

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ**  
FAKULTA STAVEBNÍ  
KATEDRA HYDROMELIORACÍ A KRAJINNÉHO INŽENÝRSTVÍ



**ZDROJE EROZNÍHO SEDIMENTU  
V POVODÍ VÝROVKY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
BC. MARKÉTA ŠÍŠKOVÁ

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

PRAHA 2023

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Šišková	Jméno: Markéta	Osobní číslo: 476994
Zadávací katedra: Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství K143		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor/specializace: Inženýrství životního prostředí		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Zdroje erozního sedimentu v povodí Výrovky	
Název diplomové práce anglicky: Erosion sediment sources in the Výrovka watershed	
Pokyny pro vypracování: Analyzujte zadané území povodí Výrovky (po uzávěrový profil Plaňany) z pohledu erozního smyvu a transportu sedimentu včetně zanášení jednotlivých vodních nádrží s využitím modelu WaTEM/SEDEM. Navažte na výsledky DP Klímová (2022) a BP Kutil (2022). Pokračujte přípravou typových scénářů opatření vedoucích ke snížení vstupu splavenin do vodních toků. S pomocí modelu vyhodnoťte účinnost opatření na úrovni povodí, subpovodí, kritických úseků říční sítě a vodních nádrží. Využijte data z monitoringu ČHMÚ v Plaňanech k vyhodnocení vybraných významných srážkových událostí. Diskutujte vztah výsledků modelu k reálně monitorovaným událostem.	
Seznam doporučené literatury: Bauer M.: Posuzování ohroženosti vodních nádrží sedimentem s využitím modelu WaTEM/SEDEM; ČVUT v Praze, 2018 Krása J.: Hodnocení erozních procesů ve velkých povodích za podpory GIS; ČVUT v Praze, 2004 Klímová H.: Kvantifikace zdrojů erozního sedimentu v povodí Výrovky, ČVUT v Praze, 2022 Kutil Š.: Posouzení zanášení nádrží v povodí Výrovky, ČVUT v Praze, 2022 Krása J. a kol.: Hodnocení ohroženosti vodních nádrží sedimentem a eutrofizací podmíněnou erozí zemědělské půdy, ISBN: 978-80-01-05428-4, ČVUT v Praze, 2013	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Miroslav Bauer, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 2. 3. 2023	Termín odevzdání DP v IS KOS: 22. 5. 2023 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze literaturu a podklady uvedené v příloženém seznamu. Software ArcGIS Pro byl použit v rámci školní licence FSV ČVUT.

V Praze dne .....

.....

Podpis

## PODĚKOVÁNÍ

Za vedení, podněty, rady, pomoc a podporu touto cestou děkuji vedoucímu své práce panu Ing. Miroslavu Bauerovi, Ph.D.

Za poskytnutá data z monitoringu Výrovky v Plaňanech děkuji panu Mgr. Vítu Kodešovi, PhD. z Českého hydrometeorologického ústavu.

Za předešlé výpočty a poskytnutá data děkuji Ing. Haně Klímové a Bc. Šimonu Kutilovi. Práce byla řešena za podpory projektů SS03010332 - Modelování významnosti zdrojů znečištění fosforem a návrhy efektivních opatření k naplnění cílů Strategie ke snížení obsahu živin ve vodách v povodí Labe a SS02030027 - Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu. V rámci nich byly dostupné datové zdroje pro další analýzy této práce.

Na tomto místě také děkuji své rodině, především rodičům, kteří mě podporovali po celou dobu studia.

# OBSAH

<b>ABSTRAKT .....</b>	<b>12</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>13</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>14</b>
<b>EROZE PŮDY.....</b>	<b>15</b>
DRUHY EROZE PŮDY.....	15
DŮSLEDKY EROZE .....	16
PROTIEROZNÍ OPATŘENÍ.....	17
EROZNÍ OHROŽENOST ZEMĚDĚLSKÉ PŮDY V ČESKÉ REPUBLICE.....	19
<b>STANOVOVÁNÍ ZTRÁTY PŮDY A EROZNÍ OHROŽENOSTI .....</b>	<b>23</b>
USLE – UNIVERZÁLNÍ ROVNICE ZTRÁTY PŮDY .....	23
RUSLE – REVIDOVANÁ UNIVERZÁLNÍ ROVNICE ZTRÁTY PŮDY .....	26
MODEL WATEM/SEDEM.....	27
<b>CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ POVODÍ VÝROVKY .....</b>	<b>36</b>
GEOLOGIE.....	38
PŮDNÍ TYPY.....	39
HYDROGEOLOGIE .....	39
HYDROLOGIE .....	40
VYUŽITÍ ÚZEMÍ.....	42
EROZE NA ŘEŠENÉM ÚZEMÍ .....	43
<b>ANALÝZA DAT ČHMÚ.....</b>	<b>46</b>
ODHAD „POZAŘOVÉHO“ MNOŽSTVÍ PROTEKLÉHO SEDIMENTU.....	48
ODHAD CELKOVÉHO MNOŽSTVÍ PROTEKLÉHO SEDIMENTU ZA ROK 2022.....	49
VYHODNOCENÍ VÝZNAMNÉ EROZNÍ UDÁLOSTI.....	52
<b>TERÉNNÍ PRŮZKUM .....</b>	<b>56</b>
LOKALITA 1.....	58
LOKALITA 2.....	59
LOKALITA 3.....	60
LOKALITA 4.....	61
LOKALITA 5.....	62
LOKALITA 6.....	63
LOKALITA 7.....	63

LOKALITA 8 .....	66
LOKALITA 9 .....	67
PROTIEROZNÍ OPATŘENÍ NA POVODÍ .....	68
SHRNUTÍ.....	69
<b>TYPOVÉ SCÉNÁŘE OPATŘENÍ PRO POVODÍ VÝROVKY .....</b>	<b>70</b>
SCÉNÁŘ 1 – ZATRAVNĚNÍ PODÉL VODNÍCH TOKŮ .....	71
SCÉNÁŘ 2 – ZATRAVNĚNÍ CELÝCH POZEMKŮ .....	72
SCÉNÁŘ 3 – ZATRAVNĚNÍ KRITICKÝCH ČÁSTÍ VYBRANÝCH POZEMKŮ .....	74
<b>VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MODELU .....</b>	<b>75</b>
EROZE NA POVODÍ .....	75
EROZE NA ÚROVNI SUBPOVODÍ.....	78
EROZE NA ÚROVNI KRITICKÝCH ÚSECÍCH VODNÍCH TOKŮ .....	85
EROZE NA ÚROVNI VODNÍCH NÁDRŽÍ .....	91
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>94</b>
<b>ZDROJE.....</b>	<b>97</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Půdy ohrožené erozí (VÚMOP, 2021).....	21
Obrázek 2 - Průměrná roční teplota vzduchu za období 1991-2020 (°C), (ČHMÚ, 2021).....	22
Obrázek 3 - Průměrný roční úhrn srážek 1991-2010 (mm), (ČHMÚ, 2021).....	22
Obrázek 4 - Hodnoty vstupní vrstvy K faktoru .....	32
Obrázek 5 - Ukázka Input 1 a Input 2.....	35
Obrázek 6 - Ukázka záložek Extra Options a Results.....	35
Obrázek 7 - Uzávěrový profil v Plaňanech .....	36
Obrázek 8 - Zájmové území na podkladu Základní mapy (ČÚZK).....	37
Obrázek 9 - Geologické poměry zájmového území, Geologická mapa 1:50000 (ČGS) .....	38
Obrázek 10 - Mapa Komplexního průzkumu půd na řešeném území (VÚMOP, v.v.i.) .....	39
Obrázek 11 - Hydrologická síť zájmového území, vstupní data: ArcČR 500, Kutil (2022) .....	41
Obrázek 12 - Ilustrativní obrázek využití území v zájmové oblasti (Devátý, 2018) .....	43
Obrázek 13 - Příklad erozních rýh vedoucích k vodnímu toku (Seznam.cz, TopGis).....	44
Obrázek 14 - Příklad eroze na svahu poblíž Vavříneckého rybníka.....	44
Obrázek 15 - Příklad depozice sedimentu na povodí.....	44
Obrázek 16 - Příklad terénní deprese v patě svahu .....	44
Obrázek 17 - Změna objemu sedimentu ve vodních nádržích (Kutil, 2022, s. 74) .....	45
Obrázek 18 - Trasa a vytipovaná místa terénního průzkumu (Mapy.cz) .....	56
Obrázek 19 - Navštívené lokality na ZM10 (ČÚZK).....	57
Obrázek 20 - Vytipovaná místa .....	58
Obrázek 21 - Erozní poměry lokality 3 na ZM10 (ČÚZK) .....	60
Obrázek 22 - Hráz Vavříneckého rybníka (ČÚZK) .....	61
Obrázek 23 - Erozní poměry v okolí Kačiče, erozní poměry na ZM10 (ČÚZK) .....	62
Obrázek 24 - Místo depozice u Skvrňova na ZM10 (ČÚZK) .....	63
Obrázek 25 - Plošná eroze a depozice v patě svahu na ZM10 (ČÚZK) .....	63
Obrázek 26 - Erozní rýhy na ortofomapách (Seznam.cz, TopGis) .....	64
Obrázek 27 - Transport sedimentu v rýhách na ZM10 (ČÚZK).....	64
Obrázek 28 - Transportovaný sediment v lokalitě 8 na ZM10 (ČÚZK) .....	66
Obrázek 29 - Ilustrační obrázek scénáře 1 – STÁVAJÍCÍ STAV .....	71
Obrázek 30 - Ilustrační obrázek scénáře 1 – NÁVRH.....	71

Obrázek 31 - Ukázka erozně náchylných míst nad ZM10 (ČÚZK).....	72
Obrázek 32 - Ilustrační obrázek scénáře 2 – STÁVAJÍCÍ STAV .....	73
Obrázek 33 - Ilustrační obrázek scénáře 2 – NÁVRH.....	73
Obrázek 34 - Ilustrační obrázek scénáře 3 - STÁVAJÍCÍ STAV .....	74
Obrázek 35 - Ilustrační obrázek scénáře 3 – NÁVRH.....	74
Obrázek 37 - Ukázka topografických poměrů na vybraných pozemcích LPIS, vstupní data: MZe .....	79
Obrázek 36 - Pozemky určené k zatravnění na povodích 4. řádu, vstupní data: ČHMÚ .....	79
Obrázek 38 - Průměrná ztráta půdy na povodích 4. řádu, STÁVAJÍCÍ STAV, vstupní data: ČHMÚ .....	82
Obrázek 39 - Průměrná ztráta půdy na povodích 4. řádu, SCÉNÁŘ 1, vstupní data: ČHMÚ ...	82
Obrázek 40 - Průměrná ztráta půdy na povodích 4. řádu, SCÉNÁŘ 2, vstupní data: ČHMÚ ...	83
Obrázek 41 - Průměrná ztráta půdy na povodích 4. řádu, SCÉNÁŘ 3, vstupní data: ČHMÚ ...	83
Obrázek 42 - Změna průměrné ztráty půdy na povodích 4. řádu oproti stávajícímu stavu, vstupní data: ČHMÚ.....	84
Obrázek 43 - Mapa s vyznačením kritických úseků vodních toků.....	85
Obrázek 44 - IDVT 10185564 na podkladu inflow, scénář 1 .....	87
Obrázek 45 - IDVT 10185564 na podkladu inflow, scénář 2, s vyznačením zatravněných pozemků (hnědá) .....	87
Obrázek 46 - Ukázka kritických úseků na podkladu inflow a landuse.....	88
Obrázek 47 - Hillslope kritických úseků dle jednotlivých scénářů .....	90
Obrázek 48 - Vavřínecký r. s hodnotami outflow pro všechny scénáře .....	92
Obrázek 49 - Vodní nádrž Strašák s hodnotami outflow pro všechny scénáře.....	92
Obrázek 50 - Příklad neprotékané nádrže .....	93



## SEZNAM FOTOGRAFIÍ

Foto 1 - Vodní tok u Bílkovic, pohled po vodě .....	58
Foto 2 - Stopy dráhy sedimentu.....	58
Foto 3 - Příkop podél levé strany cesty .....	59
Foto 4 - Erozní pukliny na orné půdě v oblasti 13.....	59
Foto 5 - Místo hromadění odtoku ze svahu, pohled od cesty.....	60
Foto 6 - Odtok zadržené vody ze svahu do příkopu podél cesty.....	60
Foto 7 - Pohled na hráz Vavříneckého r. z pravého břehu.....	61
Foto 8 - Soutok za vyrovnávací nádrží pod Vavříneckým r. ....	61
Foto 9 - Rozdělovací objekt pod Vavříneckým r.....	61
Foto 10 - Koryto Výrovky pod Vavříneckým r. ....	61
Foto 11 - Místo depozice sedimentu u toku Kačič ..... 62	62
Foto 12 - Poloha deponie sedimentu vůči Kačiči.....	62
Foto 13 - Terénní deprese v patě svahu u Skvrňova .....	63
Foto 14 - Plošná eroze a depozice u Bohuňovic II.....	63
Foto 15 - Změna vegetace v rýze, pohled k Bohouňovickému p.....	64
Foto 16 - Pohled na údolnici na pravém břehu Bohouňov. p. ....	64
Foto 17 - Pohled údolnicí, akumulace sedimentu v popředí .....	65
Foto 18 - Bohouňovický potok, stopy po vybřežení potoka.....	65
Foto 19 - Ovocné sady u rybníka Sv. Prokop.....	66
Foto 20 - Místo vstupu sedimentu ze sadů do Sv. Prokopu.....	66
Foto 21 - Dráha vstupu sedimentu do Sv. Prokopu, pravý břeh .....	66
Foto 22 - Měrný (uzávěrový) profil Výrovky v Plaňanech .....	67
Foto 23 - Výrovka bezprostředně pod měrným profilem .....	67
Foto 24 - Travní pásy na orné půdě .....	68
Foto 25 - Brukev řepka olejka s ochrannou vrstvou rmenu .....	68
Foto 26 - Cesta s protierozním účinkem .....	68
Foto 27 - Travní pásy podél vodního toku .....	68
Foto 28 - Příkop zajišťující odvodnění pozemku .....	69
Foto 29 - Větrolam .....	69

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Druhy eroze dle různých faktorů .....	15
Tabulka 2 - Hodnoty využití území v modelu WaTEM/SEDEM .....	30
Tabulka 3 - Hodnoty C faktoru na základě kategorie LPIS (Klímová, 2022).....	31
Tabulka 4 - N-leté průtoky, stanice Plaňany (ČHMÚ, 2023).....	40
Tabulka 5 - Zastoupení využití území v povodí Výrovky (Klímová, 2022) .....	42
Tabulka 6 - Maximální a celkový úhrn srážek v roce 2022 ve vybraných stanicích (ČHMÚ) ...	48
Tabulka 7 - Výpočet „požadové“ hodnoty koncentrace sedimentu a běžného průtoku .....	49
Tabulka 8 - Výpočet průměrných koncentrací sedimentu .....	50
Tabulka 9 - Výpočet průměrných průtoků .....	51
Tabulka 10 - Výpočet celkového množství vyprodukovaného sedimentu.....	51
Tabulka 11 - Koncentrace sedimentu 29.6.2022 - 7.7.2022 (ČHMÚ).....	52
Tabulka 12 - Výpočet vyprodukovaného sedimentu při vybrané erozní události.....	54
Tabulka 13 - Rozloha zatravněné plochy při jednotlivých scénářích .....	70
Tabulka 14 - Bilance sedimentu pro jednotlivé scénáře opatření .....	75
Tabulka 15 - Počet povodí 4. řádu v jednotlivých kategoriích ztráty půdy .....	78
Tabulka 16 - Transportovaný sediment v kritických úsecích vodních toků v jednotlivých scénářích .....	89
Tabulka 17 - Celkové množství usazeného sedimentu ve vodních nádržích.....	91
Tabulka 18 - Usazený sediment (t/rok) ve vybraných vodních nádržích.....	93

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 - Ohroženost půdy ČR za rok 2019 (VÚMOP, 2020).....	19
Graf 2 - Dlouhodobá průměrná ztráta půdy (G) (t/ha/rok) v ČR za rok 2019 (VÚMOP, 2020)	19
Graf 3 - Ohroženost půdy ČR vodní erozí v roce 2021 (VÚMOP, 2021) .....	20
Graf 4 - Procentuální rozložení R faktoru ve vegetačním období v ČR (Janeček a kol., 2008)	25
Graf 5 - Koncentrace sedimentu na měrném profilu v Plaňanech v roce 2022 (ČHMÚ) .....	47
Graf 6 - Průtoky na měrném profilu v Plaňanech v roce 2022 (ČHMÚ) .....	47
Graf 7 - Srážkové úhrny na stanici Kostomlaty, Žišov a Cerhenice v roce 2022 (ČHMÚ) .....	48
Graf 8 - Srážkové úhrny jednotlivých stanic v období 28.6 - 2.7.2022 (ČHMÚ) .....	53
Graf 9 - Průběh průtoku od 29.6.2022 17:00 do 7.7.2022 7:00 .....	53
Graf 10 - Porovnání typových scénářů na povodí Výrovky .....	76

## ABSTRAKT

V této diplomové práci byly navrženy tři typové scénáře protierozních opatření v povodí Výrovky po uzávěrový profil v Plaňanech. Toto povodí je zemědělsky hojně využíváno, což se negativně projevuje na kvalitě půdy a povrchových vod. Aplikací scénářů bude snížen erozní smyv z orné půdy, tedy i množství plavenin vstupujících do vodních toků a usazujících se ve vodních nádržích. Efekt jednotlivých scénářů na erozní poměry v povodí byl vyhodnocen na úrovni povodí, povodí IV. řádu, kritických úsecích vodních toků a vodních nádržích.

První část práce se zaměřuje na problematiku eroze, stanovení erozního ohrožení, sběr podkladů, charakteristiku území a seznámení se s výpočetním modelem WaTEM/SEDEM.

V další části práce byl proveden odhad skutečného množství erozního materiálu, který protekl uzávěrovým profilem v Plaňanech v roce 2022, na základě dat ČHMÚ o koncentraci plavenin ve Výrovce, průtocích a srážkách. Odhadem povodí v roce 2022 opustilo 3 624 tun sedimentu. Dále byly v softwaru ArcGIS Pro vytvořeny vrstvy reflektující navržené změny pro uvažované scénáře protierozních opatření. Tyto vrstvy byly vstupy pro výpočet erozních a transportních procesů modelem WaTEM/SEDEM. Jeho výsledky jsou dále analyzovány.

Na úrovni celého povodí byl jako nejúčinnější scénář opatření vyhodnocen scénář 2, kdy jsou zatravněny celé vybrané pozemky LPIS. Při vyhodnocování ve větší podrobnosti najdeme případy vodních toků nebo nádrží, kde dojde ke stejnému efektu při scénáři 2 jako při vytvoření travních pásů podél vodních toků (scénář 1). Výjimkou nejsou případy, kdy je nejúčinnější právě aplikace scénáře 1, který především brání vstupu sedimentu do říční sítě. Částečné zatravnění vybraných pozemků (scénář 3) zpravidla přináší nejnižší účinek, ten je ale v některých případech srovnatelný se zbylými variantami a je z hlediska záboru orné půdy značně příznivější než varianta zatravnění celých pozemků.

Aplikací scénářů opatření bylo oproti stávajícímu stavu dosaženo snížení produkce sedimentu na povodí při zatravnění pozemků o 28 % (scénář 2), resp. o 13 % (scénář 3). Při scénáři 1 je sedimentu vyprodukováno téměř stejně jako při stávajícím stavu, ale do vodních toků ho vstoupí o 33 % méně.

Pro bližší seznámení se s řešeným územím byl proveden terénní průzkum.

### **Klíčová slova:**

vodní eroze, WaTEM/SEDEM, Výrovka, protierozní opatření

## ABSTRACT

Three typical scenarios of anti-erosion measures in the Výrovka watershed, were designed in this diploma thesis. The watershed has been intensively used for agricultural purposes, which results into negative change in the quality of the soil and surface water. The erosion sediment runoff will be reduced by applying the scenarios. Therefore, the amount of sediment incoming in water streams and settling in reservoirs is reduced as well. The impact of each scenario on erosion conditions in the watershed was evaluated on the level of the whole watershed, sub-watersheds, critical sections of water streams and reservoirs.

The first part of the thesis focuses on problematics of erosion, stating the level of erosion risk, collecting data, characterization of the area and introduction of the WaTEM/SEDEM model.

In the next part, an assessment of an actual amount of transported sediment in the Plaňany pour point in year 2022 was conducted based on the Czech Hydrometeorological Institute data. Based on the calculations, 3624 tons of sediment left the Výrovka watershed in 2022.

Afterwards, new raster layers, reflecting the designed erosion control measures, were created in ArcGIS Pro. These layers were an input for the WaTEM/SEDEM calculations of the erosion and transport processes. Its results were analysed and interpreted further.

Scenario 2, the whole parcel grassing, was evaluated as the most effective one from the watershed perspective. When it comes to greater detail, there are cases of water streams and reservoirs, where the same impact of scenario 1 (grass strips along water streams) and 2 was achieved. Not exceptionally, scenario 1 brings the biggest effect. Typically, the lowest effect on erosion conditions is produced by scenario 3, where grass is designed just on the most critical parts of the picked parcels from scenario 2. However, in some cases its results are comparable with the other scenarios and from the grassed area point of view, scenario 3 is more convenient than scenario 2.

By applying the designed scenarios, the amount of produced erosion sediment in the watershed in comparison with current state was reduced by 28 % (scenario 2), resp. by 13 % (scenario 3). In scenario 1, the production was almost the same as in current state, but the income in water streams was lesser by 33 %.

In order to understand the conditions in the area of interest, a field survey was performed.

### **Key words:**

water erosion, WaTEM/SEDEM, Výrovka, erosion control measures

## ÚVOD

Půda je neobnovitelným zdrojem a je základním předpokladem pro život na Zemi. Je habitatem nejrůznějších organismů, zadržuje vodu, zprostředkovává výměnu energie a plynů, slouží jako přirozený filtr škodlivin. Kromě těchto mimoprodukčních funkcí, je zásadní i funkce produkční. Tedy poskytování potravy, stavebních materiálů, materiálů pro výrobu textilií, papíru, léčiv, energie...

S vývojem lidstva a růstem populace došlo k záboru půdy pro výstavbu měst a infrastruktury. Ke zmenšování rozlohy orné půdy (zemědělského půdního fondu) dochází v současné době i v důsledku zalesňování.

Struktura krajiny a pozemků orné půdy na našem území byla v novodobé historii nejvíce postižena kolektivizací v 50. letech 20. století. Došlo ke zvětšení obhospodařovaných pozemků, výstavbě systémů odvodňování orné půdy, zintensivnění hospodaření.

Další vývoj přinesl hnojiva, pesticidy a techniku, které zjednodušují obhospodařování a zvyšují v danou dobu produkci. Plody tohoto počínání sklízíme už dnes, kdy se projevuje ve snížení odolnosti půdy vůči (vodní) erozi. Tím dochází ke ztrátě půdy na pozemcích, změně její struktury, poklesu produkční schopnosti půdy v důsledku redukce organické hmoty v půdě, zhutňování půdního profilu, a tedy zhoršování podmínek pro infiltraci vody. Vstupem částic smytých z polí do hydrologického systému dochází ke snižování kvality povrchovým vod. Tyto a další faktory komplikují rostlinnou produkci všude ve světě, což v kontextu růstu světové populace věští závažné problémy. Je tedy více než žádoucí půdu chránit a pečovat o ni.

V této práci bylo hlavním cílem navrhnout typové scénáře opatření, která budou bránit vstupu erozního smyvu do říční sítě. Tato opatření mají i půdoochranný charakter, jelikož se jedná o různé formy zatravnění, i v místech náchylných k vodní erozi.

Řešená část povodí Výrovky má rozlohu 265 km<sup>2</sup>, z toho téměř 65 % rozlohy tvoří orná půda. Vliv na erozní poměry v povodí byl kvantifikován na základě výpočtu modelu WaTEM/SEDEM pro každý navržený scénář opatření a tyto výsledky byly vyhodnoceny na úrovni povodí i jeho dílčích částech.

Jelikož se z hlediska řešení vodní eroze jedná o relativně velké území, nedá se předpokládat, že by navržená opatření byla v této podobně realizována. Tato práce však může posloužit k nastínění trendů změn erozních poměrů v zájmovém území v důsledku aplikace protierozních opatření.

## EROZE PŮDY

Eroze půdy je přirozený přírodní proces, při němž dochází k rozrušování svrchní vrstvy půdy - uvolňování půdních částic, jejich transportu a následné depozici na novém místě. Půdní částice mohou být uvedeny do pohybu v důsledku působení vody, větru, ledu nebo jiných činitelů.

Intenzita eroze v dané lokalitě závisí na morfologii území, vlastnostech půdy a charakteru destruuujících vlivů. Hlavními faktory ovlivňující intenzitu eroze jsou délka a sklon svahu, vlastnosti půdy (obsah organické hmoty, typ zeminy, zrnitost...) a vegetační pokryv (způsob hospodaření). (VÚMOP, 2022)

Ačkoli se jedná o přirozený proces je značně ovlivněn, zpravidla negativně, lidskou činností. Často proto dochází k větší ztrátě půdy (zrychlená eroze), než je rychlost vzniku nové půdy přirozenou rychlostí pedogeneze, což je v našich podmínkách asi 1 cm za 100 let. (Dostál, 2021)

Legislativně stanovená přípustná ztráta půdy je upravena vyhláškou č. 240/2021 o ochraně zemědělské půdy před erozí, ve znění zákona 334/1992 Sb., o ochraně zemědělského půdního fondu. Vyhláška stanovuje hodnotu přípustné ztráty půdy. Pro mělké půdy je povolena ztráta 2 t/ha/rok, pro středně hluboké a hluboké půdy je to 9 t/ha/rok.

Dle Janečka (2012) je přípustná dlouhodobá roční ztráta půdy stanovena na 4 t/ha/rok.

### Druhy eroze půdy

Erozi můžeme dělit dle několika perspektiv, dělení eroze je zachyceno v tabulce 1.

Tabulka 1 - Druhy eroze dle různých faktorů

<b>eroze dle:</b>	<b>intenzity</b>	normální
		zrychlená
	<b>příčiny</b>	vodní
		větrná
		sněhová
		ledovcová
		antropogenní, ...
	<b>formy</b>	plošná
		výmolová
		proudová (stržová)
	<b>mechanismu</b>	mezinýžková
		rýhová
	<b>časového hlediska</b>	historická
		soudobá

Dále je podrobněji popsána vodní a větrná eroze, jelikož s jejich projevy se v českých podmínkách setkáváme nejběžněji a je i předmětem této práce.

### *Vodní eroze*

Vodní eroze je způsobená mechanickými účinky dešťových kapek dopadajících na zemský povrch. Dopadající kapky mohou způsobit odloučení půdních částic od půdního celku a povrchovým odtokem mohou být transportovány na jiné místo, kde dojde k jejich usazení.

Kromě vlastností půdy a charakteru území je hlavním faktorem vodní eroze charakter srážek a povrchového odtoku. (VÚMOP, 2022)

### *Větrná eroze*

Vyskytuje-li se dostatečně silný vítr při povrchu země, tento povrch je suchý a náchylný k erozi a není chráněn ochranným porostem, pak může dojít k rozrušování půdních agregátů a k uvolnění půdních částic vlivem kinetické energie větru. Uvolněné částice jsou unášeny větrem, až se nakonec usadí na jiném místě na povrchu země. Takový proces nazýváme větrnou erozí. (VÚMOP, 2022)

Větrnou erozí je v České republice potenciálně ohroženo 25,7 % výměry orné půdy (dle LPIS v roce 2012).

### **Důsledky eroze**

Hlavním projevem eroze půdy je ztráta půdy – zmenšení půdního profilu a zvýšení štěrkovitosti. S rostoucí intenzitou působení erozních vlivů roste i velikost unášených půdních částic. Primárně jsou tedy unášeny nejlehčí částice, často se jedná o organickou hmotu, která půdě zajišťuje produkční schopnosti. S úbytkem organické hmoty (humusu), klesá také schopnost půdy tvořit půdní agregáty a udržovat živiny, tím klesá její úrodnost, a tedy její využitelnost pro pěstování plodin. To se odráží i na zemědělských ziscích. Ve snaze zajistit v půdě dostatek živin pro pěstování plodin, jsou tyto dodávány ve formě hnojiv, to je však jeden ze zásadních faktorů přispívající k eutrofizaci, jež zhoršuje kvalitu povrchových vod a podmínky pro život vodních organismů. (VÚMOP, 2022)

Kromě změny fyzikálně-chemických vlastností vod dochází i k zanášení akumulčních prostor vodních nádrží. K usazování půdních částic dochází i v říčních korytech, dochází tak ke zmenšení průtočného profilu, což se může mít nepříznivě projevit při povodňových událostech. (VÚMOP, 2022)



## Protierozní opatření

Protierozní opatření (PEO), tedy opatření, která si kladou za cíl zmírnění negativních projevů vodní a větrné eroze, jsou legislativně řešena ve dvou formách.

Jednak se jedná o právní normy, které jsou součástí právního rámce České republiky („protierozní“ vyhláška k zákonu o ochraně zemědělského půdního fondu), jednak se jedná o opatření podmiňující čerpání finančních dotací (standarty Dobrého zemědělského a environmentálního stavu půdy (DZES, resp. DZES 4-6)). (MZe, 2023)

Protierozní opatření jsou pak dělena do třech skupin: organizační, agrotechnická, technická.

### *Organizační opatření*

Tato opatření spočívají v nastavení optimálního tvaru a velikosti parcely, zvolení vhodných pěstovaných plodin včetně ochranného pokryvu a pásovém střídání plodin.

Základní předpoklad je orientace pozemku delší stranou po vrstevnici, tím je zkrácená délka svahu, zároveň ale nesmí dojít k překročení maximální přípustné délky svahu, a podpořen způsob obdělávání po vrstevnici. (Novotný a kol., 2017)

Plochy, které jsou silně erozně ohroženy, by měly být zatravněny a již více nevyužívány pro produkční účely. Tyto zatravněné plochy mohou být navrženy jako zasakovací pásy, může na nich také docházet k sedimentaci erozí smyté půdy, tím je omezen transport půdních částic vně pozemek. (Novotný a kol., 2017)

Pokud je záměrem pěstovat erozně nebezpečnou plodinu na erozně ohrožené ploše, je vhodné přistoupit k pásovému střídání plodin. V takovém případě se střídají různě široké pásy plodin erozně nebezpečných (širokořádkových) s pásy plodin s vyšším protierozním účinkem. I v tomto případě by pásy měly být vedeny ve směru vrstevnic. (Novotný a kol., 2017)

### *Agrotechnická a vegetační opatření*

Tato opatření mají vést ke zlepšení schopnosti půdy odolávat erozním vlivům. Jde především o podporu vsakování a snížení erodovatelnosti. Za tímto účelem jsou aplikovány následující metody: setí/sázení po vrstevnici, ochranné obdělávání, setí kukuřice do úzkého řádku, pásové zpracování půdy, hrázkování a důlkování, plečkování, dlátování a podrývání. (Novotný a kol., 2017)

Cílem je realizace takové praxe, při níž bude půda co největší část roku chráněna vegetačním pokryvem před přímým dopadem deště, bude zajištěn dostatečný podíl organické hmoty

v půdě a půda nebude zbytečně hutněna (pojezdem těžkých strojů) (Dostál 2021). Tyto postupy byly adaptovány a za účelem nenarušování přirozeného procesu pedogeneze. Agrotechnickými opatřeními jsou na příklad setba do mulče, kypření (místo orby), výsev ochranné meziplodiny. (Novotný a kol., 2017)

### *Technická opatření*

K realizaci technických protierozních opatření (TPEO) se přistupuje až v případě, kdy je vyčerpán potenciál výše popsaných protierozních opatření a jejich vliv na kvalitu půdy není dostatečný.

