny 7,6 ha - vhodný pro zaměření přímou vpichovou metodou.

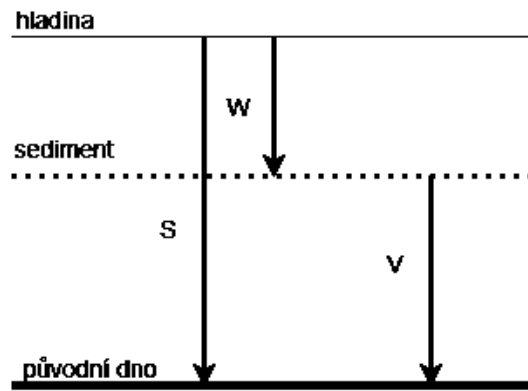
Hamerský rybník se nachází v místě starého rybníka, jehož hráz se protrhla v roce 1912. V rámci jeho obnovy v roce 1971 byl prostor zátopy vyčištěn a zbaven předchozího sedimentu (Dostál et al., 2002).

5.1.1 Metoda měření a vyhodnocení dat

Pro obě měření a vyhodnocování byla použita shodná metoda. Měřily se body z loďky, bodů byl přibližně stejný počet v podobných místech a při vyhodnocování byly nastavené podobné okrajové podmínky, tedy nulové objemy sedimentu na břehové čáře.

Měření

Vpichovou sondou byla změřena hloubka původního dna od hladiny (S) a hloubka vody (W). Z jejich rozdílu byla vypočtena mocnost sedimentu (V), (obr. 12). V roce 2002 bylo změřeno 92 bodů, v roce 2020 bylo změřeno 86 bodů. Poloha bodů byla měřena pomocí GPS.

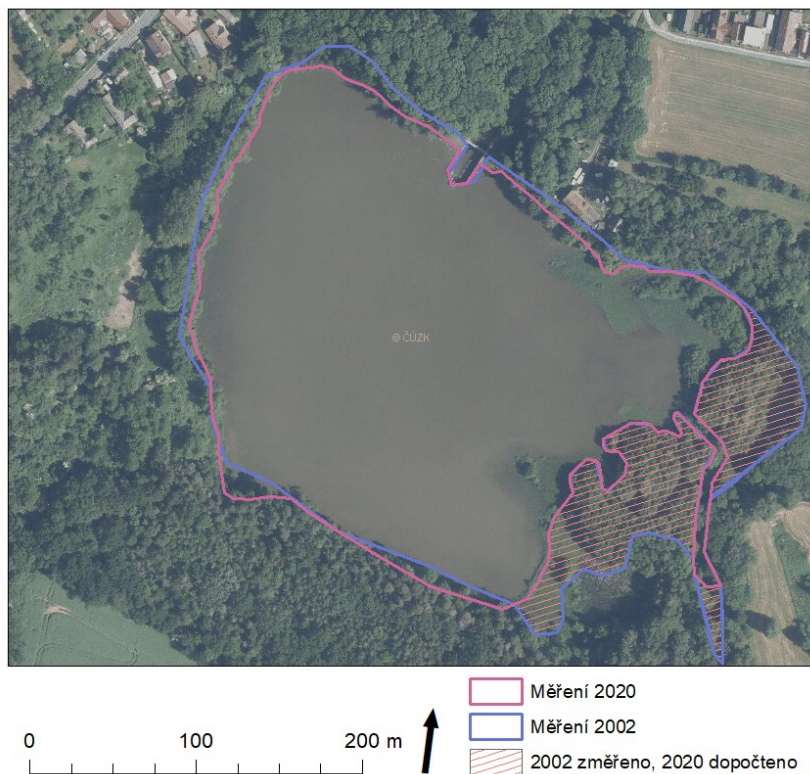


Obrázek 12 Schéma měření mocnosti sedimentu, vlastní zpracování

Vyhodnocení

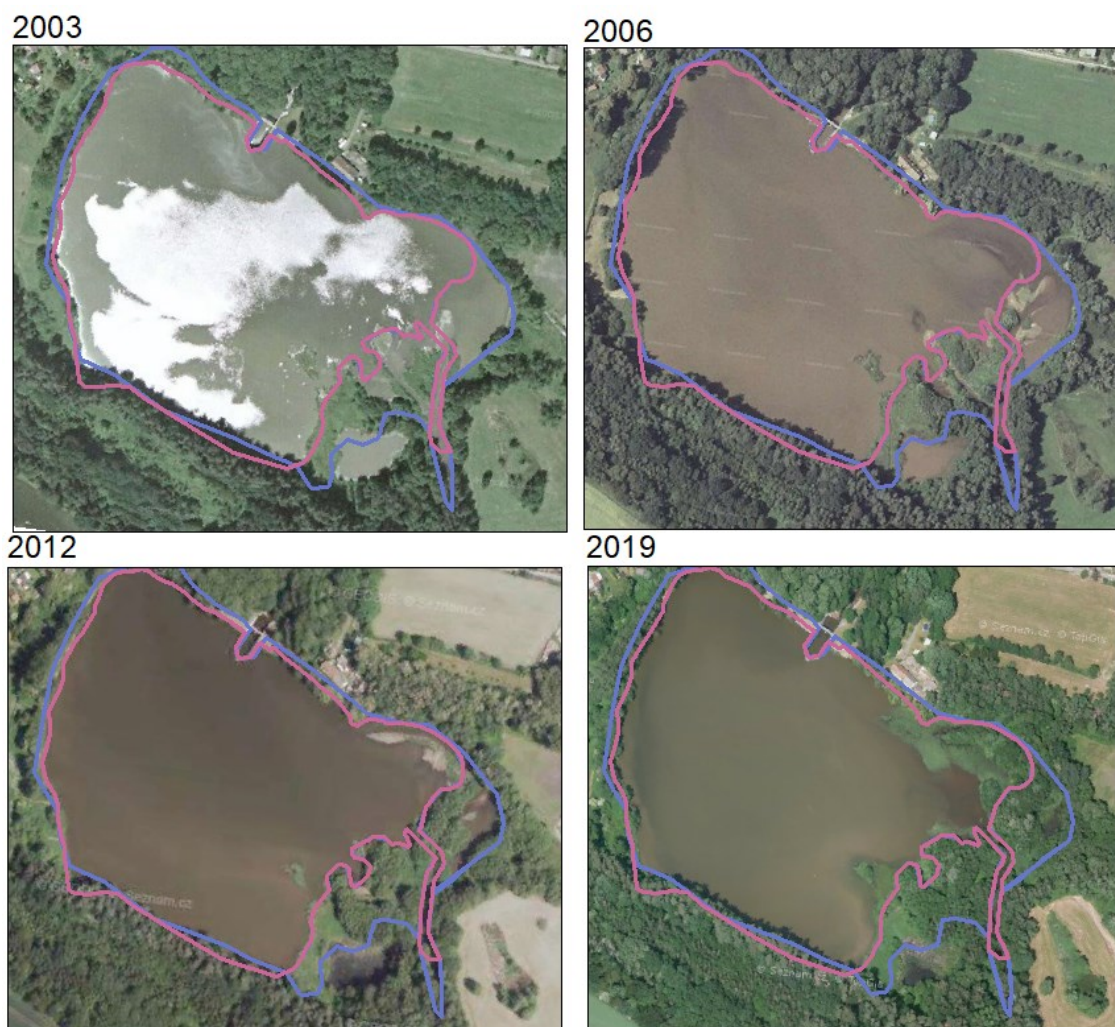
Výstupem byl datový soubor se souřadnicemi bodů. Ten byl převeden do souřadného systému S-JTSK. Bodům byly přiřazeny hodnoty z měření a byly doplněny body s nulovou mocností sedimentu reprezentující břehovou čáru. Polygon rybníka byl překreslen z Ortofoto ČR (ČÚZK, 2010a). Tyto hodnoty pak byly interpolovány v rozlišení 1 x 1 m, aby každý pixel měl svou hodnotu mocnosti sedimentu. Toto rozlišení usnadnilo následné sčítání objemu sedimentu nad jednotlivými elementy.

Je nutné brát ohled na to, že v roce 2002 proběhlo měření na větší ploše hladiny než v roce 2020 (obr. 13).



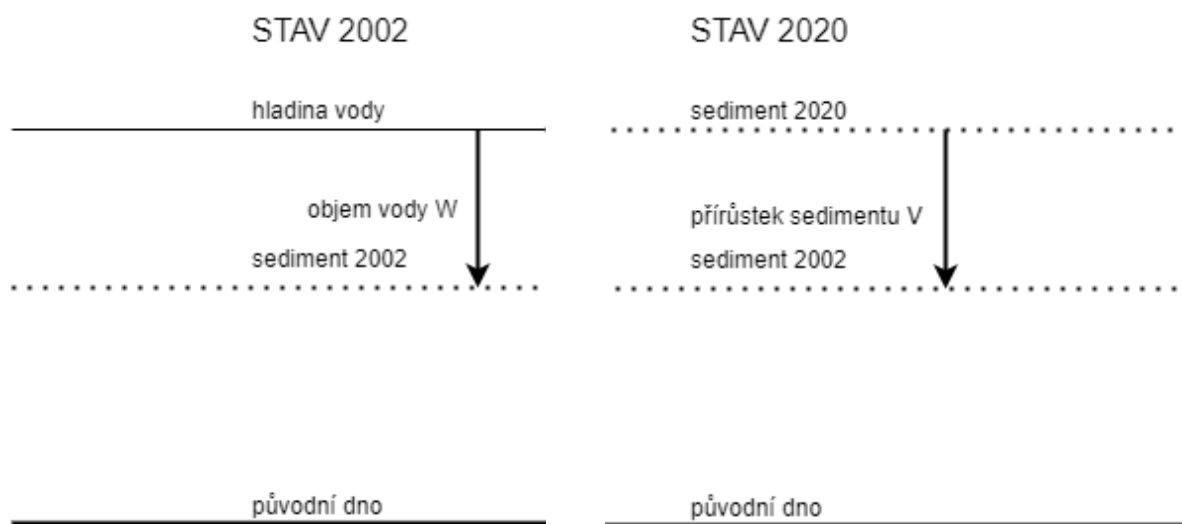
Obrázek 13 Rozsah měření sedimentu v roce 2002 a 2020, (ČÚZK, 2010a, vlastní zpracování)

Od určitého roku se v této části sediment neusazuje, jelikož tímto místem už řeka neprotéká. Došlo k postupnému zarůstání okolí jejího ústí do nádrže. Z historického ortofoto lze s nepřesností odhadnout, že k tomu pozvolně došlo mezi roky 2006 a 2012 (obr. 14). Jelikož nás ale zajímají dlouhodobé průměry přírůstku sedimentu v rybníce, není pro tuto práci podstatné tento moment přesněji identifikovat.



Obrázek 14 Zarůstání břehu Hamerského rybníka, (Seznam a.s., 2020a, vlastní zpracování)

Za předpokladu, že se splaveniny usadily v prostoru, který v roce 2002 vyplňovala voda, byl zjištěn přírůstek sedimentu v této části rybníka. Tedy, objem přírůstku sedimentu od roku 2002 do roku 2020 (V) je rovný objemu vody v roce 2002 (W), (obr. 15). Objem vody byl známý z měření v roce 2002. Tento přírůstek byl potom přičten k celkovému přírůstku za období 2002 - 2020.



Obrázek 15 Zanesení zbývajícího prostoru Hamerského rybníka sedimentem od roku 2002, vlastní zpracování



Obrázek 16 Fotografie z měření sedimentu na Hamerském rybníce, listopad 2020



Obrázek 17 Fotografie z měření sedimentu na Hamerském rybníce, listopad 2020

5.1.2 Výsledky měření z roku 2002 a 2020

Výsledné hodnoty jsou uvedené v tab. 1. Není důvod předpokládat, že objemová hmotnost sedimentu pocházejícího ze stejných zdrojů by se významně změnila oproti předchozímu zaměření. Je tedy uvažována identická pro obě měření, přičemž v roce 2002 byla přesně určena odběrem vzorků sedimentu. Objemová hmotnost sedimentu v Hamerském rybníce se uvažuje $1,25 \text{ t/m}^3$. (Dostál et al., 2002)

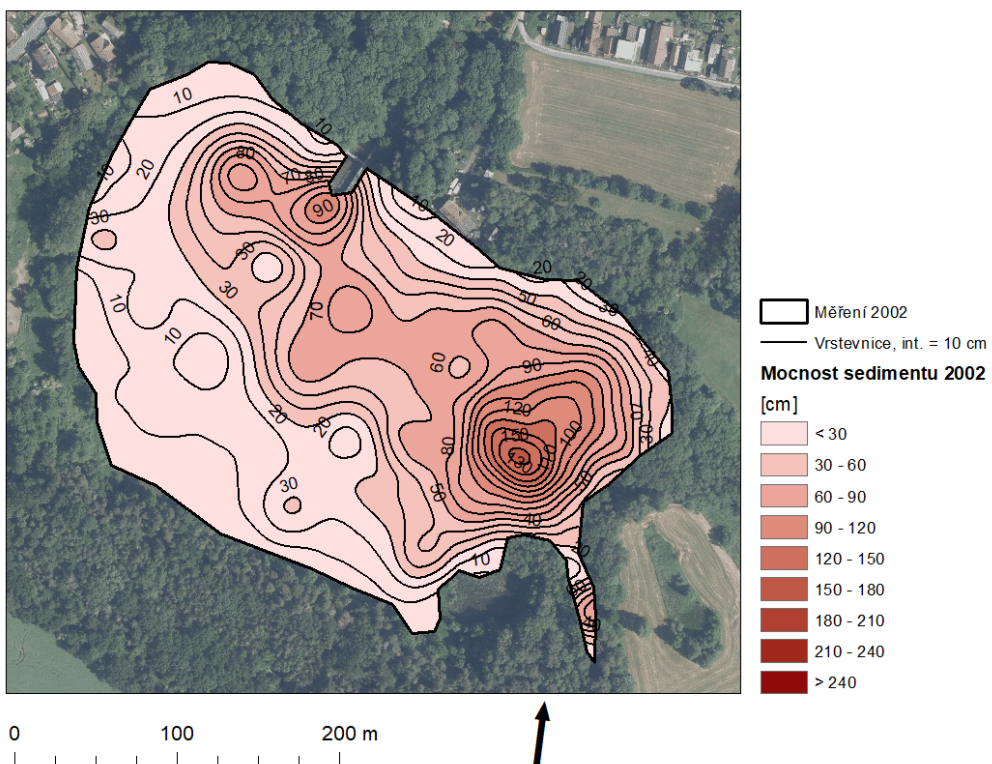
Při prvním měření v říjnu 2002 byl zjištěn objem $32\,470 \text{ m}^3$. Při druhém měření v listopadu 2020 byl zjištěn objem $73\,215 \text{ m}^3$. Po odečtení hodnoty objemu z roku 2002 od roku 2020 činí přírůstek $40\,745 \text{ m}^3$. Objem usazený od roku 2002 v nyní zarostlém prostoru je 443 m^3 . Tuto hodnotu je nutné přičíst ke změřenému přírůstku sedimentu mezi lety 2002 a 2020.

Tabulka 1 Vývoj objemu sedimentu změřeného v Hamerském rybníce

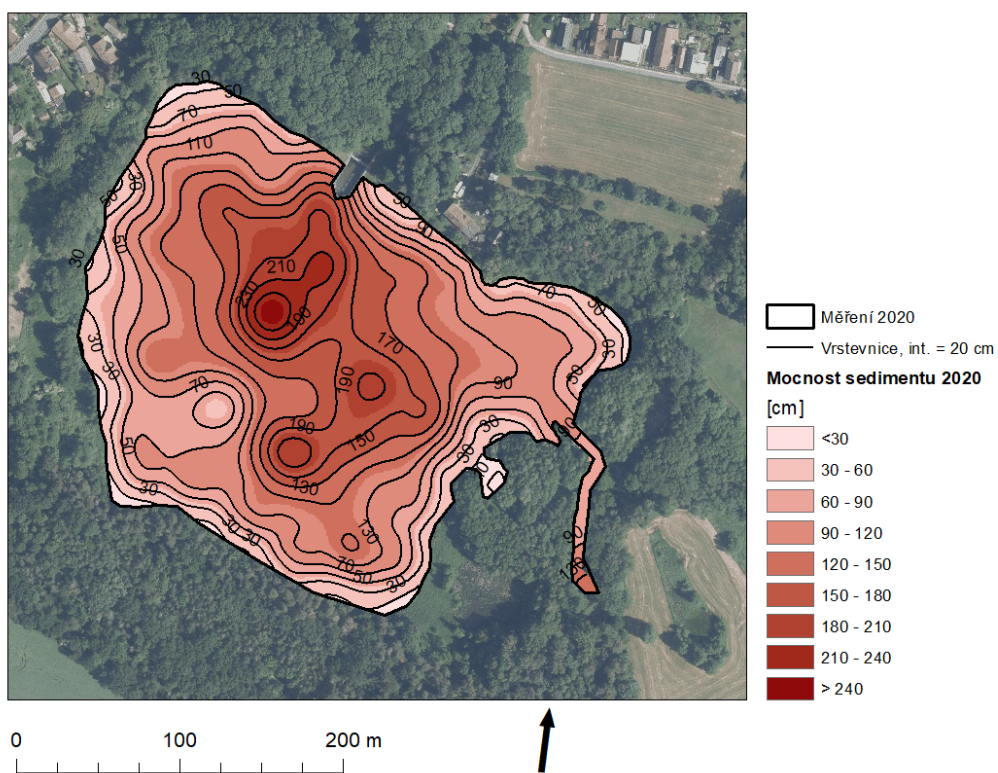
Období	Počet roků	Změřený původní objem [m ³]	Změřený Objem sedimentu [m ³]	Objem vody = původní objem – objem sedimentu [m ³]	Přírůstek sedimentu [m ³]	Roční přírůstek sedimentu [m³/rok]	Roční přírůstek sedimentu [t/rok]
1971 - 2002	31		32 470	89 435	32 470	1 047	1308
2002 - 2020	18	121 905	73 215	48 690	40 745 + 443 = 41 188	2 288	2860

Od roku 1971 do roku 2002 je průměrný přírůstek 1 047 m³ za rok. (Dostál et al., 2002). Průměrný roční přírůstek od roku 2002 do roku 2020 je 2288 m³ za rok. Z tohoto výpočtu lze usoudit, že rychlost usazování sedimentu se od předchozího měření 2002 zvýšila více než dvojnásobně.

