ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA HYDROMELIORACÍ A KRAJINNÉHO INŽENÝRSTVÍ

POSOUZENÍ ZANÁŠENÍ NÁDRŽÍ V POVODÍ VÝROVKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

ŠIMON KUTIL

VEDOUCÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

DOC. ING. JOSEF KRÁSA, PH.D.

PRAHA 2022

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kutil Jméno: Šimon Osobní číslo: 477260

Zadávající katedra: K143 - Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor/specializace: Inženýrství životního prostředí

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Posouzení zanášení nádrží v povodí Výrovky

Název bakalářské práce anglicky: Assessment of reservoirs' silting in the Výrovka watershed

Pokyny pro vypracování:
Analyzujte zadané území povodí Výrovky (po uzávěrový profil Plaňany) z pohledu erozního smyvu a transportu sedimentu s využitím dat DP práce H. Klímové (2022). Posuďte zanášení jednotlivých vodních nádrží, jejich význam pro zachycení sedimentu z dílčích částí povodí a z pohledu celkového transportu sedimentu povodím Výrovky. Na základě posouzení modelového významu jednotlivých nádrží proveďte zjednodušený průzkum jejich stavu, dostupnosti pro verifikační měření a navrhněte prioritu měření objemu sedimentu v jednotlivých nádržích.

Pokuste se provést základní analýzu historie klíčových nádrží z pohledu jejich významu pro zachycení sedimentu, nebo změn objemu sedimentu v čase.

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
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
Winterová J.: Transport splavenin v povodí VN Vrchlice, ČVUT v Praze, 2021

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

Datum zadání bakalářské práce: 21.2.2022 Termín odevzdání BP v IS KOS: 15.5. 2022
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské 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)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci na téma „Posouzení zanášení nádrží v povodí Výrovky“ zpracoval samostatně s využitím uvedené literatury a ostatních uvedených podkladů. Pro práci v softwaru ArcGIS Pro byla využita školní licence Fsv ČVUT.

V Praze dne 26.3. 2022 Šimon Kutil

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Josefu Krásovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a pomoc, díky které mohla být tato práce dokončena. Dále také děkuji Ing. Miroslavu Bauerovi, Ph.D. a Ing. Haně Klímové za poskytnutí potřebných dat pro zpracování bakalářské práce.

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

Obsah

Abstrakt 7
Abstract 9
1. Úvod 11
2. Cíl práce 12
3. Charakteristika řešeného území 13
3.1. Využití území 14
3.2. Hydrologické poměry 16
3.3. Geologické a pedologické poměry 18
4. Eroze půdy a transport sedimentů 19
4.1. Druhy eroze půdy 19
4.2. Důsledky eroze 20
4.3. Ochrana proti erozi 21
4.3.1. Organizační opatření 21
4.3.2. Agrotechnická opatření 22
4.3.3. Technická opatření 23
4.4. Eutrofizace 25
4.4.1. Opatření pro snížení eutrofizace 25
5. Výpočet ztráty půdy vodní erozí 27
5.1. USLE 27
6. Model WaTEM/SEDEM 30
6.1. Prostředí modelu 32
6.2. Vstupy do modelu 34
6.3. Výstupy modelu 38
7. Výpočet 43
8. Vyhodnocení 53
8.1. Vliv rozdílných průtoků na výsledky 53
8.2. Vyhodnocení kritických nádrží 58

Vavřinecký rybník 58
Podbečvárský rybník 59
Strašík 60
Mlékovický rybník 64
Utopenec 65
Hořejší rybník 66
Nový rybník 67
Panský rybník 68
Mlýnek 69
Bosňák 70
Svatý Prokop 71
Rybník Hydro ID – 200 72
8.3. Vyhodnocení zanášení nádrží 73
8.4. Vyhodnocení povodí nádrží – export sedimentu 76
Povodí Vavřineckého rybníka 77
Povodí rybníka Strašík 79
Povodí Podbečvárského rybníka 81
Povodí rybníka Utopenec 83
Povodí rybníka Svatý Prokop 85
9. Závěr 87
10. Použitá literatura a podklady 89

Abstrakt

S rozvojem zemědělské činnosti a stále častějším narušováním přirozeného povrchu se eroze půdy postupně stala velkým problémem, který může negativně ovlivňovat vlastnosti a kvalitu vod a mimo jiné způsobuje obrovské ztráty zemědělské půdy. S přihlédnutím ke skutečnosti, že půda je vyčerpatelným zdrojem, je zřejmé, že problém ztráty půdy je třeba intenzivně řešit.

Účelem bakalářské práce je analýza vlivu erozní činnosti a transportu sedimentů s následným posouzením zanášení vodních nádrží v části povodí řeky Výrovky, která se nachází ve Středočeském kraji. Využitý empirický model WaTEM/SEDEM poskytuje možnost společně analyzovat vzájemně související procesy eroze, transportu sedimentů i následného zanášení nádrží.

První částí práce byla bližší analýza řešeného území a shromáždění potřebných podkladů a dat. Po seznámení s principy fungování modelu WaTEM/SEDEM byla pomocí dostupných dat provedena řada výpočtů se dvěma různými variantami uvažovaného průtoku.

Ve výsledku byla v řešeném povodí (plocha 265 km^2) zjištěna celková produkce sedimentu 139 tis. tun ročně. Celkové množství depozice sedimentu je 119 tis. tun a celkem 20,1 tis tun se tak dostává do vodních toků. Řešených 70 vodních nádrží ročně zachytí zhruba 14 tis. tun sedimentu. Ze zájmové části povodí řeky Výrovky projde dále uzávěrovým profilem 6,1 tis. tun sedimentu.

Díky výstupním datům bylo možné určit konkrétní nádrže, které jsou nejvíce zatížené z hlediska zanášení. Dle vypočtených množství sedimentu, byly zjištěny podíly ročního přísunu sedimentu s přihlédnutím k budoucímu vývoji. Na základě těchto postupů bylo určeno, že zanášením sedimentu jsou nejvíce ohrožené rybníky Svatý Prokop a Mlýnek.

Klíčová slova: ztráta půdy, transport sedimentů, zanášení nádrží, povodí Výrovky, WaTEM/SEDEM

Abstract

With the development of agricultural activity and the increasing disturbance of the natural surface, soil erosion has gradually become a major problem that can negatively affect the properties and quality of water and it also cause huge losses of agricultural land. Considering the fact, that soil is an exhaustible resource, it becomes clear that the problem of soil loss needs to be intensively solved.

The purpose of the bachelor thesis is to analyze the impact of erosion activity and sediment transport, followed by an assessment of siltation in a part of the Výrovka river basin, located in the Central Bohemia Region. The empirical model WaTEM/SEDEM provides the possibility to analyze the interrelated processes of erosion, sediment transport and subsequent siltation of reservoirs.

The first part of the thesis was a closer analysis of the study area and the collection of the necessary documents and data. After getting acquainted with the principles of WaTEM/SEDEM model operation, a series of calculations were performed using the available data with two different variants of the considered flow rate.

As a result, a total sediment production of 139 thousand tons per year was found in the solved catchment area (265 km^2). The total amount of sediment deposition is 119 thousand tons and a total of 20.1 thousand tons gets into watercourses. The 70 reservoirs in question capture approximately 14 thousand tons of sediment per year. According to the model six thousand tons of sediment pass through the outlet profile of the Výrovka River basin annually.

Thanks to the output data, it was possible to determine the specific reservoirs, that are most loaded in terms of siltation. According to the calculated amounts of sediment, the proportions of the annual sediment supply were determined considering future developments. Based on these procedures, it was

identified, that the ponds Svatý Prokop and Mlýnek are the most vulnerable to sediment siltation.

Key words: soil loss, sediment transport, reservoir silting, Výrovka watershed, WaTEM/SEDEM

1. Úvod

Eroze půdy se postupem času stala výrazným problémem. V oblasti České republiky rozvoj této problematiky souvisí z velké části s kolektivizací za minulého režimu. Sjednocování menších pozemků do velkých ploch způsobilo výrazné zrychlení vodní eroze. Procesy, které způsobuje, vedou nejen ke ztrátě velkého množství půdy, ale také k výraznému ovlivnění režimu v řekách a vodních nádržích. V momentě, kdy se půda dostane do vodní sítě, je z hlediska zemědělského využití nenávratně ztracena.

Transport sedimentu vodními toky ještě prohlubuje následky této problematiky. Vlivem obohacování vod o živiny dochází ke zhoršování kvality vody. Neméně závažným problémem je postupné zanášení vodních nádrží sedimentem.

S vývojem programů a softwarů, které jsou schopné předpovídat průběhy těchto procesů, se naskytla příležitost pro intenzivnější a efektivnější řešení.

Empirický model WaTEM/SEDEM zprostředkovává možnost automatizovaného komplexního výpočtu pro kombinaci procesů, které spolu úzce souvisí. Model umožňuje řešit problematiku eroze půdy a současně podává informace o navazujícím průběhu transportu sedimentu.

Na území ČR je více než polovina rozlohy orné půdy ohrožena problémem vodní eroze. Výpočty na rozsáhlých územích jsou často náročné z hlediska množství vstupních dat a složitých výpočtů. V současnosti jsou tak empirické modely jako např. WaTEM/SEDEM nejlepší variantou, jelikož oproti jiným modelům jsou mnohem méně náročné právě na množství vstupních dat. Nabízejí nám tak možnost výpočtů i na poměrně rozsáhlých územích.

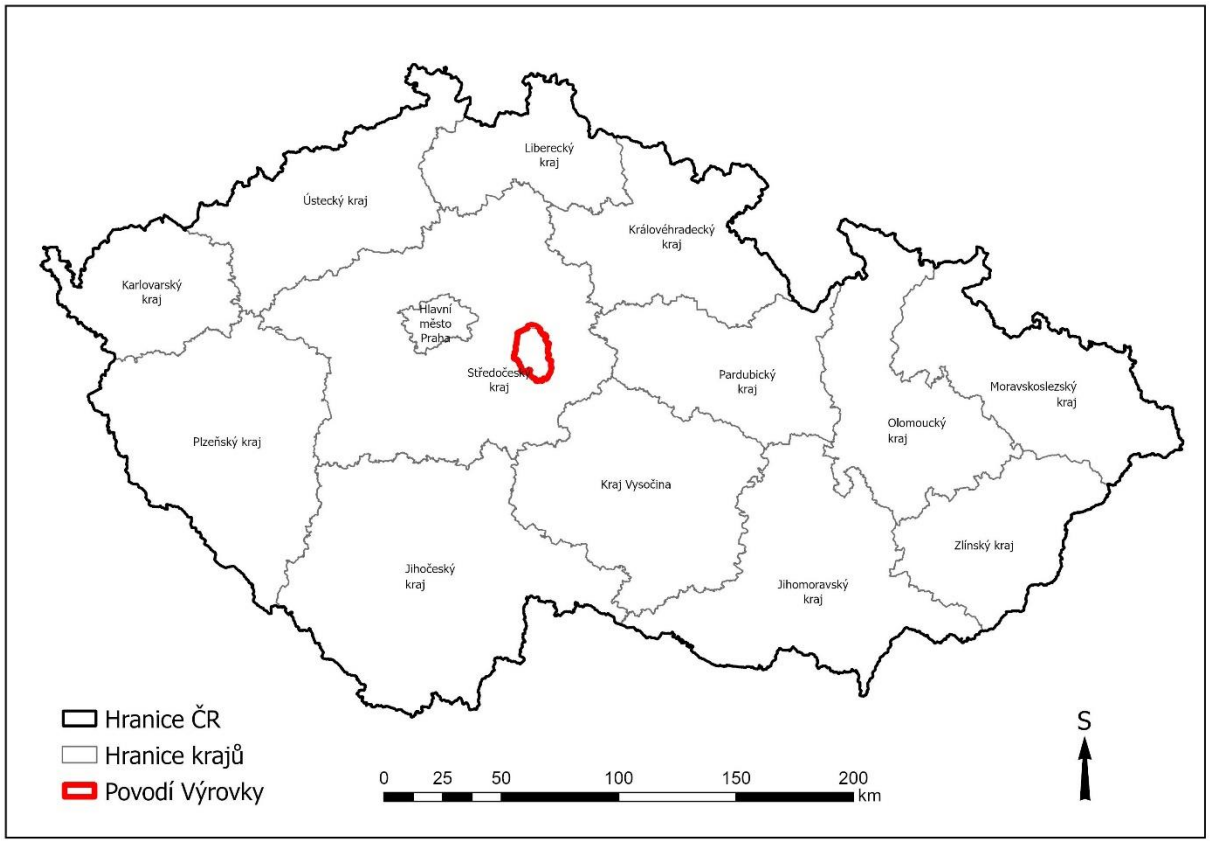
2. Cíl práce

Cílem práce je provedení analýzy na území povodí řeky Výrovky. Předmětem analýzy je zjištění erozního smyvu v území. Vlivem transportu dochází k zachycování sedimentů a k postupnému zanášení vodních nádrží v povodí. Účelem práce je posouzení míry zanášení jednotlivých nádrží a zjištění jejich vlivu na celkový transport sedimentů částí povodí řeky Výrovky.

K provedení celkové analýzy území je využit model WaTEM/SEDEM, který umožňuje zachytit procesy spojené s erozí půdy, transportem sedimentů ve vodních tocích a následně zanášení vodních nádrží v území.