TPEO řeší tři základní úlohy (Novotný a kol., 2017):

- přerušování délky pozemku po spádnicích a bezpečné odvedení soustředěného povrchového odtoku – za tímto účelem jsou budovány příkopy, průlehy a údolnice
- zachycení smyté zeminy a povrchového odtoku, jeho zdržení a neškodné odvedení – zajištěno hrázkami, sedimentačními, retenčními nebo suchými nádržemi
- změna sklonu pozemku – terénní urovnávkou, terasováním, obnovováním mezí.

TPEO na rozdíl od ostatních PEO podléhá stavebnímu zákonu. Musí proto splňovat podmínky zákonem stanované, musí být navrženy na konkrétní kapacitu a splňovat daný ochranný stupeň území. (Novotný a kol., 2017)

Nejefektivnějším způsobem realizace protierozních opatření, zejména technických, je pomocí komplexních pozemkových úprav. V takovém případě je problematika řešena v rámci celého katastrálního území a PEO jsou součástí tzv. společných zařízení.

Na konci roku 2020 byly (jednoduché a komplexní) pozemkové úpravy realizovány na cca 37 % zemědělského půdního fondu (ZPF) a na 12 % ZPF pozemkové úpravy probíhaly. (MZe, 2021)

## Erozní ohroženost zemědělské půdy v České republice

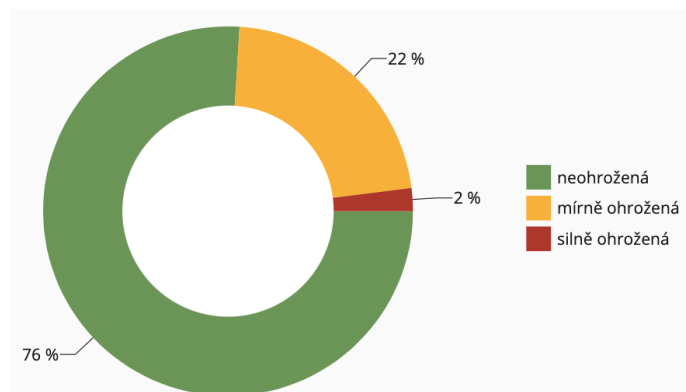
Celková výměra zemědělského půdního fondu je 4 200 tisíc ha, tj. 53,3 % rozlohy České republiky. Orná půda pak představuje 37,2 % celkové rozlohy ČR. V roce 2021 bylo vodní erozí kriticky ohroženo 52,8 % ZPF. Od roku 1 999 ubylo zemědělské půdy asi 82 000 ha, důvod poklesu je především zalesňování a rozšiřování vodních ploch. (MZe, 2021)

V roce 2012 byla rozloha ZPF 4 230 tisíc ha, tj. 53,6 % půdního fondu, 37 % půdního fondu tvořila orná půda. Vodní erozí bylo ohroženo téměř 50 % zemědělské půdy. (MZe, 2012)

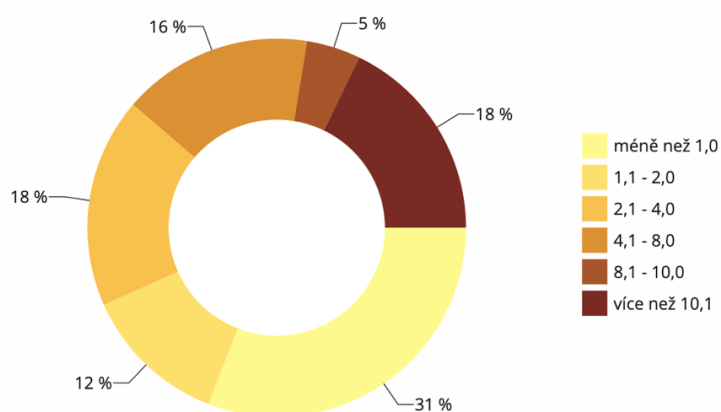
Pro evidenci erozní ohroženosti zemědělské půdy v ČR je využíván geoportál Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půd, v.v.i (VÚMOP) a Státního pozemkového úřadu (SPÚ).

Z grafu 1 vyplývá, že v roce 2019 byla ohrožena téměř čtvrtina zemědělské půdy. Z grafu 2 je pak patrné, že průměrná dlouhodobá ztráta půdy na přibližně 25 % zem. půdy je více než 8 t/ha/rok, dominantně však více než 10 t/ha/rok.

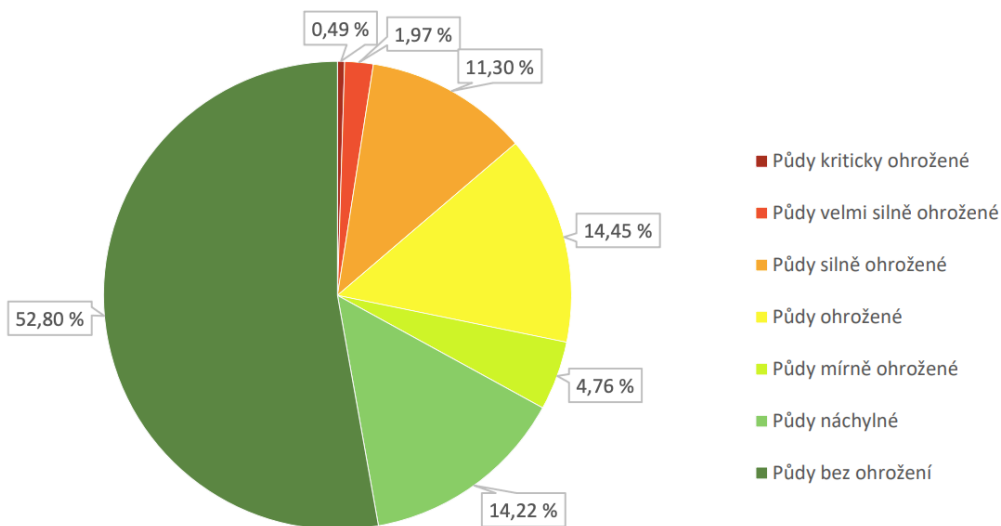
Přestože dle grafu 1 je erozně ohroženo „jen“ 24 % zem. půdy, dle grafu 2 je 39 % zem. půdy vystaveno dlouhodobé průměrné ztrátě půdy větší než 4 t/ha/rok, což je dle metodiky přípustná hranice dlouhodobé průměrné roční ztráty půdy.



Graf 1 - Ohroženost půdy ČR za rok 2019 (VÚMOP, 2020)



Graf 2 - Dlouhodobá průměrná ztráta půdy (G) (t/ha/rok) v ČR za rok 2019 (VÚMOP, 2020)



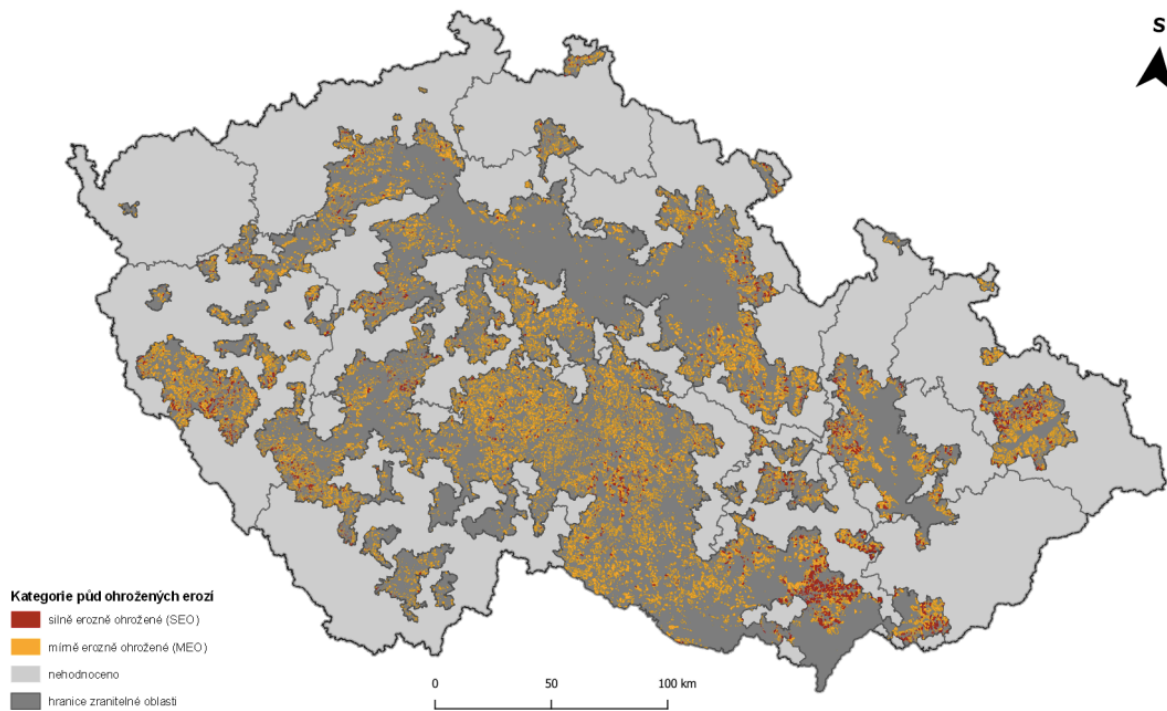
Graf 3 - Ohroženost půdy ČR vodní erozí v roce 2021 (VÚMOP, 2021)

Dle Situační a výhledové zprávy – Půda (MZe, VÚMOP, 2021) bylo v roce 2021 vodní erozí ohroženo asi 33 % půdy a v současnosti je ztráta orné půdy v ČR 20 858 milionů tun erodované ornice za rok, což přináší i značné finanční ztráty. (MZe, 2021)

Podle stejné zprávy vydané v roce 2012 bylo tehdy v souvislosti s vodní erozí potenciálně ohroženo 50 % zemědělské půdy. Maximální ztráta půdy v ČR byla 21 milionů tun ornice, bez ohrožení 28 % ZPF, půdy náchylné 25 %, půdy mírně ohrožené 18 %, půdy ohrožené 11 %, půdy silně ohrožené 7 %, neohroženějších půd pak bylo 11 % ZPF. (MZe, 2012)

Z jednoduchého porovnání údajů z let 2012 a 2021 lze konstatovat, že došlo k mírnému poklesu zastoupení ZPF na půdním fondu ČR. V rámci ZPF však došlo k mírnému navýšení podílu orné půdy, nicméně s tím roste i podíl erozně více ohrožené zemědělské půdy.

Z důvodu nastínění vývoje erozní ohroženosti půdy v ČR byla snaha získat výše uvedená data z uvedených situačních zpráv. Nicméně mezi rokem 2012 a 2021 došlo ke změně metod užívaných při stanovování erozní ohroženosti, proto uvedené podíly za vybraná léta nelze plnohodnotně porovnávat.



Obrázek 1 - Půdy ohrožené erozí (VÚMOP, 2021)

Z obrázku 1 je patrné, že erozně nejohroženější oblastí ČR je jižní Morava, v menší míře pak centrální část Moravskoslezského kraje, silně erozně ohrožena je i oblast Domažlicka.

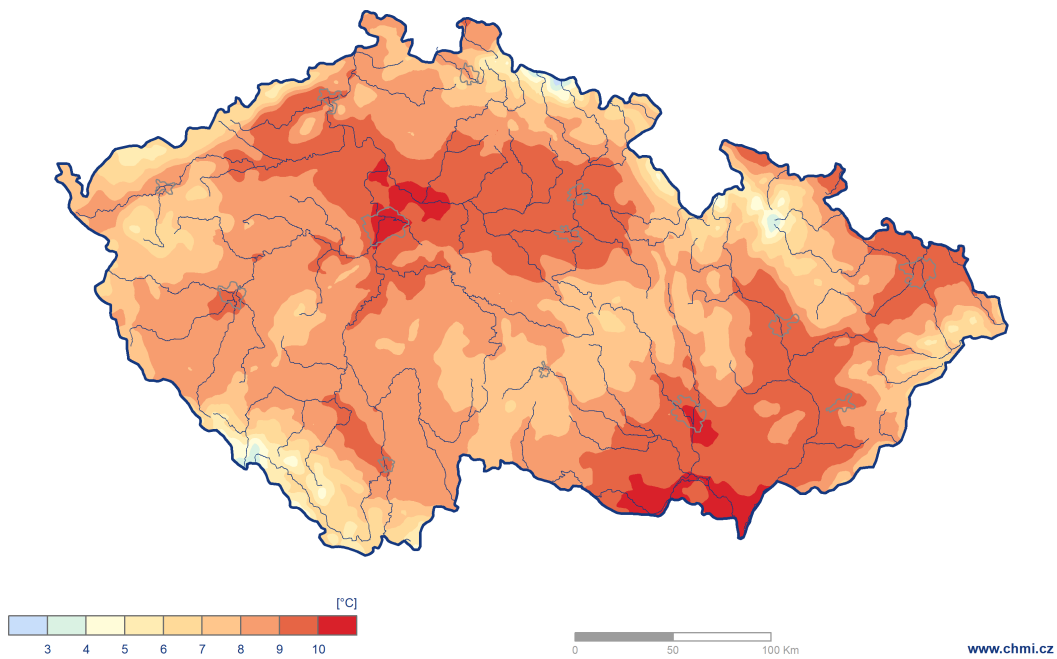
V České republice je půda nejčastěji tvořena kambizemí, gleji a pseudogleji (VÚMOP, 2021).

Půda na jižní Moravě je dominantně tvořena černozemí. To je sice z hlediska úrodnosti velmi kvalitní půdy, nicméně vzhledem k relativně vysokým průměrným ročním teplotám a nízkým srážkovým úhrnům (viz obrázek 2 a 3) je jejich náchylnost k vodní i větrné erozi značná.

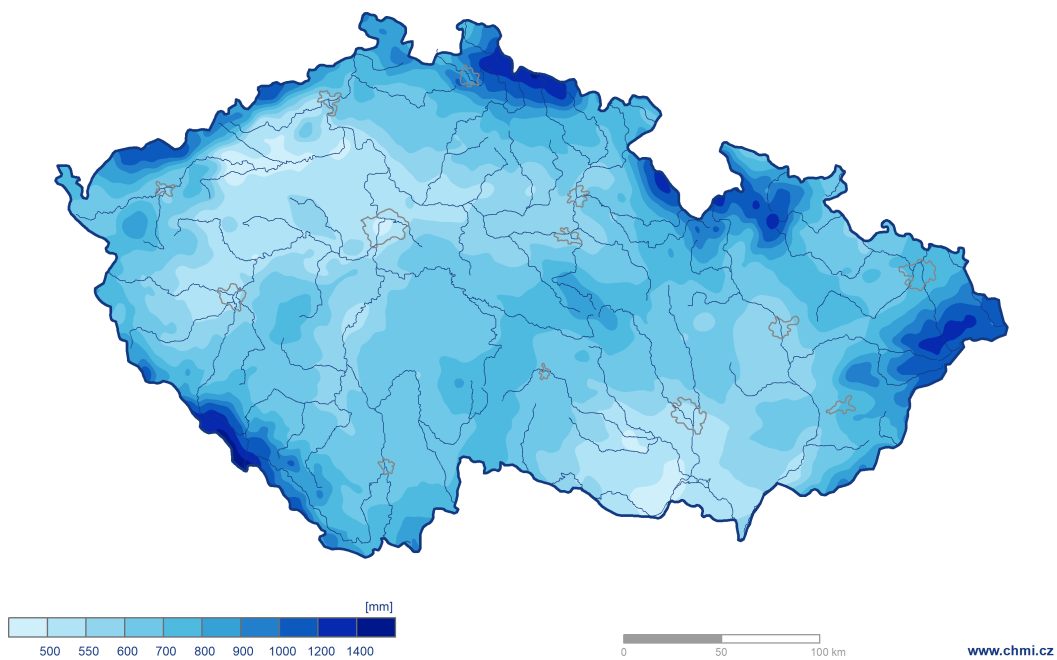
Domažlicko je oblast významnou měrou tvořena hnědozemí. Podnebí zde sice není tak teplé jako na jižní Moravě, jsou zde ale vyšší průměrné srážkové úhrny, navíc se oblast nachází v podhůří Šumavy. Topografické podmínky erozi podporují.

Přestože černo- a hnědozemě obsahují relativně vysoký podíl humusu, který přispívá k tvorbě soudržných půdních agregátů, vliv klimatu tuto vlastnost značně umenšuje. Dalším faktorem přispívajícím k náchylnosti půdy v těchto oblastech je, že jsou na nich často pěstovány širokořádkové plodiny jako kukuřice nebo cukrová řepa.

Srážky a charakter terénu jsou významným faktorem eroze i na severní Moravě. Oblast se nachází v podhůří masivu Hrubý Jeseník a průměrný dlouhodobý roční úhrn srážek se pohybuje mezi 700 až 800 mm (ČHMÚ).



Obrázek 2 - Průměrná roční teplota vzduchu za období 1991-2020 (°C), (ČHMÚ, 2021)



Obrázek 3 - Průměrný roční úhrn srážek 1991-2010 (mm), (ČHMÚ, 2021)

## STANOVOVÁNÍ ZTRÁTY PŮDY A EROZNÍ OHROŽENOSTI

Aby byla (protierozní) opatření co nejefektivnější, je nutné, aby byla aplikována na správná místa. Kde taková místa jsou, pomáhají určit erozní modely.

Obecně lze pro modelování erozních procesů využít empirické nebo fyzikální metody.

Empirické modely jsou odvozovány na základě statistické analýzy velkého množství naměřených dat. Nepostihují fyzikální podstatu jevu, jsou však jednoduše použitelné, relevantní výsledky však přinášejí, pouze jsou-li vstupní podmínky relativně podobné podmínkám, za nichž byl model odvozen. Empirickými modely jsou například USLE (Wischmeier, Smith, 1978), RUSLE (Renald a kol., 1997) nebo WaTEM/SEDEM (Van Oost a kol., 2000), které jsou popsány níže. (Krása, 2010)

Fyzikální modely oproti empirickým popisují fyzikální princip řešeného jevu, jsou však náročnější na kvalitu vstupních dat, hardware i erudici uživatele. Fyzikálními modely jsou například EROSION3D, WEPP nebo SMODERP. (Krása, 2010)

Jednou z nejrozšířenějších metod určení erozní ohroženosti zemědělských půd vodní erozí je USLE, resp. RUSLE.

S postupem doby byl manuální způsob výpočtu čím dál více vytlačován digitálními technologiemi a softwary.

### USLE – Univerzální rovnice ztráty půdy

USLE je jednoduchá empirická rovnice, která definuje průměrnou dlouhodobou roční ztrátu půdy ( $G$ ) jako součin šesti faktorů, které charakterizují topografii a pedologii území, erozní účinnost deště a vliv protierozních opatření. Tato rovnice byla definována na základě pokusů, jež byly provedeny W.H. Wischmeierem a D.D. Smithem na jednotkových pozemcích s danou délkou (22,13 m) a sklonem (9 %). Pozemky byly trvalým úhorem a byly obdělávány ve směru sklonu. Závěry (včetně univerzální rovnice) Wischmeier a Smith publikovali v roce 1978.

USLE je dána následující rovnicí (1):

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

kde:

$G$  je průměrná dlouhodobá roční ztráta půdy ( $t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ ),

$R$  faktor erozní účinnosti dešťů, vyjádřený v závislosti na kinetické energii, úhrnu a intenzitě erozně nebezpečných dešťů ( $MJ \cdot ha^{-1} \cdot cm \cdot h^{-1}$ ),

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

(Janeček a kol., 2012)

Přestože je tato rovnice běžně užívaná, má své limity. Výsledná hodnota ztráty půdy je průměrná, dlouhodobá a kvantitativně postihuje intenzitu vodní eroze na daném místě, udává množství uvolněných částic na svahu. Nelze ji však aplikovat pro analýzu jednotlivých erozních událostí. Rovnice popisuje náchylnost částí území k erozi, neřeší ale transportní procesy, tedy jestli nebo kam se erodovaná půda přesouvá. (Janeček a kol., 2012)

### *R faktor*

Vztah pro výpočet erozní účinnosti deště (R) byl odvozen empiricky. Jsou-li ostatní faktory USLE konstantní, je R faktor definován následujícím vztahem (2):

$$R = E \cdot i_{30} / 100 \quad (2)$$

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

(Janeček a kol., 2012)

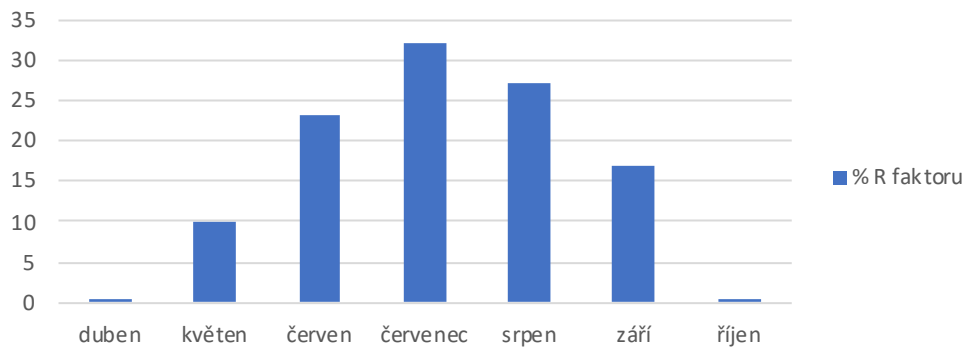
Faktor erozní účinnosti srážek je dán četností jejich výskytu, kinetickou energií, intenzitou a úhrnem. *Roční hodnota faktoru R se určuje z dlouhodobých záznamů o srážkách a představuje součet erozní účinnosti jednotlivých příválových dešťů, které se v daném roce vyskytly, přičemž se neuvažují deště s úhrnem menším než 12,5 mm a pokud v průběhu 15 minut nespadlo alespoň 6,25 mm* (Janeček a kol., s. 10, 2012).

Pro většinu zemědělské půdy v České republice lze při výpočtu ztráty půdy použít hodnoty 30 až  $45 MJ \cdot ha^{-1} \cdot cm \cdot h^{-1}$ . V oblastech srážkového stínu jsou hodnoty nižší 15 –  $30 MJ \cdot ha^{-1} \cdot cm \cdot h^{-1}$ . V horských oblastech R faktor dosahuje hodnot až  $120 MJ \cdot ha^{-1} \cdot cm \cdot h^{-1}$ . Nejčastěji se tedy v českých podmínkách používá hodnota R faktoru  $40 MJ \cdot ha^{-1} \cdot cm \cdot h^{-1}$ , což je průměrná hodnota pro



ČR: Hodnoty R faktoru byly stanoveny na základě dlouhodobých řad ombrografických záznamů ze stanic ČHMÚ a metodického rozboru erozní účinnosti srážek. (Janeček a kol., 2012)

Jak znázorňuje graf 4, půda v ČR je nejvíce ohrožena vodní erozí od června do konce srpna, kdy dochází k asi 80 % erozně nebezpečných srážek. Od listopadu do konce března zpravidla nedochází k erozně významným srážkovým událostem. (Janeček a kol., 2012)



Graf 4 - Procentuální rozložení R faktoru ve vegetačním období v ČR (Janeček a kol., 2008)

### *K faktor*

Faktor erodovatelnosti půdy (K), tedy schopnost půdy odolávat účinkům deště je uvažován jako ztráta půdy na jednotku faktoru erozní účinnosti deště R a lze určit třemi způsoby. 1) Na základě empiricky stanoveného vzorce, 2) z nomogramů, které byly odvozeny ze vzorce v bodě 1). Tyto způsoby lze aplikovat, jsou-li k dispozici výsledky půdních rozborů dané lokality. Pokud k dispozici nejsou, lze přistoupit k třetímu, přibližnému stanovení K faktoru na základě hlavní půdní jednotky (HPJ) systému bonitovaných půdně ekologických jednotek (BPEJ) ČR. (Janeček a kol., 2012)

### *LS faktor*

Faktory L a S bývají kombinovány a souhrnně označovány jako LS faktor, tzv. topografický faktor. Vyjadřuje vliv délky a sklonu svahu na projevy eroze. LS faktor je poměrem ztráty půdy na jednotce plochy svahu ke ztrátě půdy na standardním pozemku o délce 22,13 m a sklonu 9 %. S rostoucími hodnotami těchto faktorů roste náchylnost půdy k erozi, resp. k jejím výraznějším projevům. Při stanovování nepřerušené délky svahu se uvažuje pouze s půdorysnou délkou dráhy (sklon se bere v potaz jen u výrazně sklonitých pozemků). (Janeček a kol., 2012)  
V současnosti se pro stanovování LS faktoru používá například software USLE2D, který stanoví hodnoty LS faktoru na základě digitálního modelu terénu a LPIS. (Janeček a kol., 2012)  
Je i jedním z výstupů výpočetního modelu WaTEM/SEDEM.

### *C faktor*

Faktor ochranného vlivu vegetace (C) závisí na výskytu (ochranné) vegetace, která především svou listovou plochou chrání půdu před přímým dopadem kapek, a výrazně tak snižuje kinetickou energii, s níž dešťová kapka dopadne na půdu. Je proto zásadní, aby byla taková ochranná vegetace na pozemku dostatečně vyvinuta v době výskytu erozně nebezpečných srážek. Druhotně pak vegetace přímo ovlivňuje vlastnosti půdy (pórovitost, propustnost...). (Janeček a kol., 2012).

Pro komplexní stanovení C faktoru na pozemku se vychází z pětiletého období hospodaření na pozemku. Jedná se především o strukturu pěstovaných plodin, osevní postupy, nástup a způsob agrotechnických prací (Wischmeier, Smith, 1978). Pro zpřesnění výsledné hodnoty C faktoru je třeba vzít v potaz roční distribuci dešťových událostí, resp. hodnot R faktoru. (Janeček a kol., 2012).

### *P faktor*

Faktor účinnosti protierozních opatření (P) reflektuje vliv aplikovaných protierozních opatření na pozemku. Nevyskytují-li se na pozemku žádná protierozní opatření, která by erozi zabraňovala, je hodnota P faktoru rovna 1. (Janeček a kol., 2012).

Dle USLE je výsledná hodnota ztráty půdy součinem výše uvedených faktorů, proto je tato hodnota (G) menší (a eroze nižší), pokud jsou menší hodnoty erozních faktorů.

### **RUSLE – Revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy**

Renard a kol. (1997) představili RUSLE jako zdokonalenou USLE. Podoba rovnice pro výpočet průměrné dlouhodobé ztráty půdy je stejná jako USLE, liší se ve způsobu stanovování hodnot erozních faktorů.

Databáze pro určení R faktoru byla rozšířena o srážková data ze západu USA.

Aby byl zohledněn například vliv zamrzání a obsah vláhy na odolnost půdy vůči vodní erozi, byla hodnota K faktoru dána do časové závislosti.

Byl upraven i postup stanovení LS faktoru, kdy byl vytvořen algoritmus, díky němuž je lépe zohledněn podíl rýhové a mezirýžkové eroze.

Přesnější způsob stanovení hodnot vstupujících do RUSLE byl zaveden i pro faktory C a P. (Renard a kol., 1997)

## Model WaTEM/SEDEM

Model WaTEM/SEDEM (Water and Tillage Erosion Model/Sediment Delivery Model) byl vyvíjen v roce 2000 (verze 2.0.) na belgické universitě KU Leuven výzkumnou skupinou fyzické a regionální geografie. Jedná se o volně dostupný, empirický a distributivní model erozních a transportních procesů, který dohromady kloubí dva modely – WaTEM a SEDEM.

Původní verze softwaru se dočkala aktualizace - verze 2.1.0., poslední aktualizace softwaru proběhla v roce 2006. Hlavním rozdílem proti původní verzi je v řešení transportu sedimentu ve vodních tocích a jejich návaznost na vodní nádrže (Krása, 2010).

Model porovnává celkové množství ztráty půdy v povodí s celkovým množstvím sedimentu vstupujícího do vodních toků, tím je stanoven poměr odnosu SDR na daném povodí. *Tím jsou také určeny hlavní produkované výstupy původního modelu (Krása, 2004, s. 33):*

- *Celková ztráta půdy v povodí*
- *Celkový transport sedimentu do vodních toků*
- *Celková depozice sedimentu v rámci povodí*

*Díky svému distributivnímu charakteru výpočtu se zahrnutím prostorových nehomogenit území je model WaTEM/SEDEM využitelný pro řadu úkolů, například následujícím (Krása, 2004, s. 33):*

- *Výpočet ztráty půdy a opětovné sedimentace a jejich prostorové variability v rámci povodí – vlivem vodní eroze.*
- *Nalezení rizikových oblastí v rámci povodí ohrožených vodí erozí.*
- *Simulování scénářů hospodaření v povodí a dopadu variant na odnos půdy a zanášení toků.*
- *Odhad zanášení nádrží v povodí.*
- *Odhad průměrného transportovaného množství sedimentu uzávěrovým profilem povodí.*

Model je v této práci užit pro simulaci různých scénářů využití území (protierozních opatření) a jejich dopad na odnos půdy a zanášení vodních toků a nádrží, stejně tak pro odhad celkového množství sedimentu odcházející uzávěrovým profilem z povodí. Pro tato hodnocení budou zásadními hodnoty celkové ztráty půdy v povodí a celkový transport sedimentu do vodních toků, vyhodnocení se zaobírá i vlivem opatření na vodní nádrže.

Významným zdrojem informací v českém prostředí o modelu WaTEM/SEDEM je disertační práce docenta Krásky (2004), který se podílel na vývoji verze 2.1.0., pro podrobnější informace o problematice je žádoucí vyhledat tuto publikaci.

Pro výpočty v této práci byl použit WaTEM/SEDEM 2.0.

### *Metody výpočtu*

K výpočtu průměrné roční ztráty půdy model používá revidovanou univerzální rovnici ztráty půdy – RUSLE (Renard a kol., 1997), založenou na USLE (Wischmeier, Smith, 1978). Model se spíše než na časovou změnu vstupních parametrů orientuje na variability parametrů v závislosti na poloze. Výpočet povrchového odtoku bere v potaz hranice pozemků, land use, vegetační pokryv, směr orby, odtokové poměry území a cestní síť (Krása, 2004).