Na obrázku 18 a 19 lze vidět rozložení sedimentu při obou měřeních. V roce 2002 dosahuje největších mocností u výpusti a u přítoku řeky Vrchlice, což odpovídá místu, kde později dojde k úplnému zanesení sedimentem. V roce 2020 dosahuje největších mocností v místech před výpustí a v trase původního vodního toku.



Obrázek 18 Mocnost sedimentu v roce 2002 v Hamerském rybníce, (ČÚZK, 2010a, vlastní zpracování)

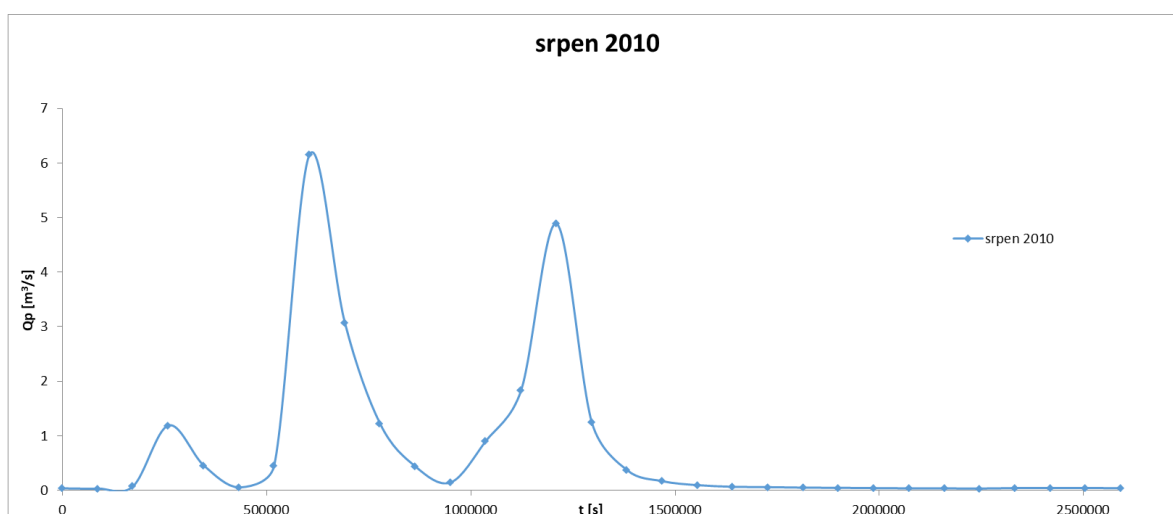


Obrázek 19 Mocnost sedimentu v roce 2020 v Hamerském rybníce, (ČÚZK, 2010a, vlastní zpracování)

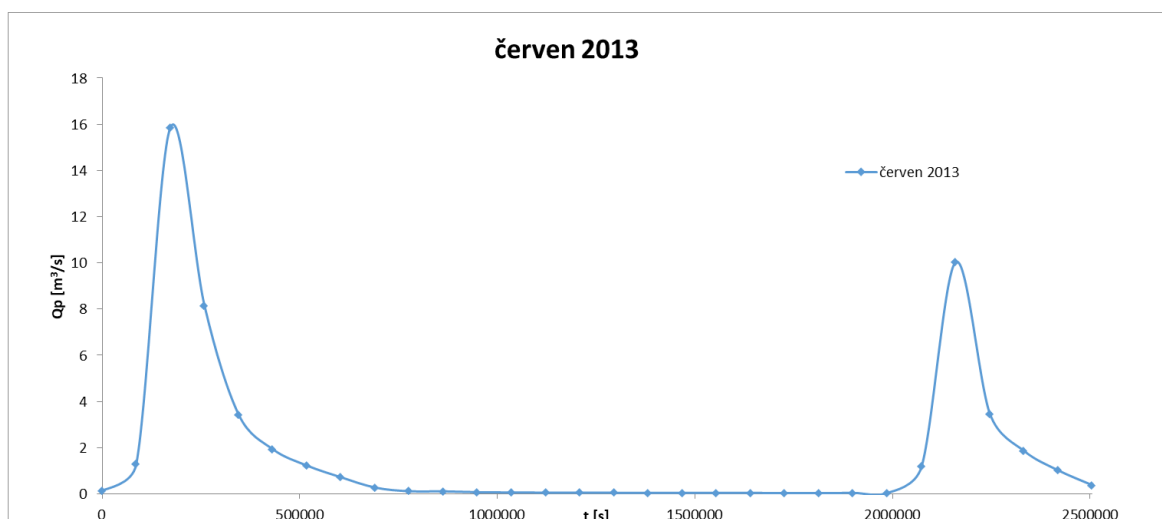
Vliv extrémních událostí

Množství sedimentu je ovlivněné extrémními událostmi, které v povodí proběhly. Při povodni se může v nádrži usadit několikanásobné množství ročního průměrného přírůstku. Státní podnik Povodí Labe poskytl data průtoků a obsahu nerozpuštěných látek (NL) Katedře hydromeliací a krajinného inženýrství. Z nich byla udělána stručná analýza extrémních událostí, které se staly v srpnu 2010 a červnu 2013 (na základě komunikace se Státní podnik, Povodí Labe).

Na obrázku 20 a 21 jsou grafy průtoků v přítoku v Malešově. V srpnu 2010 je objem největší povodňové vlny $868\,600\text{ m}^3$ a druhé $679\,500\text{ m}^3$. Celkem to je $1\,548\,100\text{ m}^3$, spočteno ve 14 dnech trvání těchto dvou vln. V červnu 2013 je objem první vlny $2\,330\,950\text{ m}^3$ a druhé $919\,310\text{ m}^3$. Dohromady je to $3\,250\,260\text{ m}^3$ za dobu 15 dní. Hodnoty jsou přibližné a zaokrouhlené.



Obrázek 20 Průtoky v srpnu 2010 – přítok Malešov, vlastní zpracování

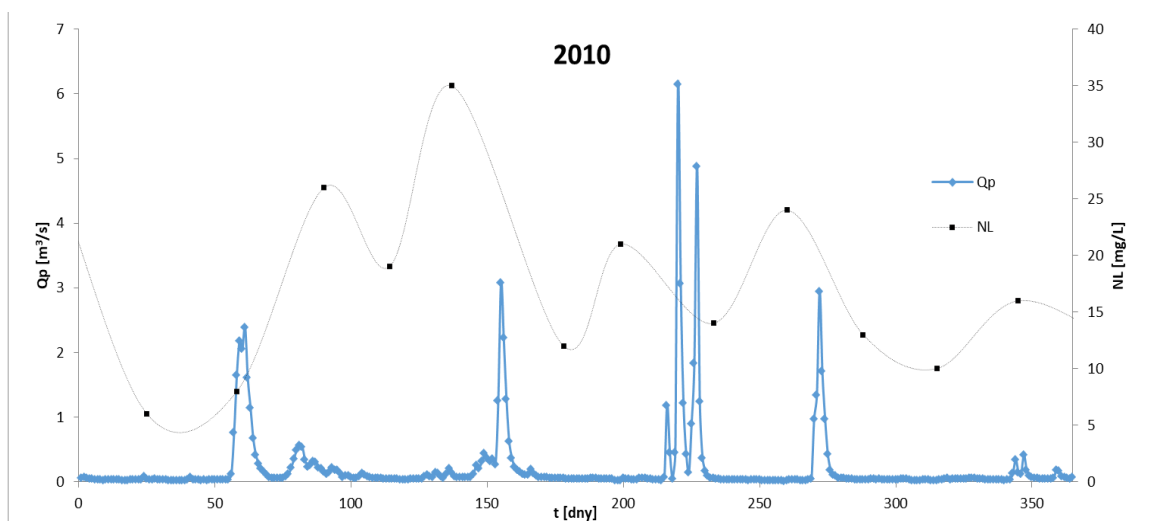


Obrázek 21 Průtoky v červnu 2013 – přítok Malešov, vlastní zpracování

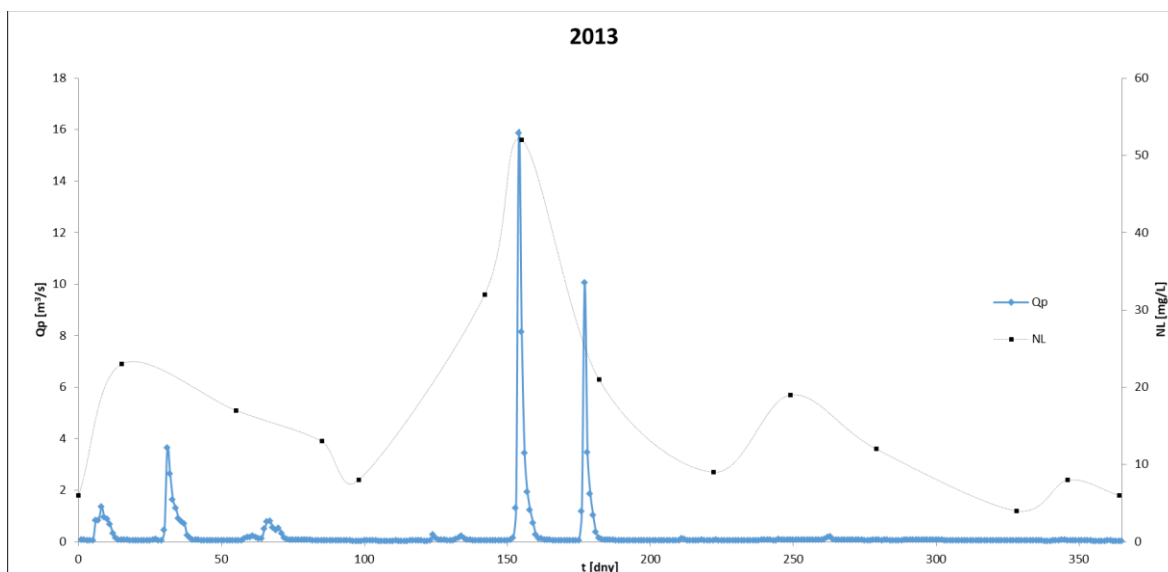
Na obrázku 22 a 23 jsou zobrazeny průtoky v celém roce 2010 a 2013 a změřené množství nerozpuštěných látek ve vodě. V roce 2013 dosahuje obsah nerozpuštěných látek v ústí do VN Vrchlice nejvyšší naměřené hodnoty v červnu, jeden den po kulminačním průtoku povodňové vlny. Přesný průběh koncentrace NL není známý, lze ale předpokládat její nevyšší hodnotu při

kulminacích průtoku. S použitím nejvyšší hodnoty NL v daném roce lze odhadnout, jakým maximálním množstvím sedimentu by povodňová vlna přispěla do nádrže. Jedná se o měření v ústí do VN Vrchlice, nikoliv Hamerského rybníka, můžeme ale předpokládat podobné koncentrace.

V srpnu 2010 byla nejvyšší změřená hodnota koncentrace NL 35 mg/L. Při vynásobení s objemem povodňové vlny vychází množství sedimentu 54 tun, tedy 43 m³ při uvažování objemové hmotnosti 1,25 t/m³. V červnu 2013 byla nejvyšší změřená hodnota koncentrace NL 54 mg/L. Množství sedimentu vnesené povodňovými vlnami by dosahovalo až 175 tun, tedy 140 m³. V porovnání ke změřenému průměrnému ročnímu přírůstku sedimentu v Hamerském rybníce - 2288 m³/rok - tvoří vnos povodňovými vlnami méně než 10 % podíl. Takové množství nemá na modelování významný vliv.



Obrázek 22 Průtoky a obsah nerozpuštěných látek v roce 2010 – ústí do VN Vrchlice, vlastní zpracování



Obrázek 23 Průtoky a obsah nerozpuštěných látek v roce 2013 – ústí do VN Vrchlice, vlastní zpracování

Vypočtené hodnoty slouží jako řádový odhad. Přesný vliv na transport a zachytávání sedimentu by musel být řešen podrobněji.

5.2 Odhad produkce a transportu sedimentu modelem WaTEM/SEDEM

Pro odhad produkce a transportu sedimentu v povodí VN Vrchlice byl použit model WaTEM/SEDEM. Díky tomu, že neklade příliš vysoké nároky na vstupní data, ho bylo možné použít v takto velkém povodí. K modelování historických scénářů byly použity mapy využití území, které vznikly v rámci bakalářských prací (Winterová, 2019) a (Anýžová, 2020).

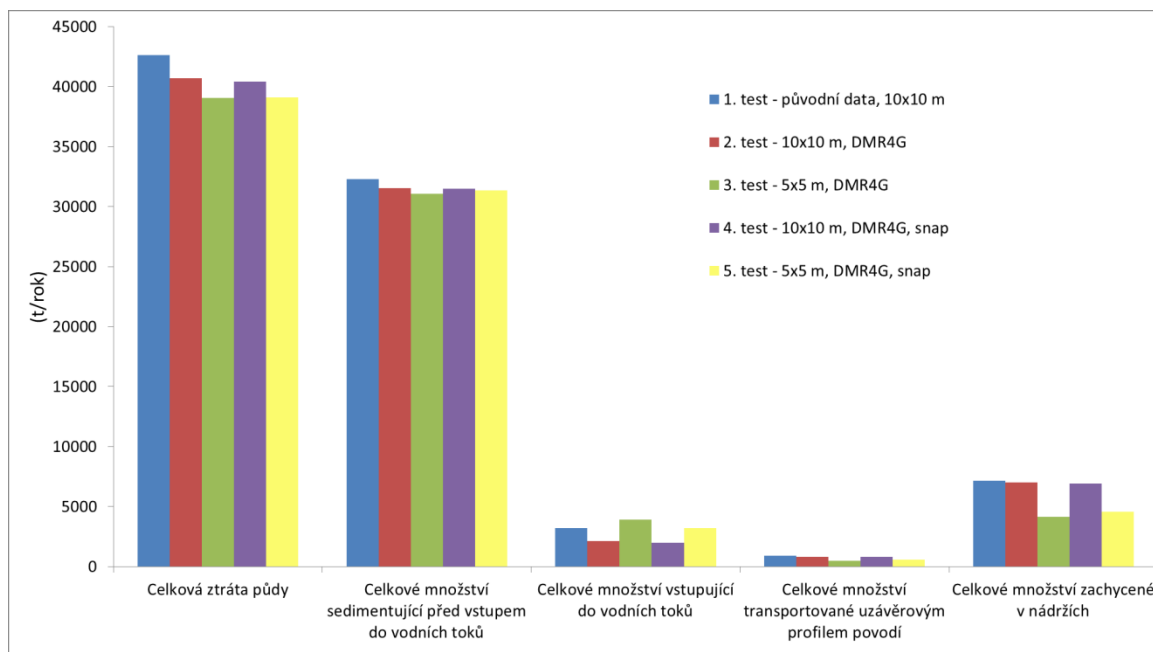
Aby byla zaručena správnost výpočtu, bylo po instalaci provedeno několik kontrolních výpočtů. Poté byla zahájena příprava nových vstupních dat pro tyto scénáře: aktuální stav z roku 2019, historická období z let 1983, 1954, a 1852. Vliv rozdělení orné půdy na malé pozemky, jak bylo typické v roce 1938, je pak samostatně sledován v jednom povodí IV. řádu - 1-04-01-028 - povodí Opatovického potoka.

Model byl kalibrován pro současný stav na základě měření sedimentu z roku 2020. Předtím byl k dispozici již kalibrováný výpočet podle měření z roku 2002, původní vstupní data ale byla v jiné kvalitě – rozlišení rastrů bylo 10 x 10 m a do výpočtu bylo zahrnuto méně vodních nádrží, protože vstupní mapa landuse nebyla tak podrobná. Proto se nyní model, s novými vstupními daty, kalibroval znovu na tato měření (2002 a 2020). Tato kalibrace pak byla použita pro výpočty v dalších historických obdobích.

5.2.1 Instalace a testovací výpočty

Před zahájením přípravy nových vstupních dat byly spuštěny testovací výpočty s daty z předchozího projektu, aby byla ověřena správnost instalace programu a zápis dat do souborů. Výsledky testovacích výpočtů jsou vyneseny do grafu (obr. 24).

1. První testovací výpočet proběhl se shodnými vstupními daty a výsledné hodnoty se rovnaly hodnotám z předchozích výpočtů. Výpočet proběhl v rozlišení rastru 10 x 10 m.
2. Druhý testovací výpočet byl proveden s nahrazeným digitálním modelem terénu. Původní DMT byl nahrazen DMR4G. Jelikož je DMR4G originálně v rozlišení 10 x 10 m, byl tento rastr upraven na rozlišení 10 x 10 m (nástrojem Resample v ArcMap).
3. Třetí testovací výpočet byl proveden také s nahrazeným digitálním modelem terénu. Původní DMT byl nahrazen DMR4G, ale tentokrát bylo zachováno originální rozlišení 5 x 5 m. Proto musely být zbylé vstupní vrstvy upraveny z rozlišení 10 x 10 m na rozlišení 5 x 5 m (nástrojem Expand v Idrisi Selva).
4. Čtvrtý testovací výpočet opět proběhl v rozlišení 10 x 10 m, avšak DMR4G byl upraven tak, aby umístění pixelů v rastru odpovídalo tomu v původních datech (nástrojem Resample v ArcMap).
5. Pátý testovací výpočet proběhl v rozlišení 5 x 5 m, a i zde byl DM4G upraven tak, aby umístění pixelů v rastru odpovídalo tomu v původních datech (nástrojem Resample v ArcMap).



Obrázek 24 Graf výsledků z testovacích výpočtů (vlastní zpracování)

Jak lze vidět v obrázku 24, výsledky hodnoty produkce a transportu sedimentu všech výpočtů se podobají. Z toho lze usoudit, že původní výpočet s použitím DMT ZABAGED byl správný. Dále lze usoudit, že použití DMR4G má nevýznamný vliv na výsledné hodnoty. Největší vliv na výsledky má rozlišení rastrů, tedy velikost pixelu. Při zmenšení rozlišení z 10 x 10 metrů na 5 x 5 metrů dochází ke snížení celkové ztráty půdy v povodí a jeho množství zachyceného ve vodních nádržích. Naopak mírné zvýšení nastává u množství sedimentu vstupujících do vodních toků po odečtení usazení v nádržích. Na základě této analýzy lze předpokládat, že DMR4G je vhodný model pro použití do dalších výpočtů a že původní výpočty proběhly správně.