3. Charakteristika řešeného území

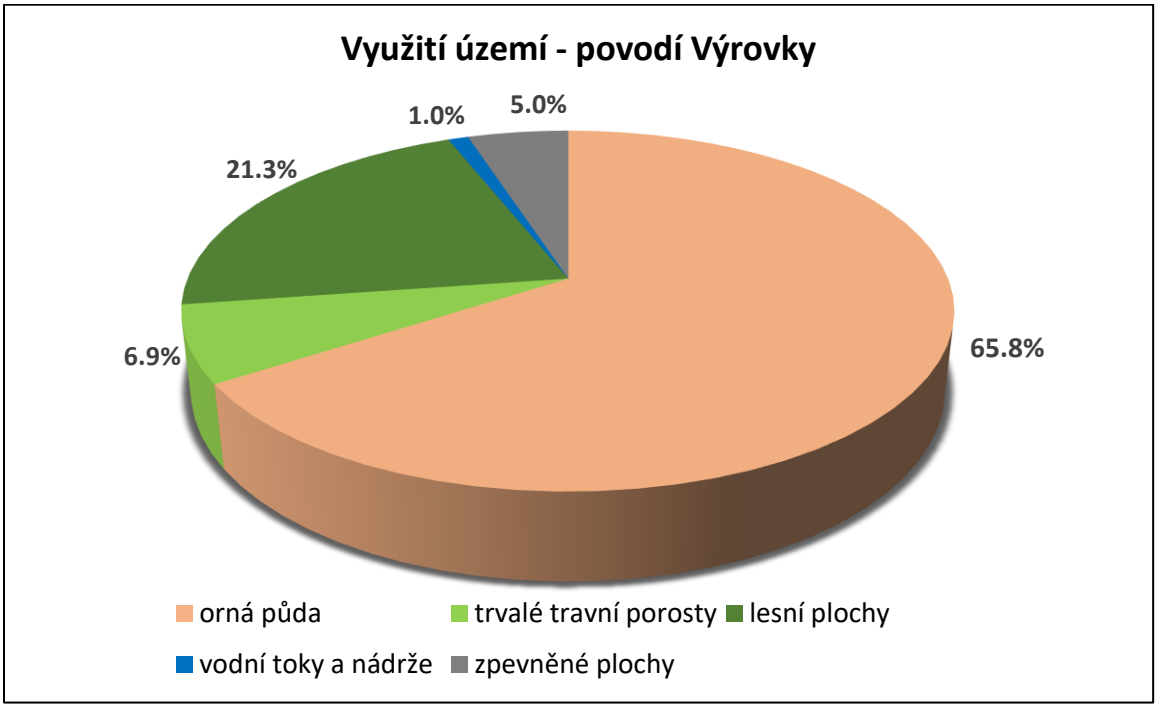
Povodí řeky Výrovky se nachází ve Středočeském kraji. Výrovka pramení v Kochánově, který je částí města Uhlířské Janovice. Poté teče převážně severním směrem a je levostranným přítokem řeky Labe, do které ústí nedaleko Nymburka. Řeka je dlouhá zhruba 62 km a plocha jejího povodí je 543,05 km^2(HEIS VÚV). Pro bakalářskou práci bylo řešeným územím dílčí povodí s plochou 265 km^2, které se táhne od pramenu řeky po uzávěrový profil v Plaňanech.



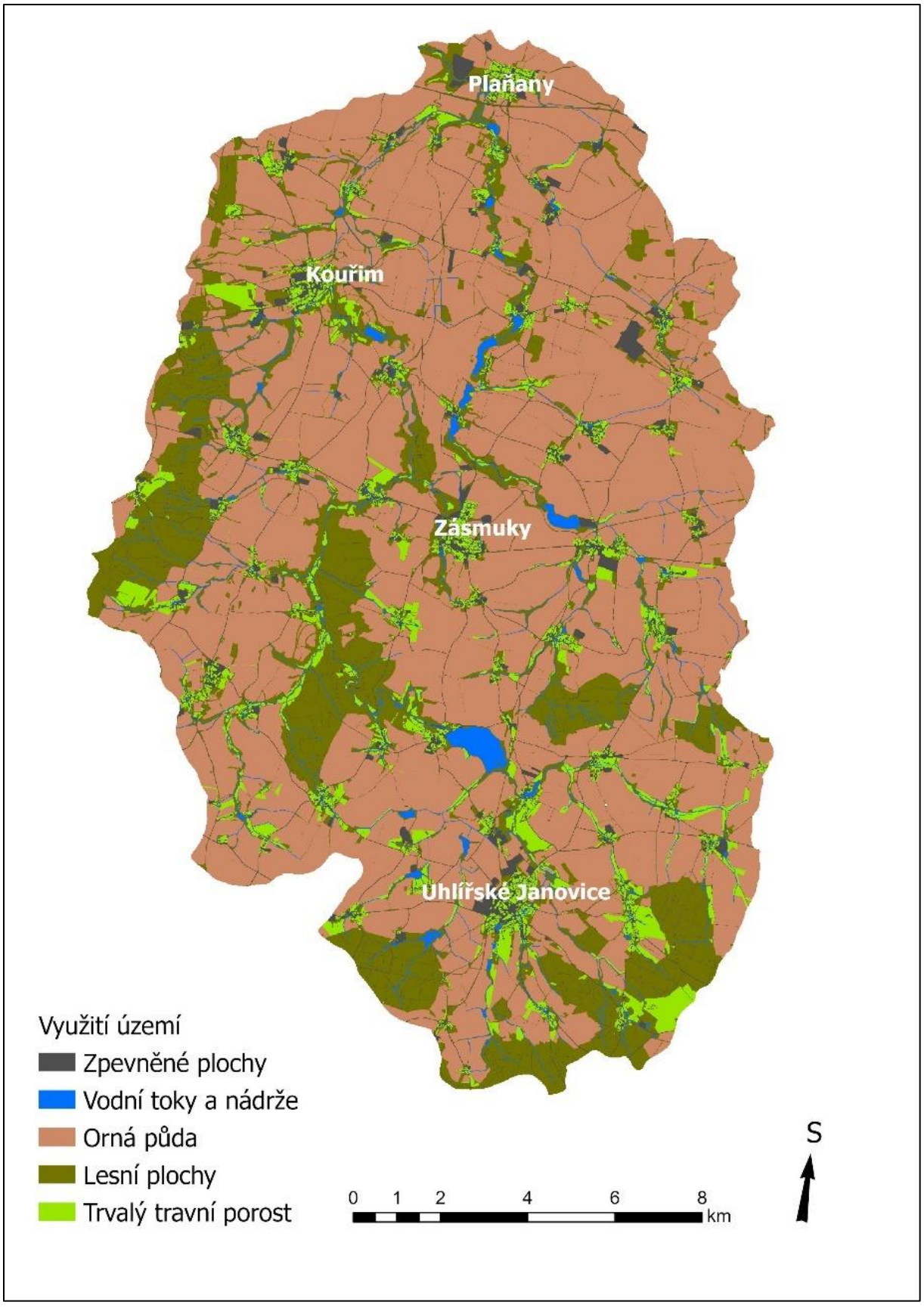
Obrázek 1 - Vymezení řešeného území (použitá data: RÚIAN, ČÚZK)

3.1. Využití území

Využití území je pro řešení práce velmi důležitým faktorem. Jak je možné vidět na Obrázku 2, výrazně zde převládají plochy s ornou půdou, která je na erozi půdy logicky nejnáchylnější. Dále v území najdeme hned několik lesních porostů. Mezi největší patří Ratajská obora, les U starého zámku nebo Budský les. Zeleň v území doplňují menší plochy trvalých travních porostů. Poměrně zanedbatelnou část tvoří zpevněné plochy, kterých v území není moc. Nedílnou součástí jsou samozřejmě vodní plochy a vodní toky, které jsou pro toto téma klíčové. Na Obrázku 3 můžeme vidět mapu využití území.



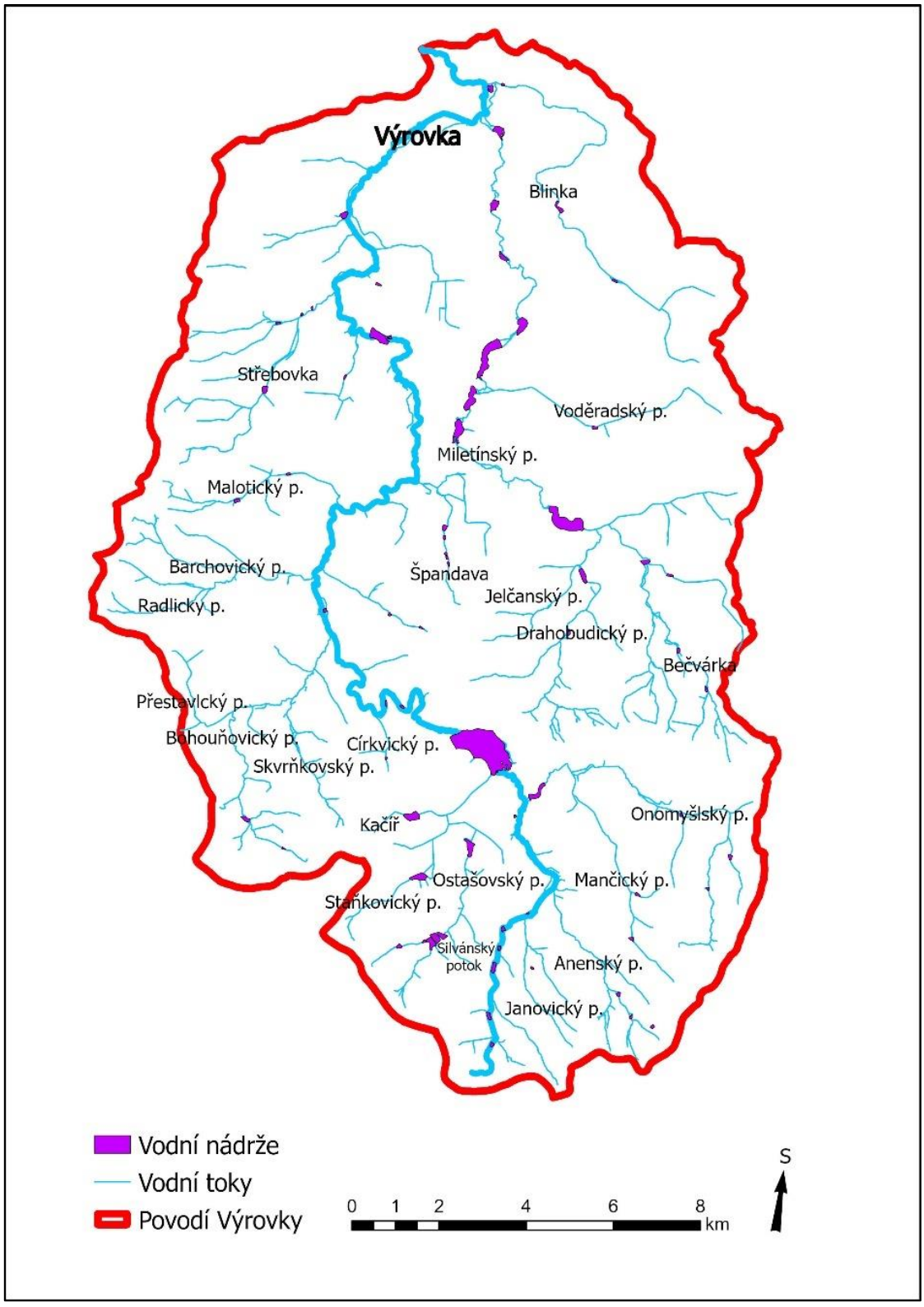
Obrázek 2 - Graf využití území v povodí Výrovky



Obrázek 3 - Využití území v povodí Výrovky (použitá data: Klímová, 2022)

3.2. Hydrologické poměry

Základem říční sítě v řešeném povodí je řeka Výrovka. Postupně se do ní vlévají významnější i méně významné přítoky.



Obrázek 4 - Říční síť v povodí Výrovky (použitá data: DIBAVOD, ZABAGED)

Z pravostranných jsou to Onomyšlský potok, Anenský potok, Blinka, Bečvárka (v horních částech toku nazývaná též Miletínský potok). Do říční sítě přispívají i přítoky Bečvárky, kterými jsou Drahobudický potok a Voděradský potok.

Mezi levostranné přítoky se řadí Střebovka, Malotický potok, Barchovický potok, Bohouňovický potok nebo Ostašovský potok. Celá říční síť v řešeném povodí je zobrazena na Obrázku 4.

V povodí najdeme také celkem 70 vodních nádrží, které byly předmětem řešení bakalářské práce. Mezi největší patří Vavřinecký rybník (78,35 ha), rybník Strašík (8,67 ha), Podbečvárecký rybník (21,85 ha), Mlékovický rybník (7,6 ha) nebo rybník Utopenec (15,63 ha) (Obrázek 21).

Řešené povodí je dílčí částí povodí 3. řádu s označení 1-04-06 a je složeno celkem ze 29 povodí čtvrtého řádu (HEIS VÚV).

V území se nachází jediná hlásná stanice. Jedná se o profil v Plaňanech, který je zároveň uzávěrovým profilem pro řešení této práce. Stanice podává informace o důležitých charakteristikách povodí i samotného profilu, o stupních povodňové aktivity, průměrných vodních stavech nebo průtocích. Data můžeme vidět na Obrázku 5, který je prozatím pouze výřezem z evidenčního listu hlásného profilu (ČHMÚ, Hlásná a předpovědní povodňová služba). Kompletní evidenční list můžeme vidět na Obrázku 16.