Výpočet je prováděn na pravidelné čtvercové síti pixelů rastrových vrstev Idrisi \*.rst. Software stanoví odtokové dráhy území v závislosti na morfologii terénu. Tyto dráhy jsou stanoveny pro každý prvek rastrové sítě. V novějších verzích softwaru může být odtok rozdělen mezi více sousedních pixelů, v závislosti na skutečném terénu. Ve starších verzích mohl odtok postoupit jen do jednoho pixelu s nejvyšší hodnotou sklonu. Je-li transportní kapacita ( $T_C$ ) odtoku dostatečně vysoká, unášená půda je transportována až do nejbližšího vodního toku. Pokud transportní kapacita odtoku dostatečná není, erodovaná půda sedimentuje na pozemku a do říční sítě nevstoupí. (Bauer, 2018)

**Transportní kapacita** je dle rovnice (3) (Van Rompaey a kol., 2001) přímo úměrná potenciálu náchylnosti k rýhové erozi ( $E_{PR}$ ). Transportní kapacita je počítána pro každý pixel digitálního modelu terénu (DMT).

$$T_C = K_{TC} \cdot E_{PR} \quad (3)$$

kde:

$T_C$  transportní kapacita ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ ),

$K_{TC}$  kalibrační koeficient transportní kapacity (m), potenciál náchylnosti k rýhové erozi ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ ).

$E_{PR}$  potenciál náchylnosti k rýhové erozi ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ ).

Dostane-li se půda do říční sítě, je celkové množství transportovaného materiálu v uzávěrovém profilu rovno součtu transportovaného materiálu v jednotlivých úsecích říční sítě. Model zanedbává proudovou erozi a sedimentaci ve vodních tocích. Aby výsledky výpočtu lépe

odpovídaly reálnému procesu, je možné zohlednit sedimentaci erozního materiálu ve vodních nádržích. A to tak, že je nádržím na říční síti přiřazen tzv. **poměr zachycení (TE)**. Tato hodnota představuje procentuální množství transportovaného materiálu, který sedimentuje v nádrži (nebude postupovat níže po toku).

Metody výpočtu poměru zachycení se různí v závislosti na objemu nádrže a velikosti povodí, na poměru velikosti zásobního prostoru nádrže a ročnímu průměrnému průtoku vody nádrží (Brune, 1953).

Pro účely řešení problematiky eroze na povodí Výrovky byla pro stanovení poměru zachycení použito Dendyho řešení (Dendy, 1978).

Dendy (1978) doplnil Bruneho databázi o další vodní nádrže a přinesl analytické vyjádření střední Bruneho křivky, viz rovnici (4) (Dendy, 1978).

$$TE = 100 \cdot 0,97^{0,19 \log \left( \frac{C}{I} \right)} \quad (4)$$

kde:

$TE$  poměr zachycení (%)

$C$  zásobní objem nádrže ( $m^3$ )

$I$  roční průměrný dlouhodobý průtok nádrží ( $m^3 \cdot rok^{-1}$ )

Pro výpočet poměru zachycení je tedy nutné znát objem nádrže a průměrné dlouhodobé roční průtoky jednotlivých nádrží. Tyto hodnoty pro všech sledovaných 70 vodní nádrží stanovil Kutil (2022).

Výpočty byly provedeny s průměrný dlouhodobým ročním průtokem  $Q_a = 0,764 \text{ m}^3 \cdot s^{-1}$  (ČHMÚ, 2022).

Objemy vodních nádrží byly zjištěny přímo z dat ČHMÚ, pro 21 nádrží byly odečteny z vodo-hospodářských map (HEIS VÚV TGM). Pro zbylé nádrže, pro které nebyly hodnoty dostupné byly odvozeny na základě ploch hladin a předpokládané hloubky. (Kutil, 2022)

#### *Vstupní data modelu*

Pro konkrétní výpočty v této diplomové práci byla jako vstupní data použita data z bakalářské práce (Kutil, 2022), která se zakládala na datech diplomové práce (Klímová, 2022) s rozlišením 10x10 m a rozsahem postihující stejně velkou oblast.

Model WaTEM/SEDEM pracuje s daty ve formátu Idrisi. Vzhledem k tomu, že vstupní vrstvy byly připravovány v prostředí ArcGIS Pro, který pracuje primárně s formáty shapefile nebo

rastr, musely být vstupní vrstvy převedeny do kýženého formátu dle následujícího schématu: polygon → rastr → ASCII → Idrisi. Pro převod ASCII na Idrisi byl použit software LS Converter.

Pro výsledky odpovídající kvality jsou nezbytnými vstupními daty vrstvy **R faktor**, **K faktor**, **C faktor**, **digitální model terénu (DMT)**, z něž je odvozen LS faktor, a rastrová mapa využití území (**land use**). Dále rastrová vrstva **vodních nádrží** s poměrem zachycení, mapa **vodních toků** s informacemi o návaznosti jednotlivých úseků.

Jako konstanty jsou pak zadávány **Parcel trap efficiency (Ptef)** a **Parcel connectivity**.

**Digitální model terénu** slouží k charakteristice území z hlediska jeho členitosti, resp. odtokových poměrů. Na základě topografických poměrů území je určen LS faktor. DMT byl přejet od Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (ČÚZK).

**Vrstva využití území (land use)** je základem pro stavení C faktoru – každému typu využití je přisouzena jedna hodnota C faktoru.

Vrstva land use vznikla na základě dat ZABAGED (ČÚZK) a LPIS (Ministerstvo zemědělství, 2009), kde je uvedeno skutečné aktuální využití zemědělské půdy – data jsou tedy přesnější, než mohou být data uvedena v ZABAGEDu.

Analýzu využití území vypracoval Ing. Jan Devátý (2018), ta byla využita v diplomové práci Klímové (2022) a její výsledky jsou vstupem i pro tuto práci.

Každý pixel rastrové vrstvy land-use nese jednu z číselných hodnot uvedených v tabulce 4 takovou, jakou model WaTEM/SEDEM požaduje, aby pixelu přiřadil odpovídající využití.

V této práci byly vytvořeny nové vrstvy land use reflektující navržené změny.

*Tabulka 2 - Hodnoty využití území v modelu WaTEM/SEDEM*

hodnota	využití území	hodnota	využití území
-2	intravilán, cestní síť a liniové prvky přerušující dráhu povrchového odtoku	6	ovocné sady
-1	vodní toky	8	chmelnice
0	oblast mimo řešenou plochu povodí	10 000	lesní porost
2	orná půda	20 000	louky a pastviny
4	vinice		

**Mapa říční sítě** je klíčovým podkladem pro stavení trasy sedimentu, jež je transportován říční sítí, od místa vstupu sedimentu do koryta vodního toku až po uzávěrový profil. Pro správný výpočet je nutno zajistit celistvost, spojitost jednotlivých úseků říční sítě, včetně uzlů, tj. míst, začátečních a koncových bodů jednotlivých úseků. Mimo to je třeba znát i směrování vodních toků. (Bauer, 2018).

Vstupní data byla převzata ze ZABAGED (ČÚZK).

**C faktor**, tedy faktor ochranného vlivu vegetace, byl stanoven podle klíče uvedeného v tabulce 5 na základě využití území, resp. kategorie LPIS, ostatním kategoriím byla přiřazena hodnota 0. Hodnoty byly převzaty z diplomové práce (Klímová, 2022). Hodnoty C faktoru pro ornou půdu byly přejaty ze vstupních dat projektu QK1920224 VÚMOP (Janoušek, Mistr, 2021), pro travní porost byl faktor stanoven podle metodiky Janečka a kol. (2012). Hodnoty pro ostatní kategorie byly přejaty z habilitační práce docenta Krásky (2010).

Jelikož byly vytvořeny nové varianty land use, musely být pro správný výpočet vytvořeny i vrstvy C faktoru s odpovídajícími hodnotami.

*Tabulka 3 - Hodnoty C faktoru na základě kategorie LPIS (Klímová, 2022)*

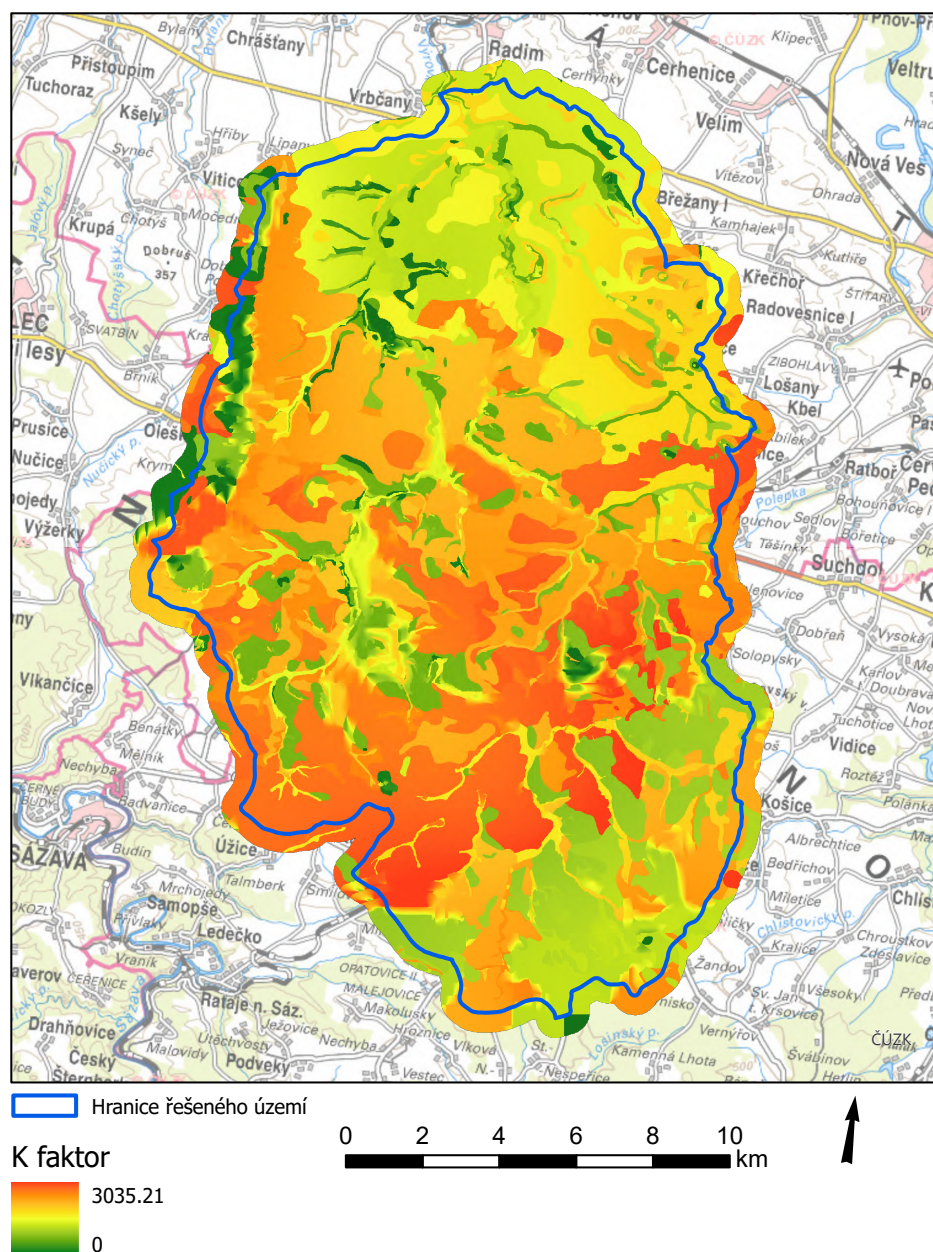
kategorie LPIS	C faktor		
	Kutná Hora	Kolín	Praha východ
okres			
orná půda	0,220	0,247	0,201
trvalý travní porost	0,005		
vinice	0,550		
ovocný sad	0,300		
chmelnice	0,600		
porost rychle rostoucích dřevin	0,005		

**K faktor**, tedy faktor erodovatelnosti půdy, byl stanoven na základě hlavní půdní jednoty (HPJ). Informaci o HPJ získáme z map bonitovaných půdně-ekologických jednotek (BPEJ) poskytovaných Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půdy, v.v.i. Dle Metodiky Janečka a kol. (2012) byla každé hodnotě HPJ přisouzena hodnota K faktoru. Aby byla zajištěna celistvost území i v případě vrstvy K faktoru, byla v místech, která nemají HPJ, jeho hodnota interpolována. Hodnoty K faktoru byly z důvodu souladu jednotek vynásobeny stem.

**R faktor** – hodnoty erozní účinnosti deště byly převzaty z regionalizované vrstvy, která vznikla vyhodnocením 30leté řady srážkových událostí a byla vytvořena pro Ministerstvo životního prostředí (MŽP, 2015).

Užití modelu bylo zamýšleno na území menší velikosti, jejichž R faktor lze postihnout jednou hodnotou. Toto zájmové území je však větší a jedna hodnota pro něj není dostačující. Model však neposkytuje zvláštní vstup pro různé hodnoty R faktoru, proto byly hodnoty R faktoru vynásobeny K faktorem a výsledný RK faktor vložen do modelu coby K faktor.

Hodnoty RK faktoru jsou znázorněny na obrázku 4.



Obrázek 4 - Hodnoty vstupní vrstvy K faktoru



**Parcel trap efficiency** určuje, kolik procent transportovaného sedimentu se usadí na konkrétních typech pozemků– orná půda: 0, les: 75, trvalé travní porosty: 75 (Krása, 2010). Dle uvedených hodnot se na orné půdě neusadí žádný sediment, který do pixelu vstoupí, na lesních a travních porostech se usadí 75 % přitékajícího sedimentu.

**Parcel connectivity** reprezentuje podíl sedimentu v procentech, který při přechodu přes hranici pozemků (s různým využitím) zůstane na výše položeném pozemku. Pro ornou půdu je hodnota 40, pro les a TTP 75 (Krása, 2010). Je-li vstupní plochou orná půda, její plocha je redukována o 40 % a množství sedimentu odpovídající této ploše vstoupí na níže položený pozemek. Plocha lesních a travních porostů je redukována o 75 %.

**Vodní nádrže** s hodnotami poměru zachycení sedimentu byly výstupem práce Šimona Kutila (2022), tato data byla použita i v této práci. Vodní nádrž v modelu představuje úsek vodního toku, kde dochází ke snížení množství transportovaného sedimentu. Tato redukce je dána poměrem zachycení. (Bauer, 2018)

#### *Výstupní data modelu*

Po proběhnutí výpočtu modelem získáme dva typy dat – textové soubory s číselnými hodnotami představujícími množství sedimentu a rastrové soubory, které vizuálně reprezentují informace v textových souborech. Celková čísla jsou zobrazena v dialogovém okně „Results“, jedná se o hodnoty (t/rok):

- Total sediment production - celkové množství ztráty sedimentu na povodí
- Total sediment deposition - celková depozice (usazení) sedimentu v povodí před vstupem do vodních toků
- Total sediment export - celkové množství sedimentu vstupující do vodních toků – to je celkové množství ztráty sedimentu zmenšeno o hodnotu celkové depozice, případně i o hodnotu usazeného sedimentu v nádržích
- Total river export - celkové množství sedimentu odcházející uzávěrovým profilem z povodí
- Total pond deposition – celkové množství sedimentu zachycené v jednotlivých vodních nádržích v povodí

#### Textové soubory:

- pitdata.txt – identifikuje a lokalizuje bezodtoká místa
- pondsedimentdeposition.txt – množství sedimentu na vstupu, výstupu a usazeného v jednotlivých nádržích, spolu s poměrem zachycení
- ponddata.txt – čísluje a lokalizuje nalezené nádrže
- projecrriversediment.txt – obsahuje informace o množství sediment, který do jednotlivých úseků vodní sítě vstoupí ze svahů přes břehovou hranu (hillslope), který vstoupí z předchozího úseku (sediment input) a který z úseku odchází (sediment output)

#### Rastrové soubory:

- nettowatererosion.rst – pixely této vrstvy nesou hodnotu, která říká, kolik materiálu se v daném místě uvolní (eroze, záporná hodnota), resp. uloží (depozice, kladná hodnota) v t/ha/rok
- inflow.rst – říká, kolik splavenin vstupuje do jednotlivých pixelů (t/rok)
- outflow.rst - říká, kolik splavenin vystupuje z jednotlivých pixelů (t/rok)
- LS.rst – obsahuje vypočítané hodnoty LS faktoru

Dále jsou to rastry pit.rst, pondnr.rst, uparea.rst, ty však nejsou pro tuto práci zásadní.

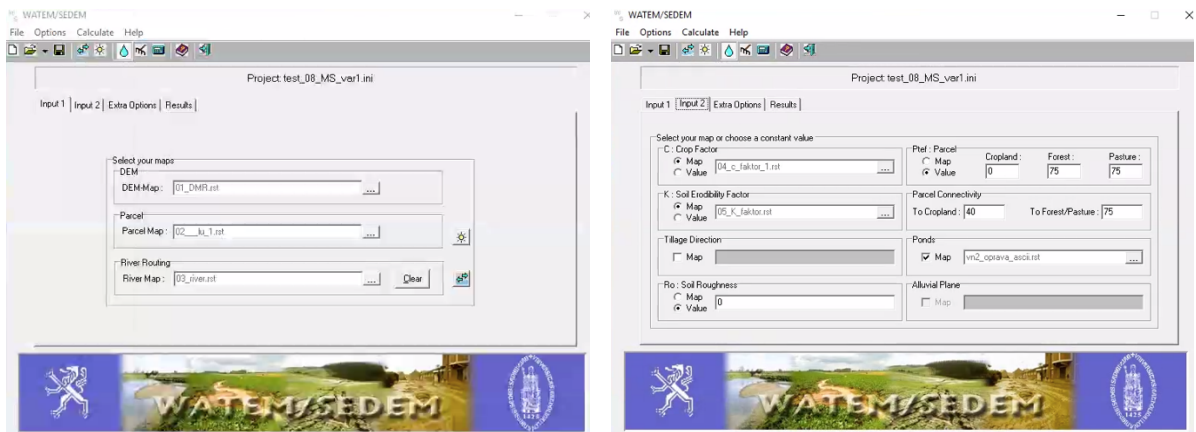
Pro tuto práci (vyhodnocování scénářů) jsou zásadní informace z pondsedimentdeposition.txt, projecrriversediment.txt, nettowatererosion.rst a inflow.rst

#### *Uživatelské prostředí modelu*

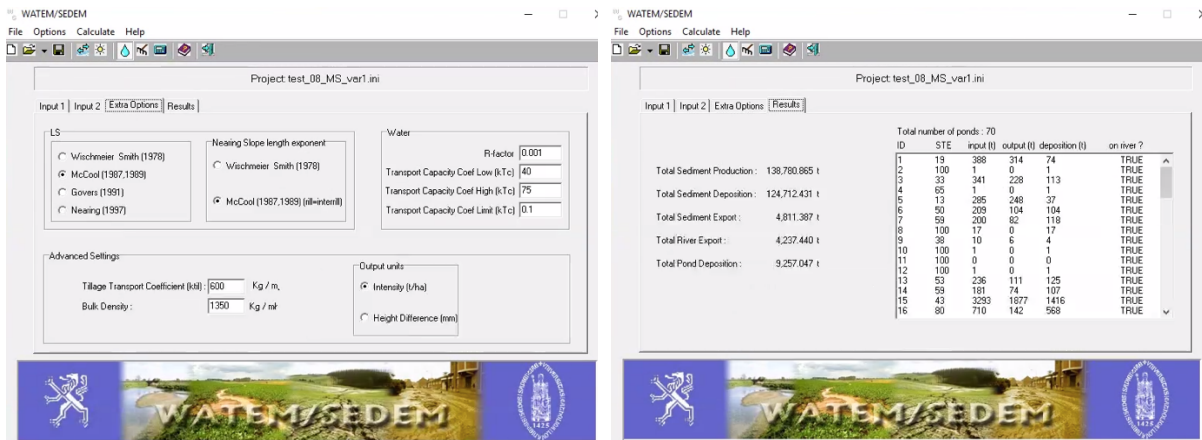
Výhodou softwaru je přehledné a uživatelsky přívětivé ovládání. V horní části okna se nacházejí rozbalovací paletky a lišta s ikonami nejdůležitějších nástrojů. Pod lištou je zobrazen název projektu, ve kterém se pracuje. Následuje řádek záložek, do nichž se zadávají vstupní data a hodnoty. Po ukončení výpočtu přibude nová záložka „Results“, kde se zobrazí výsledky popsané výše. Jednotlivé záložky jsou zachyceny na obrázcích 5 a 6.

Pro výpočet jsou nezbytné pouze vrstvy digitálního modelu terénu (DMT) a pozemků, resp. landuse (Parcel map). Některé hodnoty (C a K faktor a Ptef) lze zadat číselnou hodnotou nebo rastrovou vrstvou. Mapa říční sítě a vodních nádrží je vložena ve formě rastru.

Dále je volena výpočetní metoda a hodnota R faktoru pro stanovení LS faktoru.



Obrázek 5 - Ukázka Input 1 a Input 2



Obrázek 6 - Ukázka záložek Extra Options a Results

## CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ POVODÍ VÝROVKY

Řešené území, povodí horního a středního toku Výrovky, se nachází ve východní části Středočeského kraje. V centrální části zájmového území povodí Výrovky leží obce Zásmuky, kterou prochází silnice první třídy číslo 2, spojující obec na západ s Prahou a na východ s Kutnou Horou a Pardubicemi. V severní části povodí se nachází obdobně velká obec Kouřim. Co do počtu obyvatel největší obec povodí se nachází v jeho jižním cípu, jedná se o Uhlířské Janovice.

Výrovka pramení v obci Kochánov v nadmořské výšce 493 m n.m., jižně od Uhlířských Janovic. Délka celého toku je 61,8 km, velikost povodí je 544,5 km<sup>2</sup> (HEIS VÚV), problematika je však řešena na ploše 265,04 km<sup>2</sup>. Uzávěrový profil zájmové části povodí Výrovky se nachází u vlakového nádraží Plaňany pod silničním mostem silnice 329. Na tomto profilu byla prováděna měření projektu SS02030027 - *Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu*, na základě toho byl uzávěrový profil určen na tomto měrném profilu ČHMÚ v Plaňanech a byla zde prováděna další potřebná měření.

Zájmové území má přibližně oválný tvar orientovaný v severo-j jižním směru. Severní vrchol hranice povodí se nachází nedaleko severní hranice obce Plaňany, jižní vrchol se nachází poblíž osady Kochánov (prameniště Výrovky). Východní hranice je rozvodnicí povodí Výrovky a Sázkavy, prochází například kolem vrcholů Kamenný vrch (456 m n.m.) a Bulánka (401 m n.m.). Východní hranice zájmového území je rozvodnicí povodí Výrovky a Klejnárky, prochází přes Malešovský vrch (459 m n.m.) a Křečhoř (333 m n.m.). Jedná se o levostranný přítok Labe, do něj se vlévá pod jezem v obci Kostomlátky ve výšce 175 m n.m. Nadmořská výška v povodí kolísá mezi 175 a 555 m n.m.

Výrovka má dva významnější přítoky. Levostrannou Šemberu, která se do Výrovky vlévá až níže pod zájmovým územím. A pravostrannou Bečvárku, jejíž celý tok se naopak nachází ve vybrané části povodí.

Uzávěrový profil je zvětšen na obrázku 7, hranice povodí je znázorněna na obrázku 8.



Obrázek 7 - Uzávěrový profil v Plaňanech



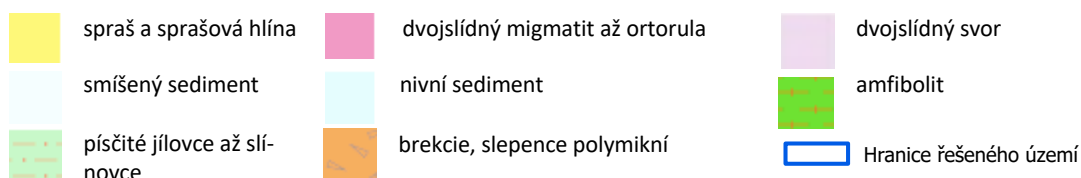
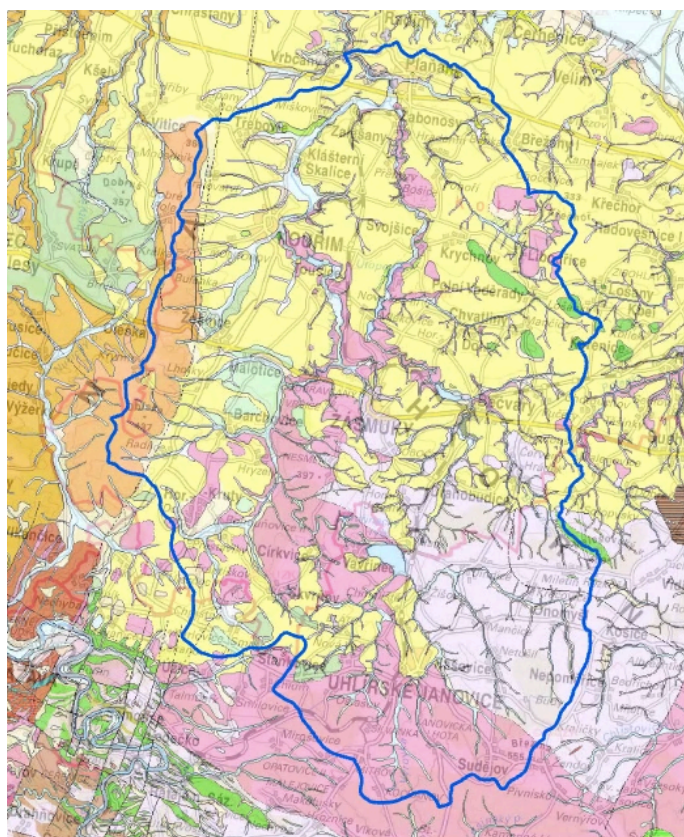
Obrázek 8 - Zájmové území na podkladu Základní mapy (ČÚZK)

## Geologie

Povodí Výrovky spadá do soustavy Český masiv. Zájmové území zasahuje do kutnohorsko-svratecké geologické oblasti, sestávající z kutnohorského krystalinika a svrateckého krystalinika, a oblasti kvartér. Území je dominantně tvořeno metamorfovanými horninami, v oblasti vodní toků pak převažují horniny sedimentované. (ČGS)

Severní oblast území je převážně tvořena sprašemi a sprašovými hlínami (žlutá). Jižní část je více tvořena dvojslídovým svorem (světle fialová) a dvojslídovým migmatitem až ortorulou (růžová). Oblasti vodních toků jsou tvořeny nivním a smíšeným sedimentem (světle modrá). Část západní hranice území je tvořena brekciemi a polymiktními slepenci. (ČGS)

Geologické poměry jsou ilustrovány na obrázku 9 na Geologické mapě 1 : 50 000 (ČGS).

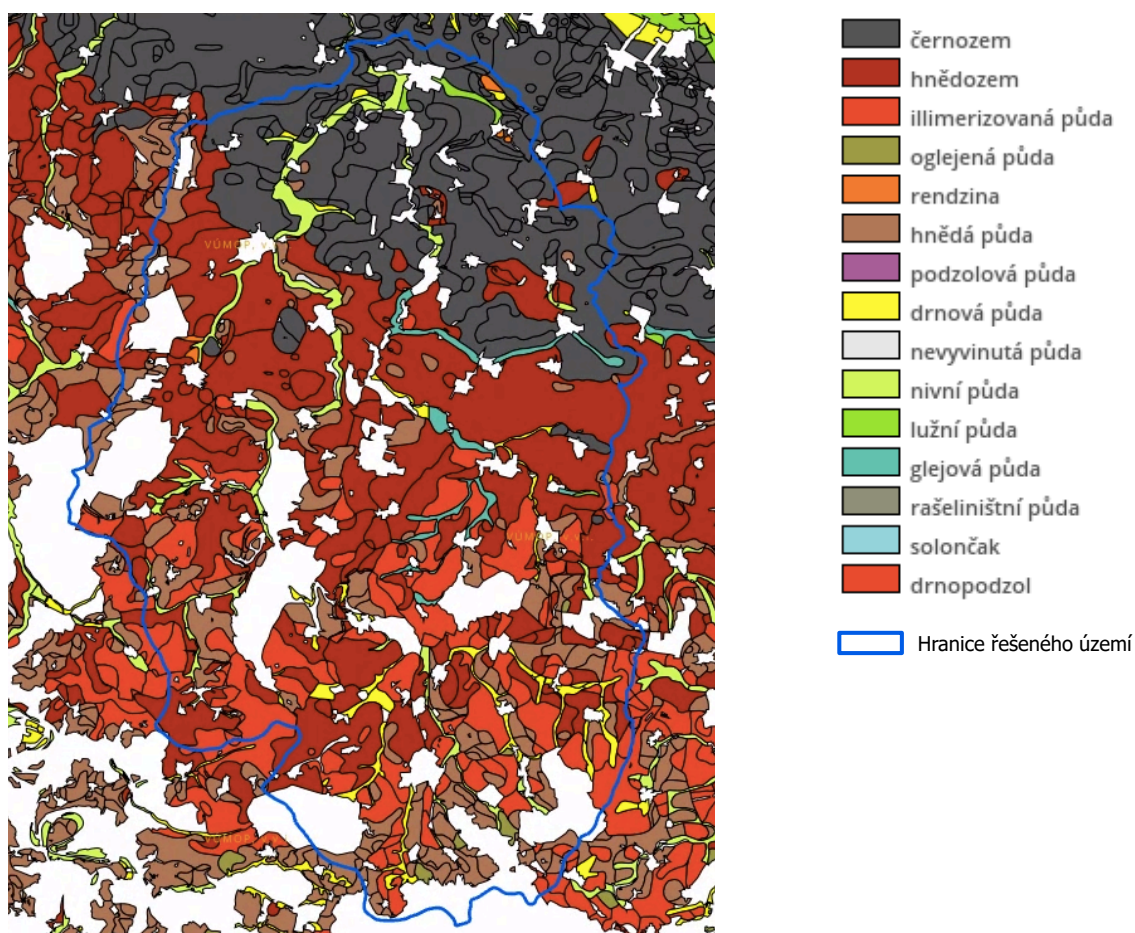


Obrázek 9 - Geologické poměry zájmového území, Geologická mapa 1:50000 (ČGS)

## Půdní typy

Na základě Komplexního průzkumu půd (VÚMOP, v.v.i.) je skladba území poměrně rozmanitá. Severní část území je tvořena různými typy černozemě (regozem a fluvizem). Jižní část je tvořena mozaikou několika typů hnědozemě, kambizemě a luvizemě. V oblastech toků je půda tvořena převážně gleji. V menší míře jsou zastoupeny nivní, glejové a lužní půdy.

Půdní poměry jsou znázorněny na obrázku 10.



Obrázek 10 - Mapa Komplexního průzkumu půd na řešeném území (VÚMOP, v.v.i.)

## Hydrogeologie

Výrovka v zájmovém území prochází dvěma hydrogeologickými rajony. Pramení v severní části kutnohorského krystalinika, níže po toku pod obcí Zásmuky Výrovka vstupuje do rajonu Velimská křída. Hlavním povodím Výrovky je Labe. (ČGS)

Kutnohorské krystalinikum, tvořeno skalními horninami, je slabě puklinově propustné. V této oblasti převažuje mělká zvědeň v kvartérních sedimentech a pásnu přípovrchového rozpojení puklin skalních hornin. Oblasti Velimské křídy je typická nepravidelným střídáním vrstev kolektorů a izolátorů s puklino-průlinovou propustností. (Richter a kol., 2022)

## Hydrologie

Povodí Výrovky je povodím 3. řádu s kódem 1-04-06.