5.2.2 Příprava vstupních dat pro povodí Vrchlice

V kapitole jsou popsány konkrétní produkty, které sloužily jako vstupní data pro výpočet v povodí VN Vrchlice. Jedná se o rastrové mapy nebo konstantní hodnoty. Všechny mapy byly vytvořené jako rastry s rozlišením 5 x 5 metrů. Bylo nutné, aby na sobě pixely přesně seděly, aby každá mapa měla stejný počet řádků i sloupců. Důležité bylo zachovat správné jednotky. Vstupní data byla připravována pomocí manuálu (B. Notebaert et al., 2006) a podle dizertační práce (Krása, 2004). Některé parametry byly převzaty z předchozích výpočtů, které proběhly v rámci projektu (NAZV, 2010).

DEM

Jako digitální model terénu byl použit Digitální model reliéfu České Republiky 4. generace, který poskytuje ČÚZK. Zobrazuje zemský povrch v pravidelné síti 5 x 5 metrů. V roce 2016 byl vygenerován z DMR5G (z nepravidelné trojúhelníkové sítě). (ČÚZK, 2017)

Protože se jedná o rastrový model v rozlišení 5 x 5 metrů a nadmořská výška je uváděna v metrech, jedinou vlastní úpravou bylo jeho oříznutí na oblast řešeného území.

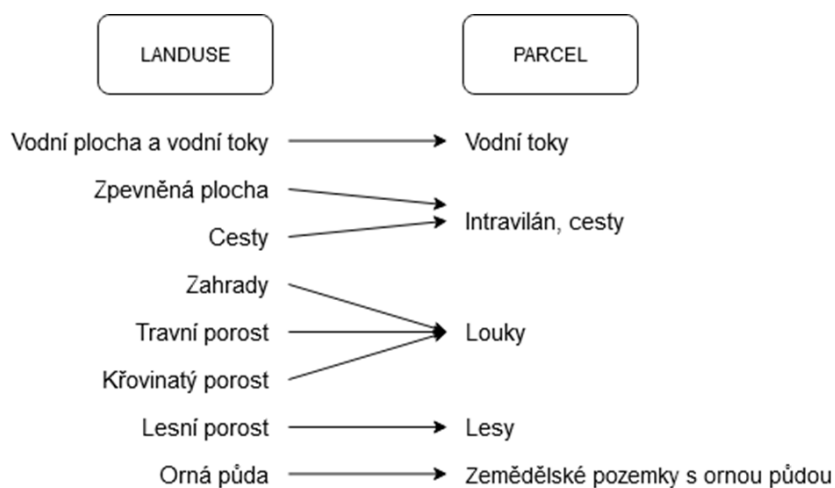
Pro historické scénáře se DEM nemění.

PARCEL

Mapa parcel je mapa pozemků získaná z mapy landuse. K přípravě nových dat byly použity mapy využití území, které vznikly v rámci bakalářských prací v předchozích letech (Winterová, 2019) a (Anýžová, 2020). Tyto mapy byly připravovány na základě historických podkladů, které však mají své limity, a to podle kvality a množství zaznamenaných informací.

Mapa landuse pro rok 2019 byla vytvořena na základě databáze ZABAGED (ČÚZK, 2010c) a LPIS (Ministerstvo zemědělství, 2020) a byla ručně upravena podle Ortofoto ČR (ČÚZK, 2010a). Mapa landuse pro rok 1983 byla ručně upravena nad Leteckými měřickými snímky (LMS), (ČÚZK, 2010b). Stejně tak vznikla mapa využití území pro rok 1954 a 1938. Období druhé poloviny 19. století je zmapováno ve II. vojenském mapování (CENIA, 2010), podle něhož byla vytvořena mapa využití území (1852). Tyto podklady byly vybrány tak, aby zobrazovaly reprezentativní období v historii, mezi událostmi jako je kolektivizace a sametová revoluce, které měly vliv kromě jiného i na zemědělství. Dalším kritériem pro výběr historických podkladů byla přesnost a také obsah map, aby bylo podle nich možné území roztrždit do 8 kategorií. Více o vhodnosti použití těchto historických podkladů je popsáno v bakalářské práci *Posouzení změn využití území v povodí VN Vrchlice a jejich vlivu na retenci srážek* (Winterová, 2019) a *Vliv využití území na retenční kapacitu krajiny v povodí VN Vrchlice* (Anýžová, 2020).

Výstupem z těchto bakalářských prací jsou mapy landuse, kde je území rozděleno do osmi kategorií. Těchto 8 kategorií bylo převedeno do 5 kategorií podle požadavků software WaTEM/SEDEM dle schématu:



Obrázek 25 Schéma rozdělení kategorií pro mapu PARCEL, vlastní zpracování

Kategoriím v mapě PARCEL byly přiřazeny identifikátory:

intravilán, cesty = -2

vodní toky = -1

zemědělské pozemky s ornou půdou = 1 až n

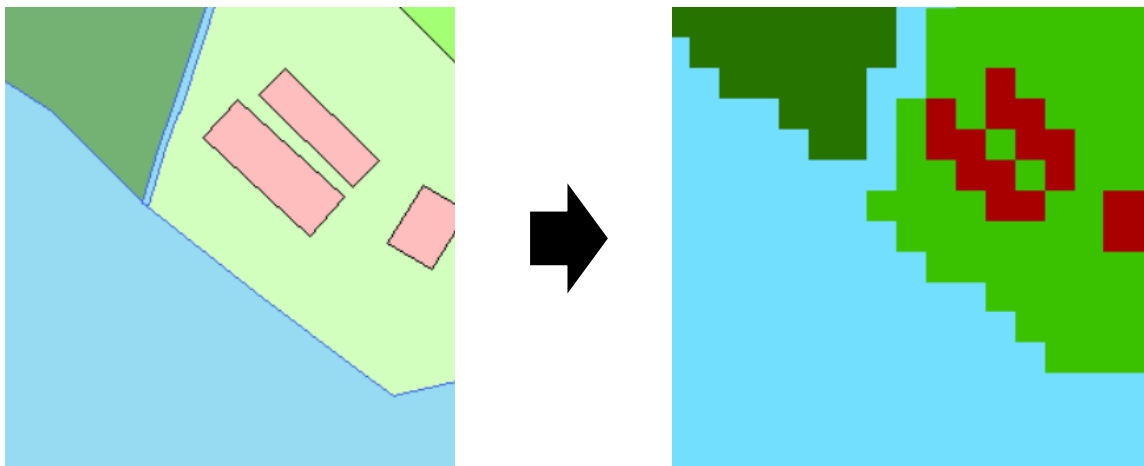
lesy = 10 000

louky = 20 000

oblast mimo řešené povodí = 0

Při vytváření mapy PARCEL mají vodní nádrže a vodní toky větší prioritu než vše ostatní, z důvodu zachování jejich návaznosti. Infrastruktura má prioritu nad lesy, loukami a pozemky s ornou půdou. Mapa vznikla postupným překrýváním vrstev pomocí nástroje OVER v ArcMap.

Každý pozemek s ornou půdou má vlastní identifikátor, aby byly stanoveny hranice jako překážky povrchového odtoku. Aby se odlišil význam kategorií využití území zahrady, travní porost a křovinatý porost, mají přiřazené rozdílné hodnoty C FAKTORU (viz dále).



Obrázek 26 Ukázka rastrování vektorové mapy landuse na mapu PARCEL, vlastní zpracování

RIVER MAP

Mapa RIVER MAP obsahuje úseky vodních toků a vodních nádrží, které leží na vodních tocích. Každý úsek nese vlastní identifikátor. Po zrastrování vektorové mapy mají buňky s úsekem vodního toku hodnotu > 0 , ostatní buňky mimo vodní tok = 0.

Vodní nádrže byly převzaty z map landuse. Protože při tvorbě map landuse nebylo možné s přesností ověřit existenci a polohu vodních toků, právě z důvodu kvality historických podkladů, byla při tvorbě mapy PARCEL využita databáze vodních toků z modelu ZABAGED (ČÚZK, 2010c).

Tato vektorová databáze společně s databází vodních nádrží byla manuálně editována podle podmínek:

- každý úsek má vlastní identifikátor, to umožňuje následnou analýzu transportu sedimentu,
- pokud na úseku leží vodní nádrž, úsek končí pod jejím uzávěrovým profilem a navazuje zde další úsek,
- každému úseku přísluší jedna nádrž a každá nádrž leží pouze na jednom úseku toku,
- do jedné nádrže může vstupovat více vodních toků, vystupuje z ní ale pouze jeden,
- všechny úseky na sebe navazují, síť je konzistentní.

Identifikátory úseků souhlasí se souborem určujícím typologii sítě: RIVER ROUTING FILE. Ten se vytváří přímo v prostředí software WaTEM/SEDEM, kam se zadá tabulka ve formátu textového souboru. V tabulce musí být minimálně 4 sloupce:

IDRID: identifikátor úseku vodního toku > 0, musí začínat číslem 1 a číselná řada nesmí být přerušena. V prvním řádku je uveden celkový počet úseků,

FNODE_: počáteční uzel úseku (bod, kde sediment do úseku vstupuje),

TNODE_: koncový uzel úseku (kde sediment z úseku odchází),

LENGTH ARC_: délka úseku, není ale zahrnutá do výpočtu, proto nemusí odpovídat realitě.

Pro historické scénáře se RIVER MAP nemění.

PONDS

Mapa PONDS reprezentuje vodní nádrže, které leží na vodním toku i mimo něj. Buňka s vodní nádrží nese hodnotu poměru zachycení 1 - 100, ostatní buňky = 0.

Mapa byla vytvořena převedením vektorových nádrží na body s parametrem poměru zachycení, a z bodů byla vytvořena rastrová mapa. Nástrojem FOCAL STATISTICS v ArcMap byly jedno pixelové nádrže zvětšeny na čtverec s rozměrem 3 x 3 pixely. WaTEM/SEDEM použije mapu k očíslování nádrží a uvede množství sedimentu zachyceného každou nádrží.

Určení poměrů zadržení

Poměry zadržení mají přímý vliv na výsledné hodnoty zachycení sedimentu. Ovlivní jednak množství sedimentu, které do vodní nádrže vstoupí (kolik sedimentu zachytí nádrže v předcházejících úsecích) a jednak množství sedimentu, které se v dané nádrži usadí.

V povodí se v současnosti (2019) nachází 137 vodních nádrží. 66 z nich leží mimo vodní tok, 34 jsou malé nádrže na vodním toku, u kterých nebylo možné v rámci této práce zjistit objem a využít metodu Bruneho křivek, 37 nádrží má určený poměr zadržení pomocí Bruneho křivek. Zbylé nezapočítané vodní nádrže jsou rybí sádky, které nemají pro zachycování sedimentu význam.

Nádrže, které leží mimo vodní tok:

mají poměr zadržení = 100, protože zachytí 100 % přicházejícího sedimentu.

Malé nádrže ležící na vodním toku:

Byl jim přiřazen poměr zadržení 50 %. Citlivostní analýzou bylo zjištěno, že pokud budeme měnit poměr zadržení u těchto nádrží, nemá to významný vliv na množství sedimentu v konečných retenčních prvcích, jako je Hamerský rybník nebo VN Vrchlice.

Větší nádrže ležící na vodním toku:

Jejich poměry zadržení byly určeny pomocí Bruneho křivek (viz. 4.2.2), případně převzaty z výpočtu v projektu *Rady vlády České republiky pro výzkum a vývoj VaV/630/4/02: Výzkum sedimentů přehrad, nádrží a jezer – zhodnocení rizik a návrhy opatření* (Dostál et al., 2002).

Objem nádrže byl určen podle ZVM 1:50 000. Průměrný roční průtok byl odhadnut pomocí metody přepočtu plochy povodí, základní hodnotou byl průměrný roční průtok v profilu hráze VN Vrchlice uvedený v knize (Chlum a kol., 1977). Z jejich poměru lze poté odečíst poměr zadržení. (Dostál et al., 2002)

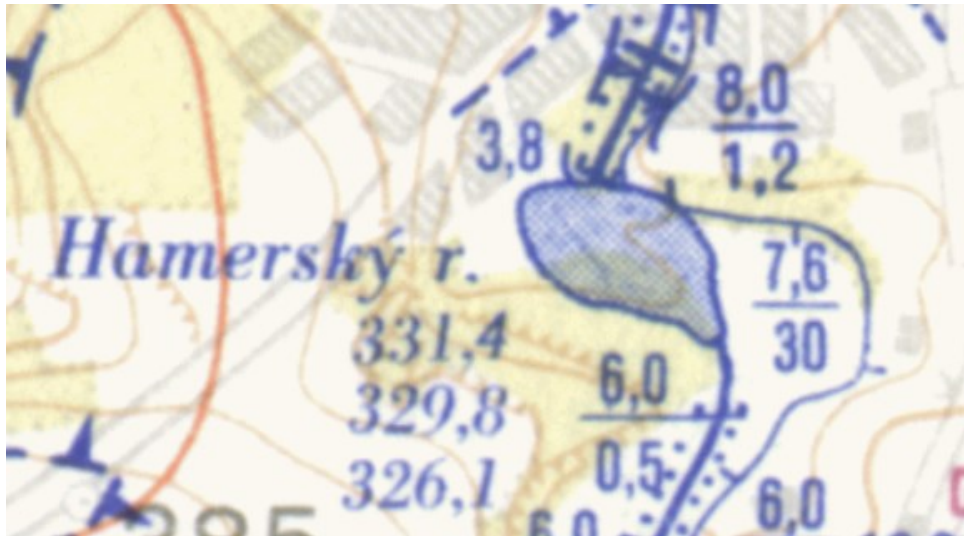
Zvláštní pozornost byla věnována Hamerskému rybníku, který slouží jako retenční prvek před vodní nádrží Vrchlice. Průměrný roční průtok v Hamerském rybníce byl zjištěn podle stanice Vrchlice – Malešov, $Q_a = 0,328 \text{ m}^3/\text{s}$ (Povodí Labe, státní podnik, 2020). Rybník má podle ZVM ČR 1:50 000 (VÚV TGM, v. v. i., 2020) celkový objem $30\,000 \text{ m}^3$. Z toho vychází dle Bruneho křivek poměr zadržení 11 %. Skutečný celkový objem je ale větší. Jak je uvedeno v kapitole 5.1.2, měřením byl zjištěn objem $121\,905 \text{ m}^3$ a lze předpokládat, že při výstavbě v roce 1971 byl ještě větší, pokud nebylo při tomto zaměrování naraženo původní dno. Poměr zadržení je tedy ve skutečnosti větší, jak je uvedeno v tab. 2, ale se zmenšujícím se zásobním objemem se jeho hodnota snižuje.

Tabulka 2 Změna poměru zachycení se změnou zásobního objemu Hamerského rybníka dle Bruneho křivek

Období	Původní objem nádrže [m ³]	Změřený objem sedimentu [m ³]	Objem vody = původní objem – objem sedimentu [m ³]	Poměr zachycení dle Bruneho křivek (kap. 6.2.4) [%]	Poměr zachycení dle zprávy CGS [%]
1971		0	121 905	45	
1971 - 2002		32 470	89 435	40	82
2002 - 2020	121 905	73 215	48 690	25	

V případě Hamerského rybníka je použití Bruneho křivek problematické, protože nezohledňuje tvar hráze a dá se předpokládat, že se zde zachytí větší část sedimentu, než je výsledný poměr. Poměr zachycení byl Hamerskému rybníku přiřazen 82 % podle výpočtu (Dostál et al., 2002).

Ačkoliv se pravděpodobně poměr zachycení v průběhu let snižoval, není teď možné určit, jak výrazně. K porovnání produkce a transportu sedimentu v historických obdobích to nepovažují za zásadní.



Obrázek 27 Výřez ze ZVM ČR 1:50 000 (VÚV TGM, v. v. i., 2020)

Pro další zpřesnění by bylo nutné provést analýzu konstrukce hráze a zrnitostní analýzu sedimentu.

Při přípravě historických dat se mění počet vodních nádrží, vodní toky zůstávají stejné. Pokud se jednalo o vodní nádrž, na jejímž místě se v daném období nachází orná půda, byla mapa PARCEL upravena, aby nedošlo ke zkreslení eroze – přerušení smyvu. Ostatním nádržím byla přiřazena nulová hodnota poměru zachycení, takže ty, které leží na vodním toku, se chovají jako úsek vodního toku a ty, které leží mimo vodní tok, nic nezachytí. Ostatní poměry zadržování zůstaly jinak stejné ve všech obdobích.

K FAKTOR

K FAKTOR je faktor erodovatelnosti půdy. K vytvoření byla použita dostupná mapa BPEJ (SPÚ ČR, 2020). V ní má daný pozemek číslo HPJ. Podle HPJ pak byla přiřazena hodnota K faktoru pro daný pozemek pomocí tabulky z metodiky Ochrana zemědělské půdy před erozí (Janeček a kol., 2012). Jelikož mapa BPEJ neodpovídá topologicky přesně mapě PARCEL, bylo nutné interpolací vyplnit místa bez hodnot. Ve skutečnosti se to ale týkalo pouze malého území na okrajích luk a zemědělských pozemků s ornou půdou, takže měla interpolace vliv na výsledek minimální. Buňky v povodí dosahují hodnot 16 až 60 [t.h/MJ.mm].

Pro historické scénáře se K FAKTOR nemění.

C FAKTOR

C FAKTOR je faktor ochranného účinku vegetace. Hodnoty = 0 až 1 byly přiřazeny dle kategorií landuse za použití hodnot z (NAZV, 2010).