Staničení:	**21.5**	*[km]*	*Číslo hydrologického pořadí:*	**1-04-06-0290-0-00**					
Plocha povodí:	**263.781**	*[km²]*	*Zeměpisné souřadnice:*	**15.0161289 v.d.**	**50.04903 s.š.**				
Nula vodočtu:	**208.24**	*[m n. m.]*	*Procento plochy povodí toku:*	**48.7**					
Stupně povodňové aktivity:		*[cm]*	*[m³s⁻¹]*	*Platnost SPA pro úsek toku:*					
1.SPA (bdělost)		**150**	**16.451**	**od ústí Bečvárky po ústí do Labe**					
2.SPA (pohotovost)		**200**	**23.151**	*Kritické místo:*					
3.SPA (ohrožení)		**250**	**30.062**						
Průměrný roční stav:	**23**	*[cm]*		*N-leté průtoky:*	Q_1	Q_5	Q_{10}	Q_{50}	Q_{100}
Průměrný roční průtok:	**0.764**	*[m³s⁻¹]*		*[m³s⁻¹]*	**7**	**21.2**	**30.2**	**58.9**	**75**

Obrázek 5 - hlásný profil Plaňany (ČHMÚ, Hlásná a předpovědní povodňová služba)

3.3. Geologické a pedologické poměry

Řešené území se nachází v soustavě Český masiv. Zasahuje do oblasti kvartéru a o něco větší část se nachází v kutnohorsko-svratecké oblasti, která se následně dělí na kutnohorské krystalinikum a svratecké krystalinikum.

V jižní části zhruba až k Vavřineckému rybníku je horninovým typem metamorfit. Dále na sever se horninový typ mění na nezpevněný sediment.

Převažující horninou v území je spraš a sprašová hlína. V jihovýchodní části se nachází dvojslídný svor. V oblasti nad Vavřineckým rybníkem jde o dvojslídný migmatit přecházející až v ortorulu. V okolí vodních toků se nachází nivní sediment.

Všechny tyto informace byly zjištěny v mapové aplikaci Geovědní mapy 1:50000 (Česká geologická služba).

Při analýze pedologických poměrů můžeme najít v území velké množství půdních druhů. V převážné části území se vyskytují především hnědozemě (luvická, luvická oglejená, modální), kambizem (modální luvická) a v menším poměru můžeme najít i pseudoglej modální. V severní části nad rybníkem Strašík až po uzávěrový profil v Plaňanech se vyskytují černozemě (modální, luvické, karbonické). V oblastech vodních toků můžeme najít fluvizemě, gleje a místy také černice.

Informace o půdních poměrech byly zjištěny z mapové aplikace Půdní mapa 1:50000 (Česká geologická služba).

4. Eroze půdy a transport sedimentů

Jedná se o přírodní proces, při kterém dochází k rozrušování povrchu a transportu půdních částic, které se následně na jiných místech usazují (Ministerstvo zemědělství, 2009-2022). Eroze půdy závisí na mnoha faktorech. Především se jedná o sklonitost a délku pozemku, vlastnosti konkrétní půdy a její schopnost odolávat erozi nebo vegetační pokryvu. Ztráta půdy může být redukována např. zvolením specifického osevního postupu, tvorbou agrotechnických opatření (sázení po vrstevnici, ochranné obdělávání), zvolením technických protierozních opatření (příkopy, průlehy, zatravněné údolnice, protierozní meze). Průměrná dlouhodobá ztráta půdy je vyjádřena v jednotkách $t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$.

4.1. Druhy eroze půdy

Hlavní druhy půdní eroze jsou klasifikovány podle příčiny jejich vzniku (větrná, sněhová, vodní).

Pro větrnou erozi jsou klíčovými faktory zejména rychlost a směr větru. Rozhodující také je doba trvání větru a četnost jeho výskytu (Janeček a kol.,2012).

Důležitý vliv má také obsah jílovitých částic. S vyšším obsahem těchto částic se současně zvyšuje odolnost půdy vůči větrné erozi. Snadněji se díky nim vytváří agregáty, které jsou vůči erozi odolnější (Kozlovsky Dufková, 2019).

Sněhová eroze může vzniknout vlivem tání sněhu, kdy se půdní částice transportují pozvolným pohybem vrstvy sněhu po povrchu. Druhou variantou původu sněhové eroze, která zasahuje území o poznání více, je velmi rychlý pohyb sněhu společně s částicemi ve formě lavin (Dostál, 2021).

Podle studií autorů (Demidov et al., 1995; Edwards et al., 1998; Lundekvam, 2002), z několika oblastí v severní, střední i východní Evropě, je patrné, že eroze

vlivem tání sněhu může svými hodnotami i převýšit dešťovou erozi. V ČR je však tento typ eroze málo rozšířený (Středová, Středa, Rožnovský, 2017).

Nejčastějším druhem půdního smyvu v našich podmínkách je eroze vodní. Tímto typem eroze je v současnosti ohroženo více než 50 % orné půdy na území ČR (Novotný a kol.,2017).

Vodní eroze je vyvolána destrukční činností dešťových srážek, které dopadají na půdní povrch a následně se povrchovým odtokem transportují (VÚMOP v.v.i).

Jak již bylo výše zmíněno, velkou roli při vzniku vodní eroze hraje především sklonitost terénu, délka konkrétního pozemku ve směru svahu, vegetační pokryv, půdní poměry včetně využívaných technologií (Janeček a kol., 2012).

Při povrchové vodní erozi můžeme rozlišovat tři typy. Plošná eroze, které se obvykle projevuje smyvem půdy z celého území. Výmolová eroze, která vznikne při soustřeďování povrchového odtoku a tvoří rýhy, které se postupně prohlubují. Proudová eroze probíhá vlivem proudění vodních toků a může při ní docházet k vymílání břehů i dna (Krása, 2004).

Dále se tato bakalářská práce zabývá již výhradně problematikou vodní eroze půdy.

4.2. Důsledky eroze

Jedním z hlavních důsledků půdního smyvu je výrazné ovlivnění půdy z hlediska zemědělského využití. Při procesu dochází k ochuzení půdního profilu o část, která je nejúrodnější, zároveň dochází k negativnímu ovlivnění půdy z hlediska chemických i fyzikálních vlastností a k mnoho dalším procesům, které mají obecně na zemědělskou činnost velmi negativní vliv (Ministerstvo zemědělství 2009-2022).

Některé půdní částice, které se smývají z povrchu, se následně dostávají do vodních toků či nádrží, odkud se přirozeně po proudu transportují dál do povodí. Sediment je vlivem odlišného zrnitostního složení obvykle obohacen o nepříznivé

látky (těžké kovy, fosfor, aj.). Vlivem tohoto procesu následně vznikají příznivější podmínky pro množení nežádoucích organismů, jako jsou sinice nebo plankton (proces eutrofizace). Po jejich odumření se, v případě vysokých letních teplot, výrazně snižuje obsah kyslíku ve vodě, který se projeví vymíráním ryb a dalších vodních organismů. Obecně tak dochází ke snižování kvality vody, a proto je třeba řešit problémy spojené s erozí a transportem sedimentů (Kukol, 2013).

4.3. Ochrana proti erozi

Jak již bylo výše zmíněno, možností ochrany proti erozi půdy jsou protierozní opatření. Při aplikování ochranných opatření je třeba postupovat pragmaticky. Pokud je to možné, jako první by měla být zaváděna opatření organizačního charakteru a agrotechnická opatření. Jejich využití je jednodušší pro realizaci a zároveň jsou finančně méně náročná na provedení. Pokud to situace vyžaduje, následně je třeba přistoupit k technickým opatření, která jsou na provedení náročnější (Novotný a kol.,2017).

4.3.1. Organizační opatření

Základní opatření lze provést již při umístění pozemků. Je třeba aby byly situovány svojí delší stranou ve směru vrstevnic a aby jejich délka nepřesahovala přípustné maximum dané výpočtem Univerzální rovnice ztráty půdy.

Další organizační opatření spočívá ve správném výběru a umístění pěstovaných plodin. Vybrané plodiny, které jsou klasifikovány jako erozně nebezpečné, je třeba umístit na plochy, které se řadí mezi pozemky neohrožené nebo pouze mírně ohrožené. Součástí opatření je také zavádění ochranných travních porostů, které dobře slouží k zachytávání erodované zeminy (Novotný a kol., 2017).

Mimo jiné je využíváno také pásové pěstování plodin. Princip opatření se zakládá na střídání pásů plodin, které chrání půdu před erozí nedostatečně a

pásů, kde se pěstují naopak plodiny s protierozním účinkem. Tím je zajištěna poměrně účinná ochrana proti erozi. Šířka pásů je zvolena s ohledem na požadovaný protierozní účinek (Sklenářová, 2008).

4.3.2. Agrotechnická opatření

Agrotechnická opatření se týkají především upravování vlastností půdy pomocí techniky. Zvyšuje se tak např. její vsakovací schopnost a také její celková odolnost proti erozi. Jedním z konkrétních příkladů agrotechnických opatření je orba po vrstevnicích, při které je pomocí pluhů půda překlápěna proti svahům a tím je zvýšena její odolnost vůči erozi.

Možností pro tento typ opatření je velké množství. Mezi další účinná opatření patří například ochranné obdělávání, pásové zpracování půdy, hrázkování, plečkování a mnoho dalších (Novotný a kol., 2017).

Obrázek 6 - Vrstevnicové obdělávání (VÚMOP-Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd)

4.3.3. Technická opatření

Protierozní opatření technického charakteru většinou nastupují jako poslední možnost po využití organizačních a agrotechnických opatření. Často se tak používají jako jejich doplnění. Jsou mnohem náročnější z ekonomického i organizačního hlediska.

Základním principem těchto opatření je zejména účinné zachytávání smývané půdy a povrchového odtoku a následně jeho bezpečné odvádění. Pokud je to nutné, součástí jsou i terénní úpravy za účelem snížení sklonu pozemku (Novotný a kol., 2017).

Protierozní příkopy mohou plnit hned několik funkcí. Existují příkopy záchytné, které brání přítoku dalších vod na pozemek. Neméně využívané jsou příkopy sběrné, které jsou vytvářeny již v rámci pozemku, aby zkrátily délku povrchového odtoku, snížily tak míru ztráty půdy a odváděly vodu z pozemku. Zde na ně navazují příkopy svodné, které mají za úkol zajistit správný odvod zachycené vody do recipientu (Kadlec a kol., 2014).

Obrázek 7 - Protierozní záchytný příkop-obec Rašovice u Uhlířských Janovic (VÚMOP-Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd)

Dalším typem opatření jsou průlehy. Svou funkcí je velmi podobný příkopům. Hlavní rozdíl je v jejich tvaru. Průlehy jsou mělké, široké a zpevněné vegetací a zpravidla jsou uzpůsobeny tak, aby byly přejezdné a případně obdělávatelné. Rozlišujeme zde stejné typy jako u příkopů. Vznikat tak mohou průlehy záchytné, svodné a sběrné, které se dále dělí na vsakovací a odváděcí (Dostál, 2021).

Mezi další technické prvky patří polní cesty s protierozní funkcí, terasy, protierozní meze nebo protierozní nádrže.

Obrázek 8 - Protierozní průleh (Vláčilová,2016)

4.4. Eutrofizace

Eutrofizace neboli nadměrné obohacování živinami, je problém týkající se mokřadů, vodních nádrží, potoků a řek (Smith, 2009). Míra obohacování vod o živiny závisí především na dvou faktorech. Jedná se o samotný obsah fosforu v půdě a o již zmíněnou erozi půdy, která primárně ovlivňuje množství odneseného materiálu. Nicméně podle typu erozní události se také výrazně podepisuje na množství transportovaného fosforu. Fosfor se nejvíce váže na lehké a jemné částice půdy, které mají větší specifický povrch, než je tomu u částic s vyšší zrnitostí. Z tohoto důvodu větší eutrofizaci způsobují události, které vedou pouze k plošnému povrchovému odtoku. Transportuje se sice menší množství materiálu, ale do vodních toků se dostávají jemnější částice, s větším poměrem navázaného fosforu. Naproti tomu při rozsáhlejších erozních událostech, kdy dojde i k erozi rýhové, se transportuje výraznější množství materiálu, ale tento proces má menší dopady z hlediska eutrofizace (Krása a kol., 2013).

4.4.1. Opatření pro snížení eutrofizace

Ochranná opatření můžeme rozdělit na dva typy. Prvním typem jsou opatření, která omezí erozi na zemědělských pozemcích. Tato opatření jsou však již přiblížena v kapitole 4.3. Ochrana proti erozi. Druhým typem jsou opatření, která zabrání nebo alespoň omezí vstup fosforu do vodní sítě pomocí zachycení transportovaného sedimentu.

První možností jsou travní pásy podél vodních toků nebo vodních nádrží. Při dostatečné šířce pásy sníží rychlost odtoku do takové míry, aby došlo i k zachycení jemnějších částic. Minimální doporučená šířka travních pásů je 10 m. Při návrhu mohou posloužit modely WaTEM/SEDEM nebo Erosion3D, které zahrnují také výpočty transportních procesů a je tak možné s jejich pomocí efektivně navrhnout parametry pasů pro účinné plnění jejich funkce. Podobným

typem opatření jsou mokřadní pásy, které jsou vytvořeny na obou březích vodního toku. Jedná se o zamokřený pás, který dobře zachytává jemnozrnné částice a stejně tak i živiny, které jsou přiváděny povrchovým odtokem. Narozdíl od travních pásů, které je třeba pravidelně udržovat, mokřadní pásy nepotřebují péči a jsou ponechány vlastnímu vývoji (Krása a kol., 2013).