Na řešeném území je hlavním přítokem Výrovky pravostranná Bečvárka. Dalšími pravostrannými přítoky jsou Janovický, Anenský, Onomyšlký potok, Špandava, Zalešanský potok, Blinka a bezejmenné přítoky.

Levostrannými přítoky Výrovky jsou Ostašovský, Bohouňovický, Barchovický a Malotický potok, Střebovka, Střebovská strouha a bezejmenné přítoky.

V řešeném území se vyskytuje 70 vodních nádrží. Mezi největší patří Vavřinecký rybník, Podbečvárecký rybník a rybník Utopenec.

Hydrologická data byla přejata z Evidenčního listu hlásného profilu č. 60 v Plaňanech, což je uzávěrový profil řešeného území. Provozovatelem stanice je Český hydrometeorologický ústav. V tabulce 4 jsou uvedeny N-leté průtoky.

Nejvyšší hodnota vodního stavu byla zaznamenána 2.6.2013, a to 454 cm.

Průměrný roční stav: 49 cm

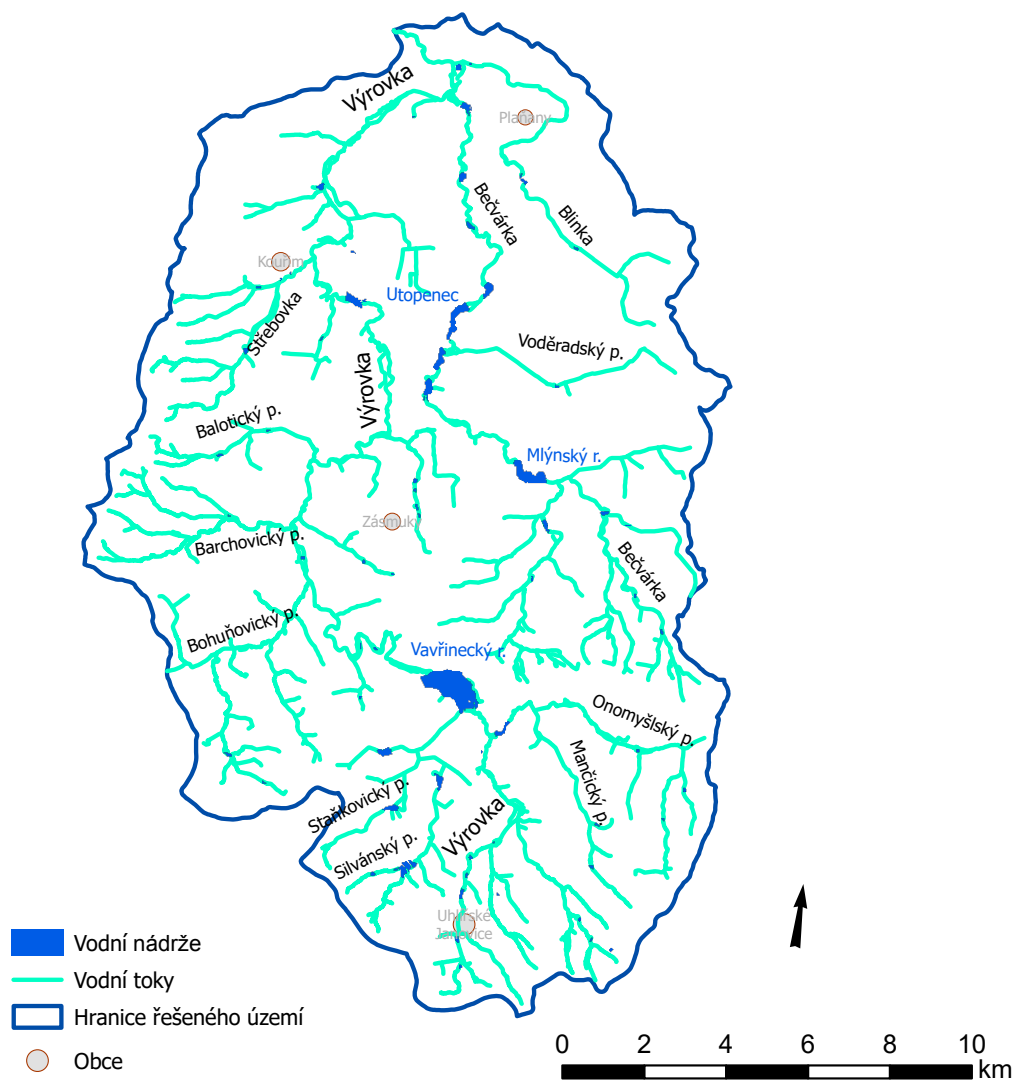
Průměrný roční průtok:  $0,688 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Tabulka 4 - N-leté průtoky, stanice Plaňany (ČHMÚ, 2023)

N-leté průtoky	Q <sub>1</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>10</sub>	Q <sub>50</sub>	Q <sub>100</sub>
$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	7	21,2	30,2	58,9	75

Hydrologická síť povodí je zachycena na obrázku 11.





Obrázek 11 - Hydrologická síť zájmového území, vstupní data: ArcČR 500, Kutil (2022)

## Využití území

Využití území na základě dat ZABAGED a LPIS zpracoval Ing. Jan Devátý (2018), typ využití a jeho plošné zastoupení v zájmovém území jsou převzaty z diplomové práce (Klímová, 2022) a jsou shrnuty v tabulce 5.

Tabulka 5 - Zastoupení využití území v povodí Výrovky (Klímová, 2022)

Využití území	Rozloha (ha)	Procentuální zastoupení (%)
Intravilán, cestní síť	133,64	5,04
Vodní plochy	251,31	0,95
Orná půda	17 136,61	64,66
Vinice	0,85	0,00
Ovocné sady	292,25	1,10
Zahrada	781,45	2,95
Křovinatý porost	1 840,23	6,94
Lesní porost	3 815,18	14,39
Louky a pastviny	1 050,32	3,96

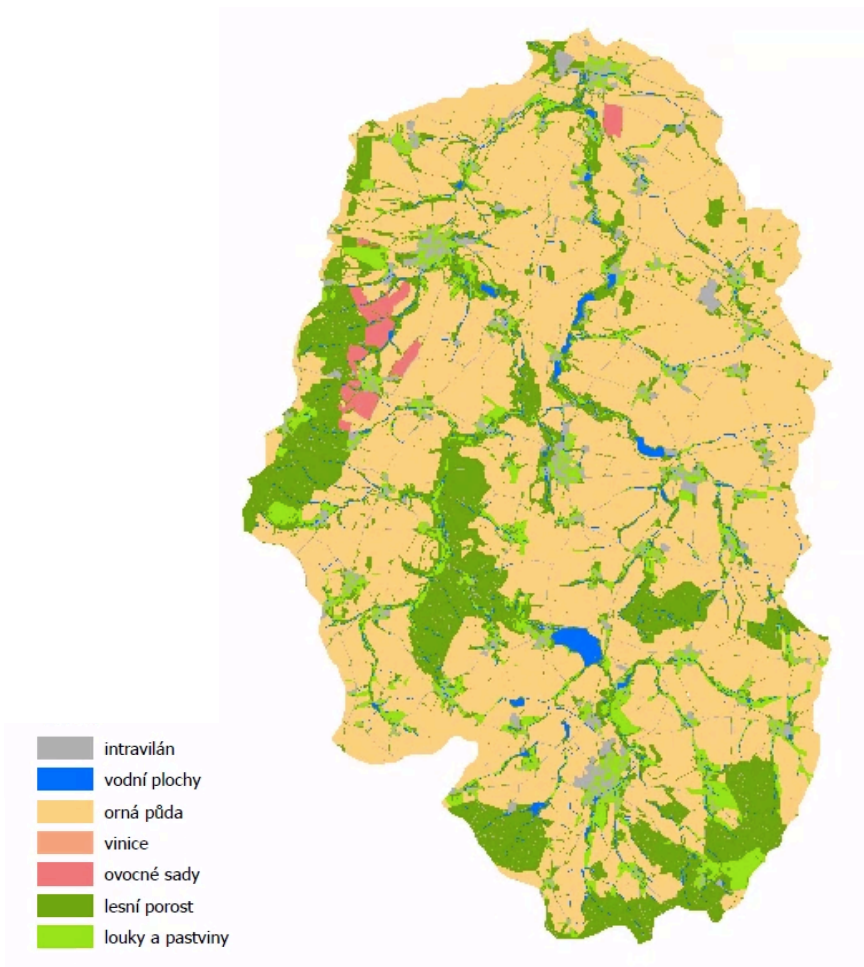
Téměř dvě třetiny území zaujímá orná půda, téměř 22 % pak lesní a křovinatý porost. Vodní toky a nádrže pak představují necelé 1 % zájmového území.

K nejvýznamnějšímu uvolňování půdy dochází na orné půdě. Vzhledem k tomu, že mezi ornou půdou a vodními plochami (hlavně toky) často chybí překážka, která by bránila, aby byly uvolněné půdní částice transportovány až do říční sítě, dochází ke značnému obohacování vodních toků látkami smytých z orné půdy. Z tohoto důvodu byl navržen Scénář 1 (viz dále).

Zelené plochy, které obecně mohou transportu sedimentu do řek bránit, jsou v tomto povodí výraznou většinou tvořeny lesy. Ty se zde nejčastěji vyskytují v nejsvažitéjších a krajních částech povodí. Louky a pastviny (trvalé travní porosty) jsou zastoupeny jen jednotkami procent, jejich potenciální protierozní účinek je tak velmi limitován, ať už se jedná o přímou ochranu půdy před vznikem eroze, zamezení povrchového odtoku, a tedy prevence zanášení říčního systému sedimentem. Z hlediska protierozní ochrany a ochrany vodních toků není místní skladba (nedostatek trvalého travního porostu) a distribuce zelených ploch velmi příznivá.

Při tvorbě vrstev využití území byla kategorie křovinatý porost sloučena s kategorií lesní porost. Stejně tak kategorie zahrady byla přiřazena k loukám a pastvinám.

Využití území v povodí je zachyceno na obrázku 12.



Obrázek 12 - Ilustrativní obrázek využití území v zájmové oblasti (Devátý, 2018)

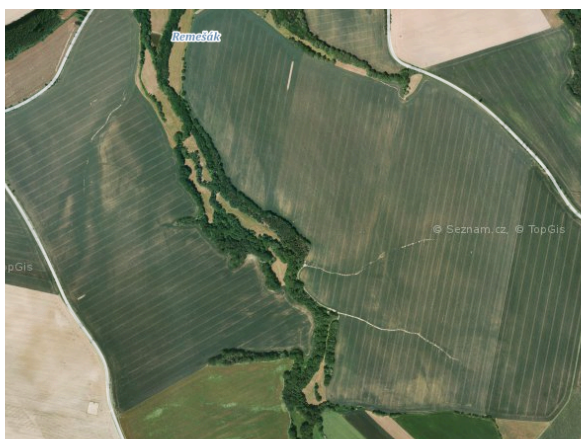
## Eroze na řešeném území

Zanášením vodních nádrží v dané lokalitě se ve své bakalářské práci zabýval Šimon Kutil (2022). Pro 12 kritických vodních nádrží byl proveden výpočet stanovení teoretické predikce míry jejich ročního zanášení transportovaným sedimentem. Za předpokladu zachování stejného ročního vývoje by mělo do 30 let dojít k úplnému zanesení (zániku) vodních nádrží Mlýnek a Svatý Prokop. Tyto nádrže jsou z pohledu následků eroze nejohroženější. Naopak relativně malý vliv na zmenšení kapacity v důsledku eroze se projevuje u vodních nádrží Vavřínecký rybník a Utopenec (obrázek 17). Tyto nádrže by za stejných podmínek za 75 let byly připraveny „jen“ o 10, resp. 12 %, svého objemu. (Kutil, 2022)

Celková eroze v povodí je 139 100 t/rok. Do vodních toků vstupuje 20 100 t/rok, tedy zhruba 14 % celkového vyprodukovaného množství sedimentu v povodí. To je dáno depozicí erodované půdy v rámci povodí, dříve, než je sediment zanesen do vodních toků.

Přestože množství půdy vstupující do hydrologické sítě je výrazně nižší než půda erodovaná, jedná se o významnou hodnotu. Erodovaná půda je obohacena o hnojiva, pesticidy a další látky, které negativně ovlivňují kvalitu vod. Usazování sedimentu ve vodních nádržích snižuje jejich zásobní objem, v případě říčních koryt jejich kapacitu. Samozřejmě dochází i ke zhoršení kvality zemědělské půdy. Kvůli těmto a dalším nepříznivým důsledkům eroze by měly být podniknuty kroky ke snížení intenzity tohoto jevu. Dále v této práci jsou navržena tři typová řešení protierozních opatření, která mají v důsledku zlepšit kvalitu orné půdy i povrchové vody v povodí.

Na obrázcích 13 až 16 jsou zachyceny příklady projevů eroze v podobě erozních rýh na ortofotomapě (Seznam.cz, TopGis), oblasti, kde dochází k depozici sedimentu, a terénní deprese, kde dochází ke kumulaci a zadržení vody na orné půdě.



Obrázek 13 - Příklad erozních rýh vedoucích k vodnímu toku (Seznam.cz, TopGis)



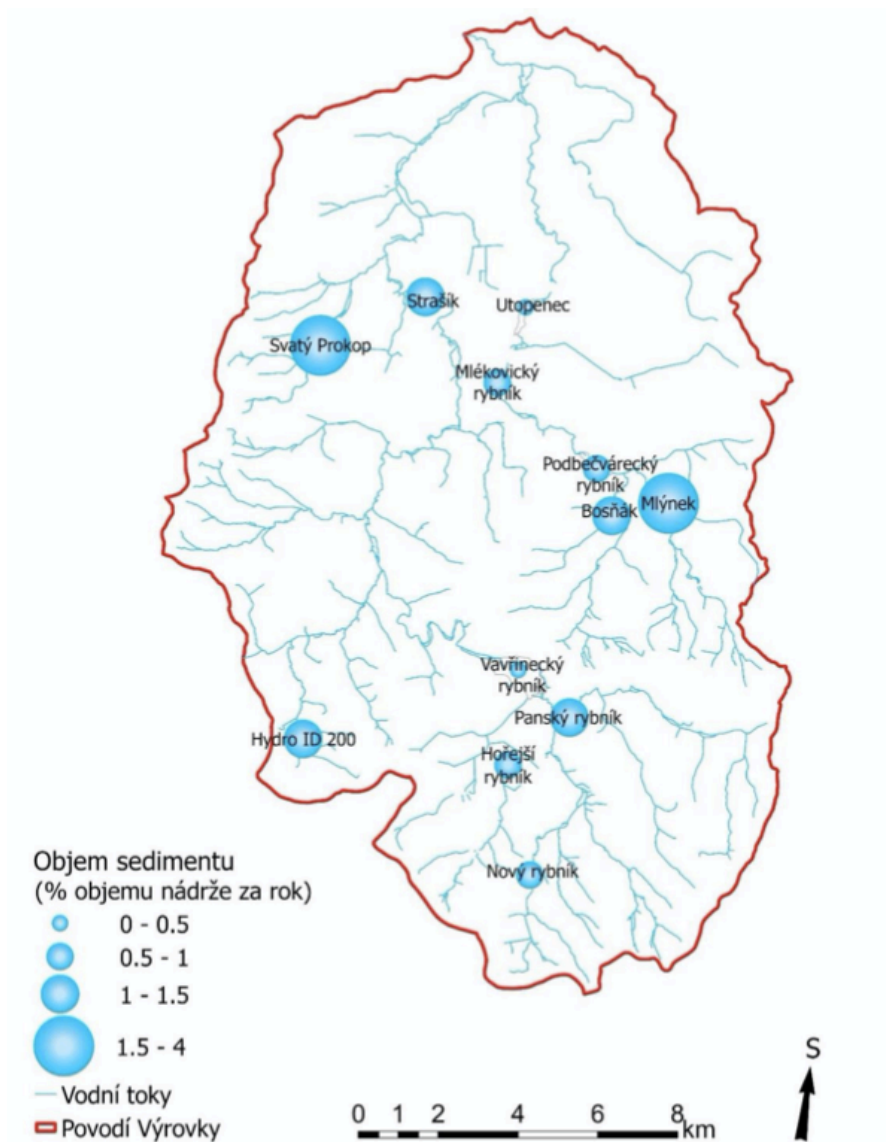
Obrázek 14 - Příklad eroze na svahu poblíž Vavříneckého rybníka



Obrázek 15 - Příklad depozice sedimentu na povodí



Obrázek 16 - Příklad terénní deprese v patě svahu



Obrázek 17 - Změna objemu sedimentu ve vodních nádržích (Kutil, 2022, s. 74)

## ANALÝZA DAT ČHMÚ

Data pro tuto analýzu byla poskytnuta Ing. Vítem Kodešem (ČHMÚ) z měření pro projekt SS02030027 Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu.

Výsledky modelu WaTEM/SEDEM budou diskutovány s odhadem množství sedimentu proteklého (transportovaným) uzávěrovým profilem v Plaňanech za rok 2022 (viz podkapitola Diskuse výsledků modelu a analýzy dat ČHMÚ).

Množství proteklého sedimentu bylo stanoveno na základě dat ČHMÚ. Jedná se o data koncentrace plavenin a měření průtoku Výrovky na měrném profilu v Plaňanech a srážková data ze třech stanic - Žišov, Kostomlaty a Cerhenice.

V roce 2022 probíhala rekonstrukce stanice Plaňany, která ovlivnila měření průtoků. V období od 25.4. do 18.7. byl průtok stanoven podle měrné křivky, ne přímým měřením. V období rekonstrukce bylo čidlo pro měření koncentrace plavenin umístěno nad stavbu, aby data nebyla stavbou ovlivněna.

K dispozici byla průtoková data za období od 1.6.2021 00:00 do 31.12.2022 23:00 zaznamenávána každou celou hodinu.

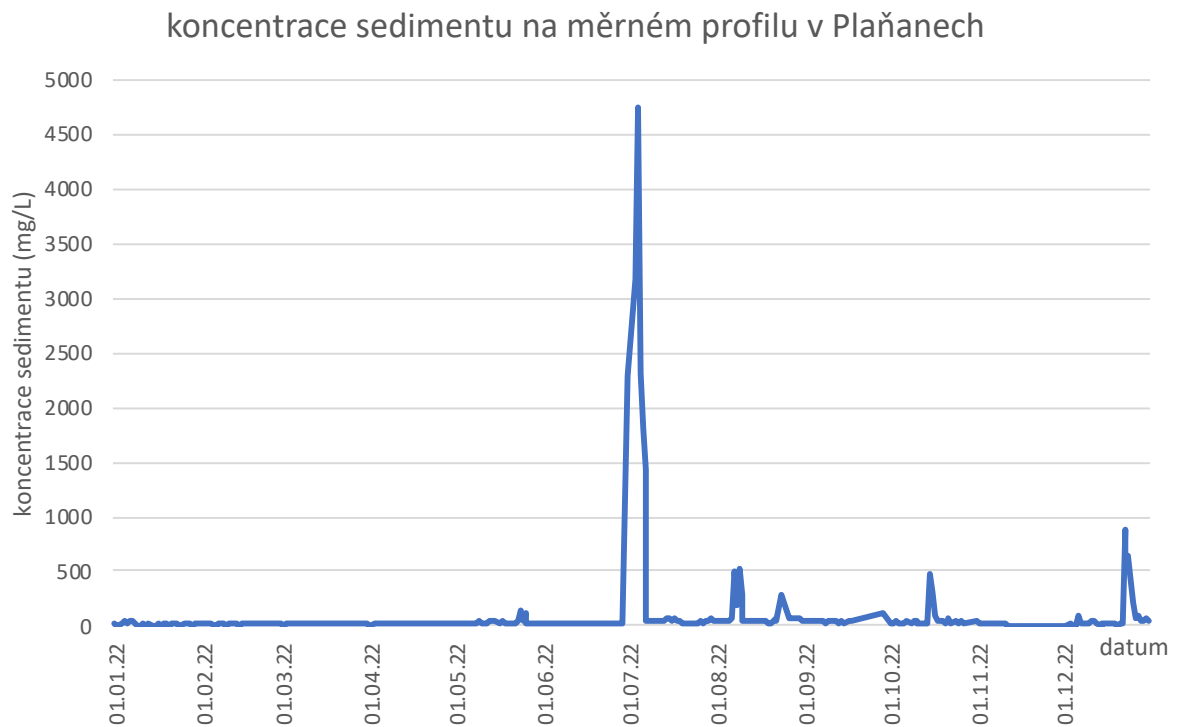
Koncentrace plavenin byly poskytnuty za období od 11.6. 2021 do 31.12.2022. Hodnoty byly vyhodnoceny z automaticky odebíraných vzorků o celkovém objemu 1 l denně. Data byla zaznamenána typicky v 18:00, přesto řada není úplná, a to z důvodu neodebrání vzorku nebo nemožnosti odebraný vzorek zpracovat. Tato skutečnost se nejvíce projevila na červnových datech – za červen 2022 je k dispozici pouze šest hodnot. Příčinou tohoto výpadku je pravděpodobně suché období (nízké průtoky), kvůli čemuž nebylo možno odebrat dostatečné množství vzorku pro zpracování. Datum zaznamenaných hodnot odpovídají výskytu srážkových událostí na povodí.

Srážková data ze stanic Žišov, Kostomlaty a Cerhenice byla k dispozici za období 1.1.2021 – 31.12.2022 s časovým krokem 10 minut.

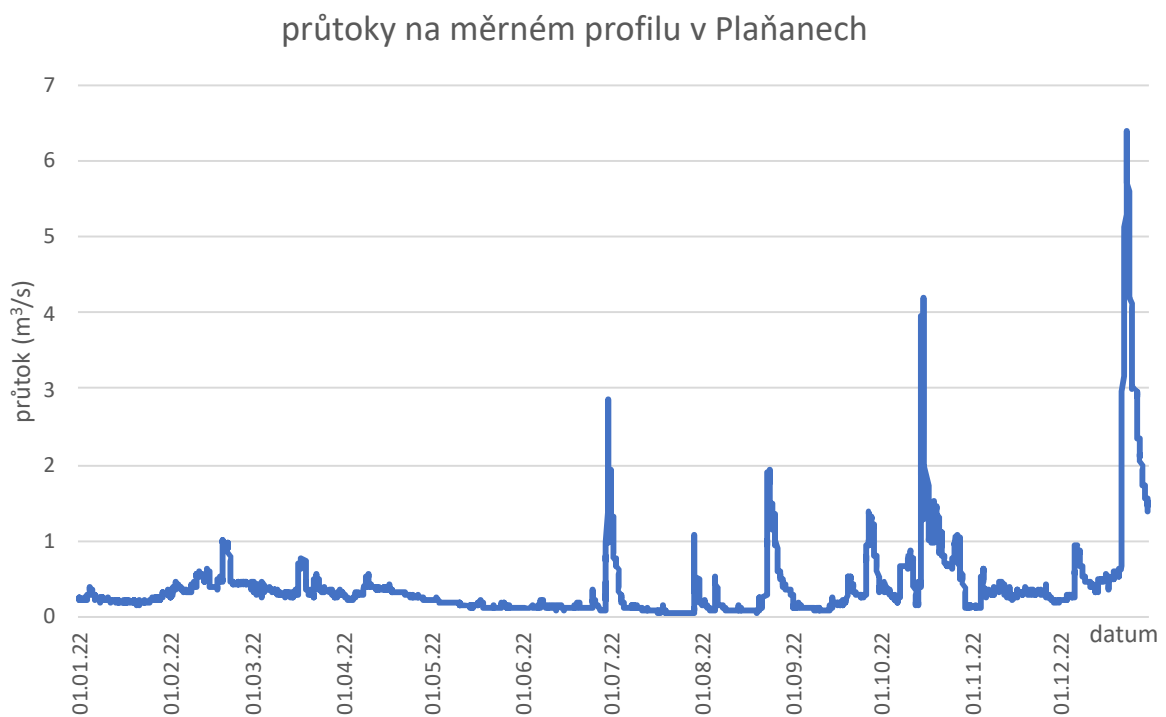
Pro účely této práce je zjednodušeně uvažováno, že koncentrace plavenin ve Výrovce naměřené v uzávěrovém profilu odpovídá množství sedimentu, které vstoupilo do říční sítě zredukováno o sediment, který se usadil ve vodních nádržích, tzv. proteklé množství sedimentu.

Posuzované období bylo zvoleno od 1.1.2022 do 31.12.2022, aby byla získána relevantní roční hodnota, která může být porovnána s výsledkem modelu.

Hodnoty koncentrací sedimentu, průtoků ze stanice v Plaňanech a srážkové úhrny ze stanic Kostomlaty (P2KOST01), Žišov (P3STAN01) a Cerhenice (P7CERH01) v roce 2022 jsou znázorněny v grafech 5, 6 a 7.

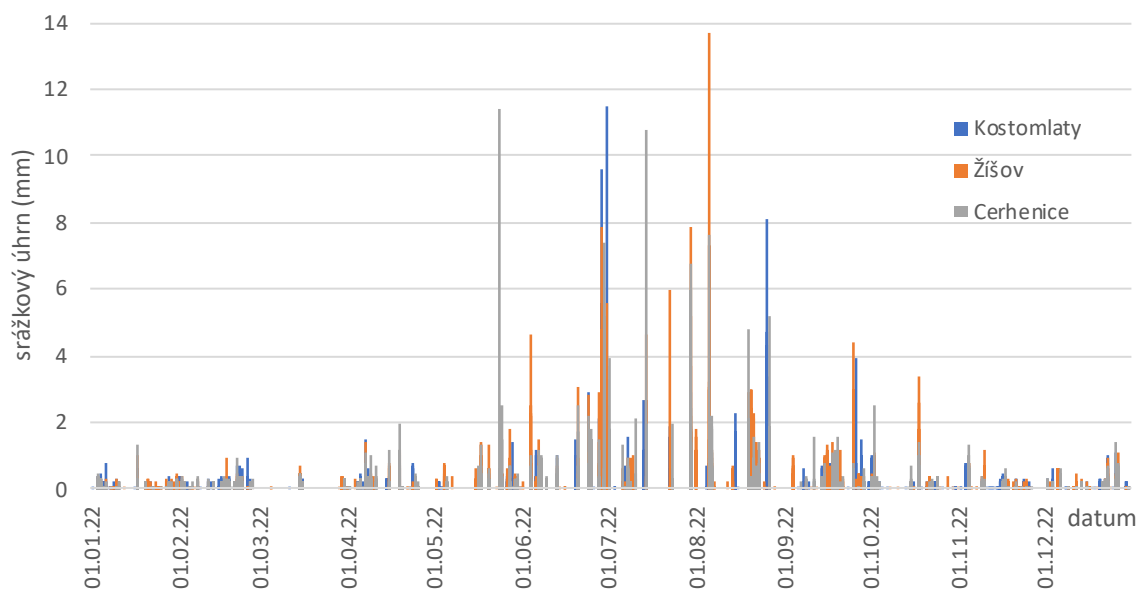


Graf 5 - Koncentrace sedimentu na měrném profilu v Plaňanech v roce 2022 (ČHMÚ)



Graf 6 - Průtoky na měrném profilu v Plaňanech v roce 2022 (ČHMÚ)

## srážkové úhrny



Graf 7 - Srážkové úhrny na stanici Kostomlaty, Žišov a Cerhenice v roce 2022 (ČHMÚ)

V tabulce 6 jsou uvedeny úhrny a maxima za rok 2022 pro každou stanici. Nejvyšší hodnoty obou charakteristik byly dosaženy na stanici Žišov. Tato stanice se jako jediná nachází uvnitř zájmového povodí. Stanice Kostomlaty a Cerhenice se nacházejí severně od povodí, jimi zaznamenané srážky tedy nedopadly na zájmové území. Přesto lze předpokládat, že část srážek se mohla projevit i v povodí Výrovky.

Tabulka 6 - Maximální a celkový úhrn srážek v roce 2022 ve vybraných stanicích (ČHMÚ)

stanice	Kostomlaty	Žišov	Cerhenice
maximum (mm)	11,5	13,7	11,4
úhrn (mm)	464,1	690,6	529,5

## Odhad „pozařového“ množství proteklého sedimentu

Z grafu 5 je zřejmé, že největší podíl na celkovém množství sedimentu mají výrazně vysoké hodnoty koncentrací na začátku července daného roku. Proto je cílem odhadnout hodnotu „pozařového“ hodnoty koncentrace sedimentu a jeho celkové proteklé množství. Tím budou stanoveny orientační hodnoty celkové eroze, které jsou přirozené pro zkoumané povodí.



Jako „požadové“ množství je uvažované takové množství sedimentu, které by proteklo uzávěrovým profilem za běžných podmínek, tj. období bez zvýšených nebo nízkých průtoků, resp. výrazných srážkových událostí nebo dlouhých období bez srážek.

Pro získání běžných hodnot byla data o koncentracích a průtocích za dané období rozdělena do tří intervalů (zvláště data koncentrací a průtoků), kdy hranicemi byly hodnoty horního a dolního kvartilu. Z hodnot ležících mezi dolním a horním kvartilem byl vypočítán průměr a výběrová směrodatná odchylka. Následně byl určen 95 % interval spolehlivosti pro průměr. Jako „požadová“ hodnota koncentrace sedimentu ve Výrovce byla stanovena střední hodnota 95 % intervalu spolehlivosti pro průměrnou koncentraci sedimentu zaokrouhlená na celé číslo. Odhad „požadové“ koncentrace sedimentu ve Výrovce je 26,5 mg/L.

Běžný průtok byl stanoven na 0,27 m<sup>3</sup>/s.

Na základě těchto hodnot bylo vypočítáno „požadové“ množství proteklého sedimentu za rok 2022 v povodí Výrovky na 226 tun.

Výpočet je nastíněn v tabulce 7.

Tabulka 7 - Výpočet „požadové“ hodnoty koncentrace sedimentu a běžného průtoku

	dolní kvartil	horní kvartil	průměr	výb. směrodatná odchylka	95 % interval spolehlivosti	„požadová“ hodnota
<b>koncentrace sedimentu (mg/L)</b>	14,00	42,00	26,68	8,06	(25,47; 27,89)	<b>26,5</b>
<b>průtok (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,14	0,42	0,27	0,07	(0,269; 0,273)	<b>0,27</b>
<b>„požadové“ množství sedimentu za rok 2022 (t):</b>	0,026*0,27*365*24*60*60					<b>226</b>

### Odhad celkového množství proteklého sedimentu za rok 2022

Pro stanovení množství sedimentu proteklého uzávěrovým profilem, resp. sedimentu transportovaného říční sítí, byly použity naměřené hodnoty koncentrace i průtoků v roce 2022, resp. od 31.12.2021 19:00 do 31.12.2022 23:00.

Kolik sedimentu proteklo uzávěrovým profilem bylo vypočteno dvěma způsoby: metodou součtu 24hodinových úseků a pomocí rozdělení dat na kvartily.

V případě průtoků byla k dispozici všechna data v hodinovém kroku. V případě koncentrací nebyly hodnoty záznamy u 49 dnů v roce 2022.