Travní porost = 0,005

Zahrady = 0,015

Křovinatý porost = 0,15

Orná půda = 0,265811

Lesní porost = 0

Vodní plocha a vodní toky = 0

Cesty = 0

Zpevněná plocha = 0

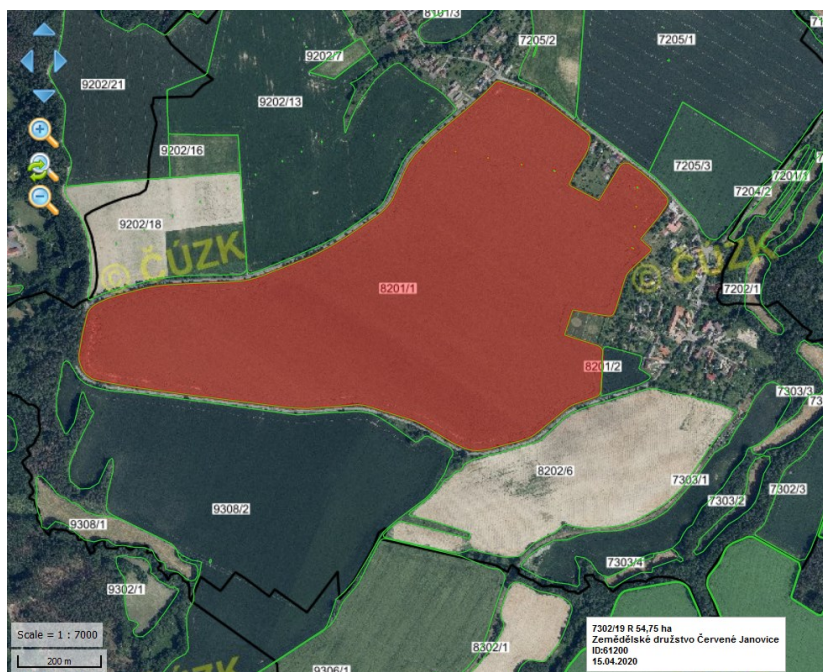
Pro nejasné rozlišení kategorie orné půdy a travního porostu v roce 1983 byla použita hodnota 0,15.

C faktor na orné půdě se určuje z osevních postupů. Kontaktovala jsem několik společností, od jedné jsem získala přehled výměry plodin v daném roce (2020):

Tabulka 3 Osevní postupy poskytnuté ZOD Úmonín

ZOD Úmonín	[ha]	C FAKTOR
Celková výměra	2020	
TTP	75	
Pšenice (ozimá i jarní)	615	0,12
Ječmen (ozimý i jarní)	280	0,17
Kukuřice (siláž i zrno)	320	0,72
Ostatní píceiny na orné půdě	175	0,02
Řepka	420	0,22
Ostatní olejniny (slunečnice, mák)	100	0,60
Luskoviny		
Brambory		
Cukrovka		
Ostatní	35	
Vážený průměr		0.265811

Dále jsem získala osevní postup za 10 let pro 2 konkrétní pozemky:

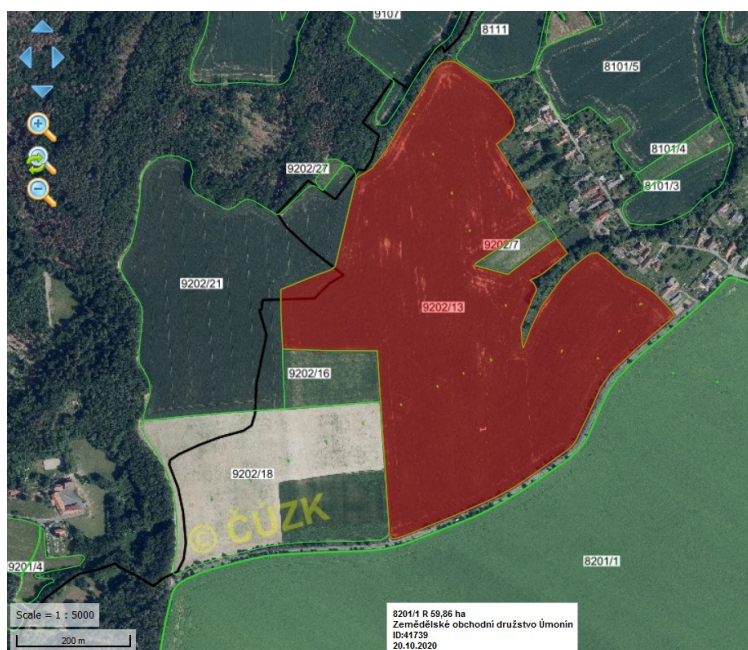


Obrázek 28 Pozemek 8201/1 v LPIS (Ministerstvo zemědělství, 2020)

Tabulka 4 Osevní postupy poskytnuté ZOD Úmonín

Výměra [ha]	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012
59.9	Kukuřice	Pšenice ozimá	Řepka ozimá	Ječmen jarní	Pšenice ozimá	Řepka ozimá	Ječmen jarní	Kukuřice	Pšenice ozimá	Řepka ozimá

Z toho průměrný C FAKTOR = 0,276.



Obrázek 29 Pozemek 9202/13 v LPIS (Ministerstvo zemědělství, 2020)

Tabulka 5 Osevní postupy poskytnuté ZOD Úmonín

Výměra [ha]	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012
26.1	Pšenice ozimá	Řepka ozimá	Ječmen jarní	Pšenice ozimá	Řepka ozimá	Ječmen ozimý	Pšenice ozimá	Řepka ozimá	Ječmen jarní	Kukuřice

Z toho průměrný C FAKTOR = 0,221.

Hodnoty C FAKTORU pro jednotlivé plodiny byly přiřazeny podle projektu (CAMARO-D, 2017) a z nich byl vypočtený vážený průměr v roce 2020 = 0,265811. Tato hodnota byla použita pro všechny pozemky, za předpokladu podobných osevních postupů na dalších pozemcích. TTP nebylo do průměru zahrnuto, protože při tvorbě map landuse byla využita databáze LPIS, kde už jsou pozemky s TTP odlišené.

Pro historická období 1983 a 1954 byla použita hodnota C FAKTORU na orné půdě = 0,217747 (NAZV, 2010).

Pro historické období 1852 byla použita hodnota C FAKTORU na orné půdě = 0,07 (Devátý a kol., 2019).

HODNOTY PTEF

Jedná se o poměr zachycení sedimentu jednotlivými pozemky, který dosahuje hodnot 0 až 100. Zde se zadaly hodnoty:

Zemědělské pozemky s ornou půdou = 0

Lesy = 75

Louky = 75

Jak uvádí ve své dizertační práci (Krása, 2004), pokud má pozemek lesa PTEF = 75, přispívá k produkci sedimentu pouze 25 % své plochy.

Hodnota určena dle původního výpočtu (NAZV, 2010).

Pro historické scénáře se PTEF nemění.

PARCEL CONNECTIVITY

Jedná se o poměr zachycení sedimentu na hranicích pozemku. Objem se redukuje při vstupu na pozemek. Hodnoty se pohybují mezi 0 a 100.

Zemědělské pozemky s ornou půdou = 40

Lesy = 75

Louky = 75

Hodnota určena dle původního výpočtu (NAZV, 2010).

Pro historické scénáře se PARCEL CONNECTIVITY nemění.

R FAKTOR

Průměrný R FAKTOR v povodí má v současnosti hodnotu = 0,0686 [$M \cdot mm \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$]. Tato hodnota byla spočtena z mapy R faktoru pro Českou republiku. Tu vytvořil ČHMÚ na základě dat z roku 2003 až 2012 (Krása a kol., 2014).

Pro historická období je uvažována hodnota = 0,0593. [$M \cdot mm \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$] (NAZV, 2010).

LS

Pro výpočet topografického faktoru byla zvolena kombinace (McCool a kol., 1989)

Na závěr byla zadána objemová hmotnost sedimentu 1650 [t/m^3].

Pro historické scénáře se volba LS nemění.

KTC

KTC je kalibrační koeficient. Jedná se o transportní kapacitu pixelů vztažené k potenciálu rýhové eroze. Potenciální eroze je teoretická hodnota ztráty z holé půdy (bez ochranných opatření) a je dána součtem eroze rýhové a mezirýhové (plošné). Hodnota tohoto koeficientu má být stanovena experimentálně pro různé typy povrchu. (Krása, 2004)

Na základě měření v kapitole 5.1 byla provedena kalibrace. Měření poskytlo průměrný roční přírůstek sedimentu v Hamerském rybníce v období 1971 – 2002 a 2002 – 2020. První období sloužilo ke kalibraci výpočtu v roce 1983, 1954 a 1852, druhé období pro výpočet v současnosti (2019).

Byly použity tyto hodnoty:

2019: kTc low (neerodivní povrchy) = 150
 kTc high (erodivní povrchy) = 250

Historická období: kTc low (neerodivní povrchy) = 40
 kTc high (erodivní povrchy) = 90

kTc limit je hodnota C faktoru odlišující od sebe erodivní a neerodivní plochy, obvyklá hodnota dle (Krása, 2004):

kTc limit = 0,1

Rozdílné hodnoty kTc pro různá období jsou způsobeny velkými rozdíly ve změřeném přírůstku sedimentu v Hamerském rybníce. Můžeme proto uvažovat, že tento koeficient zohledňuje i další vlivy, které se v historii mění, avšak nebylo možné je do výpočtu zahrnout. Takovými vlivy může být stav povrchu, použití různých technologií a mechanizací, mozaikovitost, atd.

Přehledná tabulka vstupních parametrů měnicích se podle období

Tabulka 6 Vstupní parametry měnicí se podle období

OBDOBÍ	Mapa LANDUSE zpracována na základě:	Počet vodních nádrží:	C FAKTOR orná půda	R FAKTOR [M*mm* m ⁻² *h ⁻¹].	kTc low, kTc High,
2019	ZABAGED, LPIS, ORTOFOTO ČR	137	0,265811	0,0686	150, 250
1983	LMS	108	0,217747	0,0593	40, 90,
1954	LMS	96	0,217747	0,0593	40, 90,
1938	LMS	28 (povodí Opatovického potoka)	0,217747	0,0593	40, 90,
1852	II. Vojenské mapování	70	0,07	0,0593	40, 90

5.2.3 Výsledky výpočtu modelem WaTEM/SEDEM – 2019, 1983, 1954, 1852

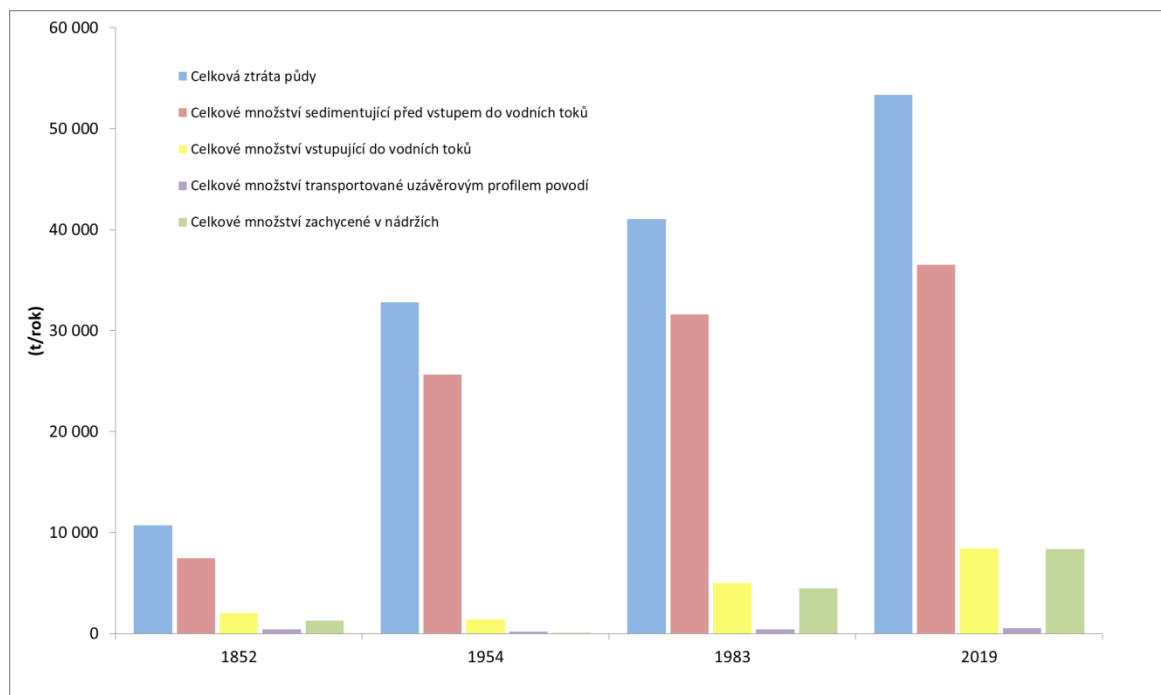
Pro současný stav a historická období byla připravena vstupní data a spuštěn výpočet v programu WaTEM/SEDEM. Některé parametry byly aktualizovány a některé byly převzaty z výpočtu (NAZV, 2010). Současný stav byl kalibrován podle měření z roku 2002 a 2020. Rok 1983 byl kalibrován podle měření z roku 2002. Pro ostatní období v historii byla použita kalibrace pro rok 1983.

Když vznikala mapa využití území pro rok 1852 a 1954, nebylo zakresleno členění pozemků na menší celky (Anýžová, 2020). V kapitole 5.2.5 Vliv mozaiky je tento vliv popsán. Zkušební výpočet s a bez mozaiky proběhl na povodí Opatovického potoka. Za předpokladu, že je toto povodí reprezentativní pro všechna povodí IV. řádu v povodí VN Vrchlice, byly výsledné hodnoty na základě této analýzy přepočteny. Celková ztráta půdy byla snížena o 23%, zbylé hodnoty byly přepočteny tak, aby zůstaly ve stejném poměru k celkové ztrátě půdy.

Celkové výsledky jsou uvedeny v tab. 7 a vyneseny do grafu (obr. 30).

Tabulka 7 Výsledky výpočtu pro historická období

[t/rok]	1852	1954	1983	2019
Celková ztráta půdy	10738	32825	41054	53343
Celkové množství sedimentující před vstupem do vodních toků	7465	25464	31613	36533
Celkové množství vstupující do vodních toků	2017	5951	4968	8444
Celkové množství transportované uzávěrovým profilem povodí	399	2269	428	548
Celkové množství zachycené v nádržích	1256	1410	4473	8366



Obrázek 30 Graf celkových hodnot výpočtu WaTEM/SEDEM, vlastní zpracování

Na výsledky je možné pohlížet jako na absolutní hodnoty. Vzhledem k rozsáhlosti území nemusí být tyto hodnoty úplně přesné, a proto je zajímavé se dívat i na vzájemné poměry.

V prvním řádku tabulky 7 je uvedena celková ztráta půdy, tedy produkce sedimentu. Zatím zde není zohledněno, kolik sedimentu se usadí na pozemku, nebo se transportuje do sítě vodních toků. Množství sedimentující před vstupem do vodních toků ukazuje, kolik sedimentu se zachytí na pozemku nebo v prostředí pod ním. Třetí a pátý řádek v součtu tvoří celkové množství, které nesedimentuje na pozemcích. Hodnota ve čtvrtém řádku udává množství sedimentu transportované uzávěrovým profilem povodí.

2019

Při současném stavu dosahuje celková ztráta půdy nejvyšší hodnoty. V tomto období se počítá s vyšší hodnotou průměrného C FAKTORU a také vyšší hodnotou R FAKTORU. Intenzivní zemědělství a častější a intenzivnější přívalové deště způsobují zvětšenou erozi. V roce 2019 se

z celkové ztráty půdy usadí před vstupem do vodních toků 68 % sedimentu, což je méně, než v ostatních obdobích (okolo 77%).

V tomto období bylo nutné navýšit kalibrační koeficienty transportní kapacity, aby se výsledný vstup sedimentu do Hamerského rybníka přiblížil naměřeným hodnotám (kap. 5.1). Takto vysoké hodnoty KTC snížily množství zachycené před vstupem do vodních toků a naopak zvýšily množství vstupující do vodních toků a nádrží. To může odpovídat zvýšené konektivité sedimentu v povodí, kdy intenzivní kultivace probíhá až do blízkosti hrany vodního toku, a kdy v povodí chybí drobné retenční prvky v těsném sousedství vodních toků a nádrží.

V současnosti prochází uzávěrovým profilem povodí pouze 1% z celkové ztráty půdy, což je nízká hodnota. Je to díky velkému počtu vodních nádrží, které se v povodí nachází, včetně VN Vrchlice. Tato hodnota bude také přímo ovlivněna poměry zachycení, které bylo někdy problematické určit.

1983

Celková ztráta půdy je v tomto období nižší než v roce 2019. Ze 41 054 t/rok se okolo 77 % nedostane do vodních toků a nádrží. Vliv na to má nižší hodnota KTC, a také nižší hodnota C FAKTORU a R FAKTORU.

VN Vrchlice a Hamerský rybník mají významný vliv na výsledné malé množství transportované uzávěrovým profilem a množství zachycené v nádržích.

1954

Vlivem mozaiky je celková ztráta půdy v tomto období nižší. Z 32 825 t/rok se okolo 78 % nedostane do vodních toků a nádrží. Vliv na to má nižší hodnota KTC.

Naopak výrazně roste množství transportované uzávěrovým profilem (7% z celkové ztráty půdy) a klesá množství zachycené ve vodních nádržích, hlavně z důvodu neexistující VN Vrchlice a mnoha dalších nádrží.

1852

Vlivem mozaiky a nižšího C FAKTORU je celková ztráta půdy v tomto období nejnižší. Z 10 738 t/rok se okolo 78 % nedostane do vodních toků a nádrží. Vliv na to má nižší hodnota KTC.

Díky Hamerskému a Pilskému rybníku je zachycena velká část sedimentu v nádržích a transport uzávěrovým profilem (necelá 4 %) není tak vysoký.

Rozdíly v celkové ztrátě půdy mezi historickými obdobími způsobují změny ve využití území. Ačkoliv zastoupení orné půdy v povodí se mění jen mírně (Anýžová, 2020), do výpočtu zde byla zahrnuta mozaika, která změnu zvýraznila.