Retenční a sedimentační nádrže jsou v zásadě považovány současně za protierozní opatření. Rozlišujeme je na nádrže s trvalým nadržením a bez trvalého nadržení (Dostál, 2021). V těchto nádržích je většinou primárním cílem zachycení větší části sedimentů. Jak již bylo výše zmíněno, fosfor se váže nejvíce na jemnozrnné částice, a proto nádrže s primárně protierozní funkcí většinou nesplňují účel z hlediska snížení eutrofizace. Nejdůležitější tedy je, aby bylo zamezeno vniknutí těch nejmenších částic. Tyto nádrže tak musí být navrženy na delší dobu zdržení, aby při odtoku z nádrže voda neobsahovala ani jemnější částice, na kterých je navázáno nejvíce fosforu (Krása a kol., 2013).

Čištění odpadních vod rovněž může být možností, jak omezit účinky eutrofizace vod. Při průchodu čistírnou je několik stupňů čištění, které proběhnou. Mechanická a případně biologická část však nezajistí odstranění vysokého obsahu dusíku a fosforečnanů a je tak potřeba přistoupit buď k chemickému přečištění vod, anebo zapojení jinak nežádoucích živin do biomasy vyšších rostlin a řas (Kunze, 2017).

Eutrofizace může být rovněž omezena opatřeními přímo v nádržích, kdy jsou podporovány a urychlovány přirozené procesy v nádržích a je pozitivně ovlivněna samočistící funkce nádrže (Kukol, 2013).

5. Výpočet ztráty půdy vodní erozí

5.1. USLE

Jednou z nejběžnějších metod pro výpočet půdního smyvu je Univerzální rovnice ztráty půdy (USLE). Jedná se o poměrně komplexní typ výpočtu, jelikož je zde zahrnuto hned několik důležitých atributů, které mají na proces eroze půdy důležitý vliv.

Autory univerzální rovnice jsou W.H. Wischmeier a D.D. Smith. USLE je čistě empirický model, který byl v roce 1965 odvozen na základě tzv. jednotkových pozemků. Jedná se o pozemky, které byly zřizovány tak, aby měly jednotné parametry (délka 22,13m a sklon 9 %). Tyto pozemky byly sledovány a analyzovány z hlediska erozního smyvu a následně bylo možné stanovit závislost eroze půdy na šesti konkrétních faktorech. Z těchto faktorů byla následně sestavena Univerzální rovnice ztráty půdy (Wischmeier a Smith, 1978) ve tvaru:

$$G = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Rovnice 1 - Univerzální rovnice ztráty půdy

G – průměrná ztráta půdy (t/ha*rok)

R – faktor erozní účinnosti deště

K – faktor erodovatelnosti půdy

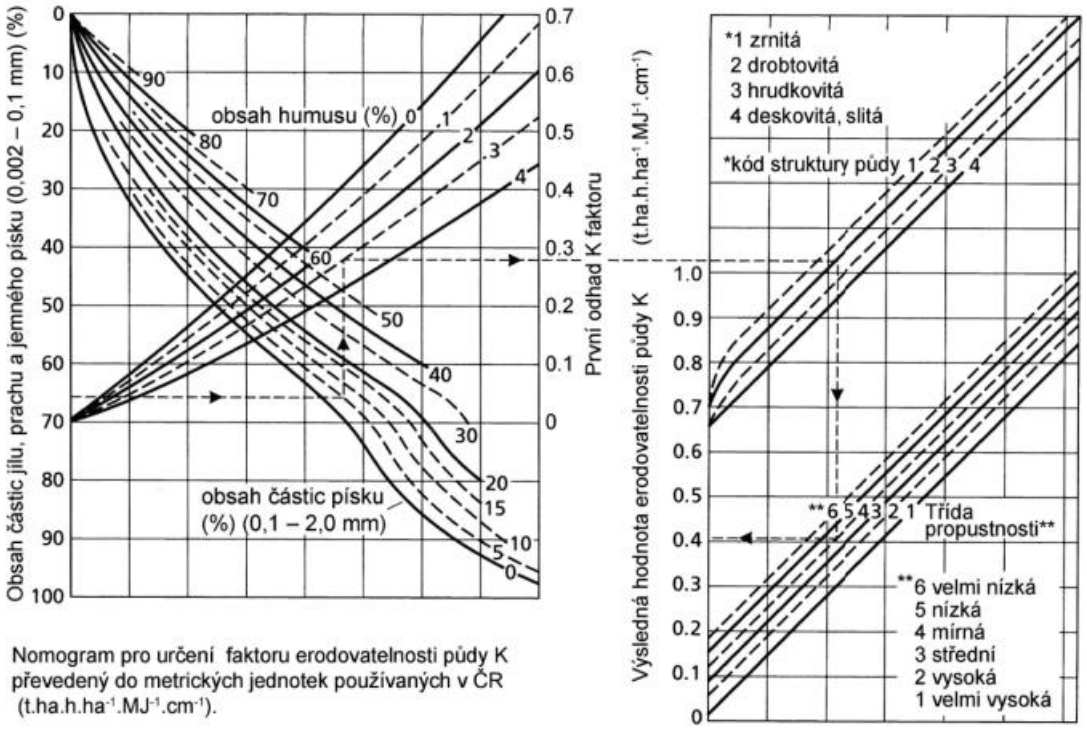
LS – topografický faktor (L – délka svahu, S – sklon svahu)

C – faktor ochranného vlivu vegetace

P – faktor účinnosti protierozních opatření

R faktor vyjadřuje účinek, který mají srážky na výši ztráty půdy. Stanovuje se z kinetické energie deště a intenzity srážek (Smrček, 2010). Určení konkrétních hodnot R faktoru se v průběhu roku různí. Nejvyšší hodnoty vykazuje v letních měsících, a naopak téměř nulové hodnoty v zimě. Pro výpočty se v současnosti používá hodnota 40 MJ / ha·cm / h dle platné metodiky (Janeček a kol.,2012).

K faktor představuje erodovatelnost půdy. Je podle něj možné zjistit, jak moc je půda náchylná k erozi a jak schopně odolává vlivu erozních činitelů. Určení K faktoru je možné provést několika způsoby. Hodnota může být určena orientačně pomocí map bonitovaných půdně ekologických jednotek (BPEJ), následného zjištění kódu hlavní půdní jednotky (HPJ) a poté určení K faktoru pomocí tabulky na Obrázku 13. Dalšími možnostmi stanovení K faktoru je výpočet ze vzorce nebo určení hodnoty z nomogramu (Janeček a kol., 2012).



Obrázek 9 - nomogram pro určení K faktoru (Janeček a kol., 2012)

Faktory L a S jsou zpravidla společně kombinovány do LS faktoru. Jedná se o tzv. topografický faktor. Vyjadřuje vliv délky a sklonu svahu na erozi půdy. V samé podstatě jde o poměr ztráty půdy na řešeném pozemku ku ztrátě půdy na jednotkovém pozemku s danými atributy (délka 22,13m a sklon 9 %) (Wischmeier a Smith, 1978). Hodnoty LS faktoru lze zjistit také pomocí upravené rovnice pro RUSLE (McCool, 1989) nebo stejně jako u K faktoru odečtením hodnot z nomogramu (Holý, 1994).

C faktor představuje ochranný účinek vegetačního krytu. Vznik a průběh povrchového odtoku, následnou erozi, a tudíž i hodnoty C faktoru výrazně ovlivňuje právě druh a stav vegetačního krytu v době výskytu příčinného deště nebo při využití agrotechniky. Dále hodnotu ovlivňuje právě typ použité agrotechniky, druhy pěstovaných plodin a rovněž záleží na současné vývojové fázi, ve které se nachází rostliny (Mistr a kol., 2016).

Hodnoty C faktoru tak vyjadřují poměr smyvu půdy na skutečném pozemku, na kterém jsou pěstovány plodiny, ke smyvu půdy na pozemku s kypřeným černým úhorem. Ostatní podmínky jsou zachovány stejně (Dostál, 2021).

P faktor vyjadřuje vliv protierozních opatření. V případě, že se opatření nevyskytují P faktor má hodnotu 1. Při aplikování protierozní ochrany se hodnota bude snižovat.

Výsledná průměrná ztráta půdy G se udává v jednotkách t/ha*rok. Slouží především jako ukazatel erozní ohroženosti konkrétních pozemků. Díky zjištěným hodnotám, je možné určit, které pozemky potřebují ochranná protierozní opatření a které naopak nejsou erozně ohrožené.

Univerzální rovnici ztráty půdy je třeba zmínit především proto, že z ní a z jejich modifikací čerpá i samotný model WaTEM/SEDEM, který je hlavním předmětem této práce.

6. Model WaTEM/SEDEM

Model je kombinací dvou dílčích modelů WaTEM (Water and Tillage Erosion Model) a SEDEM (Sediment Delivery Model). Vznikl na Katolické univerzitě v Leuvenu v Belgii. Celý model byl vyvinut na zdejší katedře fyzické a regionální geografie a je volně dostupný. V současnosti je k dispozici verze 2.1.0 (Van Oost et al., 2000), (Van Rompaey et al., 2001), (Verstraeten et al., 2002).

Tento empirický model vznikl především za účelem analýzy vlivu zemědělství na krajinný ráz, a také efektivního navrhování a následného posuzování protierozních opatření. Používá se při určování ztráty půdy v konkrétních oblastech a díky kombinaci dvou modelů také sleduje transport sedimentů vodními toky a následně i míru usazování erodovaných půdních částic nejen ve vodních nádržích (Klímová, 2022). Obecně tak model napomáhá k celkovému určení vlivu erozních událostí na krajinu i v delším časovém horizontu.

Model je založený právě na empirické univerzální rovnici ztráty půdy (USLE) a rovněž využívá její modifikaci RUSLE (Renard et al., 1997). Touto cestou se tak vypočítá průměrná roční ztráta půdy na území. Rozdílnost modelu spočívá v tom, že klade důraz spíše na prostorovou stránku než na časovou variabilitu erozních faktorů.

Následný pohyb částic je dán transportní kapacitou, která se vztahuje k potenciálu rýhové eroze v konkrétním bodě v území (Krása, 2004). Transportní kapacita je určena na základě vztahu (Van Rompaey et al., 2001):

$$\mathrm{TC} = \mathrm{kTc} \cdot \mathrm{EPR}$$

Rovnice 2 - Transportní kapacita

TC – transportní kapacita (kg.m^{-1}.rok^{-1})

kTc – koeficient transportní kapacity (m)

EPR – potenciál náchylnosti půdy k rýhové erozi (kg.m^{-2}.rok^{-1})

Transportní kapacita tak rozhoduje, co se stane s erodovanou půdou. Pokud je v některém bodě kapacita příliš nízká, dojde v tomto místě k sedimentaci materiálu nebo jeho části a nebude se dále transportovat. V místech terénu, kde je dostatečně vysoká transportní kapacita, se bude materiál dále transportovat stanovenými odtokovými dráhami, dokud se nedostane k vodnímu toku.

Poté následuje transport říční sítí. Ten je určen pomocí jednoho z důležitých vstupů. Jedná se o tabulku vodních toků, která obsahuje identifikační čísla jednotlivých úseků, délku úseků a jejich počáteční a koncové uzly (Krása, 2004). Tím určuje, jak transportovaný sediment postupuje říční sítí a k jednotlivým vodním úsekům přiřazuje úseky, které na ně bezprostředně navazují. Získáváme tak přehled o pohybu částic přes celé povodí, až k uzávěrovému profilu a rovněž je tímto způsobem do výpočtu přidána informace o množství sedimentu, které vystupuje z každého předchozího úseku (Krása, 2010).

V modelu není započítáno usazování částic ve vodních tocích a není zohledněno ani případné vymílání břehů vodním proudem. Je však možné stanovit množství sedimentu, které zachytí vodní nádrže. Tuto informaci udává hodnota tzv. poměru zachycení, který může být přiřazen pro každou jednotlivou nádrž na říční síti. Poměr zachycení udává v procentech množství materiálu, které neprojde přes vodní nádrž dále do říční sítě. Pro určení poměrů zachycení byla stanovena metoda dle Bruneho (Brune, 1953), která byla později doplněna (Dendy a Champion, 1978).

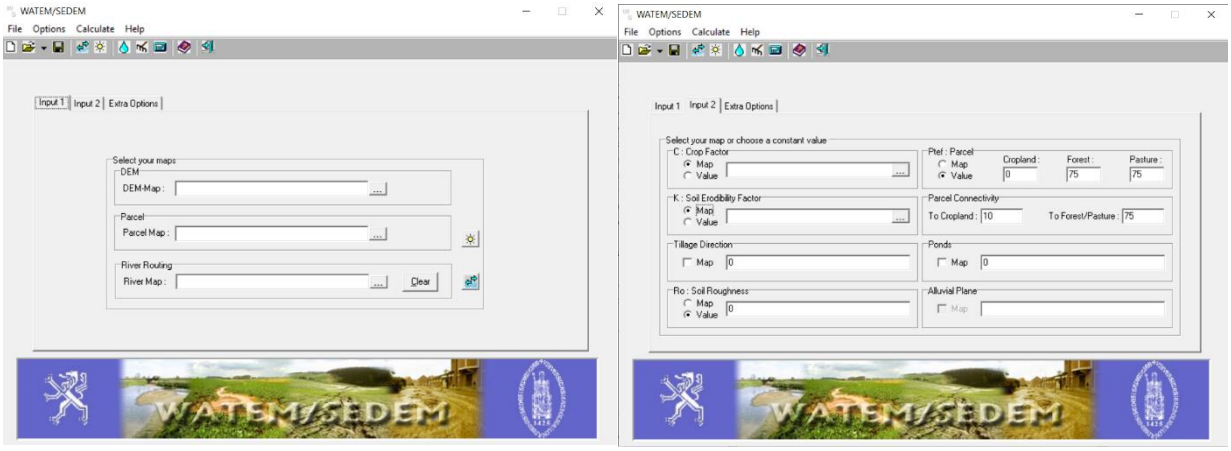
6.1. Prostředí modelu

Model je bezplatný a volně dostupný. Před první aplikací modelu je třeba správné uživatelské nastavení. V mém konkrétním případě bylo třeba nastavit v systému jako výchozí desetinný oddělovač tečku. Následně bylo třeba umístit do správně složky v Program Files soubor watemsedem.ini, aby model při spuštění pracoval správně.