Chybějící dubnové hodnoty byly doplněny 15 mg/L – průměr z ostatních dubnových hodnot. Za chybějící červnová data byla doplněna hodnota 35 mg/L – průměr květnových hodnot. Pro chybějící červencová data byly hodnoty interpolovány. Chybějící data v září a říjnu byla doplněna hodnotou 45 mg/L – průměr červencových hodnot bez extrémních koncentrací na začátku měsíce, a to z důvodu srovnatelných srážkových úhrnů a průtoků.

#### *Metoda součtu časových úseků*

Vzhledem k podrobnosti průtokových dat, bylo nasnadě stanovit množství proteklého sedimentu na základě proteklého objemu vody a odpovídající koncentrace, tedy v co největší podrobnosti v rámci možností.

Jelikož koncentrace byly zpravidla zaznamenávány jednou denně v 18:00, předpokládá se tato koncentrace v předešlých 24 hodinách. Proto bylo vypočteno, kolik vody proteklo v daném 24hodinovém úseku a vynásobeno koncentrací zaznamenanou na konci tohoto úseku. Poté byla dílčí množství z 365 úseků sečtena, a tak bylo získáno množství celkového proteklého sedimentu za rok 2022.

Za rok 2022 proteklo uzávěrovým profilem v Plaňanech **3 624 tun** sedimentu.

„Pozadová“ hodnota 226 t pak tvoří 6 %. Necelých 95 % sedimentu tedy vzniklo při nadstandardních průtocích a koncentracích.

#### *Metoda rozdělení dat na kvartily*

Při výpočtu touto metodou byla data rozdělena do třech intervalů oddělených hodnotou horního a dolního kvartilu (zvláště data koncentrací a průtoků). Pro každý interval byl vypočten průměr, výběrová směrodatná odchylka, následně určen 95 % interval spolehlivosti pro průměr. Střední hodnota tohoto intervalu je uvažována jako průměrná hodnota koncentrace, resp. průtoku pro daný interval, analogicky jako při výpočtu „požadového“ množství proteklého sedimentu. Výpočty jsou naznačeny v tabulce 8 a 9.

*Tabulka 8 - Výpočet průměrných koncentrací sedimentu*

koncentrace sedimentu (mg/L)	interval dat	průměr	výb. směrodatná odchylka	95 % interval spolehlivosti	průměrná hodnota
	dolní kvartil	9,51	2,81	(8,90; 10,12)	10
	středních 50 % dat	26,68	8,06	(25,47; 27,89)	26,5
	horní kvartil	328,86	791,64	(162,89; 494,83)	329

Tabulka 9 - Výpočet průměrných průtoků

průtok (m <sup>3</sup> /s)	interval dat	průměr	výb. směrodatná odchylka	95 % interval spolehlivosti	průměrná hodnota
	dolní kvartil	0,11	0,02	(0,11; 0,11)	0,11
	středních 50 % dat	0,27	0,07	(0,27; 0,27)	0,27
	horní kvartil	1,00	0,95	(0,96; 1,04)	1,00

Vynásobením průměrné koncentrace, průtoků a odpovídajícího počtu dnů (v sekundách) bylo stanoveno množství sedimentu pro každý interval. Po sečtení těchto dílčích hodnot bylo získáno celkové množství vyprodukovaného sedimentu v povodí v roce 2022, a to 2675 tun. Výpočet je nastíněn v tabulce 10.

Tabulka 10 - Výpočet celkového množství vyprodukovaného sedimentu

interval dat	koncentrace sedimentu (mg/L)	průtok (m <sup>3</sup> /s)	počet dní	množství sedimentu (t)
dolní kvartil	10	0,11	85,6	8
středních 50 % dat	26,5	0,27	189,4	117
horní kvartil	329	1,00	90,0	2 550
celkové množství vyprodukovaného sedimentu v povodí v roce 2022:				2 675

Z vypočtených hodnot vyplývá, že „pozadové“ množství sedimentu 226 t tvoří 8,4 % celkového vyprodukovaného množství. Necelých 90 % sedimentu se tedy do říční sítě dostane při hodnotách spadajících do horního kvartilu průtoků, resp. koncentrací.

Za běžných koncentrací a průtoků uzávěrovým profilem proteče 117 t (4,4 %) celkového množství sedimentu, za nízkých koncentrací a průtoků pak 8 t (0,3 %). Ze středních 50 % hodnot dat vyplývá, že v roce 2022 uzávěrovým profilem protéklo 2 550 t.

Vzhledem ke zvoleným výpočetním postupům lze předpokládat, že „součtovou“ metodou byla určena přesnější hodnota. Při výpočtu přes kvartily dochází ke zkreslení dat průměrováním, což může vnést značné nepřesnosti zvláště při výpočtu v horním kvartilu, kde se hodnoty výrazně vzdalují od průměru. Navíc není zaručeno, správné skombinování průtoků a koncentrací, jen se předpokládá, že vyšší průtoky odpovídají vyšším koncentracím a naopak.

Z výše uvedených důvodů mohlo dojít k podhodnocení množství proteklého sedimentu o téměř 1000 t, resp. 25 %. Přesto si vypočtené hodnoty řádově odpovídají, jak hodnotami celkové množství, tak poměrem „pozadové“ hodnoty k celku, kdy „pozadové“ množství sedimentu tvoří do 10 % celkového proteklého, resp. transportovaného sedimentu.

## Vyhodnocení významné erozní události

Pro ilustraci byla vybrána jedna událost za rok 2022, která byla co do hodnot koncentrací sedimentu nejvýznamnější, viz graf 5, jedná se o období od 30.6. do 7.7. 2022. V tomto období bylo dosaženo nejvyšších koncentrací za celý rok 2022.

Z tabulky 11 vyplývá, že k zásadnímu nárůstu koncentrace došlo během 30.6., kdy byla v 18 hodin zaznamenána víc než sto krát vyšší hodnota – 2290 mg/L – než předešlý den ve stejný čas – 20 mg/L. Data z 1. a 2.7. nebyla zaznamenána, předpokládám, že koncentrace rostla mezi 30.6. a 3.7. rovnoměrně. Výpočet byl proveden s doplněnými (interpolovanými) koncentracemi dle tabulky 11. Koncentrace rostla až do 4.7., kdy dosáhla maxima 4759 mg/L. 5.7. byla zaznamenána hodnota 2306 mg/L. Koncentrace dále klesala, 7.7. v 6:00 byla zaznamenána koncentrace 1439 mg/L. 7.7. v 7:45 už byla naměřena výrazně nižší hodnota - 49 mg/L. Za hodinu a třičtvrtě tedy koncentrace klesla o více než 95 %.

Podobné koncentrace (kolem 50 mg/L) byly zaznamenávány následujících deset dní, poté se koncentrace snížila asi o polovinu na hodnotu kolem 25 mg/L.

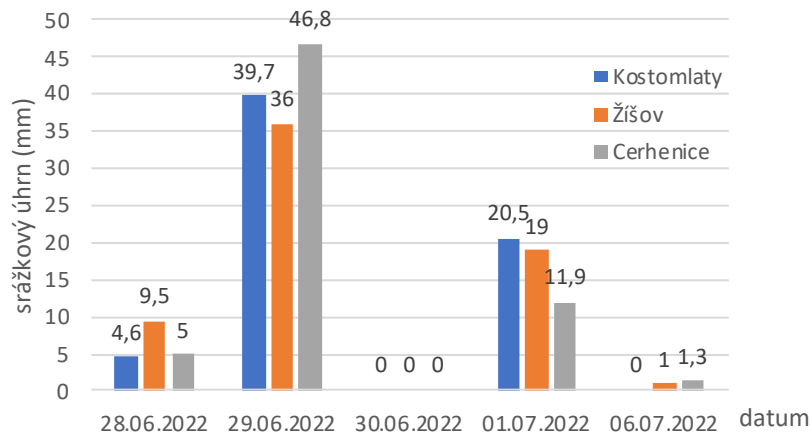
V tabulce 11 jsou zaznamenány hodnoty naměřených koncentrací sedimentu ve Výrovce v řešeném období. Na první pohled je patrné, že dosažené koncentrace mnohonásobně převyšují nejen požadovou hodnotu 24 mg/L, ale i hodnotu horního kvartilu 40 mg/L.

(Vypovídací hodnota koncentrace stanovené ze slévaného vzorku a automatickým odběrem je shodná.)

Tabulka 11 - Koncentrace sedimentu 29.6.2022 - 7.7.2022 (ČHMÚ)

datum	typ odběru	koncentrace (mg/L)
29.06.2022 18:00	slévaný vzorek	20
30.06.2022 18:00	slévaný vzorek	2 290
01.07.2022	doplněno	2 587
02.07.2022	doplněno	2 883
03.07.2022 18:00	slévaný vzorek	3 180
04.07.2022 18:00	slévaný vzorek	4 759
05.07.2022 18:00	slévaný vzorek	2 306
06.07.2022 18:00	slévaný vzorek	1 803
07.07.2022 06:00	automatický odběr	1 439
07.07.2022 07:45	automatický odběr	49

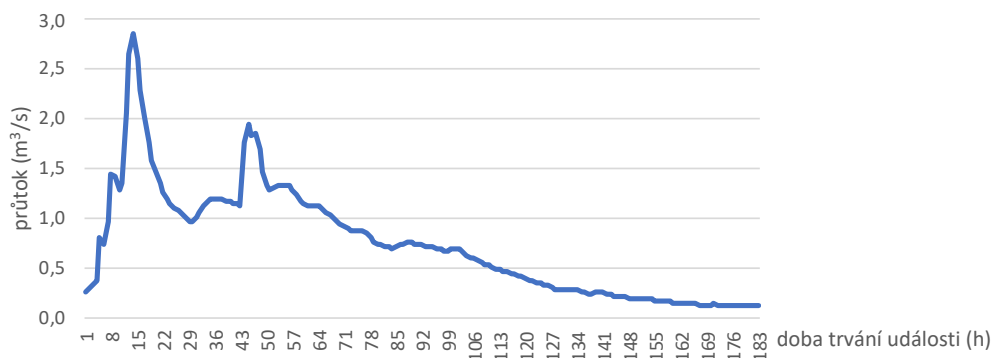
Koncentrace sedimentu v říční síti je dána výskytem a charakterem srážek, a tedy velikostí průtoků. V grafu 8 jsou zaznamenány denní srážkové úhrny v pozorovaném období, 26. a 27.6. k srážkovým událostem nedošlo. Znovu pak přišlo až 6.7., tyto srážky však byly výrazně méně vydatné než ty na konci června.



Graf 8 - Srážkové úhrny jednotlivých stanic v období 28.6 - 2.7.2022 (ČHMÚ)

Z toho vyplývá, že největší vliv na nárůst koncentrace sedimentu měla srážková událost probíhající od 28.6. 22:00 do 29.6. 6:50. Doba, po kterou byla koncentrace výrazně zvýšena, byla zřejmě prodloužena srážkovou událostí, která proběhla 1.7. mezi 18:20 a 21:20.

Srážky se na průtocích začaly projevovat 29.6. v 17:00, kdy byl naměřen průtok  $0,27 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tato hodnota byla výpočty výše určena jako běžný průtok. Průtok roste až do 30.6. 6:00, kdy bylo dosaženo maximálního průtoku za příslušnou srážkovou událost, a to  $2,855 \text{ m}^3/\text{s}$ . Následuje pokles průtoku na  $0,928 \text{ m}^3/\text{s}$  (30.6. 22:00), poté průtok roste až na  $1,849 \text{ m}^3/\text{s}$  (1.7. 13:00). Poté už jen s dílčími nárůsty průtok klesá, až 5.7. v 7:00 dosahuje hodnoty  $0,27 \text{ m}^3/\text{s}$  a dále klesá. 7.7. v 7:00 se ustaluje na hodnotě  $0,12 \text{ m}^3/\text{s}$ . Průběh průtoku je znázorněn na grafu 9. 7.7. ráno rovněž dochází k výraznému poklesu koncentrace sedimentu ve Výrovce, jak je uvedeno výše.



Graf 9 - Průběh průtoku od 29.6.2022 17:00 do 7.7.2022 7:00

Srážková událost počínající 28.6. ve 22:00 se na průtocích začala projevovat po 29 hodinách. Kulminace průtoku nastala 23 hodin po skončení deště 29.6. Z časové souslednosti také vyplývá, že dešť 1.7. neměl vliv na nárůst průtoku na 1,849 m<sup>3</sup>/s a nedošlo jím ke změně trendu průtoku (klesání).

Nárůst koncentrace sedimentu byl zachycen 30.6. v 18:00, tedy téměř dva dny po začátku srážkové události, 12 hodin po dosažení kulminačního průtoku. Maximální koncentrace zaznamenaná 4.7. v 18:00 nastala řádově čtyři dny po skončení deště.

Vzhledem k tomu, že byla hodnocena pouze jedna srážková událost, resp. období způsobující nejvyšší koncentrace sedimentu v uzávěrovém profilu zájmového území, nelze činit přesnější závěry o průběhu koncentrace sedimentu v závislosti na srážkových úhrnech. O něco těsnější vztah má koncentrace s průtoky, kdy s rostoucím průtokem roste koncentrace sedimentu s výrazně menší prodlevou. Přesto v 29.6. v 18:00 byla zaznamenána koncentrace 20 mg/L, tedy hodnota spíše podprůměrná.

Množství sedimentu proteklého uzávěrovým profilem při této události byl odhadnut následujícím postupem. Předpokládá se, že naměřená koncentrace (zaznamenaná zpravidla v 18:00) byla v toku předešlých 24 hodin. Daná koncentrace byla vynásobena objem vody, který protekl za odpovídajících 24 hodin. Součet sedimentu za jednotlivé zpravidla 24hodinové úseky je odhad sedimentu, který protekl při této erozní události uzávěrovým profilem.

Hodnoty pro výpočet přibližného množství vyprodukovaného sedimentu této události jsou uvedeny v tabulce 12.

Tabulka 12 - Výpočet vyprodukovaného sedimentu při vybrané erozní události

	<b>koncentrace (mg/L)</b>	<b>proteklý objem (m<sup>3</sup>)</b>	<b>sediment (t)</b>
29.06.2022 18:00	20	19 657	0,4
30.06.2022 18:00	2 290	126 713	290,2
01.07.2022 18:00	2 587	110 859	286,8
02.07.2022 18:00	2 883	97 442	280,9
03.07.2022 18:00	3 180	64 841	206,2
04.07.2022 18:00	4 759	46 126	219,5
05.07.2022 18:00	2 306	23 844	55,0
06.07.2022 18:00	1 803	14 500	26,1
07.07.2022 06:00	1 439	5 460	7,9
07.07.2022 07:45	49	442	0,0
			<b>1 373</b>

Podle výpočtu proteklo uzávěrovým profilem v Plaňanech při této erozní události 1373 tun sedimentu. To je téměř 40 % celkového vyprodukovaného sedimentu na povodí za daný rok – 3624 t („součtová“ metoda). Při „pozaďové“ hodnotě 226 t bylo v roce 2022 vyprodukováno 2025 t při ostatních erozních událostech.

## TERÉNNÍ PRŮZKUM

1.5.2023 byl uskutečněn terénní průzkum na povodí Výrovky.

Toho dne byly příznivé povětrnostní podmínky (15 – 19 °C, polojasno, bez srážek).

29.4.2023 na zájmovém území proběhly srážkové události. Z toho důvodu se předpokládalo, že by v terénu mohly být dobře viditelné stopy eroze.

Jeho cílem bylo bližší seznámení se s řešenou lokalitou, ověření skutečnosti a modelu a zachycení příkladů projevů eroze.

Jelikož se jedná o rozsáhlé území, byla zájmová místa předem vytipována na základě ortofotomap a výstupů zpracovaných v předešlých pracích – především vrstvy znázorňující místa intenzivnější eroze a depozice sedimentu a vrstva inflow stávajícího stavu, která znázorňuje intenzitu transportu sedimentu.

Zájmová místa se nacházela v různých částech povodí. Byla naplánována trasa (obrázek 18), po níž byla místa s pomocí automobilu navštívena. Trasa je dlouhá 53 km.

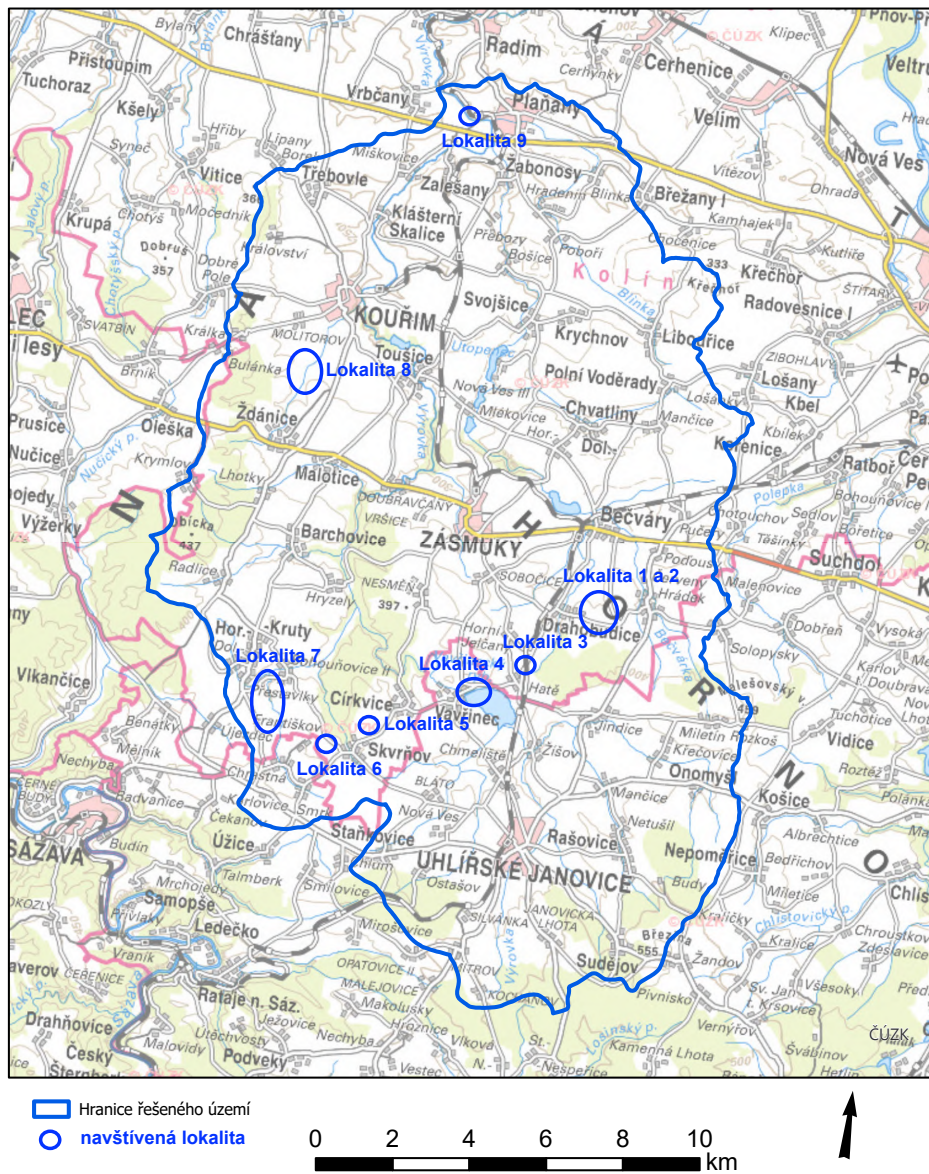


Obrázek 18 - Trasa a vytipovaná místa terénního průzkumu (Mapy.cz)



Směr terénního průzkumu byl oproti plánu pozměněn. Do povodí jsme vjely z východu po státní silnici 2. Jako první byl proto navštíven bod 10 dle obrázku 18 u obce Bílkov. Dále jsme se pohybovaly na jih po znázorněné trase.

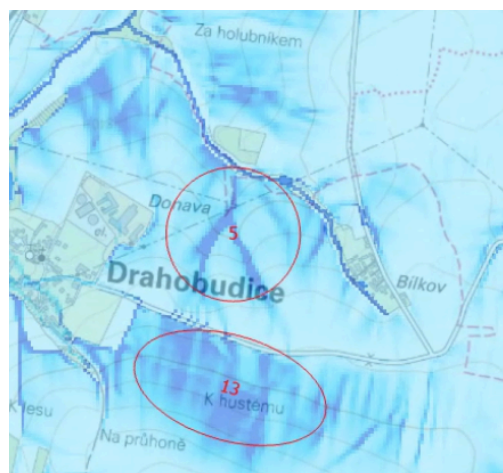
Navštívené lokality jsou zakresleny na Základní mapě (ČÚZK) v obrázku 19.



Obrázek 19 - Navštívené lokality na ZM10 (ČÚZK)

## Lokalita 1

Podle předpokladu mohla být při první zastávce patrná dráha, kudy je sediment transportován směrem k vodnímu toku, jelikož dle vrstvy inflow v dané lokalitě dochází k vysokému transportu sedimentu, obrázek 20 oblast 5. Koryto vodního toku v oblasti 5 je zachyceno na fotu 1. Jedná se o pohled po vodě z pravého břehu, který je asi o 1,5 m níže než levý. Na levém břehu se rozkládá orná půda, na pravém je zatravněno.



Obrázek 20 - Vytipovaná místa

I přes rostlinný pokryv byly objeveny stopy transportu sedimentu – foto 2, pohled na vodní tok u Bílkova.



Foto 1 - Vodní tok u Bílkovic, pohled po vodě



Foto 2 - Stopy dráhy sedimentu

## Lokalita 2

V lokalitě 13 na obrázku 20 dle modelu probíhá plošná eroze. A navíc je sediment transportován přes cestu. Foto 3 zachycuje příkop podél levé strany cesty, ze které má cestu přetékat sediment. Je ale nepravděpodobné, že by byla kapacita příkopu za běžných podmínek překonána, a sediment by tak byl transportován přes cestu na spodní svah.

Stopy plošné eroze nebyly patrné, na fotu 4 jsou však zachyceny pukliny na pozemku oblasti 13, které nebyly zřídka viditelným úkazem při průzkumu.



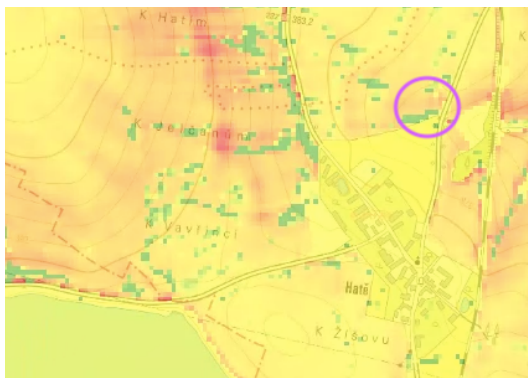
*Foto 3 - Příkop podél levé strany cesty*



*Foto 4 - Erozní pukliny na orné půdě v oblasti 13*

### Lokalita 3

Cestou od oblasti 5 a 13 k Vavříneckému rybníku bylo zachyceno místo na fotech 5 a 6. Místo se nachází v patě svahu, kde se po deštích v předchozích dnech stále držela voda, která postupně odtéká do příkopu podél cesty. Jak indikuje zelená barva na obrázku 21, model zde předpokládá depozici, což odpovídá realitě.



Obrázek 21 - Erozní poměry lokality 3 na ZM10 (ČÚZK)



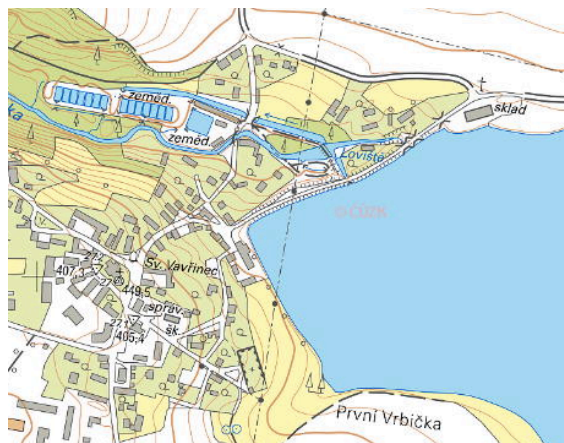
Foto 5 - Místo hromadění odtoku ze svahu, pohled od cesty



Foto 6 - Odtok zadržené vody ze svahu do příkopu podél cesty

## Lokalita 4

Dalším místem zastavení při průzkumu bylo u hráze Vavříneckého rybníka. Rybník má tři stavidla (foto 7). Dvě se nacházejí na pravé straně hráze a plní funkci bezpečnostního přelivu. Přeliv v den průzkumu aktivně plnil svou funkci. Třetí se nachází v její střední části a tvoří objekt spodní výpusti. Pod spodní výpustí je umístěna vyrovnávací nádrž (foto 8). Z ní voda přes česle vtéká do koryta, kde se k ní vlevo přitok z bezpečnostního přelivu. Na druhém břehu, proti vtoku od vyrovnávací nádrže, je umístěn rozdělovací objekt (foto 9), který část průtoku odklání k nedalekým sádkám. Situace je zakreslena na mapě na obrázku 22. Na fotu 10 je zachyceno hlavní koryto Výrovky pod Vavříneckým rybníkem.



Obrázek 22 - Hráz Vavříneckého rybníka (ČÚZK)

Na druhém břehu, proti vtoku od vyrovnávací nádrže, je umístěn rozdělovací objekt (foto 9), který část průtoku odklání k nedalekým sádkám. Situace je zakreslena na mapě na obrázku 22. Na fotu 10 je zachyceno hlavní koryto Výrovky pod Vavříneckým rybníkem.



Foto 7 - Pohled na hráz Vavříneckého r. z pravého břehu



Foto 8 - Soutok za vyrovnávací nádrží pod Vavříneckým r.



Foto 9 - Rozdělovací objekt pod Vavříneckým r.

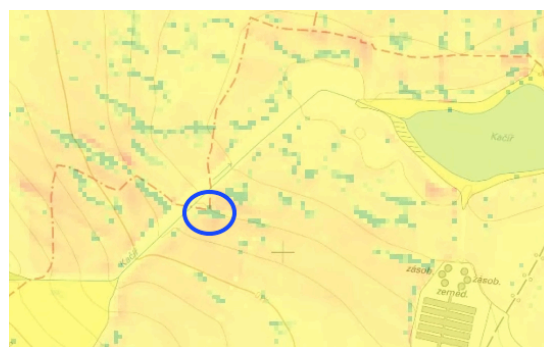


Foto 10 - Koryto Výrovky pod Vavříneckým r.

## Lokalita 5

Místo, na kterém byla zaznamenána depozice sedimentu, se nachází v blízkosti prameniště vodního toku Kačič, na jeho levém břehu. Sediment se ukládá do přibližně oválného tvaru o velikosti přibližně 50x20 m.

Model v této oblasti s depozicí počítá (zelená místa na obrázku 23). Fotografie 11 a 12 zachytily oblast v modrém kruhu na obrázku 23.



Obrázek 23 - Erozní poměry v okolí Kačiče, erozní poměry na ZM10 (ČÚZK)



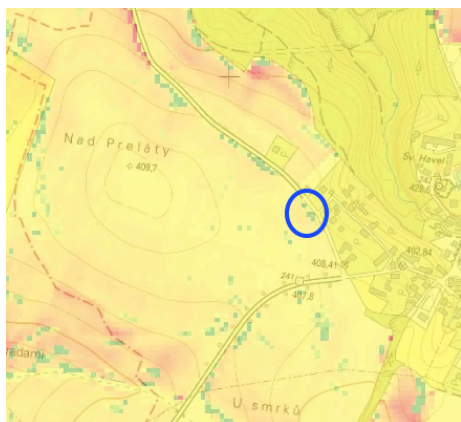
Foto 11 - Místo depozice sedimentu u toku Kačič



Foto 12 - Poloha deponie sedimentu vůči Kačiči

## Lokalita 6

Při západním okraji Skvrňova model rovněž počítá s depozicí v patě svahu, obrázek 24. To je dáno terénní depresí, při průzkumu (po dešti) se v místech vytvořily rozlehlé louže, viz foto 13.

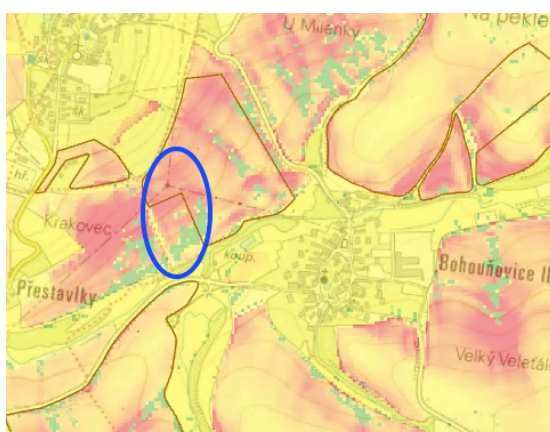


Obrázek 24 - Místo depozice u Skvrňova na ZM10 (ČÚZK) Foto 13 - Terénní deprese v patě svahu u Skvrňova

## Lokalita 7

V blízkosti obce Bohuňovice II bylo zaznamenáno několik erozních projevů – plošná eroze a depozice na obrázku 25 a erozní rýhy dle obrázků 26 a 27.

Hnědé polygony na obrázku 25 představují hranice pozemků navržených k zatravnění. Foto 14 zachycuje modře označenou oblast obrázku 25. Pod svahem protéká Přestavický potok, podél kterého se na obou březích táhne travní pás, přestože na svazích dochází k silné erozi, sediment z něj do vodního toku vstupuje jen ve velmi omezené míře.



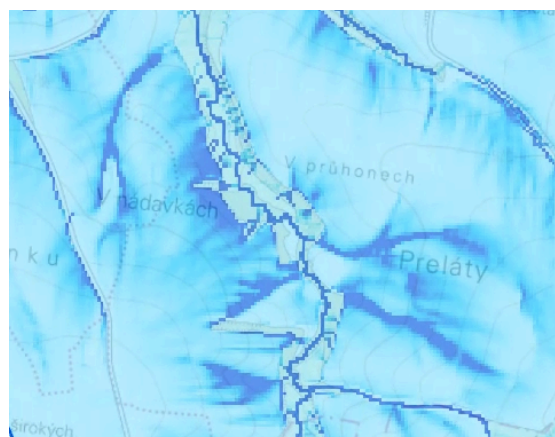
Obrázek 25 - Plošná eroze a depozice v patě svahu na ZM10 (ČÚZK) Foto 14 - Plošná eroze a depozice u Bohuňovic II

Vytipované rýhy se svažují k Bohouňovickému potoku a nacházejí se v údolnicích. Po obou stranách vodního toku se táhne travní plocha i stromová a keřová.

Obrázek 27 znázorňuje intenzitu transportu sedimentu.



Obrázek 26 - Erozní rýhy na ortofomapách (Seznam.cz, Top-Gis)



Obrázek 27 - Transport sedimentu v rýhách na ZM10 (ČÚZK)

Vzhledem k vegetační fázi rostlin nebyly potenciální erozní rýhy příliš zřetelné.

V místě rýhy na levém břehu je pozorovatelná změna vegetační skladby – kratší, řidší traviny a pampelišky smetánky místo vzrostlejší směsi travin a pícnin, foto 15.

Na pravém břehu Bohouňovického potoka je pěstována brukev řepka olejka, viz foto 16. V této lokalitě je však půda pod ní chráněna porostem rmenu. V místě údolnice (foto 17) je patrné ukládání sedimentu. V půdě jsou zřetelné erozní pukliny. Na fotu 18 je zachycen přírodní charakter Bohouňovického potoka (střídání úseků tůň-brod). Při srážkových událostech na konci dubna pravděpodobně došlo k překročení kapacity koryta a tok vybřežil, pro což svědčí odhalené svahy koryta.