Značná je změna počtu vodních nádrží. Nejvíce se liší rok 1954, kdy neexistovaly významné nádrže. V tab. 8 jsou hodnoty vstupů a výstupů sedimentu z vybraných vodních nádrží, které jsou svým umístěním významnější z pohledu přísunu a zachycení sedimentu. Hodnoty je možné

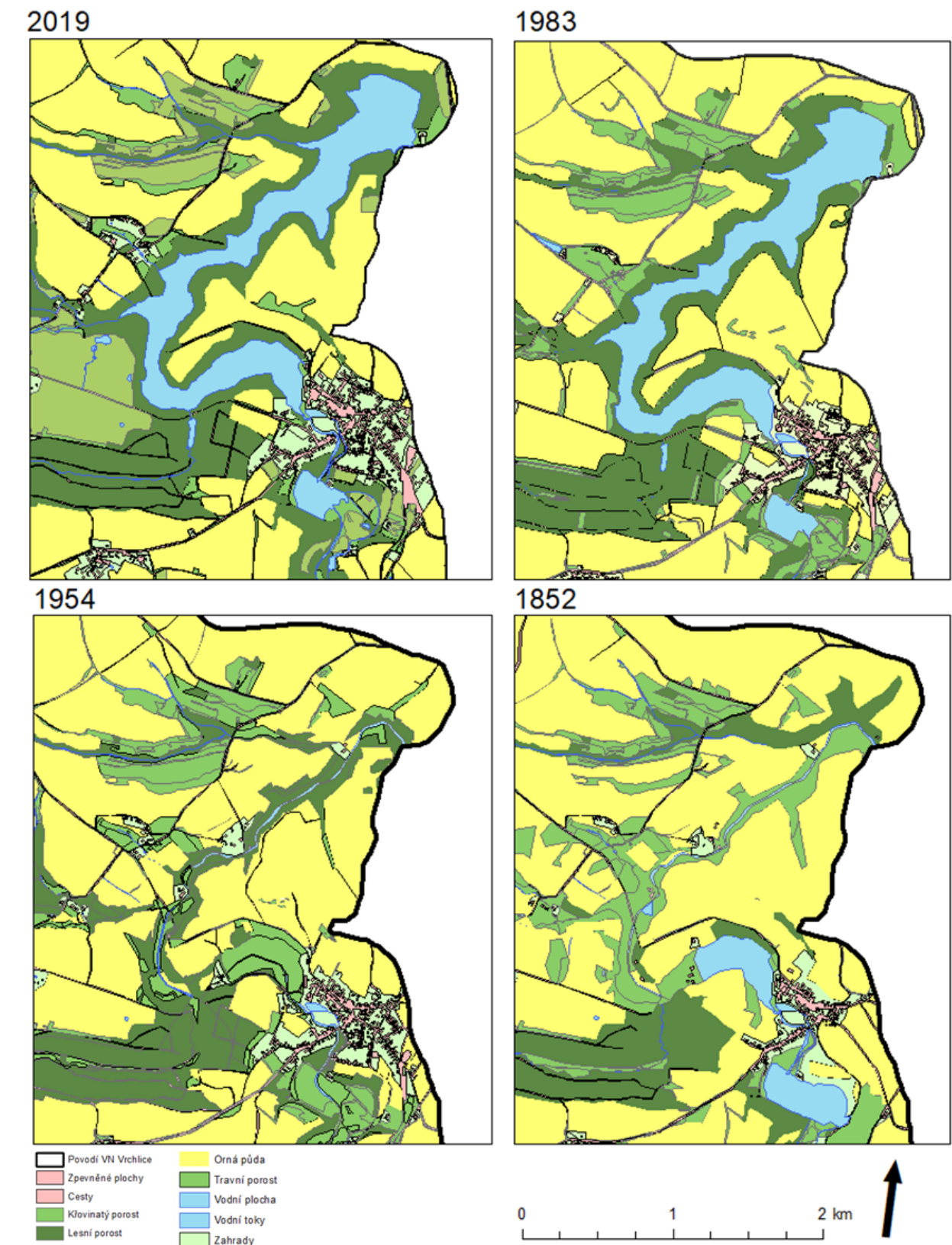
vyčíst z mapy INFLOWton, nebo z tabulky Pond Sediment Deposition. Také zde byly hodnoty v roce 1852 a 1954 přepočteny podle vlivu mozaiky a můžeme pozorovat nárůst hodnot v čase.

Tabulka 8 Ukládání sedimentu ve významných nádržích - WaTEM/SEDEM, [t/rok]

VODNÍ NÁDRŽ	POMĚR ZADRŽENÍ [%]	Množství usazené v nádrži [t/rok]			
		1852	1954	1983	2019
VN VRCHLICE	80	x	x	1003	1677
HAMERSKÝ	82	875	x	1380	2119
PILSKÝ RYBNÍK	80	166	x	x	x
PROSÍK	50	172	164	213	390
BŘEZOVSKÝ	81	229	228	212	424

(x = VN v daném období neexistovala)

Obrázek 31 zachycuje vývoj využití území v okolí VN Vrchlice. V roce 1852 existuje starý Pilský rybník a Hamerský rybník s větší plochou hladiny. V roce 1954 není zachován ani jeden z nich, a od roku 1971 je obnoven Hamerský rybník a postavena VN Vrchlice.



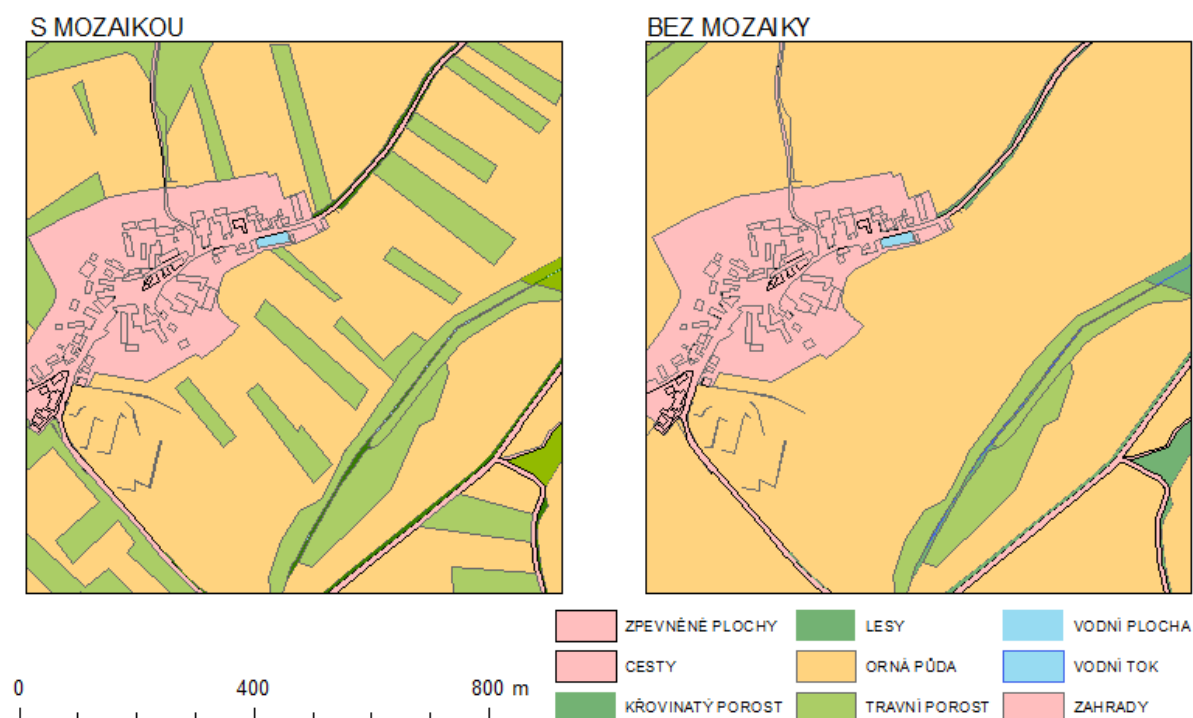
Obrázek 31 Vývoj využití území v okolí VN Vrchlice, 1852 – 2019, vlastní zpracování

Z tabulky Project River Sediment lze určit, do kterého úseku vodního toku vstupuje nejvíce sedimentu (sloupec Hillslope sediment input). Výsledek je uveden v kapitole 5.3.

5.2.4 Vliv mozaiky - 1938 - povodí Opatovického potoka - 1-04-01-028

Dělení orné půdy, jak bylo typické před kolektivizací v 50. letech 20. století, mělo svůj vliv na transport sedimentu v povodí. V předchozích výpočtech ale nebyl tento vliv zahrnut, protože nebyla k dispozici mapa využití území pro celé povodí VN Vrchlice. Zpracovaná byla v rámci bakalářské práce (Winterová, 2019) pouze pro jedno povodí IV. řádu na základě Leteckých měřických snímků z roku 1938 (Ministerstvo obrany ČR, 2019). Na tomto povodí proto proběhl výpočet s mozaikou a výpočet bez mozaiky. Tyto hodnoty pak byly srovnány mezi sebou a také s hodnotami, které poskytl výpočet na celém povodí VN Vrchlice.

Dané povodí IV. řádu – označení 1-04-01-028 - má rozlohu 24,34 km², což jej dělá největším dílčím povodím z celého povodí VN Vrchlice. Travní porost je zde v roce 1938 zastoupen na 4,38 km² a orná půda na 13,85 km², zatímco v roce 1954 (na mapě bez mozaiky) má travní porost zastoupení na 1,46 km² a orná půda 16,20 km² (Winterová, 2019) a (Anýžová, 2020).

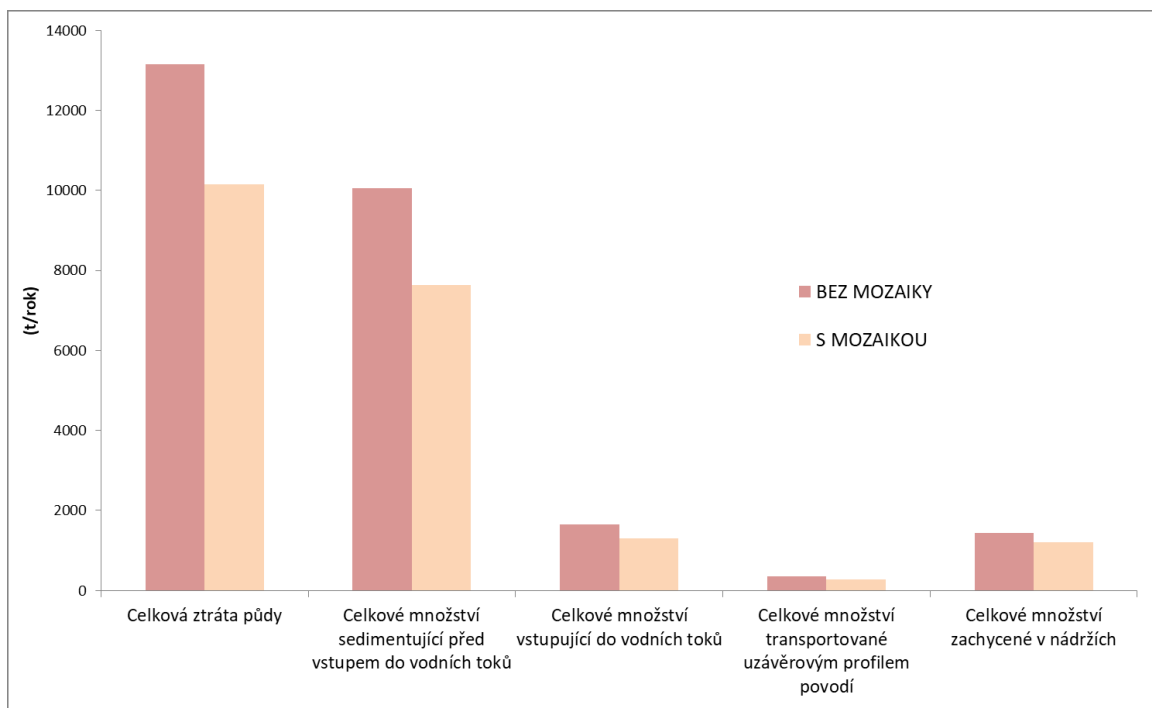


Obrázek 32 Mapa využití území s mozaikou a bez mozaiky, vlastní zpracování

Členění orné půdy má při výpočtu ve WaTEM/SEDEM vliv na vstupní mapy PARCEL a C FAKTOR, dále na přerušení odtoku.

Při výpočtu WaTEM/SEDEM se uvažuje plná propustnost mezi dvěma pozemky s ornou půdou. Ve skutečnosti může být propustnost snížena, pak by vzrostl vliv mozaiky, došlo by k většímu zachytávání sedimentu v povodí.

Výsledky jsou vyneseny do grafu (obr. 33).



Obrázek 33 Graf srovnání celkových hodnot výpočtu bez mozaiky a s mozaikou

Jak lze očekávat, mozaika má vliv na celkovou ztrátu půdy. Důvodem je vyšší zastoupení orné půdy, a tím pádem také vyšší průměrný C FAKTOR. Mozaika snižuje produkci sedimentu o 23 %.

V tab. 9 jsou uvedeny procentuální podíly jednotlivých hodnot k celkové ztrátě půdy. Tyto poměry se bez mozaiky a s mozaikou významně neliší.

Tabulka 9 Srovnání podílů celkových hodnot výpočtu bez mozaiky a s mozaikou

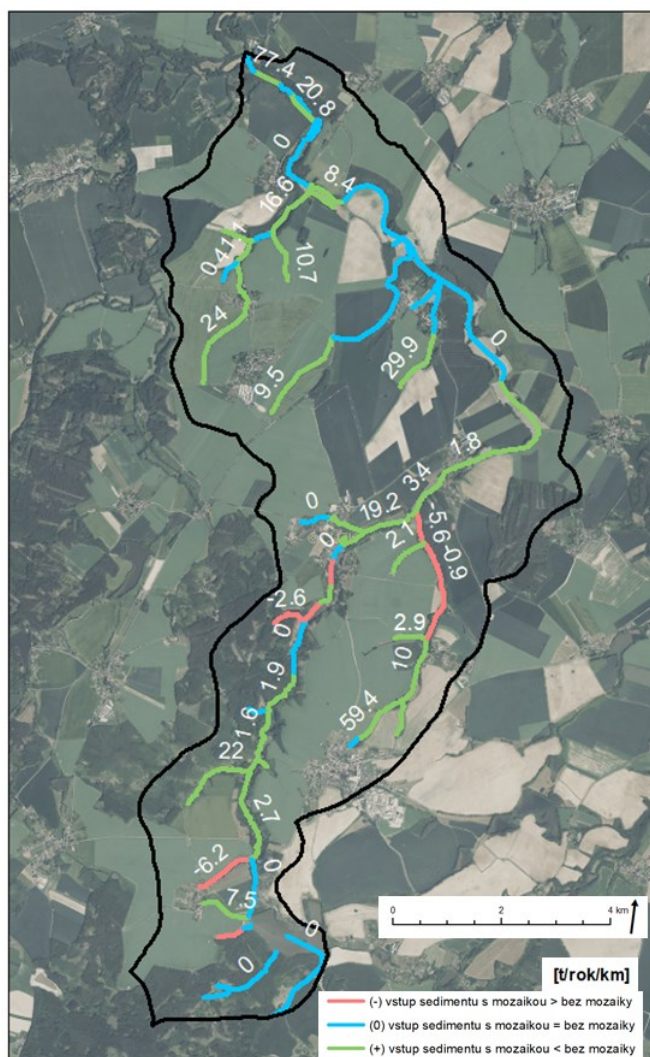
[%]	BEZ MOZAIKY	S MOZAIKOU
Celková ztráta půdy	100.0	100.0
Celkové množství sedimentující před vstupem do vodních toků	76.6	75.3
Celkové množství vstupující do vodních toků	12.6	12.9
Celkové množství transportované uzávěrovým profilem povodí	2.7	2.6
Celkové množství zachycené v nádržích	10.9	11.9

Následující tabulka (tab. 10) ukazuje procento zachycené v konkrétní nádrži (Prosík a Březovský rybník) z celkové ztráty půdy. Prosík se nachází v blízkosti uzávěrového profilu povodí Opatovického potoka, můžeme ho proto považovat za nádrž zahrnující vlivy z celého povodí. Ani zde nedochází k výrazné změně podílu sedimentu zachyceného v nádržích.

Tabulka 10 Srovnání podílů zachycení v nádržích bez mozaiky a s mozaikou

Zachycení [%]	BEZ MOZAIKY	S MOZAIKOU
Prosík	2.60	2.58
Březovský rybník	4.41	4.83

Mimo celkové hodnoty je možné se podívat na jednotlivé úseky vodních toků. Na obr. 34 je zobrazen rozdíl vstupů do úseků toků, přepočtený na 1 km délky. Zeleně jsou vyznačeny úseky s kladnou hodnotou, do nich vstupuje méně sedimentu s mozaikou než bez mozaiky. Červeně jsou naopak vyznačeny úseky se zápornou hodnotou, do nich vstupuje více sedimentu s mozaikou než bez mozaiky. Úseky, na které nemá mozaika vliv a rozdíl je = 0, jsou označeny modře. Lze tedy říci, že na pozemcích orné půdy přilehlých k zeleně vyznačeným úsekům VT má mozaika opodstatnění.