Práce s modelem je velmi intuitivní a celé prostředí modelu je přehledně uspořádáno. Můžeme zde najít tři hlavní záložky.

V první záložce Input 1 najdeme tři okna pro vstupy do modelu. Konkrétně se jedná o vstupní vrstvy DEM (digitální modelu terénu), Parcel (vrstva využití území), River (vrstvá říční sítě). K vrstvě řek je třeba přiložit tabulku s návazností jednotlivých úseků vodních toků.

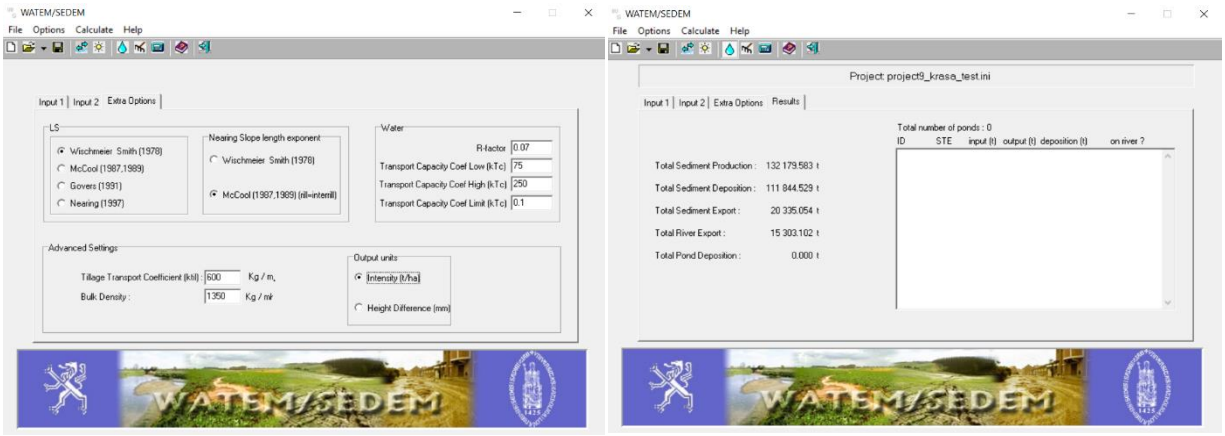
V záložce Input 2 je možné zadat např mapové vstupy s hodnotami C faktoru nebo K faktoru. Druhou možností u těchto vstupů je vložení konkrétní hodnoty, která bude pro výpočet konstantně uvažována pro celé území. Při vložení vrstvy s vodními nádržemi (Ponds) je možné zahrnout do výpočtu jejich stupeň zachycení sedimentu, výpočet však je možné provést i bez tohoto vstupu.



Obrázek 10 - Prostředí WaTEM/SEDEM (Input 1, Input 2)

Ve třetí záložce Extra Options je především třeba zvolit konkrétní hodnotu R faktoru pro výpočet a rovněž typ rovnice, podle které proběhne výpočet LS faktoru. Poté je již možné spustit výpočet.

Po úspěšném proběhnutí výpočtu se objeví čtvrtá záložka Results, na které jsou uvedeny výsledky výpočtu. Jedná se o celkovou ztrátu půdy, množství sedimentu, které se uloží z důvodu nízké transportní kapacity, a také množství, které se dále dostane do vodních toků. Můžeme zde vyčíst také kolik sedimentu projde dál přes uzávěrový profil a v případě výpočtu s nádržemi zjistíme také množství materiálů, zachyceného v nádržích.



Obrázek 11 - Prostředí WaTEM/SEDEM (Extra Options, Results)

6.2. Vstupy do modelu

Jako téměř veškeré vstupy byla využita data z diplomové práce (Klímová, 2022), která byla vypracována pro stejnou část povodí řeky Výrovky. Pro výpočet je důležité, aby všechny vstupy do modelu byly ve stejném rozlišení (v tomto případě 10x10 metrů) a pokrývaly stejnou oblast pro výpočet. Model pracuje se vstupy, které musí být převedeny do formátu Idrisi.

Správně připravené vrstvy v ArcGIS Pro ve formě shapefile bylo třeba pomocí několika kroků převést do správného formátu. Pro převod na rastr byl nejdříve použit nástroj „Polygon to Raster“. Následně bylo třeba rastr převést do formátu ASCII pomocí nástroje „Raster to ASCII“. V tuto chvíli již bylo možné pomocí programu LS Converter převést vstupy do formátu Idrisi, se kterým model WaTEM/SEDEM pracuje.

Hlavními vstupy do modelu jsou:

1) **Digitální model terénu:** Tento vstup poskytuje základní informace o morfologických poměrech terénu. Model terénu slouží k výpočtu topografického faktoru (LS faktor). Tímto získáváme přehled o celkovém charakteru reliéfu a také informace o průběhu povrchového odtoku v území. (ČÚZK)
2) **Mapa využití území:** Vzniká zkombinováním dat ZABAGED a LPIS. Základní báze geografických dat neboli ZABAGED (ČÚZK), poskytuje komplexní a velmi podrobné informace o využití území ČR. Tyto informace jsou následně doplněny o vrstvu LPIS (Ministerstvo zemědělství, 2009-2022), která upřesňuje informace především z hlediska využití zemědělské půdy. Tímto získáme aktuální analýzu využití území, která je pro studii erozních procesů nezbytná (Klímová, 2022).
3) **Mapa říční sítě:** Podkladem jsou data ZABAGED (ČÚZK). Jedná se o jeden z nejpodstatnějších vstupů pro výpočet v modelu WaTEM/SEDEM. Zde je

třeba aby na sebe jednotlivé úseky správně navazovaly a nedocházelo k nežádoucímu větvení sítě. K mapě sítě je třeba přiřadit také tabulku s číslovanými úseky, ze které získáme informaci, o směrování a návaznosti nejen jednotlivých úseků, ale také jednotlivých uzlů (Bauer, 2018).

4) **C faktor:** Informace o stavu vegetačního krytu jsou dalším faktorem, který výrazně ovlivňuje pochody spojené s erozí a transportem sedimentu. Pro konkrétní typy využití zemědělské půdy byly zde přiřazeny hodnoty C faktoru a byla tak vytvořena vstupní rastrová vrstva, která byla následně převedena do správného formátu, který je vhodný pro výpočet. Byly tak použity vstupní hodnoty z diplomové práce Ing. Hany Klímové z roku 2022. Konkrétní hodnoty pro ornou půdu byly převzaty z projektu QK1920224 (Klímová, 2022).

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

Obrázek 12 - Vstupní hodnoty C faktoru (Klímová, 2022)

5) **K faktor:** Pro určení erodovatelnosti půdy byly využity bonitované půdně ekologické jednotky – BPEJ (VÚMOP v.v.i.). Druhá část kódu BPEJ určuje rozřazení konkrétních půd do hlavních půdních jednotek (HPJ). Ke každému kódu HPJ je přiřazena hodnota K faktoru podle metodiky (Janeček a kol., 2012). Po vytvoření vrstvy K faktoru bylo třeba interpolovat místa, kde pro konkrétní HPJ nebyla z důvodu nedostatku dat přiřazena hodnota K faktoru.

HPJ	K - faktor	HPJ	K – faktor
01	0,41	40	0,24
02	0,46	41	0,33
03	0,35	42	0,56
04	0,16	43	0,58
05	0,28	44	0,56
06	0,32	45	0,54
07	0,26	46	0,47
08	0,49	47	0,43
09	0,60	48	0,41
10	0,53	49	0,35
11	0,52	50	0,33
12	0,50	51	0,26
13	0,54	52	0,37
14	0,59	53	0,38
15	0,51	54	0,40
16	0,51	55	0,25
17	0,40	56	0,40
18	0,24	57	0,45
19	0,33	58	0,42
20	0,28	59	0,35
21	0,15	60	0,31
22	0,24	61	0,32
23	0,25	62	0,35
24	0,38	63	0,31
25	0,45	64	0,40
26	0,41	65	nedostatek dat
27	0,34	66	nedostatek dat
28	0,29	67	0,44
29	0,32	68	0,49
30	0,23	69	nedostatek dat
31	0,16	70	0,41
32	0,19	71	0,47
33	0,31	72	0,48
34	0,26	73	0,48
35	0,36	74	nedostatek dat
36	0,26	75	nedostatek dat
37	0,16	76	nedostatek dat
38	0,31	77	nedostatek dat
39	nedostatek dat	78	nedostatek dat

Obrázek 13 - Hodnoty K faktoru (Janeček a kol., 2012)

6) **Parcel trap efficiency (Ptef):** Jeden ze vstupů, který je zadáván pouze číselně, je však možné ho vložit i ve formě mapy. V prostředí modelu ho nalezneme na druhé záložce Input 2. Jedná se o koeficient, který určuje, jaké množství sedimentu zachytí konkrétní typy pozemků. Můžeme zde zadat vstupy pro ornou půdu, lesní plochy a pastviny neboli trvalé travní porosty. Pro výpočet zde byly použity hodnoty: Orná půda – 0, Lesní plochy – 75, Trvalé travní porosty – 75 (Krása, 2010).

7) **Parcel connectivity:** U tohoto vstupu je jedinou možností ruční vložení čísel. Značí poměr zachycení sedimentů v místech, kde odtok přechází hranice pozemků a za hranicí je již jiný typ využití území. Pro výpočet jsou zde použity hodnoty: Orná půda – 40, Lesní plochy/trvalé travní porosty – 75 (Krása, 2010).
8) **R faktor:** Hodnoty R faktoru byly převzaty z aktuální regionalizované vrstvy, která byla vyhodnocována za dlouhé období 30 let a vytvořilo jí Ministerstvo životního prostředí v roce 2015. Není tak využito průměrné hodnoty 40 MJ/ha·cm/h podle platné metodiky (Janeček a kol., 2012).
9) **Vodní nádrže:** Při původním výpočtu byly vodní nádrže vloženy jako plošná vrstva bez uvažování zachycení sedimentu. Tudíž nádrže byly při výpočtu v práci Hany Klímové uvažovány v podstatě jako další úsek toku, do kterého vstupuje proudění z předchozího úseku a vystupuje z něj hodnota, která nebere v úvahu poměr zachycení nádrží. Jedním z úkolů této práce tak bylo určit poměry zachycení jednotlivých nádrží a zahrnout je do modelu. Dojde tak ke zlepšení přesnosti výpočtu a většímu přiblížení k reálnému stavu.

6.3. Výstupy modelu

Výstupem z modelu jsou textové soubory s číselnými hodnotami konkrétních výsledků z hlediska množství sedimentu, ale i rastrové výstupy, na kterých je možné výsledky vizuálně zobrazit (Bauer, 2018).

Z výsledných hodnot můžeme vyčíst:

a) Celkové množství produkce sedimentu v řešeném povodí. Rovná se součtu čisté ztráty půdy pro celé území (K.U. Leuven, 2006).
b) Celková depozice materiálu před vstupem do vodních toků – Jedná se o hodnotu, o které výrazně rozhoduje transportní kapacita materiálu. Vliv má snížení odtokové rychlosti z důvodu změny sklonu nebo překážky v terénu (Winterová, 2021).
c) Množství sedimentu, které vstupuje do vodních toků – Jedná se o hodnotu produkce sedimentu, od které je odečtena celková depozice. V případě zahrnutí vodních nádrží do výpočtu je odečteno i množství sedimentu v nádržích (K.U. Leuven, 2006).
d) Množství sedimentu, které se zachytí ve vodních nádržích – Zde je rozhodujícím faktorem poměr zachycení jednotlivých nádrží. Při výpočtu bez vložení hodnot poměru zachycení bude hodnota sedimentu zachyceného v nádržích nulová. V případě zahrnutí poměru zachycení do výpočtu získáme množství sedimentu, které se usazuje a vodní nádrže ho nepropustí dál do povodí.
e) Množství sedimentu, které opouští řešenou oblast uzávěrovým profilem
f) Tabulka jednotlivých úseků vodních toků – Z tohoto výstupu můžeme vyčíst data pro každý dílčí úsek toku v povodí. Udává nám množství sedimentu, které přichází z předchozího úseku, dále sumu materiálu, která se dostane do vodního toku na daném úseku, a nakonec výslednou hodnotu sedimentu, která konkrétní úsek opouští a dostává se do navazujícího úseku.

Pro ukázku rastrových výstupů byla použita a zpracována data z výpočtu v modelu WaTEM/SEDEM z diplomové práce Ing. Hany Klímové na téma Kvantifikace zdrojů erozního sedimentu v povodí Výrovky. Díky těmto datovým výstupům je možné hodnoty upravit v ArcGIS Pro a následně je správně vizualizovat. Výsledné vrstvy nám pomáhají názorněji si představit průběhy sedimentů povodím.