Foto 15 - Změna vegetace v rýze, pohled k Bohouňovickému p.



Foto 16 - Pohled na údolnici na pravém břehu Bohouňov. p.





*Foto 17 - Pohled údolnicí, akumulace sedimentu v popředí*



*Foto 18 - Bohouňovický potok, stopy po vybřežení potoka*

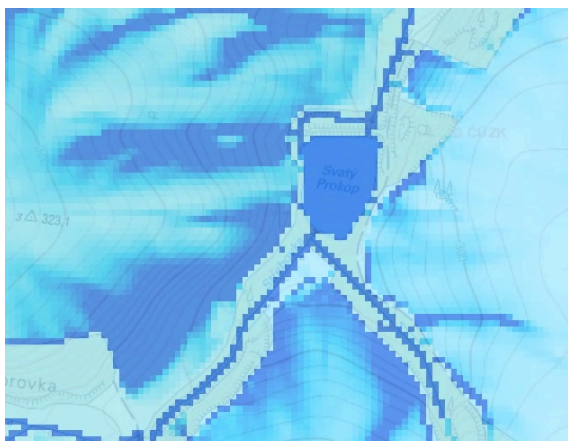
## Lokalita 8

V lokalitě 8 se nachází ovocné sady a rybník Sv. Prokop.

Intensita transportu sedimentu je zachycena na obrázku 28.

Svatý Prokop byl navštíven, jelikož se jedná o jedenu z nejhroženějších vodních nádrží z hlediska zanášení sedimentem na povodí. Sediment do nádrže stéká na levém břehu z pozemků s ovocnými sady (foto 20), na pravém břehu z pole osetého brukví řepkou olejkou (foto 21). Nejvíce sedimentu však do rybníku přináší protékající vodní tok Střebovka.

Ovocné sady nesou v modelu jednu z nejméně příznivých hodnot C faktoru. Jak dokládá foto 19, řádky ovocných stromů byly vysázeny kolmo na vrstevnice. Mezi jednotlivými řádky na povrchu roste tráva a vyskytuje se například pampeliška smetánka. Po obvodu pozemku je asi 10 m široký pás neobhospodařované zeminy sloužící snad jako přístup ke stromům.



Obrázek 28 - Transportovaný sediment v lokalitě 8 na ZM10 (ČÚZK)



Foto 19 - Ovocné sady u rybníka Sv. Prokop



Foto 20 - Místo vstupu sedimentu ze sadů do Sv. Prokopu



Foto 21 - Dráha vstupu sedimentu do Sv. Prokopu, pravý břeh

## Lokalita 9

Poslední navštívenou lokalitou bylo místo uzávěrového profilu zájmového povodí. Jedná se o měrný profil Plaňany osazený Českým hydrometeorologickým ústavem na ř. km 21,3 Výrovky. Profil se nachází pod silničním mostem silnice 329 v blízkosti vlakového nádraží Plaňany, na západním okraji Plaňan.

Měrný profil je zachycen na fotu 22.

Charakter Výrovky pod uzávěrovým profilem je zachycen na fotu 23. Šířka koryta je asi 6 m a hloubka přibližně 0,5 m.



Foto 22 - Měrný (uzávěrový) profil Výrovky v Plaňanech      Foto 23 - Výrovka bezprostředně pod měrným profilem v Plaňanech

## Protierozní opatření na povodí

Na různých místech povodí byla zaznamenána protierozní opatření - travní pásy na orné půdě (foto 24), setba širokořádkových plodin do ochranné vegetace (foto 25), cesta s protierozní funkcí (foto 26), travní pásy podél toků (foto 27), příkopy (foto 28), větrolamy (foto 29). Tato opatření zamezují nebo zmírňují erozi a její projevy.

Jak je vidět například na fotech 24 a 25, přestože se jedná o pozemky orné půdy, které jsou modelovány shodně, ve skutečně je jejich C faktor odlišný.



Foto 24 - Travní pásy na orné půdě



Foto 25 - Brukev řepka olejka s ochrannou vrstvou rmenu



Foto 26 - Cesta s protierozním účinkem



Foto 27 - Travní pásy podél vodního toku



Foto 28 - Příkop zajišťující odvodnění pozemku



Foto 29 - Větrolam

## Shrnutí

1.5.2022 byl proveden terénní průzkum na zájmovém území povodí Výrovky.

Na základě předchozí přípravy bylo vytipováno několik míst, která byla navštívena. Plán zastávek byl v průběhu průzkumu upravován, kvůli nepříznivým podmínkám v lokalitě nebo naopak objevení zajímavých míst cestou.

Absolvovaná trasa začala u obce Červený Hrádek, pokračovala směrem na Skvrňov přes hráz Vavříneckého rybníka, odtud na sever kolem Žďanic přes Kouřim k uzávěrovému profilu Výrovky v Plaňanech.

Navštívené lokality jsou zajímavé z pohledu transportu sedimentu (např. lokalita 5 a 7) nebo jsou významnými body povodí (např. lokalita 4 a 9). Byl také zjištěn nesoulad ve výpočtu modelu WaTEM/SEDEM a skutečností (lokalita 2).

Z lokalit byly pořízeny fotografie.

V průběhu průzkumu byly také zaznamenány případy aplikovaných protierozních opatření, které jsou prezentovány v předešlé podkapitole.

## TYPOVÉ SCÉNÁŘE OPATŘENÍ PRO POVODÍ VÝROVKY

V rámci této práce byly navrženy tři scénáře typových opatření, které by měly vést ke snížení ztráty půdy na zemědělsky velmi využívaném a poměrně (z hlediska řešení eroze) rozlehlém povodí. V prvním scénáři byly navrženy travní pásy podél všech vodních toků. V druhém scénáři bylo navrženo zatravnění celé rozlohy vybraných pozemků. Třetí scénář pak uvažuje se zatravněním pouze vybraných kritických částí pozemků z druhého scénáře.

Pro každý z těchto scénářů byla v ArcGIS Pro vytvořena nová rastrová vrstva pro navržený landuse a vrstva C faktoru reflektující danou změnu v území. Vrstvy byly pomocí LS Converteru převedeny do formátu nutného pro výpočet WaTEM/SEDEMu.

Vzhledem k velikosti povodí není příliš efektivní ani univerzální metodou ruční výběr kritických ploch. Proto byla nastavena kritéria, která byla aplikována univerzálně na celé povodí, bez ohledu na možné lokální limity při realizaci uvažovaných opatření. Scénáře jsou uvažovány jako typová řešení, na nichž lze obecně demonstrovat vliv různého uspořádání protierozních opatření na erozní poměry na povodí. Cílem práce není navrhnout konkrétní řešení protierozních opatření, která by měla být realizována.

Zásadní faktor, který musí být reflektován při posuzování efektivity uvažovaných scénářů je plocha zatravnění. Zatravnění je extrémní protierozní opatření a zde je uvažováno na úkor orné půdy, která by po realizaci opatření nemohla být užívána za stejným účelem jako v současnosti. Alternativou pro zatravnění je adaptace půdoochranných osevních postupů a technologií, které dosahují nižších hodnot C faktoru.

V tabulce 13 je uvedena celková plocha travního porostu a její nárůst oproti stávajícímu stavu na povodí při jednotlivých scénářích. Jak je vidět, prostorové nároky scénářů 1 a 3 jsou shodné, liší se tedy pouze v distribuci na povodí. Scénář 2 vyžaduje skoro šestkrát více plochy.

Tabulka 13 - Rozloha zatravněné plochy při jednotlivých scénářích

	<b>zatravnění (ha)</b>	<b>ovlivněná plocha (ha)</b>
<b>stávající stav</b>	1 782,6*	
<b>scénář 1</b>	2 239,4	456,8
<b>scénář 2</b>	4 388,3	2 605,7
<b>scénář 3</b>	2 239,6	457,0

\*hodnota vypočtena na základě počtu a velikosti pixelů s kategorií land use trvalý travní porost

## Scénář 1 – Zatravnění podél vodních toků

V prvním scénáři byl navržen travní pás na obou březích vodních toků. Šířka pasů je 10 nebo 20 m. Tato šířka byla zvolena s ohledem na možnou údržbu, minimální velikost pixelu 10x10 m a zkruslení při rastrování. Pokud by byly uvažovány šířky, které nejsou násobkem deseti, byla by do výpočtu vnesena další nepřesnost – při převodu z polygonu do rastru by mohlo snáze dojít k nadhodnocení nebo podhodnocení plochy travního pásu.

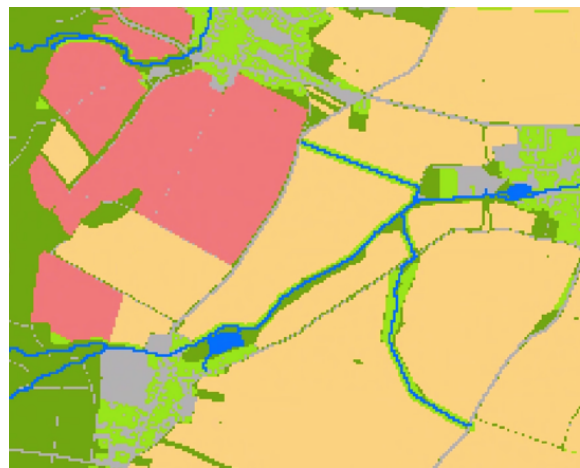
Travní pás ale nemůže být implementován místo vodních toků, intravilánu, cestní sítě a lesů, proto byla vytvořena vrstva obsahující tyto „prioritní“ plochy. Dále byla vytvořena vrstva bufferu 20 m kolem linie vodních toků (vektorové vrstvy). Prioritní vrstva byla překryta vrstvou s travním pásem a následně vrstvou původního landuse. Zároveň musela být zajištěna správná hodnota pixelů reprezentující daný landuse pro použití v modelu WaTEM/SEDEM. Všechny tyto vrstvy jsou rastrové.

Převodem do rastru byla ale část šířky travního pásu překryta pixely vodních toků. Pokud pás bufferu nezabíral více než polovinu plochy pixelu, nebyl zatravnění daný pixel přisouzen. V některých případech je šířka pásů na obou březích stejná – 10 m, v některých místech se šířka na protějších březích liší – na jednom je to 10 m, na druhém 20 m. Vždy je ale zajištěna šířka 10 m.

Na obrázcích 29 a 30 je zachycena ukázka změny využití území podle scénáře 1.



Obrázek 29 - Ilustrační obrázek scénáře 1 – STÁVAJÍCÍ STAV



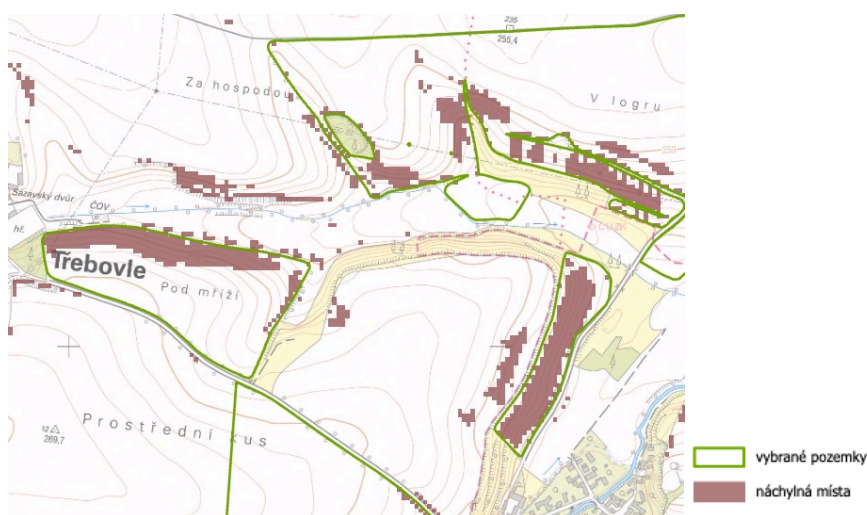
Obrázek 30 - Ilustrační obrázek scénáře 1 – NÁVRH

## Scénář 2 – Zatravnění celých pozemků

Jako druhý možný scénář ochrany povodí před erozí bylo navrženo zatravnění celých vybraných pozemků LPIS.

Pro zatravnění byly vybrány pozemky LPIS, kde průměrná dlouhodobá roční ztráta půdy je vyšší než 4 t/ha a maximální roční ztráta pixelu je větší než 100 t/ha.

Hodnota průměrné dlouhodobé roční ztráty půdy 4 t/ha byla zvolena coby mez erozní ohroženosti pozemku. 100 t/ha/rok pro maximální ztrátu půdy bylo zvoleno s přihlédnutím k tomu, že průměrná maximální ztráty půdy na pozemcích je 57,8 t/ha. V místech se ztrátou větší než 100 t/ha/rok lze předpokládat výskyt drah koncentrovaného odtoku, resp. zvýšenou intenzitu eroze, jak naznačuje obrázek 31. Tato místa jsou erozně namáhána, a proto je snahou je zahrnout mezi ochraňovaná území. Hodnota 100 t/ha byla uvažována jako dostatečně vysoká hranice pro zachycení erozně nejohroženějších pozemků.



Obrázek 31 - Ukázka erozně náchylných míst nad ZM10 (ČÚZK)

Číselné hodnoty byly získány zonální statistikou vrstvy Netto water erosion stávajícího stavu provedenou přes pozemky LPIS na povodí.

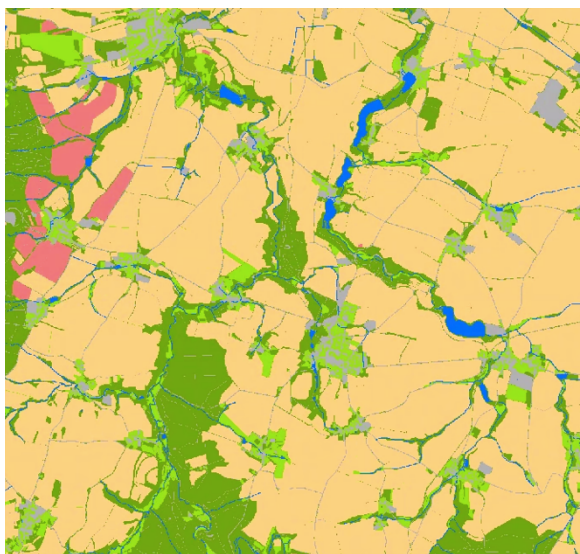
Podle tohoto klíče bylo vybráno 213 pozemků LPIS o celkové ploše 2670 ha, což odpovídá zhruba 10 % rozlohy řešeného území.

V osmi případech jsou pozemky využívány jako ovocné sady. Nepředpokládá se, že by sady byly nahrazeny trvalým travním porostem, povrch pod stromy však může být zatravněn.

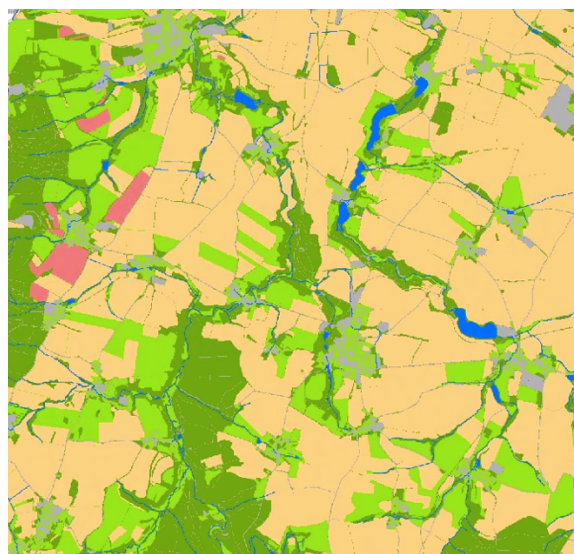
Tento scénář je s ohledem na rozlohu zatravněné plochy nejextrémnější, nepředpokládá se, že by mohlo dojít k jeho realizaci. Lze ale očekávat, že tato varianta přinese největší protierozní ochranu.



Na obrázcích 32 a 33 je ukázka změny využití území podle scénáře 2.



Obrázek 32 - Ilustrační obrázek scénáře 2 – STÁVAJÍCÍ STAV



Obrázek 33 - Ilustrační obrázek scénáře 2 – NÁVRH

### Scénář 3 – Zatravnění kritických částí vybraných pozemků

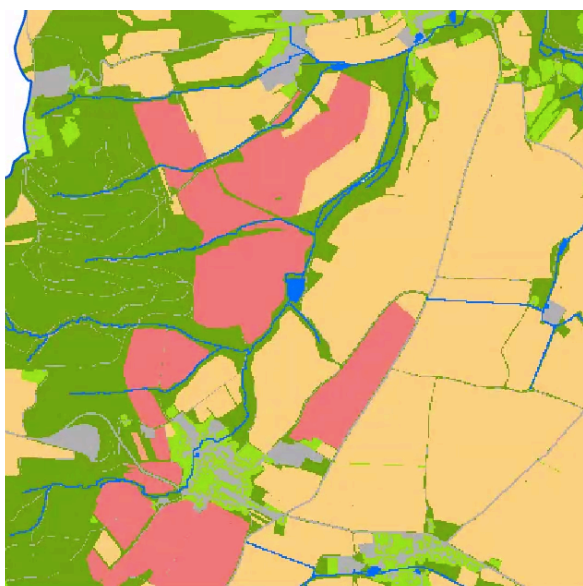
Poslední scénář možných opatření na povodí Výrovky uvažuje se zatravněním pouze kritických částí pozemků LPIS, které byly vybrány ve scénáři 2 (průměrná dlouhodobá roční ztráta půdy je vyšší než 4 t/ha, a zároveň maximální roční ztráta je větší než 100 t/ha).

Kritická místa (pixely) byly vybrány podmínkou: LS (topografický) faktor je větší než 5 a průměrná ztráta půdy větší než 4 t/ha/rok. Hodnota 4 t/ha/rok byla opět zvolena coby mez přípustné ztráty půdy. Průměrná hodnota LS faktoru na pozemcích LPIS je 1,5 (na pozemcích vybraných pozemcích 2,9), maximální hodnota je 17,2, resp. 15,5. Hodnota LS faktoru větší než pět byla zvolena pro zachycení extrémnějších hodnot topografického faktoru, kde lze očekávat intenzivnější erozní procesy.

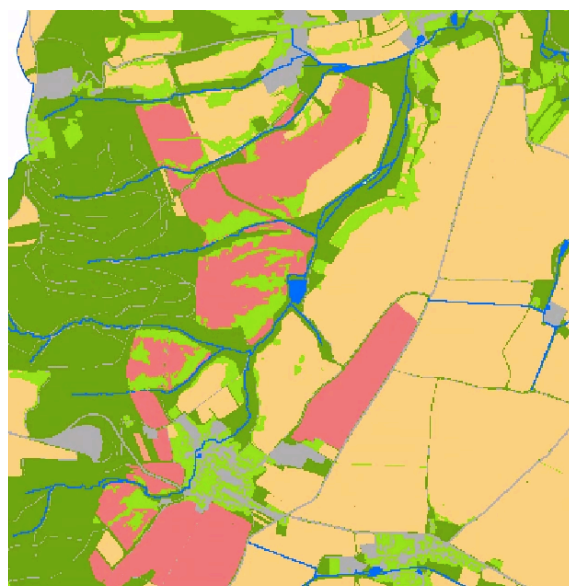
Tím byla výrazně snížena plocha pro zatravnění oproti scénáři 2. Vzhledem k tomu, že nejzranitelnější místa budou přesto ochráněna, efekt na snížení půdního smyvu je očekáván srovnatelný.

Jelikož zatravnění dle scénáře 3 je navrženo na výběru pixelů o velikosti 10x10 m, může dojít k případu, kdy bude vybrána jen malá plocha (třeba i jeden pixel, který bude obklopen pixely, které vybrány nebudou). V takovém případě by se zatravnění navržené tímto způsobem velmi těžko realizovalo a udržovalo. Bylo by pak nutno zvážit, zda takovou plochu nezatravněvat, nebo naopak zatravnit i okolní plochu tak, aby její údržba byla schůdná. V takovém případě bude pak realizované opatření účinnější než ve výpočtu.

Scénář 3 je ilustrován na obrázcích 34 a 35.



Obrázek 34 - Ilustrační obrázek scénáře 3 - STÁVAJÍCÍ STAV



Obrázek 35 - Ilustrační obrázek scénáře 3 – NÁVRH

## VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MODELU

Účinnost uvažovaných scénářů na erozi v povodí bude vyhodnocována na úrovni povodí, sub-povodí, kritických úseků říční sítě a vodních nádrží.

### Eroze na povodí

Výstupy modelu WaTEM/SEDEM byly nejprve zobrazeny a výsledky rozebrány na úrovni celého povodí, tedy v nejmenším rozlišení. V tabulce 14 jsou shrnuty údaje o bilanci sedimentu pro všechny navržené scénáře, pro porovnání jsou uvedeny i hodnoty pro stávající stav.

Tabulka 14 - Bilance sedimentu pro jednotlivé scénáře opatření

	stávající stav	scénář 1	scénář 2	scénář 3
produkce sedimentu (t/rok)	139 078	138 781	99 603	121 422
depozice sedimentu (t/rok)	118 970	124 712	87 976	105 758
vstup do vodních toků (t/rok)	20 191	13 494	11 737	15 781
sediment usazený v nádržích (t/rok)	14 031	9 257	8 829	11 427

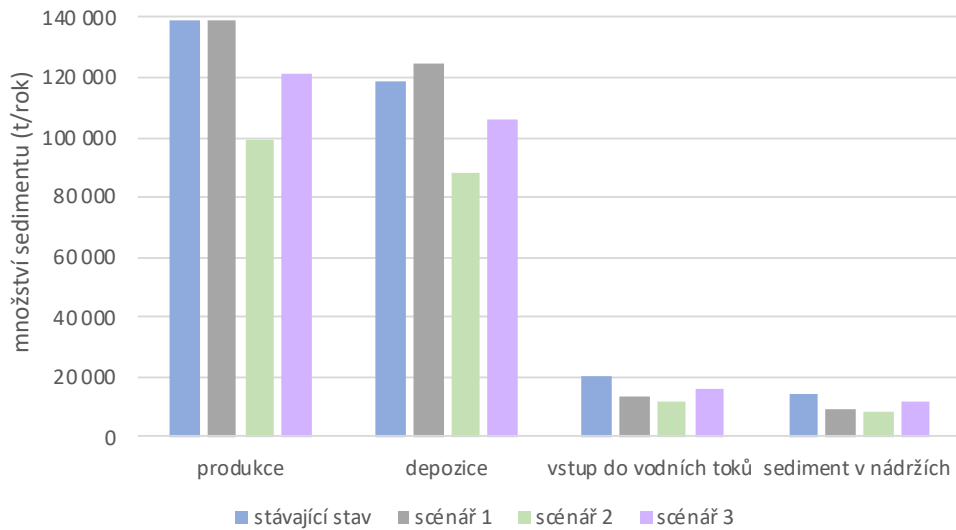
Na první pohled je zřejmé, že nejúčinnější z navržených scénářů je scénář 2, kdy dojde k nejnižší produkci sedimentu, proto jsou nejnižší hodnoty i v ostatních kategoriích. Kdyby se však množství sedimentu v jednotlivých kategoriích posuzovala ve vztahu k celkové produkci sedimentu pro daný scénář, scénář 2 by sice stále přinášel nejnižší hodnoty, nicméně řádově by se hodnoty lišily jen o desetiny procent. Vzhledem k povaze problematiky jsou však zásadní absolutní hodnoty těchto kategorií.

Při porovnání scénáře 1 se stávajícím stavem bylo vyprodukováno téměř stejné množství sedimentu, ve scénáři 1 o 0,2 % méně. O 4,8 % narostla depozice. Do vodních toků vstoupilo o 33 % méně sedimentu a o 34 % méně ho sedimentovalo ve vodních nádržích.

Podle scénáře 2 bylo oproti scénáři 3 vyprodukováno o 22 % méně sedimentu, o 20 % méně sedimentu se usadilo předtím, než vstoupilo do vodních toků. Do vodních toků vstoupilo o 26 % méně sedimentu a o 23 % méně se usadilo ve vodních nádržích.

Porovnání těchto variant je názorně shrnuto v grafu 10.

## porovnání typových scénářů



Graf 10 - Porovnání typových scénářů na povodí Výrovky

Z grafu je patrné, že množství sedimentu usazeného, vstupujícího do vodních toků a usazujícího se v nádržích je samozřejmě závislé na vyprodukovaném množství sedimentu. Přibližně 90 % vyprodukovaného sedimentu se uloží na níže položených pozemcích, a nevstoupí tak do povrchových vod. Zhruba 10 % vyprodukovaného sedimentu vstupuje do vodních toků, z toho se asi 70 % sedimentu usadí ve vodních nádržích.

### *Diskuse výsledků modelu a analýzy dat ČHMÚ*

Na základě výpočtu modelu pro stávající stav opustí povodí Výrovky přes 6 160 t/rok sedimentu. To je o 70 % více než bylo toto množství vypočteno na základě dat ČHMÚ pro rok 2022 – 3 624 t. Obě čísla ale mají své limity.

Hodnota vypočtená modelem WaTEM/SEDEM je dlouhodobá průměrná roční hodnota. Hodnota vypočtená z dat ČHMÚ se vztahuje ke konkrétnímu roku, kde se mohou spíše projevit meziroční výkyvy srážek, průtoků, teplot vzduchu a dalších faktorů. Tento fakt má největší podíl na rozdílu hodnot. Obecně jsou výpočty na základě dlouhodobých datových řad směrodatnější. Čím je ale konkrétní rok neobvyklejší, tím více se liší od dlouhodobě průměrných hodnot. Celkový roční úhrn srážek ve Středočeském kraji v roce 2022 byl lehce nadprůměrný, přesto byl průměrný průtok 0,493 m<sup>3</sup>/s, což je znatelně nižší hodnota než dlouhodobý průměrný roční průtok 0,688 m<sup>3</sup>/s. Průtok pro výpočet modelu byl uvažován 0,764 m<sup>3</sup>/s. Rozdíl mezi průměrným průtokem roku 2022 a průtokem v modelu způsobí při koncentraci 40 mg/L rozdíl 342 t. Nižší průtoky vedou k nižším koncentracím plavenin v tocích a intensivnějšímu usazování sedimentu ve vodních nádržích i korytech. Proto lze předpokládat, že se v roce 2022 se usadilo v korytech a nádržích relativně více sedimentu než dlouhodobě průměrně, to se však v tomto případě nemusí projevit na rozdílu absolutních hodnot usazeného sedimentu v nádržích (možné nadhodnocení celkového množství sedimentu modelem může způsobit, že množství sedimentu uloženého v nádržích dle modelu bude v absolutních číslech lépe odpovídat skutečnému usazenému množství v nádržích v roce 2022).

Rozdíl výpočtu modelu oproti skutečnosti je, že model neuvažuje s usazováním splavenin v korytě, ani s břehovou erozí. Tímto je v jednom případě proteklé množství nadhodnocováno v druhém podhodnocováno. Vzhledem k velikosti vodních toků v tomto povodí množství sedimentu vzniklé erozí břehů snad nebude mít výrazný podíl na celku. Podíl bude růst s rostoucími průtoky. Na základě provedených výpočtů není možné kvantifikovat vliv zanedbání těchto erozních procesů v korytech vodních toků na celkové proteklé množství uzávěrovým profilem. Významnější odchylky mohou být způsobeny generalizací při stanovování C faktoru, kdy je celé území postiženo osmi hodnotami, lze ale očekávat, že skutečné hodnoty jsou rozmanitější. Další nepřesnost je dána rozlišením vstupní rastrových vrstev 10x10 m, tím dochází ke zkreslení velikosti ploch i topografie terénu, na kterých jsou výpočty prováděny.

## Eroze na úrovni subpovodí

Zájmová oblast povodí Výrovky se skládá ze 30 povodí 4. řádu.

Vliv scénářů na těchto povodích byl vyhodnocen na základě zonální statistiky výstupních vrstev Netto water erosion na povodích 4. řádu. Vrstva Netto water erosion obsahuje hodnoty v místech eroze, depozice, i místech, kde, erozní procesy neprobíhají. Výslednou průměrnou hodnotu pro subpovodí vypočtenou tímto způsobem proto nelze považovat za průměrnou hodnotu ztráty půdy pro dané subpovodí. Lze ji ale použít pro porovnání subpovodí mezi sebou, a vyhodnotit tak účinnost scénářů.

V tabulce 15 je uveden počet povodí spadajících do jednotlivých kategorií.

Tabulka 15 - Počet povodí 4. řádu v jednotlivých kategoriích ztráty půdy

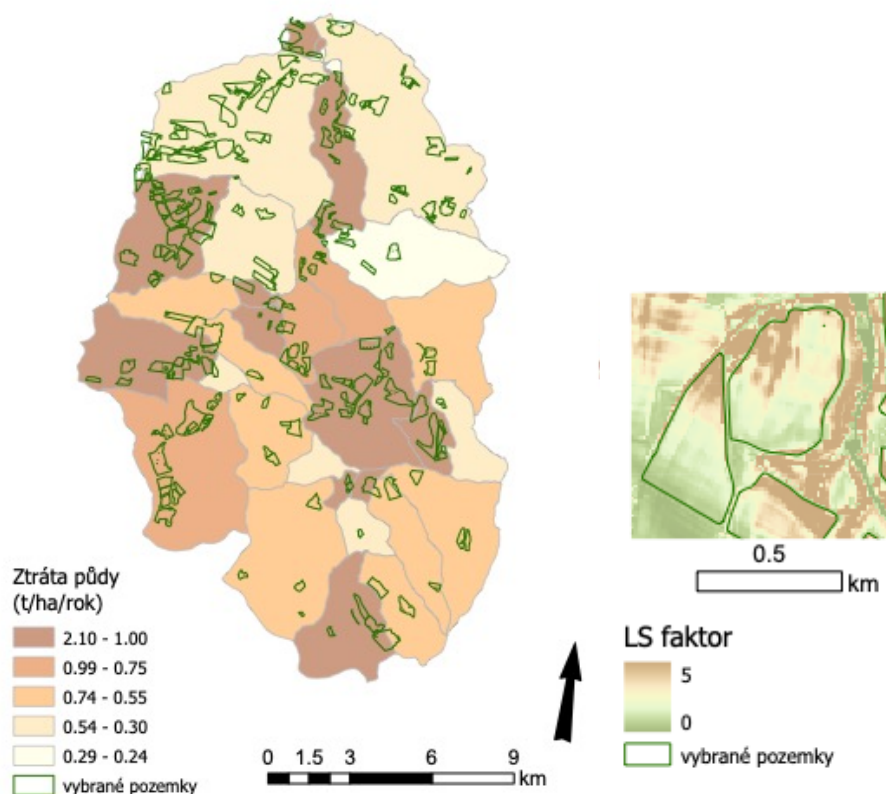
průměrná ztráta půdy (t/ha/rok)	>1	0,99 - 0,75	0,74 - 0,55	0,54 - 0,30	<0,29
stávající stav	10	3	8	7	2
scénář 1	5	5	4	12	4
scénář 2	1	2	4	16	7
scénář 3	5	5	6	11	3

Při stávajícím stavu (obrázek 38) se průměrná ztráta půdy pohybovala od 2,10 do 0,24 t/ha/rok. Deset povodí (nejvíce) spadá do nejpostiženější kategorie. Maximální ztráta je dosažena na povodí Miletínského potoka (rozsáhlejší povodí ve východní části území). Významně jsou dále postižena povodí Bečvářky v centrální oblasti severní části povodí Výrovky, povodí 4. řádu Výrovky na jihu území, povodí, v nichž se nacházejí sady na západě, a v centrální části sousedící s povodím Miletínského potoka.