Obrázek 34 Rozdíl v množství sedimentu přicházející do jednotlivých úseků vodních toků na 1 km délky [t/rok/km], povodí Opatovického potoka (ČÚZK, 2010a, vlastní zpracování)

5.3 Návrh opatření na ohrožených pozemcích

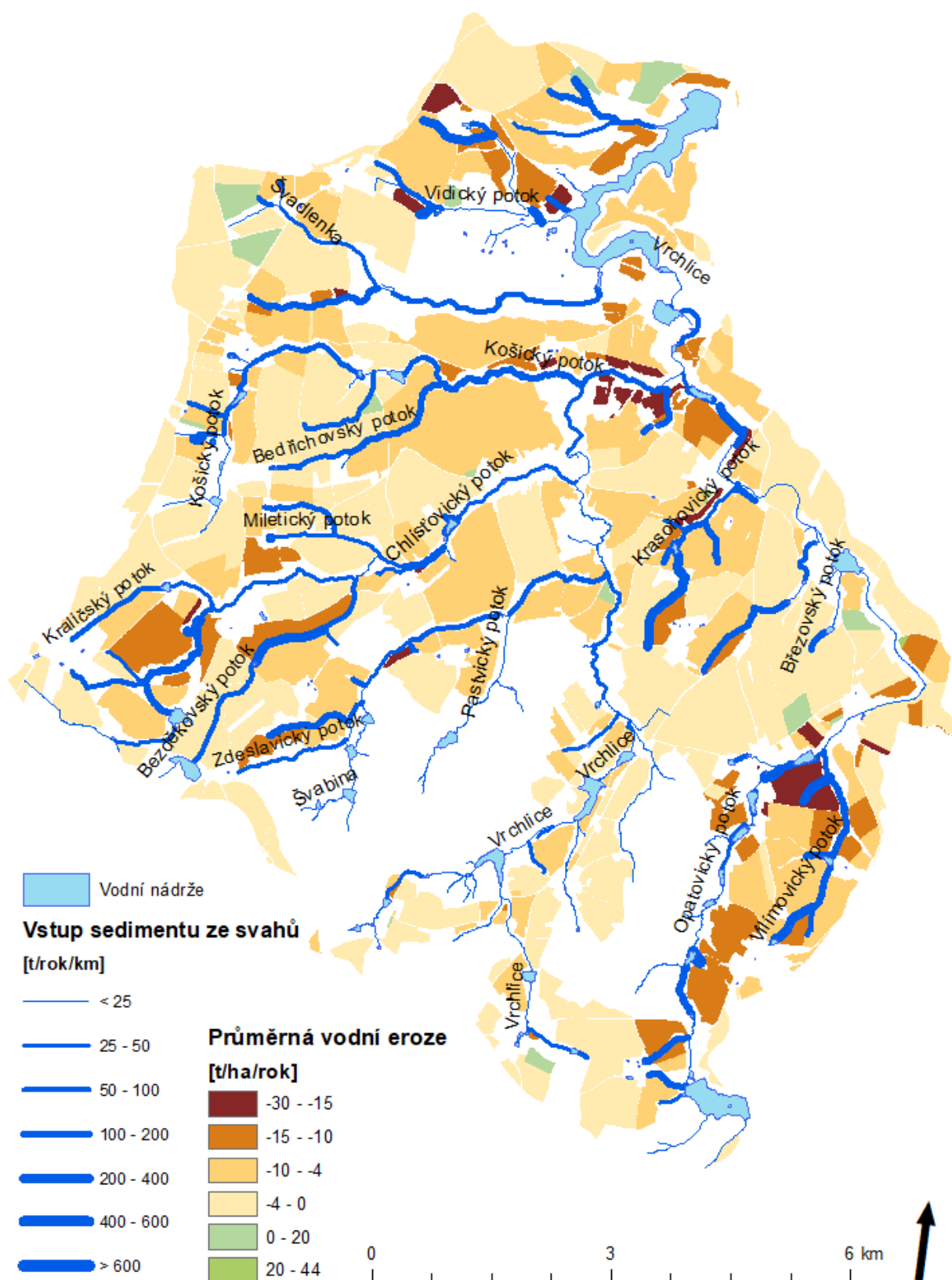
S využitím výsledků z modelu je možné nalézt pozemky nejvíce ohrožené vodní erozí a také úseky vodních toků s největším průměrným ročním přísunem sedimentu.

5.3.1 Nalezení ohrožených pozemků a změna C FAKTORU

Z tabulky Project River Sediment lze určit, do kterého úseku vodního toku vstupuje nejvíce sedimentu z přilehlých svahů – pozemků (sloupec Hillslope sediment input). Tato hodnota byla přepočtena na 1 km délky.

Model také připraví jako výstup mapu Netto Water Erosion in ton per ha, kde má každý pixel kladnou či zápornou hodnotu. Kladná hodnota znamená, že se zde usadí sediment, záporná hodnota znamená ztrátu půdy. Na tomto rastru lze provést zonální statistiku na pozemcích orné půdy a zjistit tak, na kterém pozemku je v průměru největší ztráta půdy.

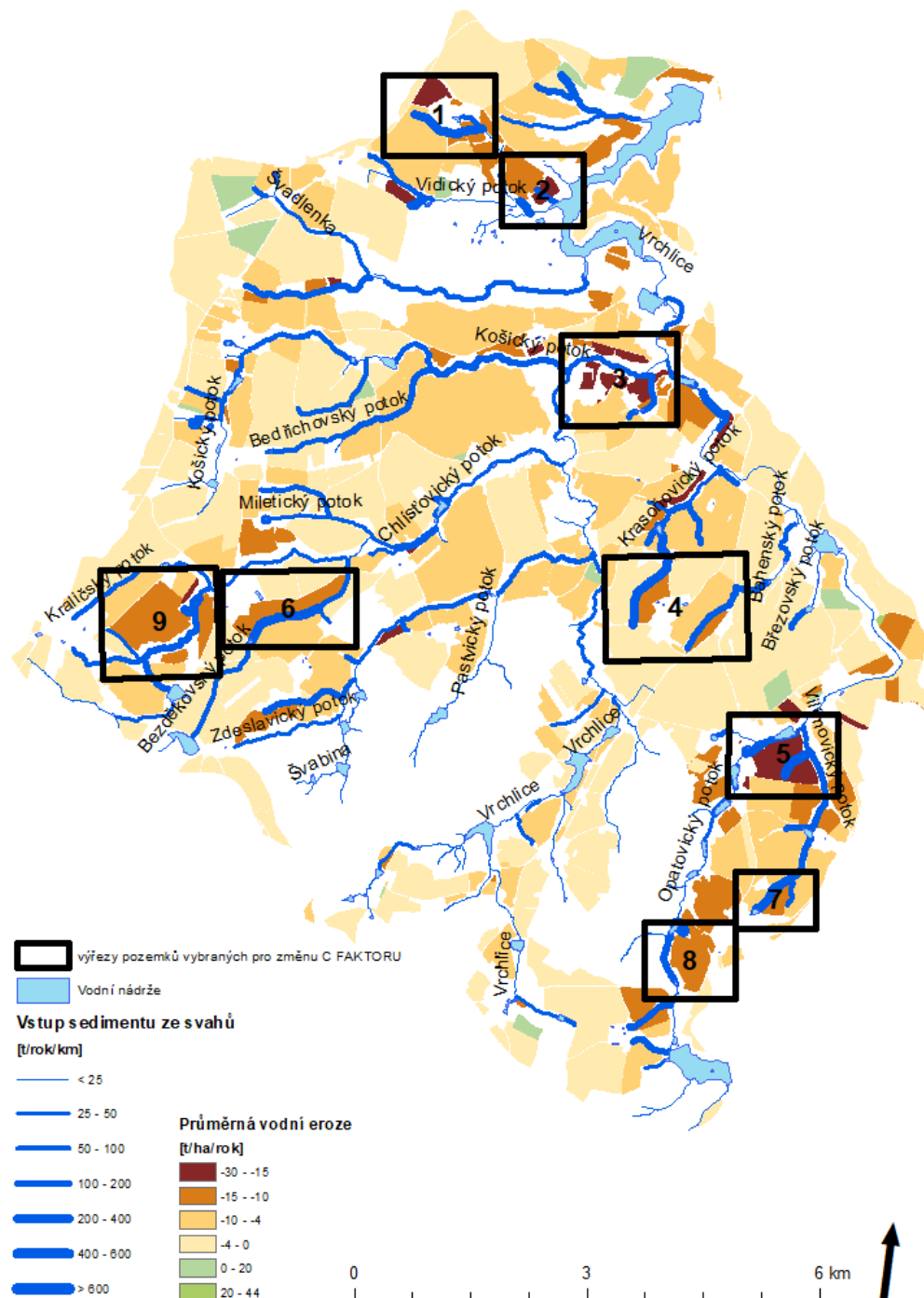
Na obrázku 35 je kombinace těchto dvou výstupů pro současný stav. Tloušťka linie toku vyznačuje hodnotu Hillslope Sediment Input přepočtenou na jeden kilometr délky. Barva pozemku udává průměrnou roční hodnotu vodní eroze. Záporné hodnoty znamenají ztrátu půdy, kladné hodnoty depozici půdy. Lze poměrně dobře určit, která místa jsou erozí nejvíce zasažena a zároveň mají vliv na vodní toky.



Obrázek 35 Průměrná vodní eroze a průměrný roční vstup sedimentu ze svahu do vodních toků, na 1 km délky, v roce 2019, vlastní zpracování

V blízkosti pozemků s vyšší ztrátou půdy (zápornou hodnotou vodní eroze) se nacházejí úseky vodních toků, do kterých vstupuje vyšší množství sedimentu. Na základě těchto dat byly vybrány pozemky, kterým byla přiřazena nová hodnota C FAKTORU = 0,12. To je průměrná hodnota protierozního osevního postupu (Dostál, 2020). Celkově byla tato hodnota změněna na ploše 3,06 km², což tvoří 5,7 % plochy celkové orné půdy.

Vybrané pozemky jsou vyznačeny ve výřezech (obr. 36):



Obrázek 36 Výřezy pozemků vybraných pro změnu C FAKTORU

5.3.2 Výsledky návrhového výpočtu

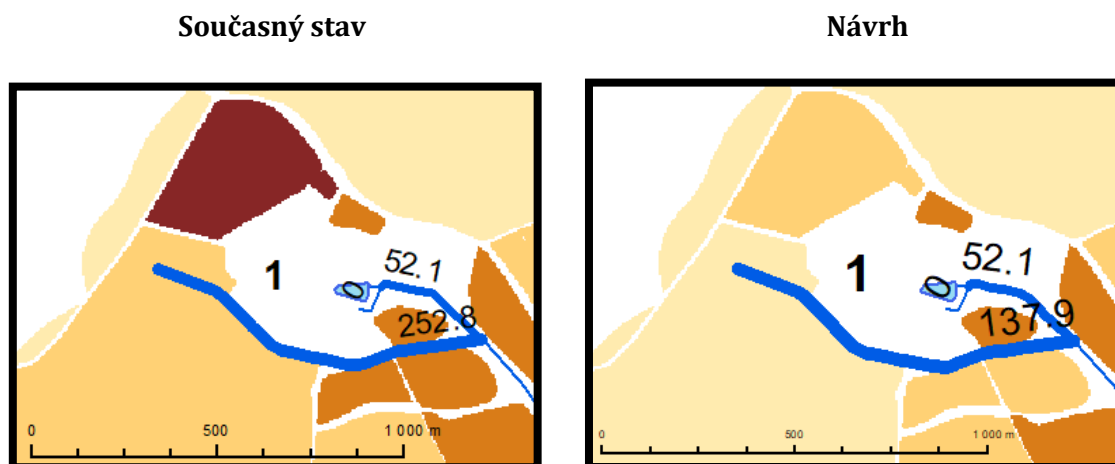
Změna C FAKTORU proběhla na necelých 6 % plochy orné půdy, celková ztráta půdy klesla o 5,3 %.

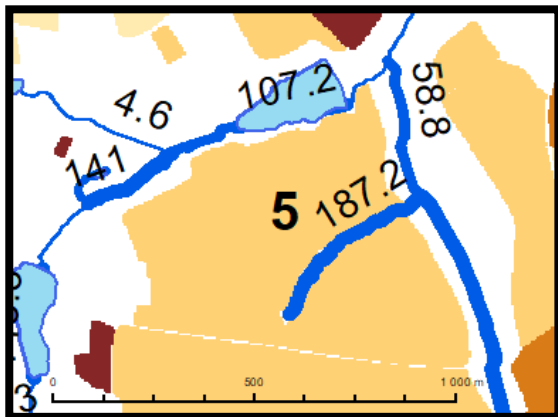
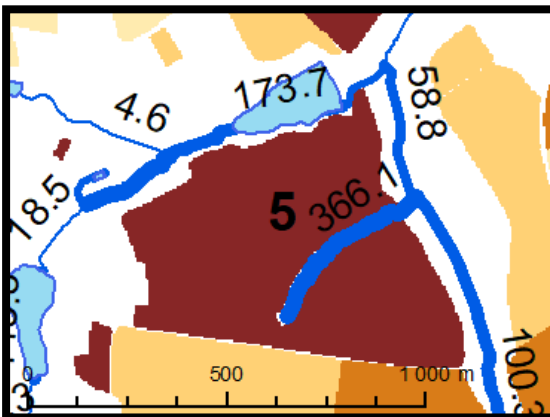
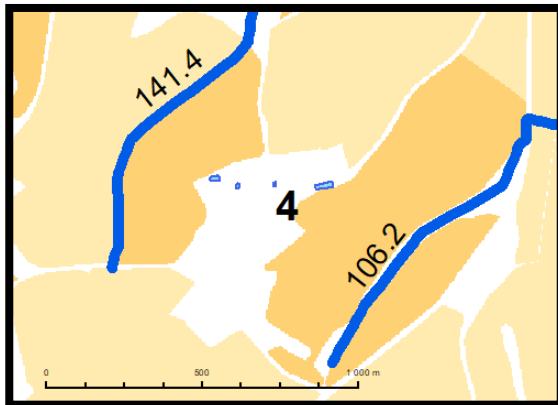
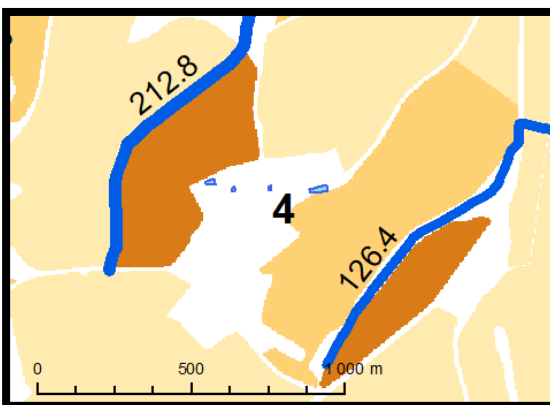
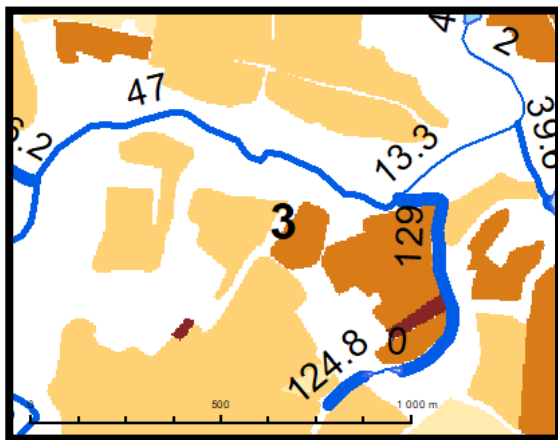
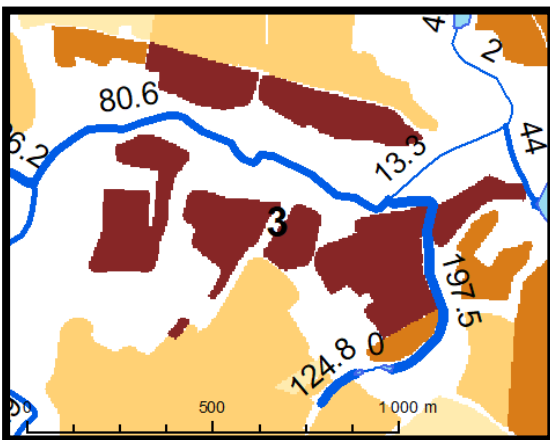
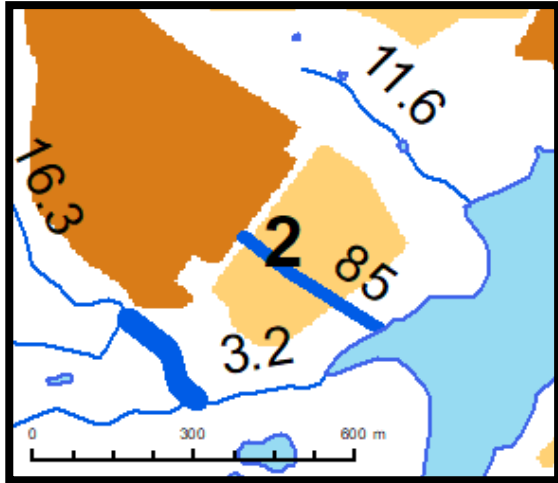
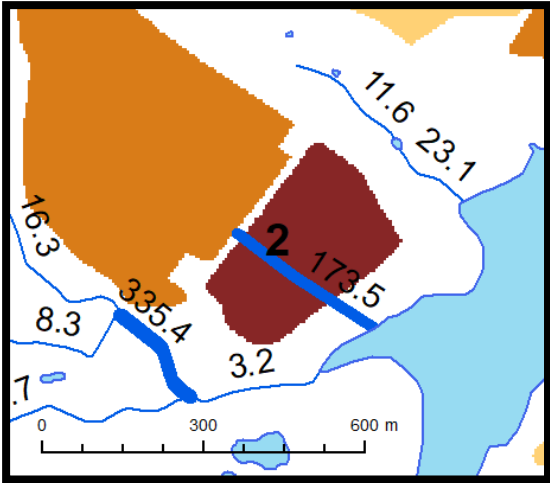
Tabulka 11 Celkové výsledky návrhového výpočtu