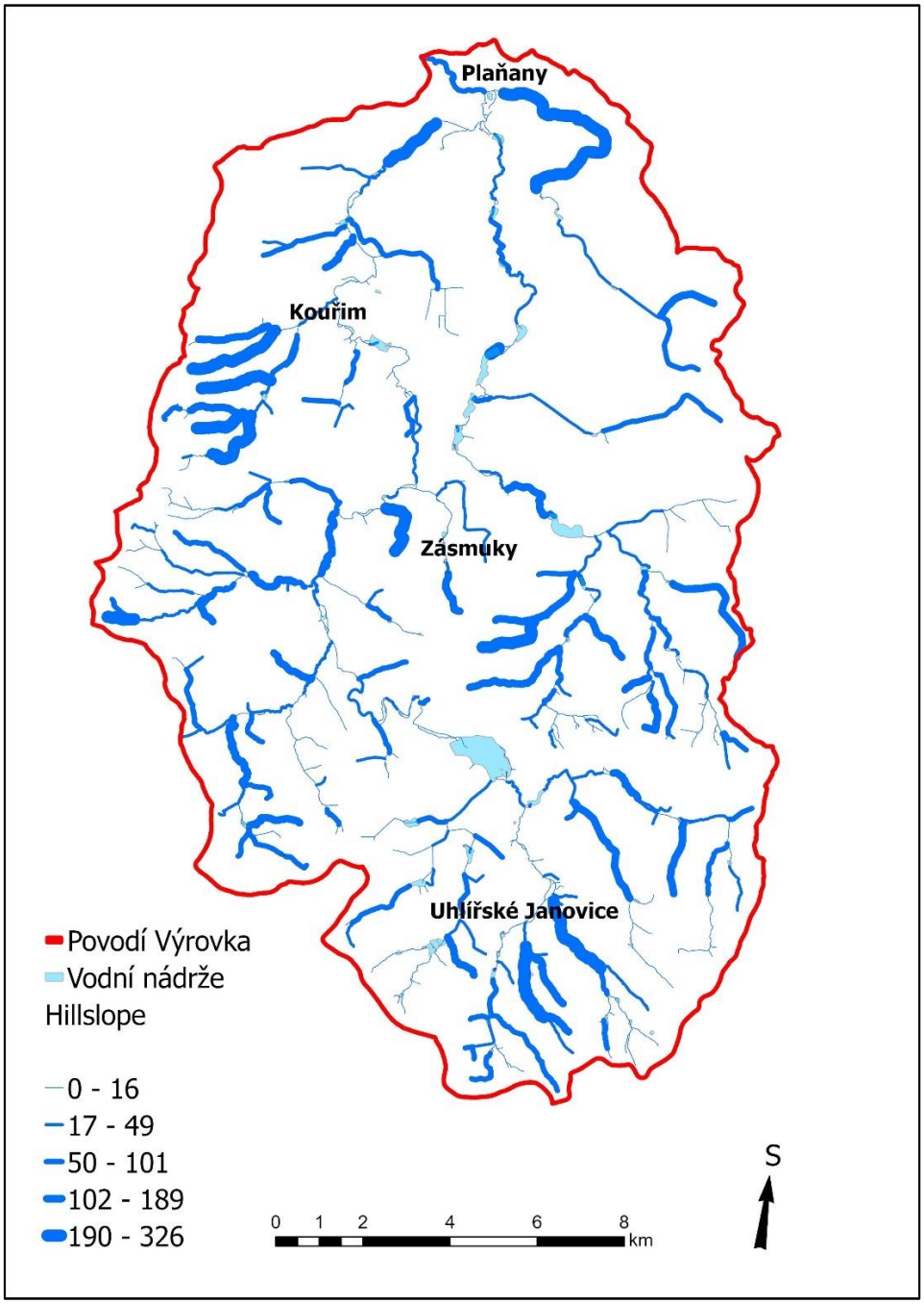
Zpracování těchto konkrétních dat je vhodné i pro pozdější srovnání s novými výpočty, které byly provedeny na stejném území. V nových výpočtech do modelu totiž vstupují vodní nádrže i s uvažovaným stupněm zachycení. Můžeme tak vidět, jak se toto doplnění výpočtů projeví ve výsledném množství sedimentu.

a) Netto water erosion – Podle výstupní vrstvy Netto water erosion můžeme zjistit chování sedimentu na konkrétních pozemcích. Části s kladnými hodnotami, které jsou zbarveny do tmavě modra, znázorňují místa, kde dochází k depozici materiálu, a tudíž k jeho ukládání.

V místech se zápornými hodnotami, která jsou zbarvena do hněda, dochází k erozi půdy a materiál se tak dále transportuje povodím. Vrstvu Netto water erosion můžeme vidět na Obrázku 14.

Obrázek 14 - Výstupní data: Netto water erosion (použitá data: Klímová, 2022, vlastní zpracování)

b) Hillslope – Pomocí tohoto výstupu je možné zjistit, do kterých vodních toků se z polí dostává největší množství sedimentu. Podle zvolené symbologie můžeme jasně určit, že úseky vodních toků, které mají největší tloušťku, jsou nejzatíženější vstupem sedimentu, který pochází z povrchového odtoku. Zároveň je možné určit, které úseky jsou zatížené pouze minimálním množstvím sedimentu.



Obrázek 15 - Výstupní data: Hillslope
(použitá data: Klímová, 2022, vlastní zpracování)

c) Sediment input – Hodnoty ve vrstvě sediment input značí pouze množství sedimentu, které do dané části přichází z předchozího úseku toku. Není zde tak započítáno množství sedimentu, které v průběhu daného úseku přiteče z polí. Hodnoty množství sedimentu v toku se postupně sčítají a nejvyšší hodnota je tak na konci povodí v uzávěrovém profilu Plaňany.
d) Sediment output – Hodnoty v tomto výstupu se velmi podobají vrstvě Sediment input. Rozdílem však je obohacení právě o množství sedimentu, které do úseku přiteče z okolních polí. Výsledná hodnota je tedy celkové množství, které vstupuje z daného úseku toku do úseku navazujícího. Názorně můžeme tento výstup vidět na Obrázku 22.

S postupem povodím stále narůstá množství sedimentu. Takový průběh však neodpovídá realitě. Pro správné určení transportu splavenin říční sítí je třeba do výpočtů implementovat vliv vodních nádrží. Výpočet pak ovlivňuje již několikrát zmíněný poměr zachycení nádrží. Když jeho vliv do výpočtu nevstupuje, znamená to, že na výstupu z nádrží registrujeme minimálně stejně velké hodnoty jako na jejich vstupu. Ve skutečnosti však některé nádrže zachytí značné množství sedimentu. V práci Ing. Hany Klímové nebylo cílem zapojení nádrží do výpočtů. Proto byl v této práci pro doplnění výsledků proveden nový výpočet, již se zahrnutím zanášení vodních nádrží.

7. Výpočet

Vstupem do nového výpočtu byla stejná data, která byla použita v diplomové práci Hany Klímové při řešení problematiky erozních sedimentů na povodí Výrovky. Jediným rozdílem oproti předchozímu výpočtu byla nově vytvořená vstupní data s určením vlivu vodních nádrží na transport sedimentu.

Pro určení konkrétních hodnot TE byl použit výpočet, který byl proveden na základě metodiky Hodnocení ohroženosti vodních nádrží sedimentem a eutrofizací podmíněnou erozí zemědělské půdy (Krása a kol., 2013).

Výpočet spočívá ve znalosti daných údajů pro každou vodní nádrž v území. Jedná se především o hodnoty průměrného dlouhodobého ročního průtoku (m^3/rok) a celkový zásobní objem nádrže (m^3). Tyto dvě hodnoty jsou potřeba k vypočtení doby zdržení sedimentu v nádržích, která je hlavní veličinou pro následný výpočet poměru zachycení.

Pro hodnoty poměru zachycení sedimentu ve vodních nádržích tak platí výpočet z analytického vyjádření střední Bruneho křivky, které vytvořil v roce 1978 Dendy (Krása, 2010).

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

Rovnice 3 - Poměr zachycení

TE – poměr zachycení (%)

C – zásobní objem nádrže (m^3)

I – roční průměrný dlouhodobý průtok (m^3/rok)

Hodnoty dlouhodobého průměrného průtoku je možné dohledat pouze pro malé množství vodních nádrží v ČR, z toho důvodu byla vytvořena metodika stanovení dlouhodobého průměrného průtoku. Byla vyvinuta pomocí regresní analýzy na základě 84 vybraných povodí s rozlohou do 170km^2. Pro tato povodí

byly k dispozici hodnoty průměrných dlouhodobých ročních průtoků, které byly k analýze využity.

Výpočet je založen na stanovení hodnoty specifického odtoku pro dané povodí podle vzorce (Krása a kol., 2013):

$$q_a = 80{,}009 \cdot A^{-0{,}0068} \cdot P^{01226} \cdot T^{-0{,}1582} - 118{,}36$$

Rovnice 4 - Specifický odtok z povodí

q_a – specifický odtok z povodí (l.s^{-1}.km^{-2})

A – plocha povodí (km^2)

P – průměrný roční úhrn srážek (mm)

T – průměrná roční teplota (°C)

Plocha řešeného povodí je 265,04 km^2. Hodnoty průměrných ročních teplot a úhrnů srážek byly vyhledány na webu Českého hydrometeorologického ústavu v tabulkách pro Prahu a Středočeský kraj za rok 2021. Do výpočtu tak byly použity hodnoty: průměrný roční úhrn srážek P = 627 mm, průměrná roční teplota T = 8,7 °C. Po dosazení do Rovnice 4 vyšel specifický odtok 2,14 l. s^{-1}. km^{-2}.Pro získání potřebné hodnoty dlouhodobého průměrného průtoku bylo třeba dosadit vypočtený specifický odtok společně s plochou povodí do vzorce (Krása a kol., 2013).

$$Q_a = 10^{-3} \cdot q_a \cdot A$$

Rovnice 5 - Průměrný dlouhodobý roční průtok

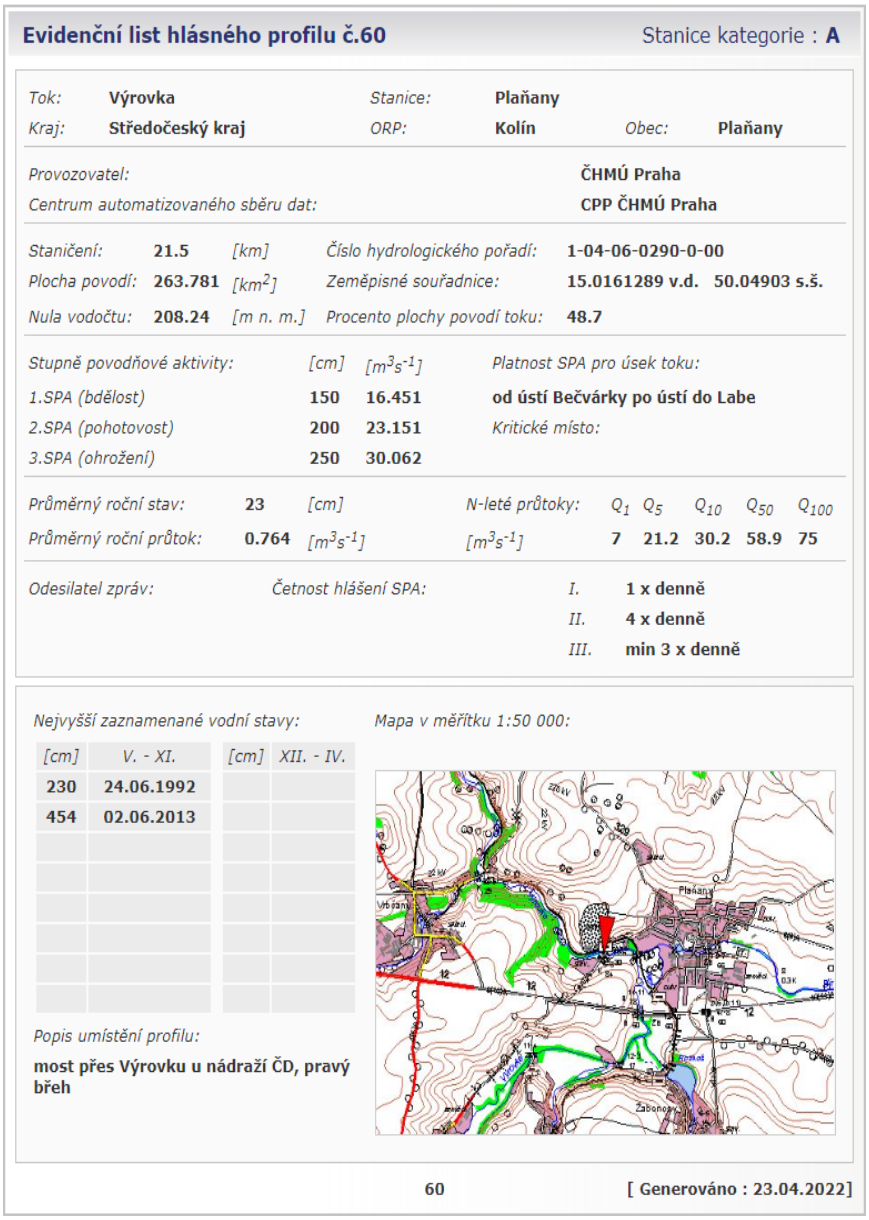
$Q\,a$ – průměrný dlouhodobý roční průtok (m^3/s)

q_a – specifický odtok z povodí (l.s^{-1}.km^{-2})

A - plocha povodí (km^2)

Po dosazení do Rovnice 5 byla získána hodnota průměrného průtoku v povodí Q_a= 0,5662 m^3/s.

Další potenciální hodnota dlouhodobého průměrného průtoku pro výpočet byla zjištěna opět z dat Českého hydrometeorologického ústavu. Uzávěrový profil řešeného území je v obci Plaňany, kde se také nachází hlásný profil kategorie A. Bylo tak možné dohledat volně dostupný evidenční list hlásného profilu v Plaňanech (Obrázek 15). Zde můžeme vidět kompletní popis profilu s údaji o vodních stavech, stupních povodňové aktivity, umístění profilu nebo také o hledaném průměrném ročním průtoku. Druhým zjištěným ročním průtokem je tedy hodnota 0,764 m^3/s (ČHMÚ).