Dvě povodí spadají do kategorie s nejmenší průměrnou roční ztrátou půdy – pod 0,29 t/ha/rok. Menší z nich se nachází v blízkosti uzávěrového profilu a jeho rozloha činí 0,42 km<sup>2</sup>. Druhé povodí – Voděradského potoka – se nachází na východní hranici povodí Výrovky a jeho rozloha je 13,46 km<sup>2</sup>, jeho erozně příznivý stav je dán morfologií terénu.

Ve zbývajících 18 povodích se průměrná hodnota ztráty půdy pohybuje od 0,3 do 1 t/ha/rok. Na obrázku 36 jsou zakresleny pozemky LPIS vybrané pro zatravňování (scénář 2 a 3) na podkladu kartogramu znázorňujícím průměrnou roční ztrátu půdy při stávajícím stavu na povodích

4. řádu v povodí Výrovky. Vedlejší obrázek 37 ilustruje topografické poměry pomocí LS faktoru na několika z vybraných LPIS pozemcích.



Obrázek 36 - Pozemky určené k zatravnění na povodích 4. řádu, vstupní data: ČHMÚ

Obrázek 37 - Ukázka topografických poměrů na vybraných pozemcích LPIS, vstupní data: MZe

Jak dokládá obrázek výše, na povodích, kde dochází k největším ztrátám půdy, je koncentrace zatravněovaných pozemků zvýšená oproti ostatním povodím. Což dokládá, že zvolenými postupy při výběru ohrožených pozemků byly zachyceny lokality v nejvíce postižených subpovodích.

Při aplikaci scénáře 1 (obrázek 39) je maximální průměrná ztráta 1,30 t/ha/rok a minimální 0,08 t/ha/rok. V 5 pěti povodích ztráta půdy vyšší než 1 t/ha/rok, ztrátu menší než 0,3 t/ha/rok vykazují 4 povodí. Pět nejvíce ohrožených povodí nepostoupí do kategorie nižší ztráty půdy. Dalších šest povodí neopustí svou kategorii. Naopak v nejzápadnějším povodí se hodnoty ztráty půdy z nejhorší kategorie (nad 1 t/ha/rok) snížily pod 0,75 t/ha/rok. Ostatní povodí postoupila do kategorie o jednu příznivější.

Scénář 1 je jediný, při kterém došlo k posunutí nejnižnějšího povodí do příznivější kategorie ztráty půdy.

Při scénáři 2 (obrázek 40) je maximální průměrná ztráta 1,06 t/ha/rok a minimální 0,04 t/ha/rok. Jen v jednom povodí je ztráta půdy vyšší než 1 t/ha/rok (nejjižnější povodí), to se z této kategorie neposune. Ztrátu menší než 0,3 t/ha/rok vykazuje 7 povodí. Čtyři povodí neopustí svou kategorii 0,54 – 0,30 t/ha/rok, jsou to ta, na nichž dojde k zatravnění pozemků jen v malé míře. Průměrná ztráta se viditelně nezmění ani v povodí v centrální části (sytě oranžová). Ve dvou případech dojde ke posunu poměrů z nejhorších do nejlepších. Ostatní povodí postoupila do kategorie o jednu až dvě příznivější.

Při scénáři 3 (obrázek 41) je maximální průměrná ztráta 1,61 t/ha/rok a minimální 0,25 t/ha/rok. Na pěti povodích je ztráta půdy vyšší než 1 t/ha/rok, na těch v centrální a jižní části území. Ztráta menší než 0,3 t/ha/rok je na 3 povodích. Při této variantě dochází k menším změnám kategorií povodí. Pokud dochází ke změnám kategorie, pak zpravidla o jeden stupeň. Výrazně se scénář odráží na čtyřech nejohroženějších povodích v severní polovině území. Tam došlo ke zlepšení poměrů na ztrátu menší než 1 t/ha/rok v případě dvou povodí při západní hranici území. Na dalších dvou povodích, v blízkosti uzávěrového profilu, byla průměrná ztráta snížena dokonce pod 0,55 t/ha/rok, tedy téměř o polovinu

Nejlepší účinky na průměrnou dlouhodobou ztrátu půdy na povodí 4. řádu má scénář 2. Při něm dojde ke zlepšení alespoň o jednu kategorii téměř na všech povodích a v nejohroženější kategorii těsně setrvá jen nejjižnější povodí. Téměř o polovinu oproti stávajícímu stavu je snížena maximální hodnota průměrné ztráty půdy. Jednoznačně nejlepší účinek má toto opatření na dvě nejohroženější povodí poblíž uzávěrového profilu v Plaňanech. Přesto tato varianta není nejúčinnější pro každé povodí.

Například pro nejjižnější povodí je nejúčinnější první varianta, při ní je průměrná ztráta půdy menší než 1 t/ha/rok. Toho se ostatními scénáři dosáhnout nepodařilo. Tímto scénářem je oproti scénáři 3 dosaženo lepšího výsledku na povodích jižní části území. Naopak hlavně pro nejohroženější povodí severní části území je účinnější scénář 3.

Čtyři povodí nezměnila kategorii při aplikaci jakéhokoli ze scénářů. Ve třech případech se jedná o menší povodí, která za stávajícího stavu patří do druhé nejpříznivější kategorie. Zatravněvané pozemky se zde vyskytují ve velmi malé míře a ani zatravnění podél toku poměry nezlepší. Čtvrté povodí je povodí Bečvářky nad rybníkem Utopenec (protáhlé povodí v centrální



částí území, sytě oranžová barva, obrázek 38), které spadá do kategorie ztráty půdy 0,75 – 0,99 t/ha/rok nehledě na aplikovaná opatření.

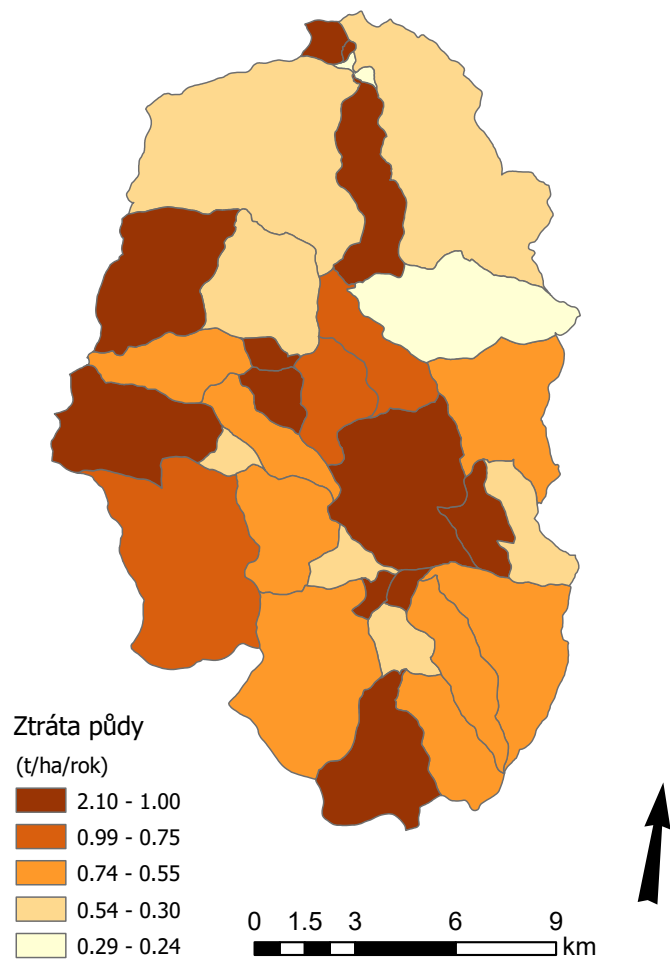
Na obrázku 42 jsou povodí vybarvena v závislosti na tom, o kolik procent se změnila průměrná ztráta půdy na povodí při jednotlivých scénářích oproti stávajícímu stavu.

Při scénáři 1 jsou poměry na subpovodích nejčastěji zlepšeny o 20 až 40 %, ve třech případech dojde k mírnému zhoršení oproti stávajícímu stavu a v malém povodí kolem uzávěrového profilu dojde ke zlepšení o více než 60 %.

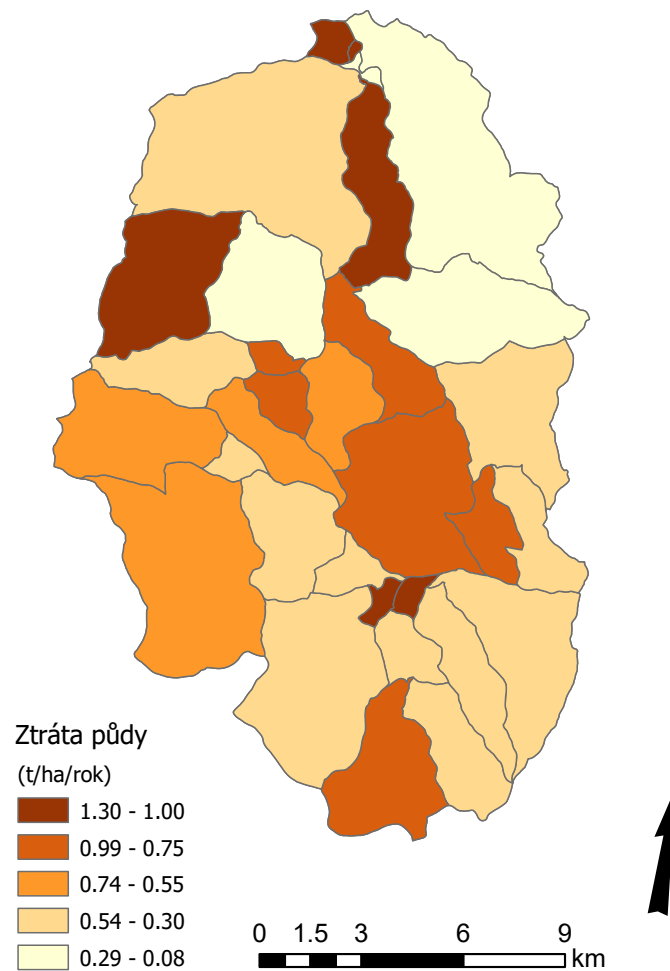
Při scénáři 2 je také nejčastěji dosaženo zlepšení do 40 %. Výrazněji se objevují fialové oblasti, které indikují významnější zlepšení poměrů, nad 60 %, na dvou povodích dokonce nad 80 %. Ke zhoršení stavu dojde pouze na jednom povodí – kolem uzávěrového profilu.

Při scénáři 3 převažuje zlepšení do 20 %. Největšího zlepšení je dosaženo na šesti povodích v severní části území, a to o 40 až 60 %. Jsou to ta povodí, kde při scénáři 2 došlo ke zlepšení stavu nad 60 %. Na třech povodí došlo ke zhoršení oproti stávajícímu stavu, a to až o 16 %.

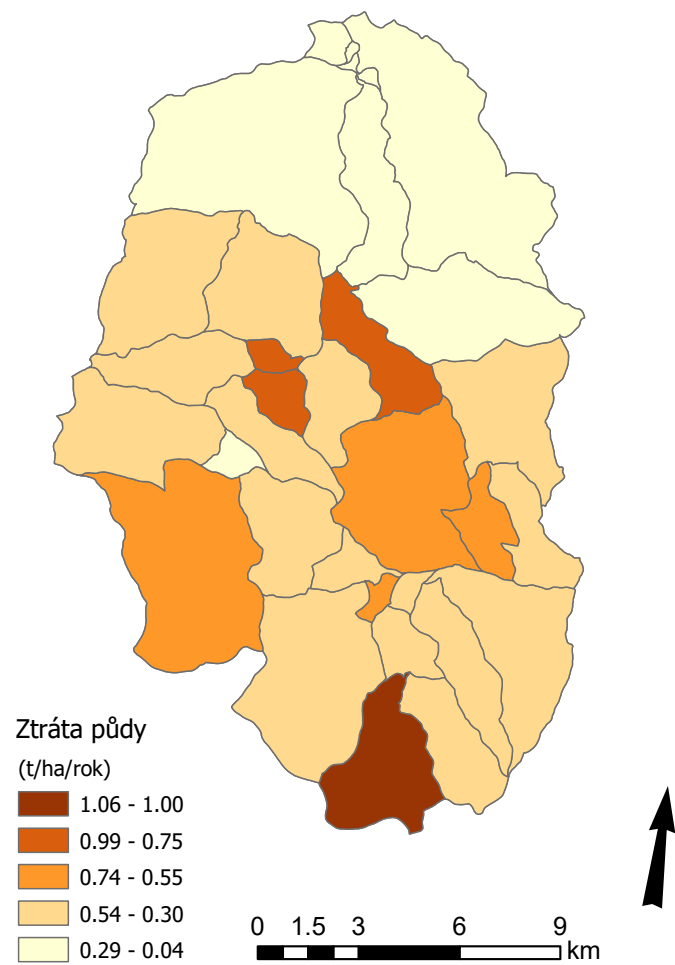
Lze konstatovat, že zpravidla scénáře 2 a 3 vykazují na povodích stejný průběh, projevy druhého scénáře jsou však intenzivnější.



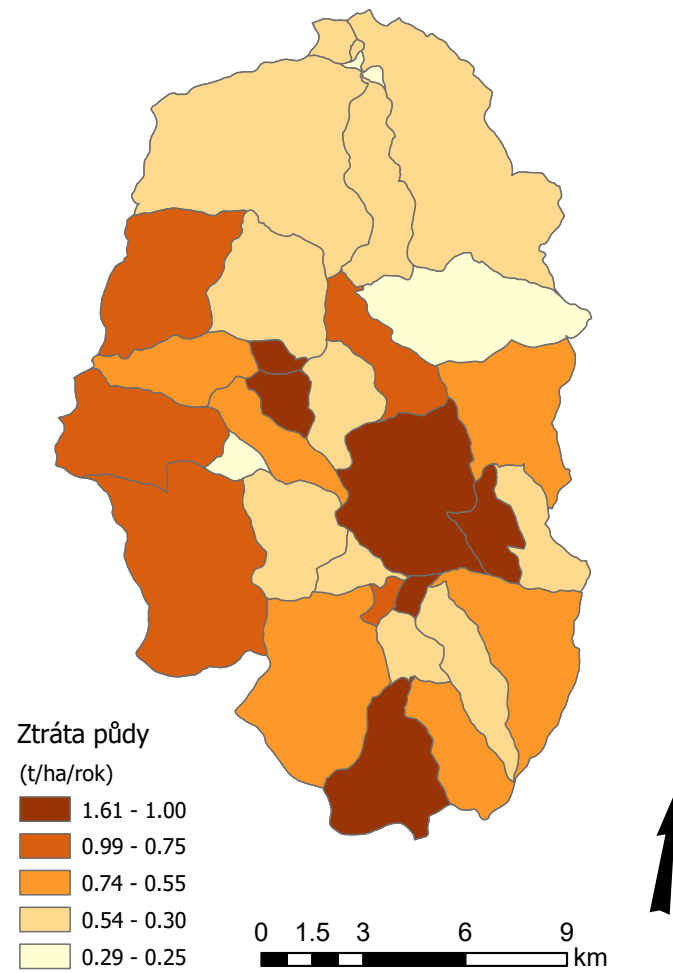
Obrázek 38 - Průměrná ztráta půdy na povodích 4. řádu, STÁVAJÍCÍ STAV, vstupní data: ČHMÚ



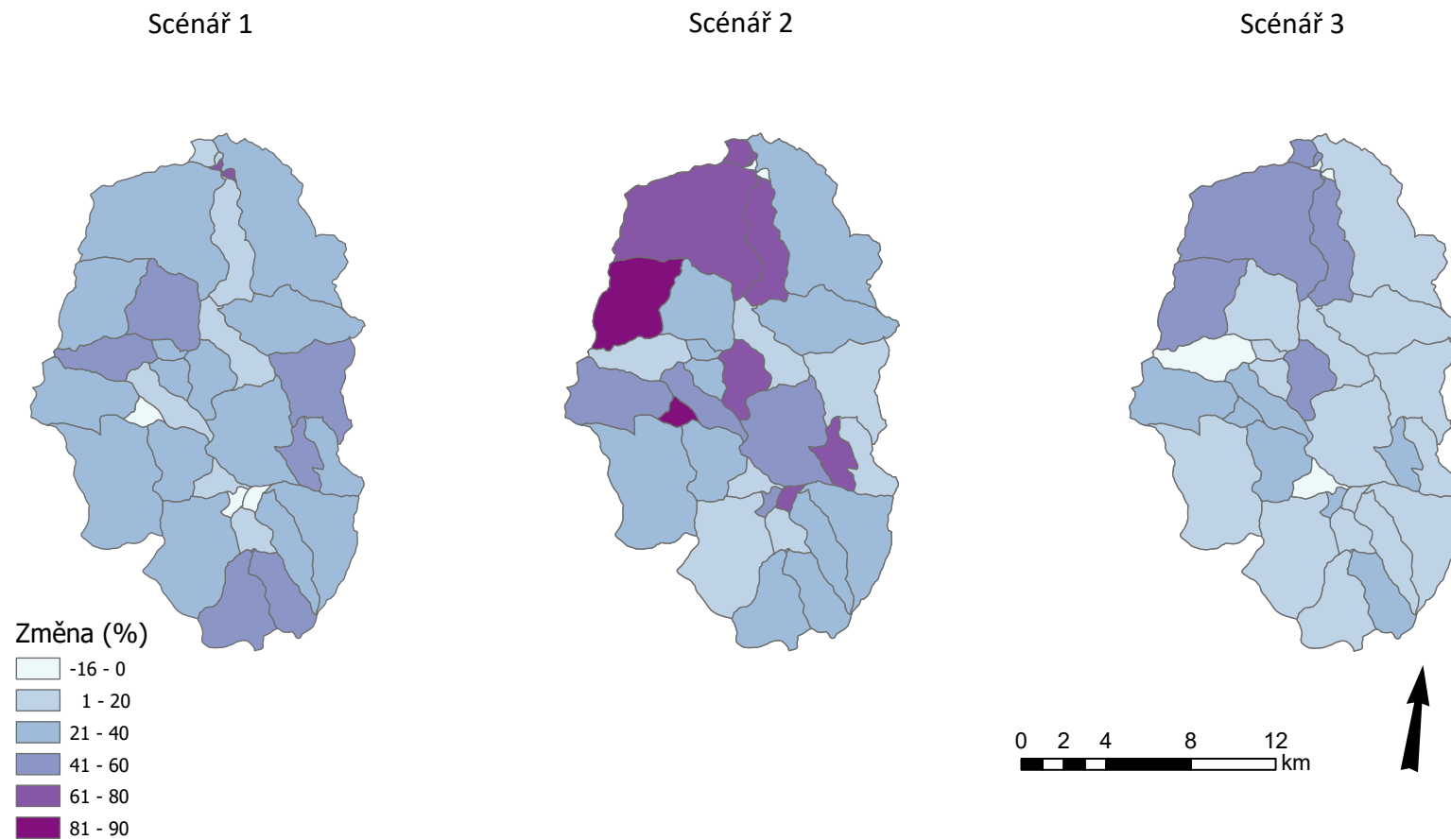
Obrázek 39 - Průměrná ztráta půdy na povodích 4. řádu, SCÉNÁŘ 1, vstupní data: ČHMÚ



Obrázek 40 - Průměrná ztráta půdy na povodích 4. řádu, SCÉNÁŘ 2,  
vstupní data: ČHMÚ



Obrázek 41 - Průměrná ztráta půdy na povodích 4. řádu, SCÉNÁŘ 3,  
vstupní data: ČHMÚ



Obrázek 42 - Změna průměrné ztráty půdy na povodích 4. řádu oproti stávajícímu stavu, vstupní data: ČHMÚ

Při kategorii -16 – 0 došlo ke zhoršení oproti stávajícímu stavu. V ostatních kategoriích došlo ke snížení průměrné ztráty o daná procenta.

## Eroze na úrovni kritických úsecích vodních toků

Bylo vybráno devět kritických úseků říční sítě, na nichž bude sledován vliv jednotlivých uvažovaných scénářů navržených opatření.

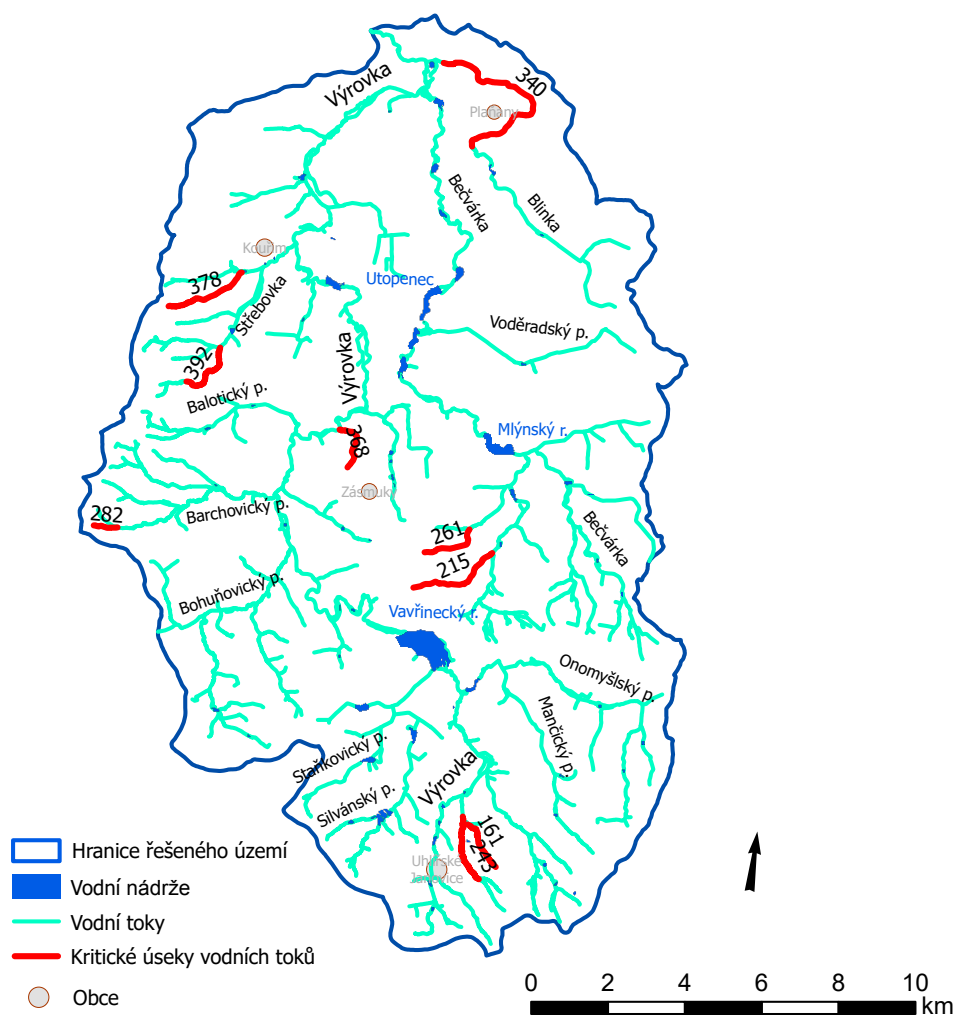
Byly vybrány úseky, do nichž přitéká výrazné množství sedimentu z příslušné odvodňované části povrchu, v průměru 293 t/rok.

V průměru do celé říční sítě vstoupí 38 t/km/rok, do kritických úseků vstoupí průměrně 87 t/km/rok, tedy více než dvojnásobek.

První čtyři úseky říční sítě, do nichž přitéká nejvíce sedimentu z povrchu, byly zahrnuty mezi kritické úseky. Další úseky byly vybrány v závislosti na poloze, množství transportovaného sedimentu z příslušné části povrchu a délce úseku.

Kritické úseky jsou zpravidla toky 1. řádu dle Strahlera (od pramene k prvnímu soutoku).

Kritické úseky jsou vyznačeny na obrázku 43.



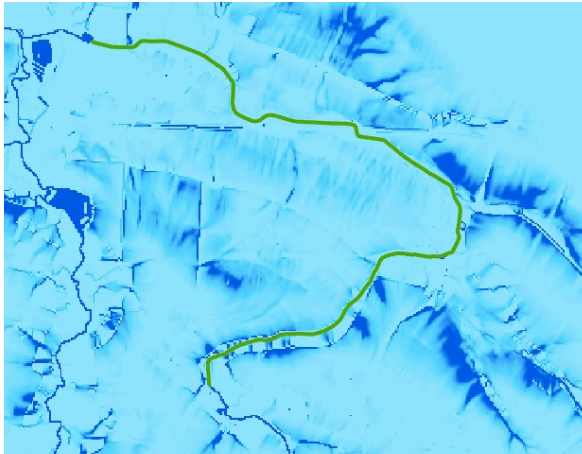
Obrázek 43 - Mapa s vyznačením kritických úseků vodních toků

V tabulce 16 jsou zaznamenány charakteristiky kritických úseků, včetně množství sedimentu, které do daného úseku přiteče z předchozího úseku vodní sítě (sediment input) a množství sedimentu, které z daného úseku odtéká (sediment output) do níže položeného úseku pro stávající stav i uvažované scénáře opatření. Pro lepší porovnání hodnot byly vypočteny i jednotkové odtoky, tedy množství sedimentu, které z úseku průměrně odteče za rok vztaženo na kilometr délky úseku. Modře je vyznačena nejpříznivější varianta pro daný úsek, resp. nejmenší hodnota jednotkového odtoku z daných scénářů.

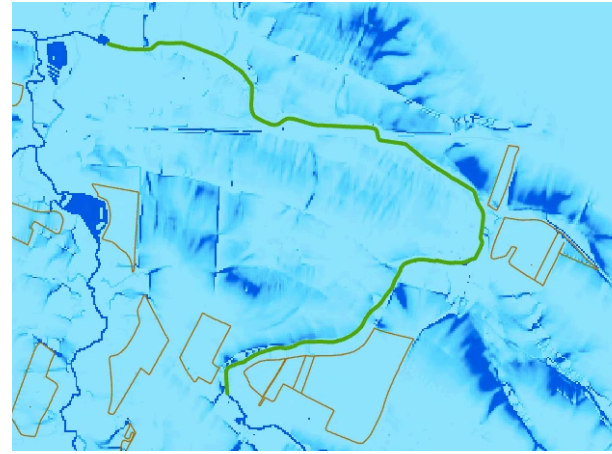
Aplikace scénářů se projevuje ve snížení množství sedimentu vstupujícího do vodních toků jak z výše položeného úseku, tak z přímého vstupu sediment přes břehovou hranu koryta (hillslope). Kritické úseky jsou ale v šesti případech toky 1. řádu dle Strahlera, proto do nich žádný sediment z předchozího úseku nemůže vstoupit.

Z tabulky 16 vyplývá, že v pěti z devíti případech vstoupí do (kritických) úseků vodní sítě nejméně sedimentu při aplikaci scénáře 2. Ve třech úsecích byl nejúčinnější scénář 1, na obrázku 47 a v tabulce 16 vyznačeny žlutě. Proto by pro tyto úseky IDVT 10178804, 10178906 a 10178658 bylo nejvhodnějším řešením zatravnění podél vodních toků, i vzhledem k prostorové náročnosti varianty 2.

V jednom úseku (IDVT 10185564) bylo dosaženo stejného množství odtékajícího sedimentu (388 t/rok) a jednotkového odtoku (75 t/rok/km) pro scénář 1 a 2. Při aplikaci scénáře 1 je výrazněji redukován sediment přitékající z předchozího úseku - o 99 t/rok, sediment vstupující ze svahu je redukován o 66 t/rok v porovnání se stávajícím stavem. To odpovídá charakteru opatření scénáře 1, který především brání vstupu sedimentu do říční sítě, ale nezamezuje eroznímu smyvu. Při scénáři 2 je sediment přitékající z předchozího úseku redukován o 20 t/rok, ze svahů však do úseku vstoupí o 145 t sedimentu za rok méně oproti stávajícímu stavu. Situace je znázorněna na obrázcích 44 a 45, kde je tento úsek zobrazena na vrstvě inflow pro scénář 1 a 2. Vrstva inflow znázorňuje množství transportovaného sedimentu, čím intenzivnější odstín, tím je transportované množství větší.



Obrázek 44 - IDVT 10185564 na podkladu inflow, scénář 1



Obrázek 45 - IDVT 10185564 na podkladu inflow, scénář 2, s vyznačením zatravněných pozemků (hnědá)

Z obrázků je patrné, že nejvíce sedimentu do toku vstupuje ve spodní části úseku. Nicméně kritická plocha zasahuje jen relativně malou, a krajní, část pozemků určených k zatravnění. V případě realizace scénáře 2 by byla odebrána zbytečně velká plocha pro dosažení stejného výsledku jako při realizaci scénáře 1, který je plošně méně náročný. Scénář 1 v oblasti tohoto úseku nezasahuje na LPIS pozemky zatravněvané ve scénáři 2.

Při zatravnění jen kritických oblastí dle scénáře 3 by došlo k redukci sedimentu přitékajícího z předchozího úseku, o 7 t/rok, sediment vstupující ze svahu je redukován o 40 t/rok v porovnání se stávajícím stavem. Úsek opouští o 47 t/rok méně a jednotkový odtok je 98 t/rok/km, tj. o 9 t/rok/km méně. Při stávající stavu odtéká 553 t/rok sedimentu a jednotkový odtok je 107 t/rok/km.

Aplikace scénáře 3 není v tomto případě vhodná. Jeho realizace je relativně náročná a účinky oproti ostatním variantám ne příliš uspokojivé.

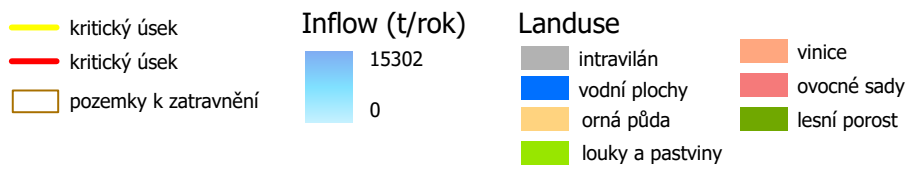
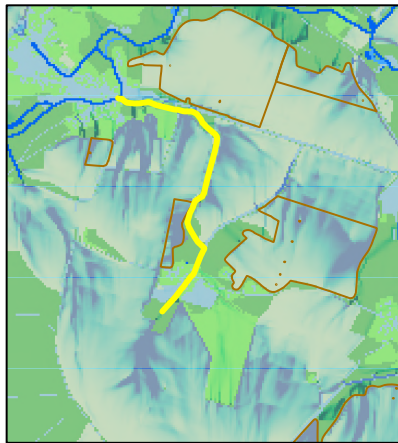
Na obrázku 46 je vlevo ukázka kritického úseku vodního toku preferovaně řešeného scénářem 1, vpravo kritický úsek preferovaně řešený scénářem 2. Podkladními vrstvami jsou inflow a landuse, znázorňující využití území.