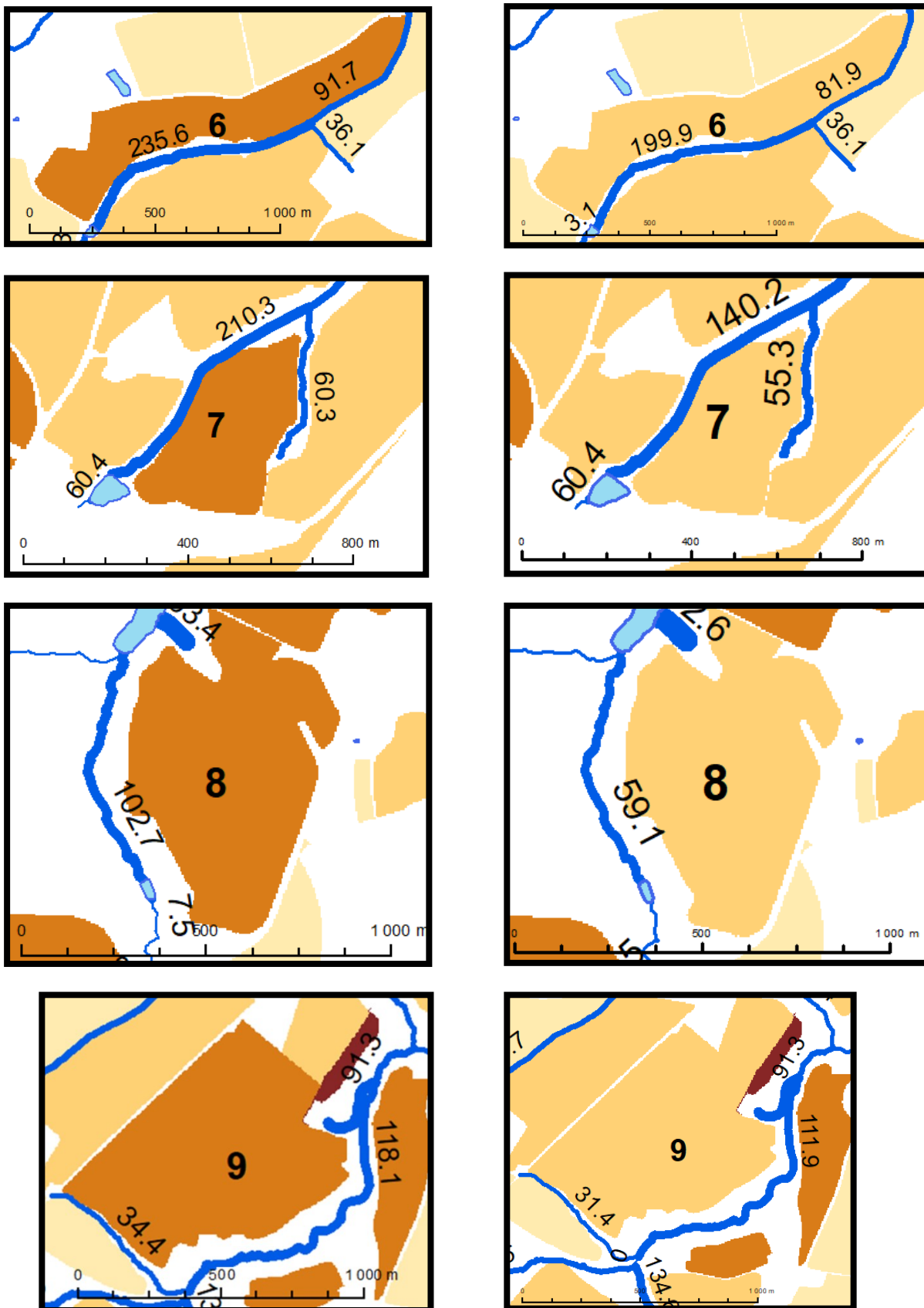
[t/rok]	Současný stav	Návrh
Celková ztráta půdy	53343	50527
Celkové množství sedimentující před vstupem do vodních toků	36533	35283
Celkové množství vstupující do vodních toků	8444	7833
Celkové množství transportované uzávěrovým profilem povodí	548	455
Celkové množství zachycené v nádržích	8366	7410

Změna C FAKTORU z původních 0,265811 na 0,12 je poměrně výrazná a svůj vliv to potvrdilo i na vstup sedimentu do přilehlých úseků vodních toků.

Přehledné výřezy pozemků, kde proběhla změna, jsou uvedeny v následujícím obrázku (obr. 37) Levá strana ukazuje současný stav, vpravo je výsledek po návrhu. Čísla udávají průměrný roční přísun sedimentu do úseku vodního toku přepočtený na 1 km. V úsecích dochází obvykle k 50 % poklesu. Někde dochází i 66 % (číslo 4). U čísla 9 byl chybně zvolený pozemek, protože změna C faktoru výrazně výsledek neovlivnila.







Obrázek 37 Výřezy s pozemky s navrženou změnou osevního postupu, vlastní zpracování

5.4 Diskuze

Jako součást praktické části této práce proběhlo měření v terénu. Tato data pak sloužila ke kalibraci modelu WaTEM/SEDEM pro současný stav (2019) - a historická období (1983, 1954, 1852). Byl posouzen vliv mozaiky. Na závěr byl zhodnocen vliv změny osevňovacího postupu na půdoochranný.

Skutečné určení množství sedimentu bylo určeno odpichováním bodů z lod'ky. Metodu bych označila za poměrně přesnou a jednoduchou. Vyžaduje sice vybavení jako je loď, lať a GPS, nejsou to ale položky s jedním specifickým účelem a proto si je lze také vypůjčit. Počasí ovlivňuje spíše osobní pohodu než samotné měření, ačkoliv silný vítr by mohl komplikovat plutí a déšť by komplikoval zapisování hodnot.

Přesnost výsledků je odvozena od množství změřených bodů. Samozřejmě platí, že čím více bodů změříme, tím přesnější výsledky získáme. Je ale nutné vyvážit časové možnosti vůči požadované přesnosti. Nejistotu do měření vnáší neznalost přesného tvaru dna, a proto se může stát, že nedojde k zaznamenání významných prohlubní nebo naopak nánosů sedimentu. To by ale mělo být z větší části eliminováno větší hustotou měřených bodů. Další nejistotou v měření je původní dno. To je potřeba latí narazit, ne vždy může být ale jeho naražení s jistotou určené a z hlediska fyzické síly možné. Určitá chyba je vnesena při interpolování hodnot z bodů. Největší nejistotu ale vnesla místa s tak velkým množstvím sedimentu, že tam měření z lod'ky neproběhlo. Je zřejmé, že od nějaké doby zde usazování ustalo, protože zde již voda přestala proudit. Častější měření a pozorování by přineslo spolehlivé hodnoty, o jaké množství sedimentu se jedná, případně lze sledovat historická ortofoto. Celkově považuji metodu pro dané účely za spolehlivou.

Model WaTEM/SEDEM posloužil pro výpočet ztráty půdy, jejího transportu a depozice v několika historických a současných scénářích. Program má příjemné uživatelské prostředí a nároky na vstupní data jsou přiměřené, lze ho tedy použít pro větší území. Určitě záleží, zda umíme získávat podklady a zjišťovat parametry pro dané území. Pro začínajícího uživatele může být ze začátku komplikované připravit správně všechna data tak, aby model počítal správně. Osobně mi zabralo několik týdnů seznámit se se způsobem výpočtu, přípravou dat a jejich formátem. Po osvojení je ale práce poměrně snadná. Jedná se o empirický model a tak je nutné ho kalibrovat. K tomu sloužila měření z roku 2002 a 2020, a měnily se hodnoty transportní kapacity. Pro přesnější nastavení parametrů by bylo nutné provést měření skutečného množství sedimentu v dalších nádržích, podrobněji určit jejich poměr zadržení a mít lepší přehled o množství sedimentu vnesené při extrémních událostech.

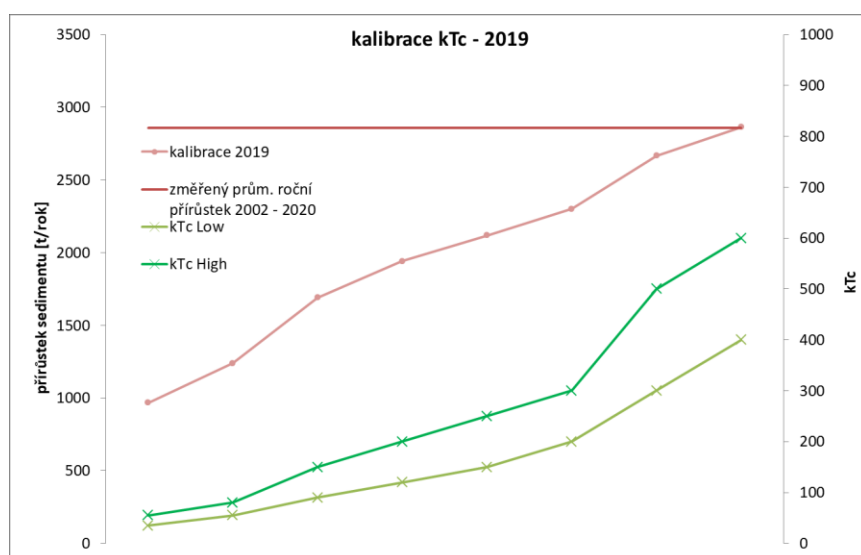
Každý parametr vnáší určitou nejistotu do výpočtu, protože se jedná o průměrované hodnoty. Hodnota R FAKTORU byla určena z měření ČHMÚ. Zda byly do měření zahrnuty extrémní události záleží na umístění měrné stanice. Jisté je, že extrém z roku 2013 není do dlouhodobého průměru započítán, protože hodnota R FAKTORU pro současný stav vychází z dat 2003 – 2012. Na základě odhadu podloženém výpočtem objemu povodňové vlny násobenou naměřenou hodnotou koncentrace mohla tato událost vnést do Hamerského rybníka jednorázově 175 tun sedimentu pouze ve dvou letních epizodách roku 2013 a 54 tun při dvou epizodách v létě roku 2010. K upřesnění C FAKTORU jsem se snažila získat osevňovací postupy přímo od zemědělských

společností. Z 5 kontaktovaných společností mi ho nakonec poskytla jedna společnost. Zde by pomohlo strávit více času komunikací a dotazováním. Pokud neznáme osevňovací postup pro každý jednotlivý pozemek v povodí, jedná se také o průměrnou hodnotu. Mapy využití území jsou poměrně přesné, u historických scénářů ale mohlo dojít k záměně například orné půdy a travního porostu, nemusely být zohledněny všechny liniové prvky.

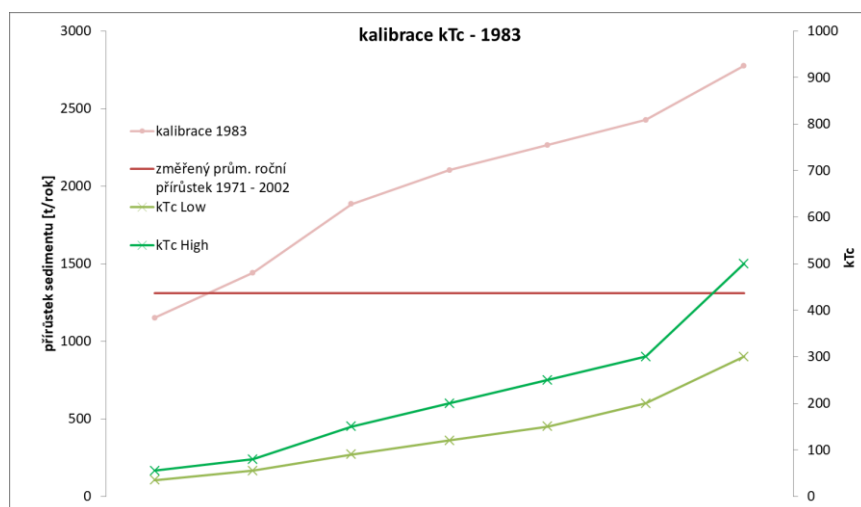
Vliv mozaiky je možné sledovat pomocí modelu WaTEM/SEDEM poměrně snadno. Stačí upravit mapu PARCEL a C FAKTOR. Z výsledků lze určit, jak velký vliv mozaika má a pro které pozemky je její význam větší. Hodnoty lze použít k upravení výsledků historických období, kde mozaika existovala.

Při kalibraci byly nastaveny hodnoty kTc tak, aby se co nejvíce přiblížily měřeným hodnotám. Na druhou stranu nebylo nutné dosáhnout přesné rovnosti, protože hodnoty z měření skutečného množství sedimentu v Hamerském rybníce nejsou absolutně přesné.

Průběh kalibrace je vyneseno v obr. 38 a 39.



Obrázek 38 Průběh kalibrace kTc pro rok 2019, vlastní zpracování



Obrázek 39 Průběh kalibrace kTc pro rok 1983, vlastní zpracování

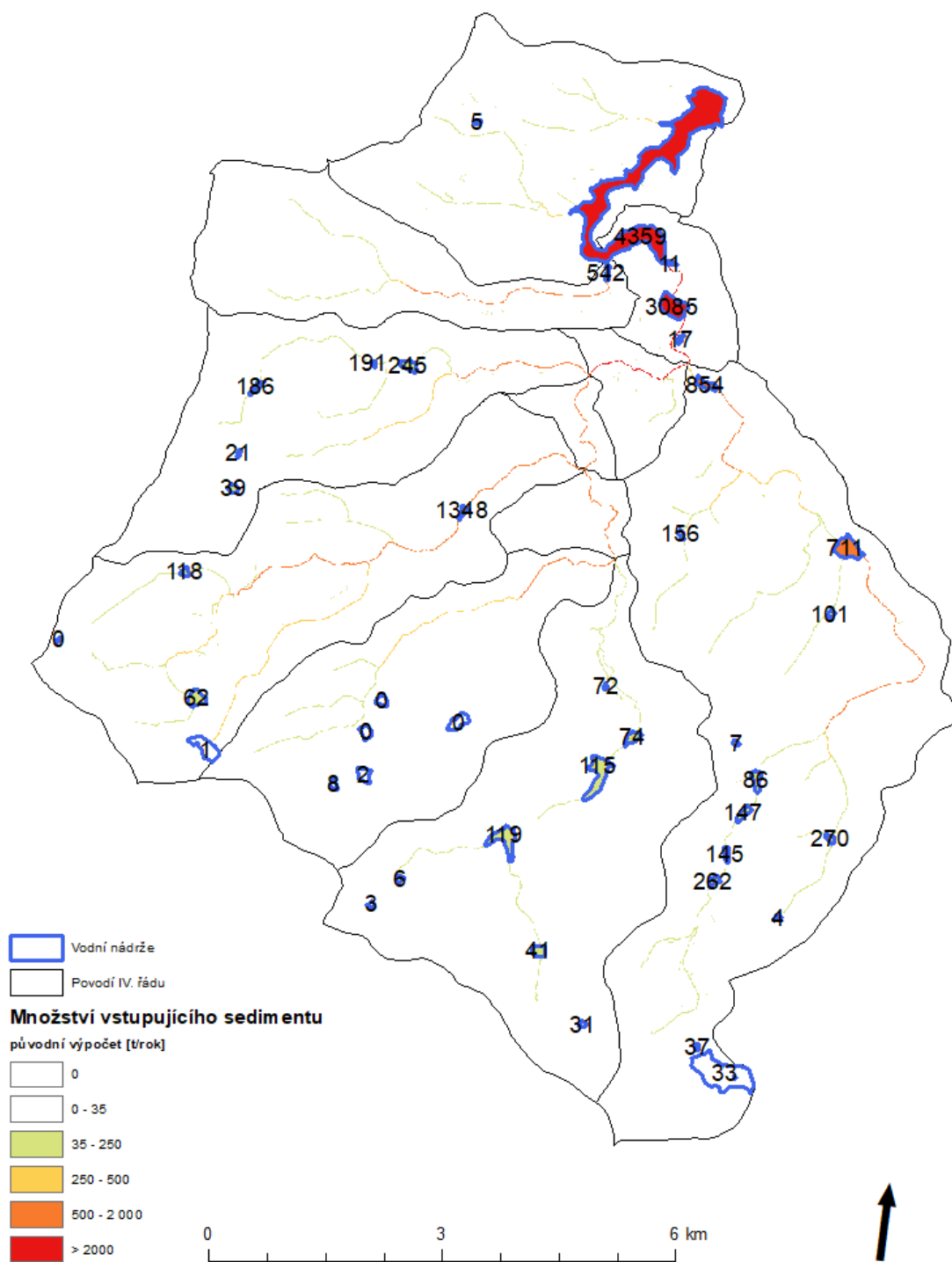
Jedno z možných půdoochranných opatření je změna osevního postupu. Půdoochranný osevní postup dosahuje hodnot C FAKTORU 0,10-0,12. Na základě výpočtu pro současný stav byly vybrány pozemky, které jsou nejvíce ohrožené erozí a přispívají značným množstvím sedimentu do úseků vodních toků. Snížením C FAKTORU vybraným pozemkům se podařilo snížit hodnotu vstupujícího sedimentu o 50%, někde až o 65%. Za předpokladu, že pro zemědělské společnosti není žádoucí změnu osevního postupu realizovat, bylo snahou vybrat co nejméně pozemků. Další změny by bylo možné do výpočtu také zahrnout, například přerušení pozemků travními pásy, zatravnění údolnic a podobné.

K dispozici jsem měla původní výpočet z projektu (NAZV, 2010), který proběhl na rozlišení 10 x 10 m. Podrobnost mapy využití území byla menší a také byl menší počet nádrží – model počítal s 42 nádržemi. Nový výpočet s rozlišením 5 x 5 m počítal se 137 nádržemi. Výpočet se také lišil dalšími vstupními parametry, jako R FAKTOR a C FAKTOR. Vlivem těchto rozdílů došlo k získání odlišných celkových hodnot a vstupů sedimentu do jednotlivých nádrží. K porovnání slouží tab. 12.