Evidenční list hlásného profilu č.60 Stanice kategorie : **A**

Tok:	Výrovka	Stanice:	Plaňany		
Kraj:	Středočeský kraj	ORP:	Kolín	Obec:	Plaňany

Provozovatel: ČHMÚ Praha
Centrum automatizovaného sběru dat: CPP ČHMÚ Praha

Staničení:	21.5	[km]	Číslo hydrologického pořadí:	1-04-06-0290-0-00	
Plocha povodí:	263.781	[km^2]	Zeměpisné souřadnice:	15.0161289 v.d.	50.04903 s.š.
Nula vodočtu:	208.24	[m n. m.]	Procento plochy povodí toku:	48.7	

Stupně povodňové aktivity:	[cm]	[m^3s^{-1}]	Platnost SPA pro úsek toku:
1.SPA (bdělost)	150	16.451	od ústí Bečvárky po ústí do Labe
2.SPA (pohotovost)	200	23.151	Kritické místo:
3.SPA (ohrožení)	250	30.062	

Průměrný roční stav:	23	[cm]	N-leté průtoky:	Q_1	Q_5	Q_{10}	Q_{50}	Q_{100}
Průměrný roční průtok:	0.764	[m^3s^{-1}]	[m^3s^{-1}]	7	21.2	30.2	58.9	75

Odesilatel zpráv: Četnost hlášení SPA:
I. 1 x denně
II. 4 x denně
III. min 3 x denně

Nejvyšší zaznamenané vodní stavy:

[cm]	V. - XI.	[cm]	XII. - IV.
230	24.06.1992		
454	02.06.2013		

Popis umístění profilu:
most přes Výrovku u nádraží ČD, pravý břeh

Mapa v měřítku 1:50 000:

60 [Generováno : 23.04.2022]

Obrázek 16 - Evidenční list hlásného profilu č.60 (ČHMÚ, Hlásná a předpovědní povodňová služba)

Poslední neznámou pro výpočet poměru zachycení byly jednotlivé zásobní objemy vodních nádrží. Pro zjištění hodnot objemů bylo nejdříve využito služeb HEIS VÚV TGM (Hydroekologický informační systém, Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.Masaryka). Hlavním podkladem byly mapové listy Základní vodohospodářské mapy v měřítku 1:50000. Těchto 211 mapových listů pokrývá celé území České republiky a nabízí informace o vodních tocích, hydrologickém členění povodí, objektech na vodní síti a mnoho dalších údajích.

Pro bližší průzkum řešeného území byly staženy čtyři mapové listy (13-14 Nymburk, 13-31 Říčany, 13-32 Kolín, 13-34 Zruč nad Sázavou). Při průzkumu bylo i za pomoci seznamu mapových značek zjištěno, že konkrétní hodnoty objemů jsou uvedeny pouze u některých nádrží v povodí. Z vodohospodářských map byly odečteny objemy celkem pro 21 vodních ploch v povodí.

Celkem pro 2 nádrže byla zjištěna hloubka u hráze a pomocí ní byl proveden zjednodušený výpočet objemu. Za pomoci vrstvy vodních toků, která byla oříznutá vrstvou vodních ploch, byly v prostředí ArcGIS Pro zjištěny délky vodních nádrží. Poté již bylo násobením s hloubkou u hráze možné vypočítat přibližný objem dané nádrže.

Pro zbylých 47 menších vodních nádrží nebyly v mapových podkladech uvedeny hodnoty. Bylo tak postupováno zjednodušeným odvozením od celkových ploch nádrží s předpokladem průměrné hloubky 1 metr u každé nádrže. Tímto způsobem byly dopočteny zbývající objemy vodních nádrží.

Posledním důležitým krokem pro výpočet poměru zachycení bylo zjištění plochy povodí pro každou jednotlivou nádrž. Tento krok musel být opět proveden v prostředí ArcGIS Pro. Cílem bylo pomocí dostupných nástrojů určit pro všechny nádrže dílčí část z celého povodí, která je přispívající plochou pro danou nádrž. Obecně jde tedy o území, ze kterého se voda postupně dostává do uzávěrového profilu konkrétní nádrže.

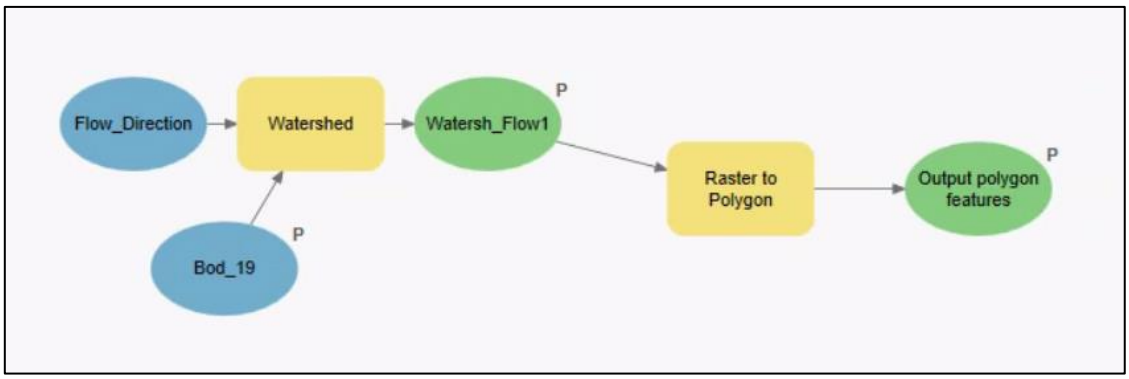
Na začátku postupu byl využit rastr digitálního modelu terénu pro řešené území. Důležité bylo, aby model byl nástrojem „Fill“ zbaven menších nedokonalostí v datech (Esri). Poté byly z modelu terénu vytvořeny další dva potřebné rastry pomocí dvou nástrojů. Prvním z nich je „Flow Direction“, díky kterému zjistíme charakter a vlastnosti povrchového odtoku. Druhým nástrojem je „Flow Accumulation“, který slouží pro vytvoření odtokové sítě. Pro každý pixel vzniklého rastru je ve výsledku vyjádřen počet předchozích přispívajících pixelů (Esri).

Pro samotné zjištění ploch dílčích povodí pro nádrže byl použit nástroj „Watershed“, který determinuje celou přispívající odtokovou oblast nad konkrétním bodem. Pro spuštění nástroje bylo třeba vytvořit sadu nových vrstev, které obsahovaly body uzávěrových profilů pro každou nádrž. Tyto body byly vytvořeny ručně s podkladem rastru Flow Accumulation, který po správné úpravě symbologie podává informace o odtokové síti. Díky tomu mohl být každý z bodů umístěn přesně do dráhy odtoku.

Všechny vytvořené body následně již mohly být vstupem pro nástroj „Watershed“. Druhým potřebným vstupem pro výpočet byl rastr Flow Direction. Výstupem je rastrová vrstva, která určuje oblast povodí pro jednotlivé nádrže. Hlavním cílem bylo získání ploch povodí v km^2, proto byly výstupní rastry převedeny na polygony a následně byla změřena jejich plocha, která byla zanesena do tabulky k příslušné vodní nádrži.

Vzhledem k většímu počtu nádrží byly pro mírné zjednodušení v ArcGIS Pro využity možnosti nástroje „ModelBuilder“, který často bývá využit i pro mnohem složitější sérii výpočtů. Principem nástroje je sestavení modelu posloupnosti jednotlivých úkonů pro výpočet. Pro spuštění modelu následně stačí nastavit vstupní a výstupní parametry a jedná se tak o výrazné zjednodušení a zrychlení procesu výpočtů.

Byl tak vytvořen menší model, do kterého stačilo postupně zadávat pouze vytvořené body a po průběhu výpočtu byly přímo distribuovány výsledné polygony ploch povodí.



Obrázek 17 – výpočet ploch povodí pomocí nástroje Watershed (ArcGIS Pro, ModelBuilder)

Hodnoty ploch dílčích povodí se lišily v závislosti na poloze nádrží v rámci řešeného území. Povodí pro nádrže, které se nacházejí v dolních částech toku, vykazovala menší hodnoty přispívajících ploch. S postupem do horních částí toku se povodí nádrží přirozeně zvětšují. Největší plochu povodí 128,5 km^2 má jezero Strašík.

Poté již bylo možné přistoupit k samotnému výpočtu hodnot poměrů zachycení. Jelikož hodnota dlouhodobého ročního průtoku Q_a= 0,5662 m^3/s byla vypočtena pro celé povodí plochy 265,04km^2 (Klímová, 2022), bylo možné jednoduchou trojčlenkou přepočítat tuto hodnotu pro každé menší povodí konkrétních nádrží. Tímto výpočtem a následným převedením na jednotky m^3/rok byly získány hodnoty průtoků, které byly společně s objemy nádrží vloženy do vzorce pro výpočet poměru zachycení (Rovnice 3).

Druhý vypočet byl proveden se stejnými údaji o nádržích. Jediným rozdílem byl dlouhodobý průměrný roční průtok. Zde byla uvažována hodnota převzatá z evidenčního listu hlásného profilu v Plaňanech (ČHMÚ). Tato hodnota průtoku 0,764 m^3/s byla stejným postupem jako v prvním případě přepočítána pro konkrétní plochy povodí nádrží. Následně byly provedeny výpočty poměrů zachycení, pomocí Rovnice 3, i pro druhou variantu.

Nádrž*	Metoda zjištění objemu nádrže	Objem (m3)	Plocha povodí** (km2)	Průtok 2 (l/s)	Poměr zachycení nádrže pro průtok 1 (%)	Poměr zachycení nádrže pro průtok 2 (%)
708	výpočet (1)	17 430	-	mimo tok	100	100
709	výpočet (1)	3 064	-	mimo tok	100	100
710	výpočet (1)	3 588	-	mimo tok	100	100
711	výpočet (1)	6 252	-	mimo tok	100	100
V lomu	výpočet (1)	6 100	-	mimo tok	100	100
713	výpočet (1)	3 558	-	mimo tok	100	100
714	výpočet (1)	2 771	-	mimo tok	100	100
Rozkoš	vodohospodářská mapa	40 000	64.47	185.8	41	33
404	vodohospodářská mapa	8 700	24.04	69.3	27	19
Strašík	vodohospodářská mapa	118 000	128.50	370.4	51	43
659	výpočet (2)	21 600	1.92	5.5	90	87
660	výpočet (1)	4 961	1.68	4.8	75	70
Mlékovický r.	vodohospodářská mapa	100 000	41.40	119.3	71	66
Stojespal	vodohospodářská mapa	160 000	42.30	121.9	78	74
Utopenec	vodohospodářská mapa	320 000	57.03	164.4	83	80
Podbečvárecký r.	vodohospodářská mapa	256 000	37.86	109.1	85	82
531	výpočet (1)	8 053	7.12	20.5	56	49
Svojšický r.	vodohospodářská mapa	100 000	58.23	167.9	65	59
Molitorovský r.	výpočet (1)	4 712	3.43	9.9	60	53
142	výpočet (1)	5 746	7.60	21.9	46	38
Bošický r.	vodohospodářská mapa	12 000	-	mimo tok	100	100
521	vodohospodářská mapa	2 500	1.45	4.2	65	59
362	vodohospodářská mapa	16 000	13.27	38.3	57	50
Rybník	vodohospodářská mapa	17 000	62.32	179.6	20	13
469	výpočet (1)	3 128	1.34	3.9	71	65
136	výpočet (1)	9 709	1.78	5.1	83	79
Svatý Prokop	výpočet (1)	17 102	5.47	15.8	76	71
621	výpočet (1)	4 456	4.62	13.3	52	45
51	výpočet (1)	4 016	2.58	7.4	63	56
Frčina	výpočet (1)	7 173	3.90	11.2	66	60
250	výpočet (1)	7 206	2.73	7.9	73	68
Mlýnek	výpočet (2)	15 900	9.93	28.6	64	57
Obecní rybník	výpočet (1)	4 934	1.27	3.7	79	74
Vlčka	výpočet (1)	7 594	1.49	4.3	82	78
325	výpočet (1)	7 187	1.11	3.2	85	81
494	výpočet (1)	6 118	0.52	1.5	90	88
592	výpočet (1)	3 854	2.86	8.2	60	53
Velký rybník	výpočet (1)	8 655	1.42	4.1	84	81