V obou případech terén je poměrně svažité a v těsné blízkosti toku vyskytují oblasti s vysokým vstupem sedimentu. Tyto oblasti jsou v prvním případě využívány jako orná půda, v druhém jako sady. Hnědé polygony indikují oblasti vybrané k zatravnění, v obou případech se jedná o pozemky, na kterých dochází k intenzivnímu transportu sedimentu.

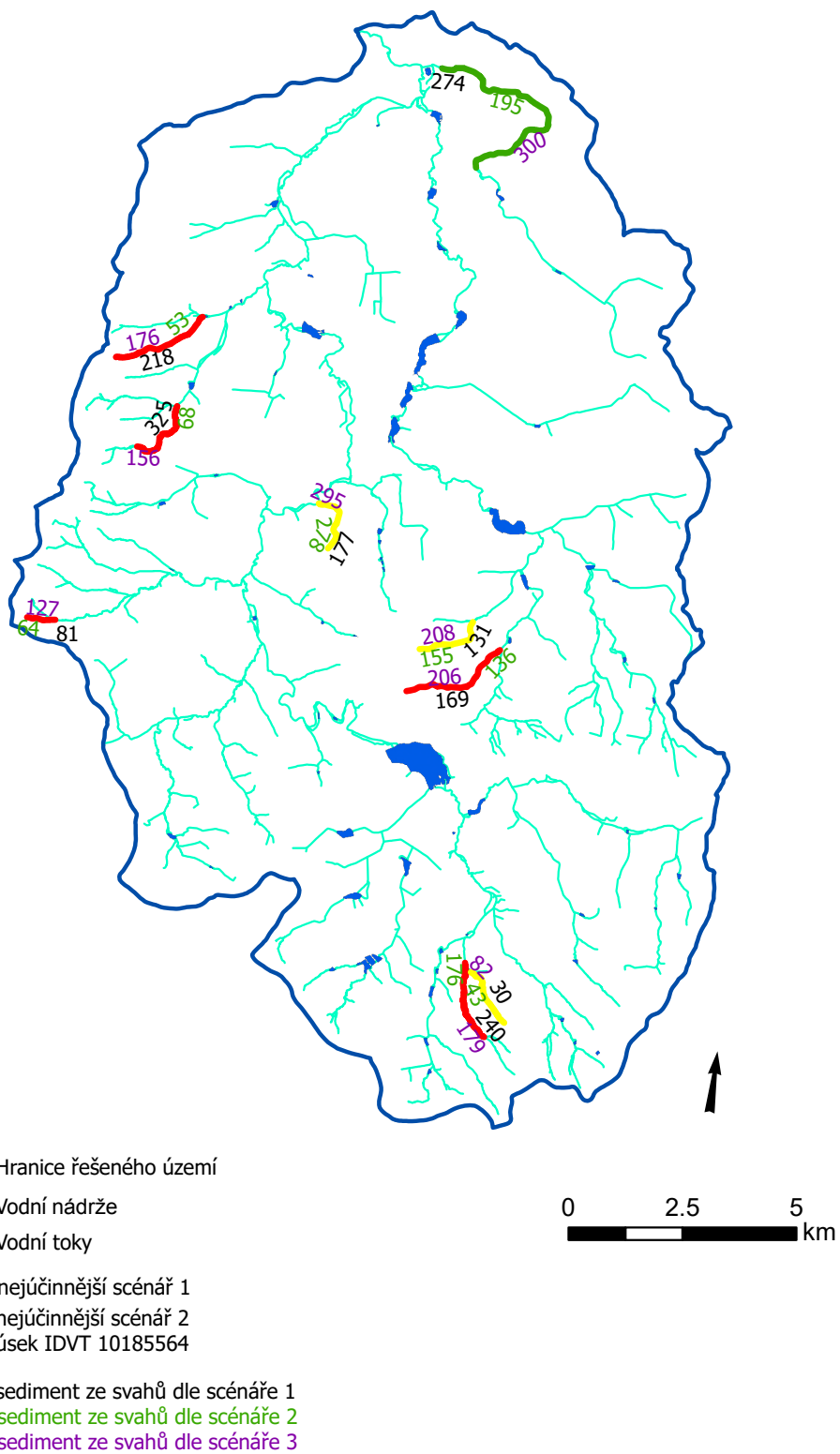
Tabulka 16 - Transportovaný sediment v kritických úsecích vodních toků v jednotlivých scénářích

		stávající stav				scénář 1			
IDVT	délka úseku (km)	sediment z povrchu (t/rok)	sediment z předchozího úseku (t/rok)	odtékající sediment (t/rok)	jednotkový odtok (t/rok/km)	sediment z povrchu (t/rok)	sediment z předchozího úseku (t/rok)	odtékající sediment (t/rok)	jednotkový odtok (t/rok/km)
10178804	1,45	368	0	368	254	177	0	177	122
10185562	1,78	392	65	457	256	325	31	356	200
10178906	1,56	261	0	261	167	131	0	131	84
10178839	2,28	378	0	378	166	218	0	218	96
10185564	5,17	340	213	553	107	274	114	388	75
10178778	0,64	282	0	282	443	81	0	81	127
10178657	2,02	243	201	444	220	240	91	331	164
10178903	2,54	215	0	215	85	169	0	169	67
10178658	1,44	161	0	161	112	30	0	30	21
		scénář 2				scénář 3			
IDVT	délka úseku (km)	sediment z povrchu (t/rok)	sediment z předchozího úseku (t/rok)	odtékající sediment (t/rok)	jednotkový odtok (t/rok/km)	sediment z povrchu (t/rok)	sediment z předchozího úseku (t/rok)	odtékající sediment (t/rok)	jednotkový odtok (t/rok/km)
10178804	1,45	278	0	278	192	295	0	295	204
10185562	1,78	68	32	100	56	156	46	202	113
10178906	1,56	155	0	155	99	208	0	208	133
10178839	2,28	53	0	53	23	176	0	176	77
10185564	5,17	195	193	388	75	300	206	506	98
10178778	0,64	64	0	64	101	127	0	127	200
10178657	2,02	176	50	225	111	179	95	274	136
10178903	2,54	136	0	136	54	206	0	206	81
10178658	1,44	43	0	43	30	82	0	82	57





Obrázek 46 - Ukázka kritických úseků na podkladu inflow a landuse



Obrázek 47 - Hillslope kritických úseků dle jednotlivých scénářů

## Eroze na úrovni vodních nádrží

Na množství sedimentu, které se ve vodní nádrži usadí mají mimo jiné vliv průtoky v nádrži a poměry zachycení. Poměr zachycení klesá se zvyšujícím se průtokem. Pro výpočet je uvažován průtok 0,764 m<sup>3</sup>/s a poměry zachycení nádrží tak, jak byly stanoveny v Kutil (2022).

V povodí se nachází 70 vodních nádrží. V tabulce 17 jsou uvedena celková množství usazeného sedimentu ve vodních nádržích v povodí v jednotlivých scénářích. Za stávajících podmínek se podle modelu v nádržích usadí 14 031 t/rok. Při aplikaci scénáře 1 by se usadilo o 34 % sedimentu méně, při scénáři 2 o 37 % a při scénáři 3 o 19 %. I v tomto případě je z hlediska množství usazeného sedimentu nejúčinnější scénář 2. Scénář 1 však přináší srovnatelný efekt a z hlediska realizace je přívětivější.

Tabulka 17 - Celkové množství usazeného sedimentu ve vodních nádržích

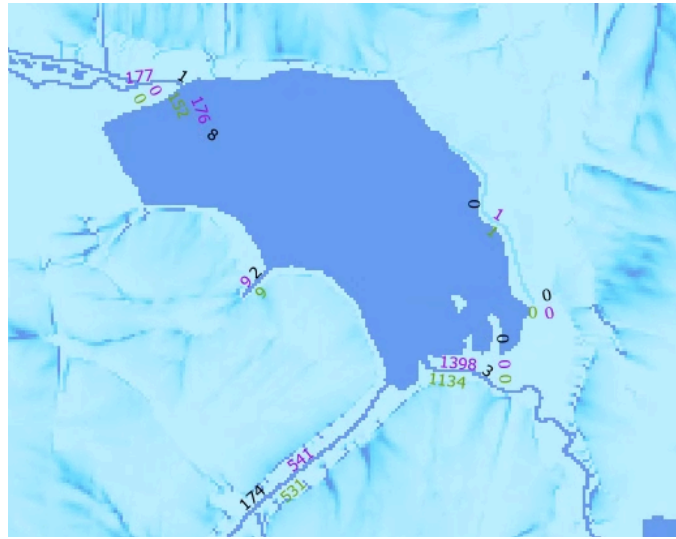
	stávající stav	scénář 1	scénář 2	scénář 3
<b>sediment usazený v nádržích (t/rok)</b>	14 031	9 257	8 829	11 427

Nejvíce sedimentu se ukládá ve Vavříneckém rybníce - 2 164 t/rok. Tato nádrž je nejvíce zanášena i při scénáři 2 a 3 – 1 532 a 1 781 t/rok. Při scénáři 1 se usadí 1 408 t/rok, což je druhá nejvíce zanášená nádrž při tomto scénáři. Poměr zachycení nádrže je 91 %, v nádrži se tedy zachytí 91 % transportovaného sedimentu. Plocha jeho povodí je 59,9 km<sup>2</sup>. Jedná se o největší vodní plochu v povodí, do které přitékají dva vodní toky – Výrovka a Ostašovský potok. Ty jsou hlavními donory sedimentu nádrži, ze svahů přitékají jen jednotky tun sedimentu. Proto je pro snížení zanášení rybníka nutno aplikovat protierozní opatření výše na přítocích.

Při scénáři 1 je nejvíce zanášena nádrž Strašík, kde se usadí 1416 t/rok. Při stávajících podmínkách se usadí 1991 t/rok, při scénáři 2 1209 t/rok, při scénáři 3 1648 t/rok. Poměr zachycení nádrže je uvažován 43 %. A jeho plocha povodí je 128,5 km<sup>2</sup>. Podle výpočtu Kutila (2022) by při stávajícím tempu zanášení byla nádrž za 75 let zcela zanesena (objem sedimentu bude 101 % objemu nádrže). Za 75 let by při scénáři 1 by byla nádrž zanesena ze 72 %, při scénáři 2 ze 61 % a při scénáři 3 by sediment zaplnil 84 % objemu nádrže. I v tomto případě je hlavním zdrojem sedimentu přítok – Výrovka.

Na obrázku 48, resp. 49 je zachycen Vavřínecký rybník, resp. Strašík na podkladu vrstvy inflow pro stávající stav a úseky vodních toků popsaných hodnotami sediment output, tedy

množstvím sedimentu, které odtéká z daného úseku (outflow). Černé písmo přísluší scénáři 1, zelené scénáři 2 a fialové scénáři 3.



Obrázek 48 - Vavřínecký r. s hodnotami outflow pro všechny scénáře



Obrázek 49 - Vodní nádrž Strašík s hodnotami outflow pro všechny scénáře

Nádrž Strašík se nachází přibližně o 10 km níže na Výrovce než Vavřínecký rybník a mezi nimi se žádná nádrž nevyskytuje. Z Vavříneckého rybníka při stávajícím stavu odtéká 214 t/rok sedimentu, Výrovka do Strašíku přináší 4569 t/rok. Při aplikaci scénáře 1 by Výrovkou přitékalo o 29 % sedimentu méně, při scénáři 2 o 39 % méně a při scénáři 3 o 17 % méně.

V tabulce 18 jsou uvedena množství usazeného sedimentu (t/rok) a poměry zachycení Vavříneckého rybníka a Strašíku.

Tabulka 18 - Usazený sediment (t/rok) ve vybraných vodních nádržích

	poměr zachycení	stávající stav	scénář 1	scénář 2	scénář 3
Vavřínecký r.	91	2 164	1 408	1 532	1 781
Strašík	43	1 991	1 416	1 209	1 648

Jak je patrné z tabulky 18, v případě některých nádrží může být účinnější scénář 1, v některých scénář 2. Ve 24 případech se v nádrži usadí méně sedimentu, bude-li aplikován scénář 1. V dalších 24 nádržích se usadí méně sedimentu, bude-li aplikován scénář 2. V případě jedné nádrže bude efekt stejný, ať už bude aplikován scénář 1 nebo 2. Pro žádnou nádrž se scénář 3 nestal nejúčinnější variantou opatření.

Aplikace scénářů se z pohledu množství zachyceného sedimentu neprojeví na všech nádržích. Scénář 1 nemá vliv na 28 nádrží, scénář 2 na 33 nádržích a scénář 3 na 36 nádržích. Ani jeden ze scénářů se neprojeví na 21 nádržích. Jedná se o nádrže, které nejsou téměř vůbec zanášeny ani při stávajícím stavu. V průměru se v těchto nádržích usadí 4 t/rok, nejčastěji pak 1 t/rok. Tyto nádrže mají často plochu povodí menší než 2 km<sup>2</sup>, jsou tedy relativně malé. Mezi tyto patří 11 neprotékaných nádrží, často v (blízkosti) zastavěných území nebo lomu. U těchto nádrží nebyla plocha povodí stanovována. Příklad takové vodní nádrže je zobrazen na obrázku 50 s hodnotami sediment output úseků vodní sítě.



Obrázek 50 - Příklad neprotékané nádrže

## ZÁVĚR

Cílem práce bylo analyzovat povodí Výrovky po uzávěrový profil v Plaňanech z pohledu erozního smyvu a transportu sedimentu včetně zanášení vodních nádrží za využití matematického modelu WaTEM/SEDEM, připravit typové scénáře snižující vstup sedimentu do hydrologické sítě a na základě dat z monitoringu ČHMÚ vyhodnotit erozně významnou událost.

V začátku se práce věnuje problematice eroze, jejím druhům, protierozním opatřením, erozním poměrům v ČR a stanovování erozní ohroženosti území.

Následuje seznámení se zájmovým územím, popis výpočtu, vstupních a výstupních dat matematického modelu WaTEM/SEDEM.

V další části jsou vyhodnocována data z monitoringu ČHMÚ z měrného (uzávěrového) profilu v Plaňanech pro rok 2022. Výsledkem výpočtů je 1. „požadové“ množství sedimentu – 226 t, 2. celkové množství sedimentu, které v daném roce proteklo uzávěrovým profilem – 3 624 t a 3. množství sedimentu proteklého uzávěrovým profilem při nejvýraznější erozní události v roce 2022 – 1 373 t.

Tato data byla diskutována v konfrontaci s výsledky výpočtu modelu pro stávající stav. Dle modelu je vodními toky transportováno 6 160 t/rok, tato hodnota je o 70 % větší než výsledek analýzy dat ČHMÚ pro rok 2022 – 3 624 t. Výsledek modelu je dlouhodobý roční průměr, zatímco z dat ČHMÚ je hodnota vypovídající pro jeden konkrétní rok. Výsledky získané na základě dlouhodobé časové řady jsou obecně směrodatnější. Výsledné hodnoty se ale řádově shodují a lze konstatovat, že uzávěrovým profilem v Plaňanech jsou transportovány jednotky tisíc tun erozního sedimentu ročně.

Na rozdíl těchto hodnot se také podílejí rozdílné hodnoty průtoků, zanedbání sedimentace a eroze ve vodních korytech, generalizace vstupních dat a použité rozlišení rastrů 10x10m, čímž dochází ke ztrátě detailu.

1.5.2022 byl proveden terénní průzkum. Při něm byla navštívena značná část povodí Výrovky. Byly pořízeny fotografie míst, kde byly viditelné projevy eroze, a významných míst povodí. Důraz byl kladen i na ověření skutečných podmínek terénu s výpočty modelu, kde byly nalezeny nesrovnalosti.

Dále byly nastoleny tři typové scénáře protierozních opatření, která zamezí vstupu sedimentu do říční sítě a zanášení nádrží. První z nich především zmírňuje následky eroze - zachycuje

sediment přitékající ze svahů před vstupem do říční sítě. Další dva scénáře mají spíše preventivní charakter – předcházejí vzniku erozního sedimentu, tím je pak množství transportovaného a usazeného sedimentu menší.

Ve scénářích jsou uvažovány různé varianty zatravnění. To je extrémní opatření, při němž je sice dosaženo vysokého stupně ochrany půdy, ovšem výměnou za zabor zpravidla produkčně využívané půdy. Alternativou k zatravnění mohou být vhodné půdoochranné osevní postupy, které dosahují příznivějších hodnot C faktoru a zachovávají produkční funkci půdy. Vzhledem k velikosti řešeného území byly scénáře aplikovány automaticky na plochu celého území podle vyčíslitelných parametrů.

Ve scénáři 1 byly navrženy travní pásy minimální šířky 10 m podél vodních toků. Ve scénáři 2 bylo vybráno 213 pozemků LPIS, které byly zatravněny na celé ploše. Ve scénáři 3 byly zatravněny pouze výrazněji erozně ohrožené části pozemků vybraných pro scénář 2. Zatravněvaná plocha je ve scénářích 1 a 3 téměř shodná – cca 460 m<sup>2</sup>. Oproti tomu plocha zatravnění scénáře 2 je cca 2 610 m<sup>2</sup>, téměř 10 % zájmového území, což je hlavní faktor, který snižuje jeho efektivitu.

Ambicí uvažovaných scénářů není jejich realizace, spíše demonstrace účinků různých typů zatravnění na erozní poměry v území. Tyto účinky byly analyzovány na úrovni celého povodí Výrovky (po uzávěrový profil v Plaňanech), povodích 4. řádu, kritických úsecích vodních toků a vodních nádržích.

Nejúčinnější scénář opatření je zpravidla scénář 2, což vzhledem k jeho generalitě a prostorové náročnosti není překvapující. Úspěch tohoto scénáře je dán výraznou redukcí vyprodukovaného sedimentu. Při podrobnějším vyhodnocování se projevuje účinnost ostatních scénářů, ve větší míře pak scénáře 1. Objevují se i případy, kdy je účinnost scénáře 1 a 2 stejná. Třetí varianta není nejučinnější v žádném případě.

Na úrovni nižších povodí jsou erozní poměry nejvíce zlepšeny při scénáři 2, a to až o 84 % oproti stávajícímu stavu, na jednom z nejohroženějších dílčích povodích. Při scénáři 1 jsou poměry nejčastěji zlepšeny o 20 až 40 %, při scénáři 3 nejčastěji do 20 %. Na povodích, kde byly účinky scénáře 1 největší, nebylo dosaženo nejvyšších účinků při scénářích 2 a 3. Jsou to ta povodí, na nichž se zatravněvané pozemky vyskytují v malé míře. Scénáře 2 a 3 se tedy nejvíce projevují na povodích, kde se zatravněvané pozemky vyskytují častěji.

Vyskytují se také povodí, na nichž dochází při aplikaci scénářů v průměru jen k malým změnám erozních poměrů, v použité kategorizaci se tato odchylka neprojeví.

Pro další hodnocení bylo vybráno 9 (kritických) úseků vodních toků, a to těch, do nichž přitéká velké množství sedimentu přes břehovou hranu. Na základě jednotkového odtoku, tedy množství sedimentu odtékajícího z daného úseku (t/km/rok), vypočteného pro každý úsek při každém scénáři byl určen scénář, který má na dané úseky nejlepší účinek. Ve třech případech to byl scénář 1, v pěti případech scénář 2. V jednom případě došlo ke shodnému účinku scénářů 1 a 2. Kvůli prostorové náročnosti scénáře 2 je scénář 1 v tomto případě považován za lepší řešení.

Celkově se nejméně sedimentu v 70 vodních nádržích povodí Výrovky usadí při scénáři 2. Při vyhodnocování jednotlivých nádrží je však počet nádrží, kde je účinnější scénář 2, stejný jako počet nádrží, kde je účinnější scénář 1, a to 24. V jednom případě je účinek těchto variant stejný. Ani pro jednu nádrž není nejúčinnější scénář 3. V případě 21 nádrží se neprojeví účinky žádného ze scénářů, zpravidla se jedná o neprotékané nádrže s malou zatopenou plochou. Podrobněji byly popsány poměry Vavříneckého rybníku a Strašíku – nejvíce zanášené nádrže při jednotlivých scénářích. V obou případech jsou hlavním zdrojem sedimentu přítoky, množství sedimentu vstupující do nádrží přímo ze svahů je zanedbatelné.

Otestování navržených scénářů může posloužit při konkrétnějších úvahách o zlepšení erozních poměrů na povodí Výrovky. Pokud by bylo žádoucí dosáhnout ještě výraznějšího zlepšení, je třeba zvětšit zatravňovanou plochu nebo přistoupit k „tvrdším“ (technickým) protierozním opatřením, jako jsou zasakovací průlehy, příkopy, úpravy sklonu svahu atp. Pokud naopak už otestované scénáře přinesly lepší než žádoucí výsledek, lze navržená opatření redukovat nebo nahradit „měkčími“ opatřeními, např. změnou osevních postupů (na protierozní), setbou/sadbou po vrstevnicích, pásovým obhospodařováním pozemků a dalšími agrotechnickými opatřeními.



## ZDROJE

ARCDATA PRAHA, s.r.o., 2016. ArcČR 500 ver 3.2. [online]. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <http://www.arcdata.cz>

BAUER, Miroslav, 2018. Posuzování erozní ohroženosti vodních nádrží sedimentem s využitím modelu WATEM/SEDEM. Disertační práce, ČVUT, Praha [Online]. [cit. 04/2023]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/75684>

BRUNE, G.M., 1953. Trap efficiency of reservoirs. Eos, Transactions American Geophysical Union, 34(3), s.407–418. In Bauer, 2018.

Česká geologická služba. Hydrogeologické rajony, Geologická mapa 1 : 50 000. In: Geovědní mapy 1 : 50 000 [online]. Praha. [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr50/>

Česká geologická služba. Půdní mapa 1:50000, Geologická mapa 1 : 50 000. In: Geovědní mapy 1 : 50 000 [online]. Praha. [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr50/>

Český hydrometeorologický ústav, 2021. Resort životního prostředí. Územní srážky [Online]. [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-srazky>

Český hydrometeorologický ústav, 2021. Resort životního prostředí. Územní teploty [online]. [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty#>

Český hydrometeorologický ústav, 2021. Průměrný roční úhrn srážek za období 1991-2020 [online]. [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: [https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/charakteristiky\\_klimatu/img/SRA\\_normal9120.gif](https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/charakteristiky_klimatu/img/SRA_normal9120.gif)

Český hydrometeorologický ústav, 2021. Průměrná roční teplota vzduchu za období 1991-2020 [online]. [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: [https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/charakteristiky\\_klimatu/img/T\\_normal9120.gif](https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/charakteristiky_klimatu/img/T_normal9120.gif)

Český hydrometeorologický ústav, Evidenční list hlásného profilu č. 60, generováno 23.04.2022, [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://hydro.chmi.cz/hppsevlist/download.php?seq=307024>

Český hydrometeorologický ústav, Evidenční list hlásného profilu č. 60, generováno 12.02.2023, [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://hydro.chmi.cz/hppsevlist/download.php?seq=307024>

Český hydrometeorologický ústav. Rozvodnice povodí 4. řádu rozšířené. [Online]. [vid. 05/2022]. Dostupné z: [https://services1.arcgis.com/ZszVN9IBVA5x4VmX/arcgis/rest/services/rozvodnice\\_IV\\_radu\\_full/FeatureServer](https://services1.arcgis.com/ZszVN9IBVA5x4VmX/arcgis/rest/services/rozvodnice_IV_radu_full/FeatureServer)

Česká republika. Vyhláška o ochraně zemědělské půdy před erozí. In: Sběrka zákonů. 2021, částka 100, číslo 240, s. 1985-1992. ISSN 1211-1244.

Český ústav zeměměřický a katastrální, Geoportál ČÚZK, 2010. Základní báze geografických dat České republiky (ZABAGED®) – polohopis. [Online]. [cit. 04/2023]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(ao5zz3jkaw1ftjgzbas001i\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=zabaged&metadataID=CZ-CUZK-ZABAGED-VP&mapid=8&head\\_tab=sekce-02-gp&menu=241](https://geoportal.cuzk.cz/(S(ao5zz3jkaw1ftjgzbas001i))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=zabaged&metadataID=CZ-CUZK-ZABAGED-VP&mapid=8&head_tab=sekce-02-gp&menu=241)

Český ústav zeměměřický a katastrální, Geoportál ČÚZK, 2010. Základní mapa 1:10000. [Online]. [cit. 04/2023]. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/?p=486>

DENDY, F.E. & Champion, W.A., 1978. Sediment deposition in US reservoirs: summary of data reported through 1975, U.S. Department of Agriculture [Online]. [cit. 04/2023]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=DtKAYefXXbkC&oi=fnd&pg=PV#v=one-page&q&f=false>

DEVÁTÝ, J., 2018. Klasifikace území pro erozní modely pomocí GIS a veřejně dostupných datových zdrojů [Online]. ČVUT, Stavební inženýrství, Inženýrství životního prostředí, [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/75682>.

DOSTÁL, T., 2021. 2. přednáška. [online]. Katedra hydromeliiorací a krajinného inženýrství, Fakulta stavební, ČVUT v Praze. [cit. 2022-10-20]. Dostupné z: [https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/YOPO/eroze%202\\_klasifikace.pdf](https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/YOPO/eroze%202_klasifikace.pdf)

DOSTÁL, Tomáš, 2021. 5. přednáška - Predikce erozních procesů. [online]. Katedra hydromeliiorací a krajinného inženýrství, Fakulta stavební, ČVUT v Praze. [cit. 2022-10-20]. Dostupné z: [https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/YOPO/eroze%202\\_klasifikace.pdf](https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/YOPO/eroze%202_klasifikace.pdf)

JANEČEK, M. a kol., 2008. Základy erodologie, Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN: 978-80-213-1842-7

JANEČEK, M. a kol., 2012. Ochrana zemědělské půdy před erozí: Metodika [online]. [cit. 2023-02-12]. ISBN 978-80-87415-42-9. Dostupné z: <https://knihovna.vumop.cz/files/90>

JANOŠEK, Z.a MISTR, M., 2021. Mapa erozně ohrožených ploch se zohledněním zemědělské produkce v období 2020+ Specializovaná mapa s odborným obsahem [Online]. - Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., 2021. [cit. 2023-03-14].

KLÍMOVÁ, Hana, 2022. Kvantifikace zdrojů erozního sedimentu v povodí Výrovky. Diplomová práce, ČVUT, Praha [online]. [cit. 03/2023]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/99724/F1-DP-2022-Klimova-Hana-DP\\_Klimova.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/99724/F1-DP-2022-Klimova-Hana-DP_Klimova.pdf?sequence=-1&isAllowed=y)

KRÁSA, J., 2004. Hodnocení erozních procesů ve velkých povodích za podpory GIS. Disertační práce, ČVUT v Praze [online] [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: [https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/osobni%20stranky/Krasa%20Josef/Dizertace\\_krasa.pdf](https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/osobni%20stranky/Krasa%20Josef/Dizertace_krasa.pdf)

KRÁSA, J., 2010. Empirické modely vodní eroze v ČR, habilitační práce, ČVUT v Praze. [online] [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: [https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/osobni%20stranky/Krasa%20Josef/habilitace\\_krasa\\_2010.pdf](https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/osobni%20stranky/Krasa%20Josef/habilitace_krasa_2010.pdf)

KUTIL, Š., 2022. Posouzení zanášení nádrží v povodí Výrovky. ČVUT v Praze, [cit. 2023-02-15]

K.U. Leuven, Physical and Regional Geography Research Group, 2006. WaTEM / SEDEM version 2006 Manual [online]. [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: [https://ees.kuleuven.be/geo-geography/modelling/watemsedem2006/manual\\_watemsedem\\_122011.pdf](https://ees.kuleuven.be/geo-geography/modelling/watemsedem2006/manual_watemsedem_122011.pdf)

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

Ministerstvo zemědělství, 2012. Situační a výhledová zpráva, půda [online] [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: [https://eagri.cz/public/web/file/181775/Zprava\\_Puda\\_kniha\\_web\\_\\_1\\_.pdf](https://eagri.cz/public/web/file/181775/Zprava_Puda_kniha_web__1_.pdf)

Ministerstvo zemědělství, 2021. Situační a výhledová zpráva, půda [online] [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: [https://eagri.cz/public/web/file/697802/Puda\\_2021\\_Web.pdf](https://eagri.cz/public/web/file/697802/Puda_2021_Web.pdf)

Ministerstvo zemědělství, 2022. Veřejný export dat LPIS (Portál farmáře, eAGRI) [online]. [cit. 04/2023]. Dostupné z: <https://eagri.cz/public/web/mze/farmar/LPIS/export-lpis-rocnishp.html>

Ministerstvo zemědělství, 2023. Protierozní opatření [online] [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: <https://eagri.cz/public/web/mze/zivotni-prostredi/ochrana-pudy/eroze-pudy/protierozni-opatreni/>

Ministerstvo životního prostředí, 2015. Regionalizovaný faktor erozní účinnosti přívalového deště na orné půdě (R faktor). [online] [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: <https://metadata.vumop.cz/record/basic/54c8933e-5a48-4b40-bf7d-13707f000001>

NOVOTNÝ, I. a kol., 2017. Příručka ochrany proti erozi zemědělské půdy. [online]. [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://knihovna.vumop.cz/media-viewer?rootDirectory=152&origin=https%3A%2F%2Fknihovna.vumop.cz%2Frecords%2F41a3b087-35ae-4c7e-89f2-dfbdec55dbff#!?file=942>

RICHTER, P. a kol., 2022. Povodí Výrovky jako vhodné území pro sledování a porovnávání hydrologických a krajinných charakteristik, Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, VÚV TGM, Praha. [online]. [cit. 02/2023]. Dostupné z: <https://www.vtei.cz/2022/06/povodi-vyrovky-jako-vhodne-uzemi-pro-sledovani-a-porovnavani-hydrologickych-a-krajinnych-charakteristik/>

RENARD, K. a kol., 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. [online]. [cit. 04/2022]. Dostupné z: [https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/64080530/RUSLE/AH\\_703.pdf](https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/64080530/RUSLE/AH_703.pdf)

RÖDLOVÁ, Sylva, 2014. Ovlivnění půdy lidskou činností Fyzikální, chemická a biologická degradace půdního fondu [online] [cit. 2023-10-20]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3360173/>

Seznam.cz, a.s., TopGis, 2019. Letecká mapa [online] [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://mapy.cz/turisticka?source=base&id=2117557&x=14.3957796&y=50.1040397&z=17&base=ophoto>

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.

Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd, v.v.i, 2020. Půda v číslech [online] [cit. 2023-01-30].

Dostupné z: <https://statistiky.vumop.cz/?core=account>

Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd, v.v.i, 2022. Eroze půdy [online] [cit. 2023-02-10].

Dostupné z: <https://www.vumop.cz/eroze-pudy>

Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd, v.v.i, Komplexní průzkum půd. [online] [cit.: 04/2023].

Dostupné z: <https://mapy.vumop.cz/>

WISCHMEIER, W.H. and SMITH, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses. Agriculture handbook No.537 [online]. [cit. 03/2023]. Dostupné z: <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>.