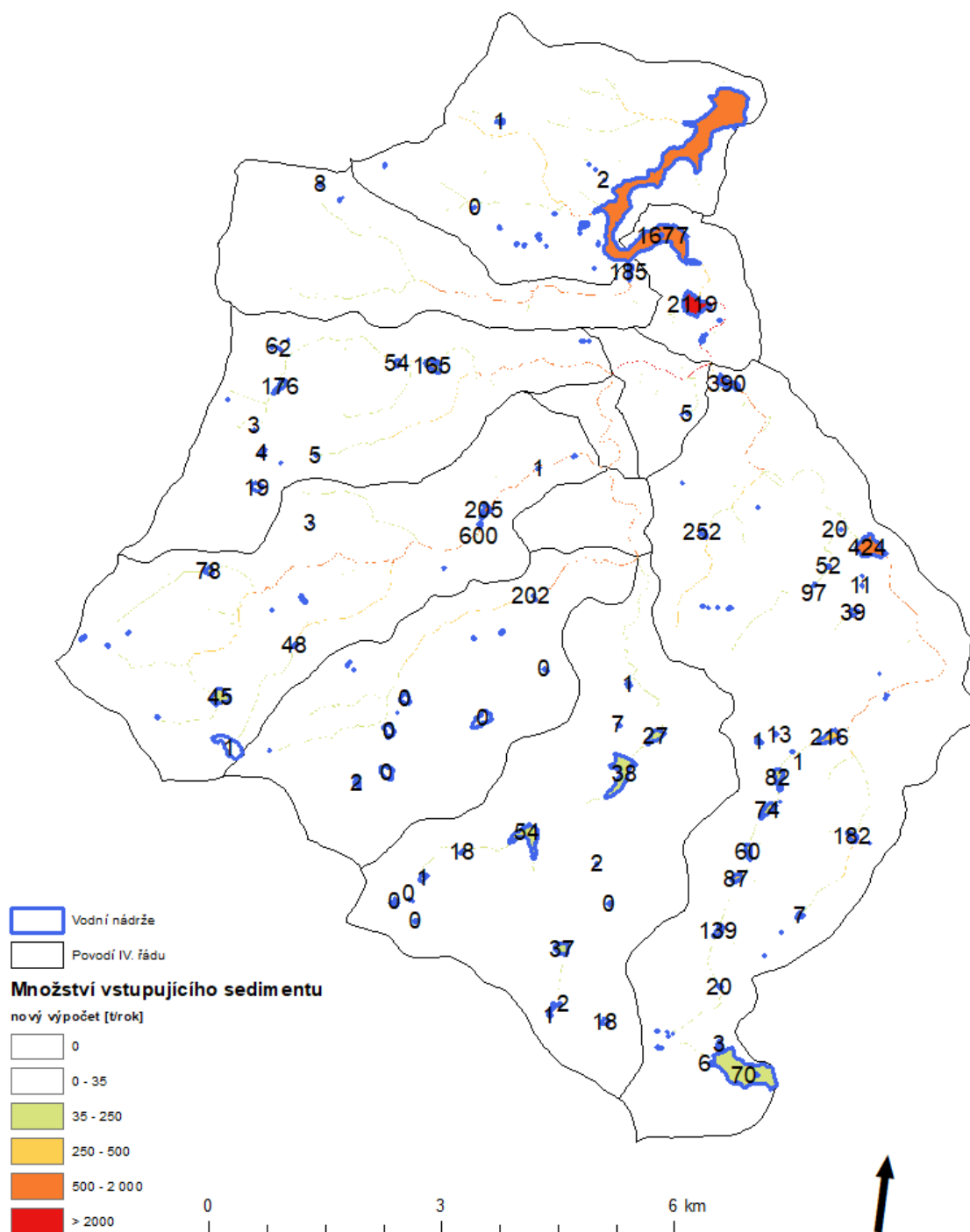
Tabulka 12 Tabulka hodnot výpočtu pro původní a nový výpočet.

[t/rok]	Původní výpočet	Nový výpočet
Celková ztráta půdy	42605	53266
Celkové množství sedimentující před vstupem do vodních toků	32375	37158
Celkové množství vstupující do vodních toků	3185	7998
Celkové množství transportované uzávěrovým profilem povodí	883	532
Celkové množství zachycené v nádržích	7144	8109
Množství sedimentu vstupující do VN Vrchlice	4359	2096
Množství sedimentu vstupující do Hamerského rybníka	3085	2584

Následující obrázky 40 a 41 zobrazují množství sedimentu vstupující do vodní nádrže.



Obrázek 40 Množství sedimentu vstupující do každého elementu, původní výpočet (NAZV, 2010, vlastní zpracování)



Obrázek 41 Množství sedimentu vstupující do každého elementu, nový výpočet, vlastní zpracování

Množství sedimentu vstupující do vodní nádrže je přímo ovlivněno poměrem zachycení v Hamerském rybníce. V původním výpočtu byl nastaven na 11 %, což vychází z Bruneho křivek za použití chybného objemu nádrže (kap. 5.2.2 PONDS). V novém výpočtu je sediment více redukován, aby usazený sediment v Hamerském rybníce odpovídal změřenému skutečnému množství.

6 Závěr

Teorie i praktické poznatky dokládají, že eroze je jev, který způsobuje mnoho odlišných problémů. Je proto žádoucí se tímto procesem zabývat a snažit se mu předcházet, případně zmírňovat jeho dopady.

Cílem této práce bylo popsat transport splavenin v povodí VN Vrchlice, sledovat i historická období a vliv změny využití území.

V úvodní části jsem charakterizovala přírodní podmínky oblasti. Stručně jsem popsala i dějiny, protože ovlivňují vývoj využití území a způsob zemědělství.

V teoretické části jsem popsala problematiku vodní eroze, možnosti jejího modelování a skutečného měření sedimentu v terénu.

Praktická část se skládala ze tří částí. Tou první bylo měření objemu sedimentu v Hamerském rybníce, který slouží jako záchytný prvek před VN Vrchlice. Měření v terénu jsem se přímo zúčastnila a poté jsem vyhodnocovala data. K těmto datům mi byly poskytnuté údaje z měření v roce 2002, které proběhlo stejnou metodou. Z těchto měření bylo možné odvodit průměrný roční přírůstek sedimentu v Hamerském rybníce. Z výpočtů vyplynulo, že se rychlost ukládání sedimentu více než zdvojnásobila.

Druhá část se týkala modelu WaTEM/SEDEM. Ten jsem využila k modelování ztráty půdy a transportu do vodních toků a nádrží. Příprava data ve správném formátu a za dodržení všech podmínek mi zabrala poměrně dlouhou dobu. Některé parametry jsem aktualizovala pro současný stav, jiné jsem převzala z původních výpočtů katedry. Jako podklad mi dále sloužily mapy využití území, které vznikly z bakalářských prací (Winterová, 2019) a (Anýžová, 2020). Tyto hodnoty jsem poté porovnávala. Je nutné zmínit, že tyto mapy vznikly z historických podkladů, takže mohou vnášet do výpočtu určitou chybu – například rozdělení pozemků na menší části, rozlišení orné půdy a travního porostu. Abych zjistila vliv mozaiky, provedla jsem dva stejné výpočty na povodí IV. řádu, jednou s členěním orné půdy na menší celky a podruhé bez této mozaiky. Mozaika snižovala celkovou ztrátu půdy o 23 %, což je dáno změnou zastoupení orné půdy. Vliv na transport sedimentu do toku už nebyl tak výrazný. Model byl kalibrován na měření v Hamerském rybníce. Zde by byl prostor pro zpřesnění dalším měřením, v jiné nádrži.

Ve třetí části byly pro současný stav vytipovány nejvíce ohrožené pozemky. Těm byl upraven osevní postup na půdoochranný a tím byla snížena hodnota C FAKTORU. Výpočtem bylo možné sledovat snížení celkové ztráty půdy a množství sedimentu vstupujícího do vodních toků o 50 až 65 %.

Na závěr jsem v diskuzi pospala výhody a nevýhody použité metody měření a modelování. Dále jsem diskutovala nejistoty, které vznikají vstupními podklady a při určování různých parametrů, které bývají průměrnou hodnotou. Srovnala jsem výsledky mého výpočtu s původním výpočtem v jiném rozlišení.

Reference

Literatura:

ANÝŽOVÁ R., 2020: Vliv využití území na retenční kapacitu krajiny v povodí VN Vrchlice. Bakalářská práce, ČVUT, Praha. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/88922> ; (dne 10.10.2020).

BERANOVÁ, M., A. KUBAČÁK, 2010: Dějiny zemědělství v Čechách, na Moravě a ve Slezsku. Libri, Praha, ISBN 978-80-7277-113-4.

BIČÍK, I., V. JANČÁK, 2005: Transformační procesy v českém zemědělství po roce 1990. Katedra sociální geografie a regionálního rozvoje Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy, Praha, ISBN 80-86561-19-4. Dostupné z: https://web.natur.cuni.cz/~ksgrsrsek/jancak/download/zemedelstvi_ceska.pdf (dne 5.10.2020).

BORRELLI, P., K. VAN OOST, K. MEUSBURGER, C. ALEWELL, E. LUGATO a P. PANAGOS, 2018: A step towards a holistic assessment of soil degradation in Europe: Coupling on-site erosion with sediment transfer and carbon fluxes. Environmental Research., (161), 291-298. ISSN 0013-9351.

BRUNE G. M., 1953: Trap efficiency of reservoirs. Trans Am. Geophys. Union. Vol., 34, No. 3, p. 407-418.

CAMARO-D, 2017: Cooperating towards Advanced Management Routines for land use impacts on the water regime in the Danube river basin.

ČÚŽK, 2010a: Ortofoto České republiky – úvod. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(hbfay5oqqceekubvhikepsyq\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&text=ortofoto_info&side=ortofoto&menu=23](https://geoportal.cuzk.cz/(S(hbfay5oqqceekubvhikepsyq))/Default.aspx?mode=TextMeta&text=ortofoto_info&side=ortofoto&menu=23) (dne 12.12.2020).

ČÚŽK, 2010b: Letecké měřické snímky – úvod. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(hbfay5oqqceekubvhikepsyq\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&text=lms&side=lms&head_tab=sekce-02-gp&menu=40](https://geoportal.cuzk.cz/(S(hbfay5oqqceekubvhikepsyq))/Default.aspx?mode=TextMeta&text=lms&side=lms&head_tab=sekce-02-gp&menu=40) (dne 3.10.2020).

ČÚŽK, 2010c: ZABAGED® - polohopis - úvod. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(zabxmbmrtbttoftycyaqpsk\)\)/default.aspx?mode=TextMeta&text=dSady_zabaged&side=zabaged&menu=24](https://geoportal.cuzk.cz/(S(zabxmbmrtbttoftycyaqpsk))/default.aspx?mode=TextMeta&text=dSady_zabaged&side=zabaged&menu=24) (dne 18.10.2020).

DEVÁTÝ J., T. DOSTÁL, R. HÖSL, J. KRÁSA, P. STRAUSS, 2019: Effects of historical land use and land pattern changes on soil erosion – Case studies from Lower Austria and Central Bohemia. Land Use Policy. Vol. 82. p. 674-685. ISSN 0264-8377.

DOSTÁL T., 2020: Protierozní opatření. Presentace. Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, Praha. Dostupné z: http://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/YPEO/eroze%2006_protierozni%20opatreni.pdf (dne 31.12.2020)

DOSTÁL, T., J. KRÁSA, J. VÁŠKA, K. VRÁNA, 2002: Shrnutí hlavních principů vytváření modelů erozních a transportních procesů z povodí vodních nádrží.: Aplikace v povodí VN Vrchlice. Dílčí zpráva, ČVUT, Praha.

CHLUM, A. a kol., 1977: Vodní dílo Vrchlice. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.

JANEČEK, M. a kol., 2012: Ochrana zemědělské půdy před erozí. Metodika. Powerprint s.r.o., Praha, ISBN 978-80-87415-42-9. Dostupné z:

http://r.fzp.czu.cz/vyzkum/metodiky/Methodika_Ochrana_zemedelske_pudy_pred_erozi.pdf (dne 5.11.2020).

JANEČEK, M. a kol., 1992: Ochrana zemědělské půdy před erozí, Metodiky pro zavádění výsledků výzkumu do zemědělské praxe 5/1992, ÚVTIZ Praha.

JÁCHYMOVÁ, B., 2018: Transport půdy a fosforu vodní erozí. Dizertační práce, ČVUT, Praha. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/75683/F1-D-2018-Jachymova-Barbora-Disertace_Jachymova_CD.pdf?sequence=-1&isAllowed=y (dne 21.12.2020).

KRÁSA, J., 2004: Hodnocení erozních procesů ve velkých povodích za podpory GIS. Dizertační práce, ČVUT, Praha. Dostupné z:

http://storm.fsv.cvut.cz/data/files/osobni%20stranky/Krasa%20Josef/Dizertace_krasa.pdf (dne 14.10.2020)

KRÁSA, J., T. DOSTÁL, A. VAN ROMPAEY, J. VÁŠKA a K. VRÁNA, 2005: Reservoir's siltation measurments and sediment transport assessment in the Czech Republic, the Vrchlice catchment study. CATENA, 64(2-3), 348-362. ISSN 0341-8162.

KRÁSA J, H. STŘEDOVÁ, T. DOSTÁL, I. NOVOTNÝ, 2014: Rainfall erosivity research on the territory of the Czech Republic. Mendel a bioklimatologie, Brno, 3 – 5 9 2014 17:20.

MCCOOL, D. K., G. R. FOSTER, C. K. MUTCHLER, L. D. MEYER, 1989: Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. Trans. ASAE, 32, 1571-1576. In Krása, 2004.

NAZV, 2010: QI102A265 – Určení podílu erozního fosforu na eutrofizaci ohrožených útvarů stojatých povrchových vod (2010-2013, MZE/QI).

NOVÁK, P., 1999: Kutnohorsko - Vlastivědný sborník: Vývoj struktury pozemkové držby a zemědělské "velkovýroby" na okrese Kutná Hora. Vydavatelství a nakladatelství Martin Bartoš - Kuttna, ISBN 80-902719-3-6. ISSN 1212-6098. Dostupné z: https://www.cms-kh.cz/sites/default/files/books/kutnohorsko-vlastivedny_sbornik_02-99.pdf#page=3&zoom=120,528,157 (dne 12.11.2020).

REDERER, L., P. FERBAR, 2017: Vodárenská nádrž Vrchlice Hradec Králové. Povodí Labe, Hradec Králové. Dostupné z:

http://www.pla.cz/planet/public/dokumenty/publikace/2017_Vodarenske_zdroje.pdf (dne 18.10.2020).

RENARD, K. et al., 1997: Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). US Department of Agriculture, Washington, DC, USA. In Jáchymová, 2018.

Ministerstvo vnitra České republiky, 2019: Sbírka zákonů a Sbírka mezinárodních smluv. Dostupné z: <https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/> (dne 5.10.2020).

SÝKORA, J., T. DOSTÁL, M. HANEL, M. DOČKAL, P. KOUDELKA, V. HAVLÍČEK, M. HEŘMANOVSKÝ, 2020: Povodí nádrže Vrchlice - vodní zdroje a jejich perspektiva. Technická zpráva, Praha.

ŠTROBLOVÁ, H., 2000: Dějiny Českých měst: Kutná Hora. Nakladatelství Lidové Noviny, Praha. ISBN 80-7106-186-7.

VAES, B., G. VERSTRAETEN a G. GOVERS, 2006: WaTEM / SEDEM version 2006 Manual.

Dostupné z:

https://ees.kuleuven.be/geography/modelling/watemsedem2006/manual_watemsedem_122011.pdf (dne 21.12.2020).

VACHUDA, J., 2017: Analýza změn zemědělského landuse v ČR a v modelovém regionu (katastrální území). Dizertační práce, Masarykova univerzita, Brno. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/yphbi/Dis_prace_Jan_Vachuda_finale.pdf (dne 1.10.2020).

VALENTOVÁ, J., R. ŠUMBEROVÁ, 1999: Kutnohorsko - vlastivědný sborník: Pravěk Kutné Hory ve světle nových archeologických výzkumů. Vydavatelství a nakladatelství Martin Bartoš - Kuttna, Kutná Hora. ISBN 80-902719-2-8. ISSN 1212-6098. Dostupné z: https://www.cms-kh.cz/sites/default/files/books/kutnohorsko-vlastivedny_sbornik_01-99.pdf#page=3&zoom=120,528,157 (dne 1.10.2020).

WILLIAMS, J. R., 1977: Sediment delivery ratio determined with sediment and runoff models, In: Janeček a kol., 1992.

WINTEROVÁ, J., 2019: Posouzení změn využití území v povodí VN Vrchlice a jejich vlivu na retenci srážek. Bakalářská práce, ČVUT, Praha. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/84190> (dne 21.12.2020).

Povodí Labe, státní podnik, 2020: Stavby a průtoky na vodních tocích. Dostupné z: <http://www.pla.cz/portal/sap/cz/PC/Prehled.aspx> (dne 19.10.2020).

4p1000, 2018: 4 per 1000 Initiative. Dostupné z: <https://www.4p1000.org/> (dne 21.12.2020).

Databáze a mapové podklady:

ARCDATA PRAHA. 2016: ArcČR 500 verze 3.3. Online databáze. Dostupné z: <https://www.arcdata.cz/produkty/geograficka-data/arccr-500> (dne 21.12.2020).

CENIA, 2010 II. vojenské mapování. Mapa. ArcGIS Server on geoportal.gov.cz. Dostupné z: <https://geoportal.gov.cz/web/guest/wms/> (dne 4.11.2020).

ČÚZK, 2017: Digitální model reliéfu České republiky 4. generace (DMR 4G). Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz (dne 10.10.2020).

DIBAVOD, 2007: A07 – hydrologické členění – povodí IV. Řádu. Online databáze © Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., odbor ochrany vod a informatiky, odd. GIS. Dostupné z: <http://www.dibavod.cz/index.php?id=27> (dne 2.12.2020).

VÚMOP v.v.i., 2020: EKatalog BPEJ. Dostupné z: <https://bpej.vumop.cz/> (dne 12.12.2020).

Ministerstvo zemědělství, 2009: LPIS (Registr půdy). Online databáze. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/app/lpisext/lpis/verejny2/plpis/> (5.11.2020).

Seznam.cz. 2020: Mapy.cz. Mapový podklad. Dostupné z: www.mapy.cz (dne 22.12.2020).

SPÚ ČR, 2020: Celostátní databáze BPEJ. Online databáze. Dostupné z: <https://www.spucr.cz/bpej/celostatni-databaze-bpej> (dne 01.10.2020).

VÚV TGM, v.v.i., 1997: Základní vodohospodářská mapa ČR. 1:50 000. 1986-1999. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka. Dostupné z: <https://heis.vuv.cz/data/> (dne 18.12.2020)

Software:

ARCDATA PRAHA. 2016: ArcMap 10.6. Dostupné z: <https://www.arcdata.cz/produkty/arcgis/desktopovy-gis/arcmap>.

Microsoft, 2010: Microsoft Excel 2010. Dostupné z: <https://products.office.com/cs-cz/excel>.

Clark Labs, 2012: Idrisi 17.0 The Selva Edition. Dostupné z: <http://www.clarklabs.org>.

Van Oost K, Govers G, & Desmet PJJ, 2000: Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology* 15 (6), 579-591.

Van Rompaey A, Verstraeten G, Van Oost K, Govers G & Poesen J, 2001: Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Processes and Landforms* 26 (11), 1221-1236.

Verstraeten G, Van Oost K, Van Rompaey A, Poesen J & Govers G, 2002: Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling. *Soil Use and Management*, 18, 386-394.