Nádrž*	Metoda zjištění objemu nádrže	Objem (m3)	Plocha povodí ** (km2)	Průtok 2 (l/s)	Poměr zachycení nádrže pro průtok 1 (%)	Poměr zachycení nádrže pro průtok 2 (%)
Pančák	výpočet (1)	4 280	8.65	24.9	35	27
Dolní Kunvald	výpočet (1)	6 106	2.80	8.1	70	64
Bobr	výpočet (1)	12 673	2.66	7.7	81	77
566	výpočet (1)	6 903	0.99	2.9	86	82
Nový rybník	vodohospodářská mapa	23 000	5.25	15.1	80	76
Hořejší rybník	vodohospodářská mapa	50 000	8.16	23.5	84	81
Kačíř	vodohospodářská mapa	60 000	1.53	4.4	96	95
Panský rybník	vodohospodářská mapa	50 000	19.67	56.7	72	67
Vavřinecký rybník	vodohospodářská mapa	1 200 000	59.87	172.6	93	91
460	vodohospodářská mapa	500	-	mimo tok	100	100
696	výpočet (1)	7 259	0.35	1.0	93	92
48	výpočet (1)	3 207	0.61	1.8	83	79
Nesměňský rybník	výpočet (1)	4 158	1.33	3.8	76	71
Bosňák	vodohospodářská mapa	40 000	10.52	30.3	78	74
96	výpočet (1)	4 122	0.98	2.8	80	76
95	výpočet (1)	3 734	1.07	3.1	77	73
661	výpočet (1)	3 608	1.38	4.0	73	67
287	výpočet (1)	6 307	5.64	16.3	56	48
529	výpočet (1)	32 633	3.35	9.7	88	86
Dolní Ostarov	výpočet (1)	8 856	0.52	1.5	92	90
Drahorádův r.	výpočet (1)	29 456	3.41	9.8	87	85
269	výpočet (1)	4 868	1.04	3.0	81	77
Fílův rybník	výpočet (1)	20 017	3.47	10.0	84	80
Hořejší rybník	výpočet (1)	8 329	5.87	16.9	61	54
Holoubek	výpočet (1)	2 642	-	mimo tok	100	100
Škrobka	vodohospodářská mapa	60 000	2.48	7.1	94	92
200	výpočet (1)	14 986	4.67	13.5	76	71
103	výpočet (1)	2 766	0.11	0.3	94	93
222	výpočet (1)	2 689	0.52	1.5	82	79
584	výpočet (1)	6 452	0.37	1.1	92	90
Šusťák	výpočet (1)	2 819	0.75	2.2	78	74
Dolejšák	vodohospodářská mapa	600	-	mimo tok	100	100

Tabulka č.1 – Výpočet poměrů zachycení nádrží

* Nádrže, u kterých není uvedený název byly označeny podle říčních úseků toku číslem Hydro ID

** Pro nádrže, které se nenacházejí v dráze vodních toků, nebyla určena plocha povodí a byl jim přiřazen poměr zachycení 100 %

(1) Výpočet objemu nádrže s předpokladem hloubky 1 metr

(2) Výpočet pomocí získaných hodnoty výšky u hráze (vodohospodářská mapa) a délky nádrže

V Tabulce č.1 můžeme vidět vypočtené hodnoty poměrů zachycení pro obě varianty výpočtů. Nádrže jsou ve vstupních datech s vodními toky uvažovány jako další úseky říčního toku, odtud bylo převzato označení konkrétním číslem Hydro ID. Nakonec celkem u jedenácti nádrží bylo po bližším průzkumu zjištěno, že se nenachází v dráze hlavního toku, a proto byl jejich poměr zachycení zvolen jako 100 %.

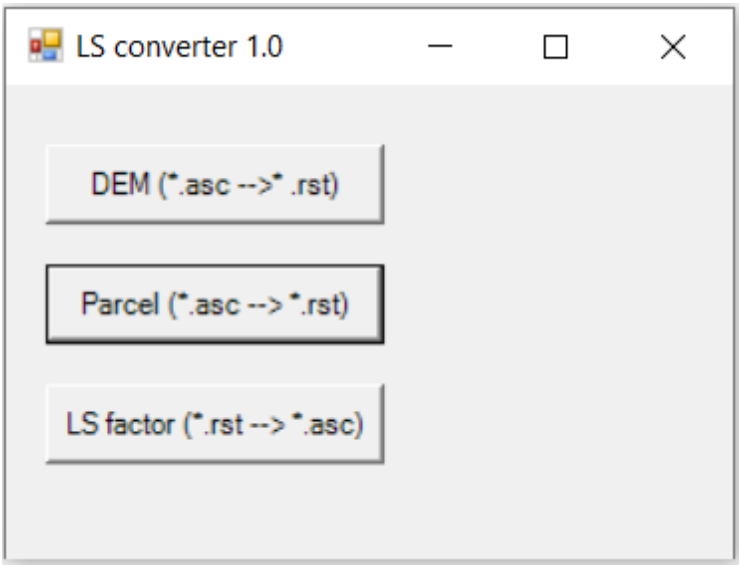
Poměry zachycení pro druhou variantu, vzhledem k vyšším průtokům, vyšly o něco menší než v prvním výpočtu, tudíž nádrže zachytí méně sedimentu a zároveň z toho vyplývá, že dále uzávěrovým profilem projde větší množství materiálu.

Vstupní vrstva vodních nádrží vycházela z dat ZABAGED. Vrstvu s polygony vodních nádrží bylo třeba převést na body pomocí nástroje „Feature to Point“. Bylo třeba, aby každý bod měl dostatečnou plochu na základě rozlišení rastru. Proto bylo v tomto případě využito nástroje „Buffer“. Kolem každého bodu byla nastavena hodnota bufferu 12 metrů. Tímto postupem došlo k tomu, že vznikly kruhy s průměrem 24 metrů, což zajistilo dostatečně velkou plochu vzniklých bodů.

Dále bylo nutné vytvořit v atributové tabulce sloupec s názvem TE (Trapping efficiency), do kterého byly následně vepsány hodnoty poměrů zachycení nádrží.

Takto připravená bodová vrstva byla poté pomocí nástroje „Feature to Raster“ převedena do rastrové podoby. Při nastavení nástroje bylo třeba dbát na to, aby výsledný rastr odpovídal ostatním vstupním vrstvám především v rozsahu oblasti pro výpočet a rovněž v rozlišení rastru 10x10 metrů. Poslední úprava před převádění do správného formátu proběhla nástroje „Reclasiffy“, kterým muselo být zajištěno, aby veškeré plochy, kde se nenachází žádná data, byla v rastru uvedena pod hodnotou 0.

Nyní již stačilo převést rastr do správného formátu nejdříve nástrojem „Raster to ASCII“ a poté pomocí programu LS Converter. Takto připravené vstupy ve správném formátu již bylo možné použít pro výpočet v modelu WaTEM/SEDEM.



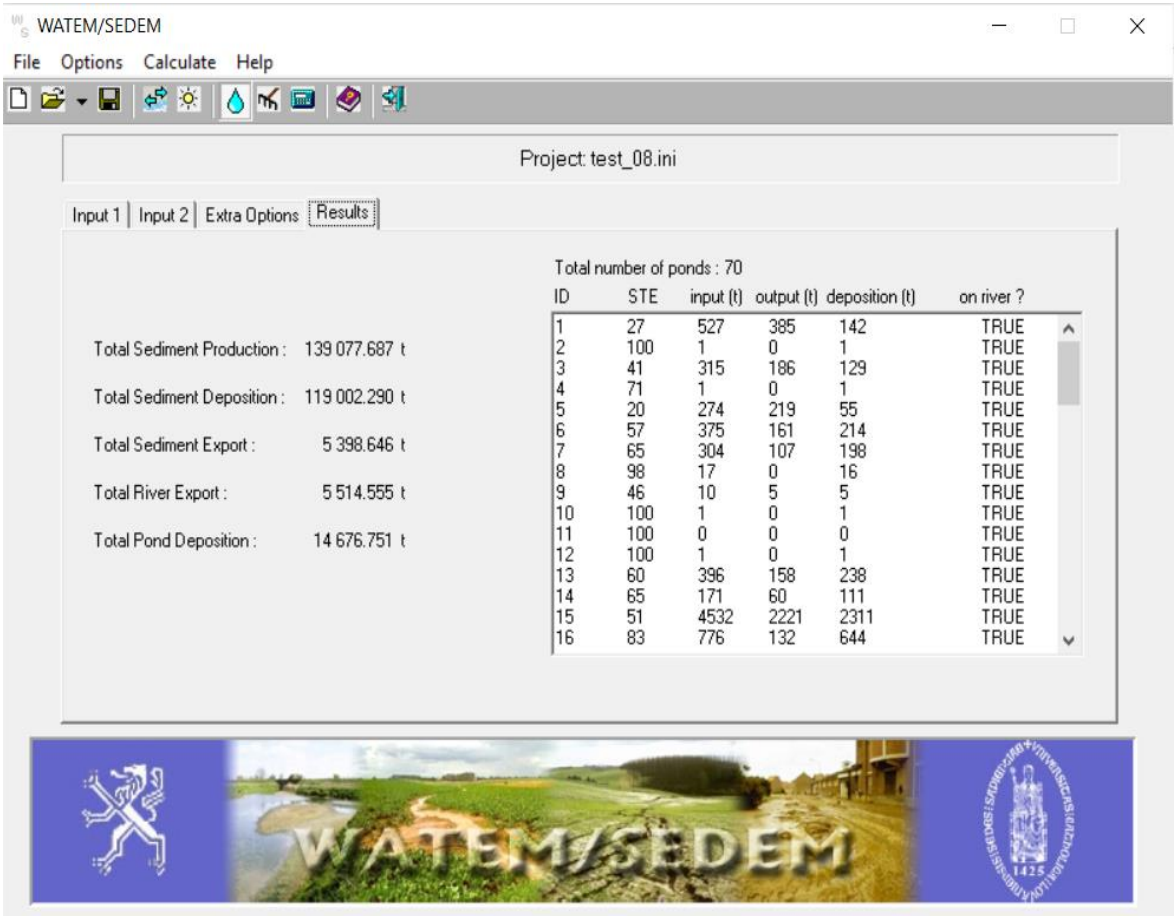
Obrázek 18 - LS Converter 1.0

V následném vyhodnocování proběhlo podle několika kritérií srovnání dvou variant výpočtů. Finální vyhodnocování výstupních hodnot však bylo řešeno pro výpočet s průtokem 2 (0,764m^3/s), který byl zjištěn z evidenčního listu ČHMÚ a u něhož lze předpokládat přesnější určení poměrů zachycení.

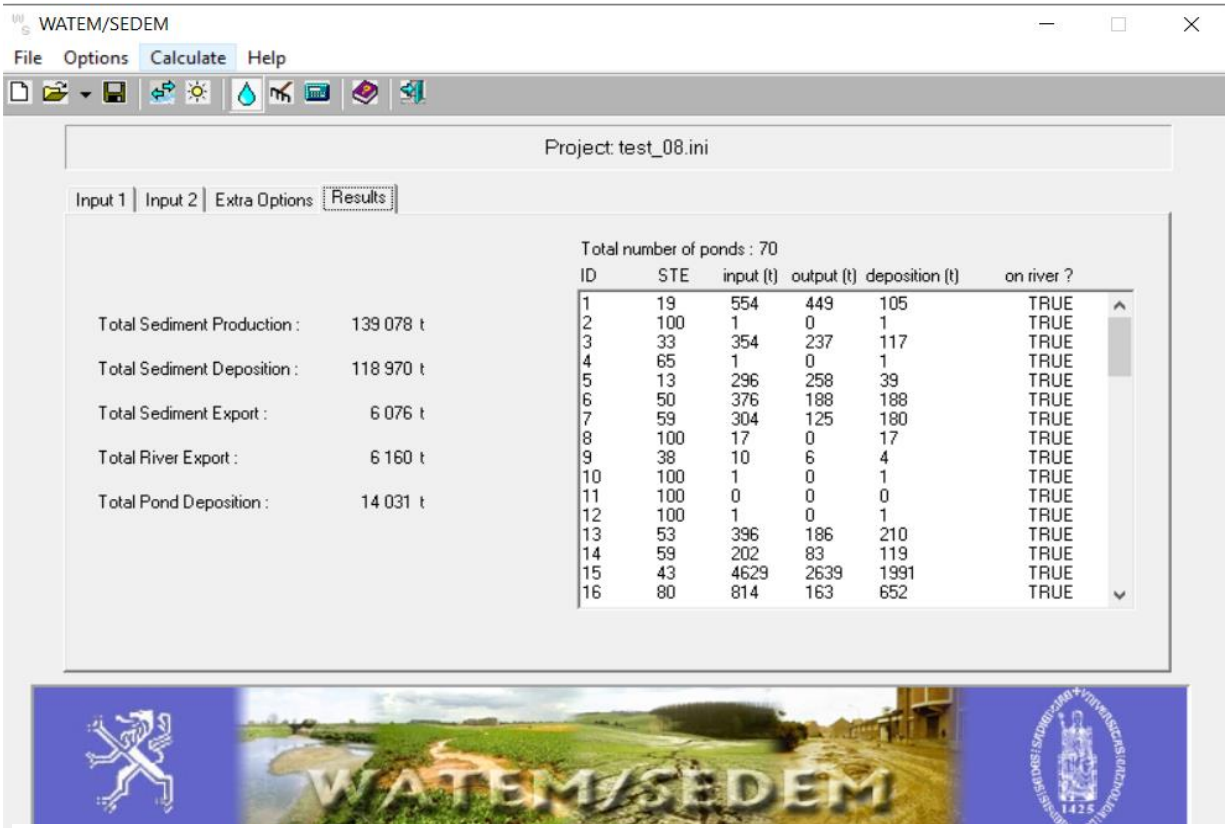
8. Vyhodnocení

8.1. Vliv rozdílných průtoků na výsledky

Vlastní vyhodnocování proběhlo v několika částech. Nejdříve proběhlo srovnání dvou variant výpočtů s rozdílnými uvažovanými průtoky v nádržích. Zjišťováno bylo, jaký vliv, na celkové hodnoty množství sedimentu z hlediska celého řešeného povodí, mají různé průtoky v nádržích a s nimi spojené odlišné hodnoty poměrů zachycení. Byly tedy porovnány celkové sumy množství sedimentu usazeného v nádržích a rovněž množství, které vystupovalo uzávěrovým profilem z povodí.



Obrázek 19 - Výsledky výpočtu pro průtok 1 (0,5662m^3/s)



Obrázek 20 - Výsledky výpočtu pro průtok 2 (0,764m^3/s)

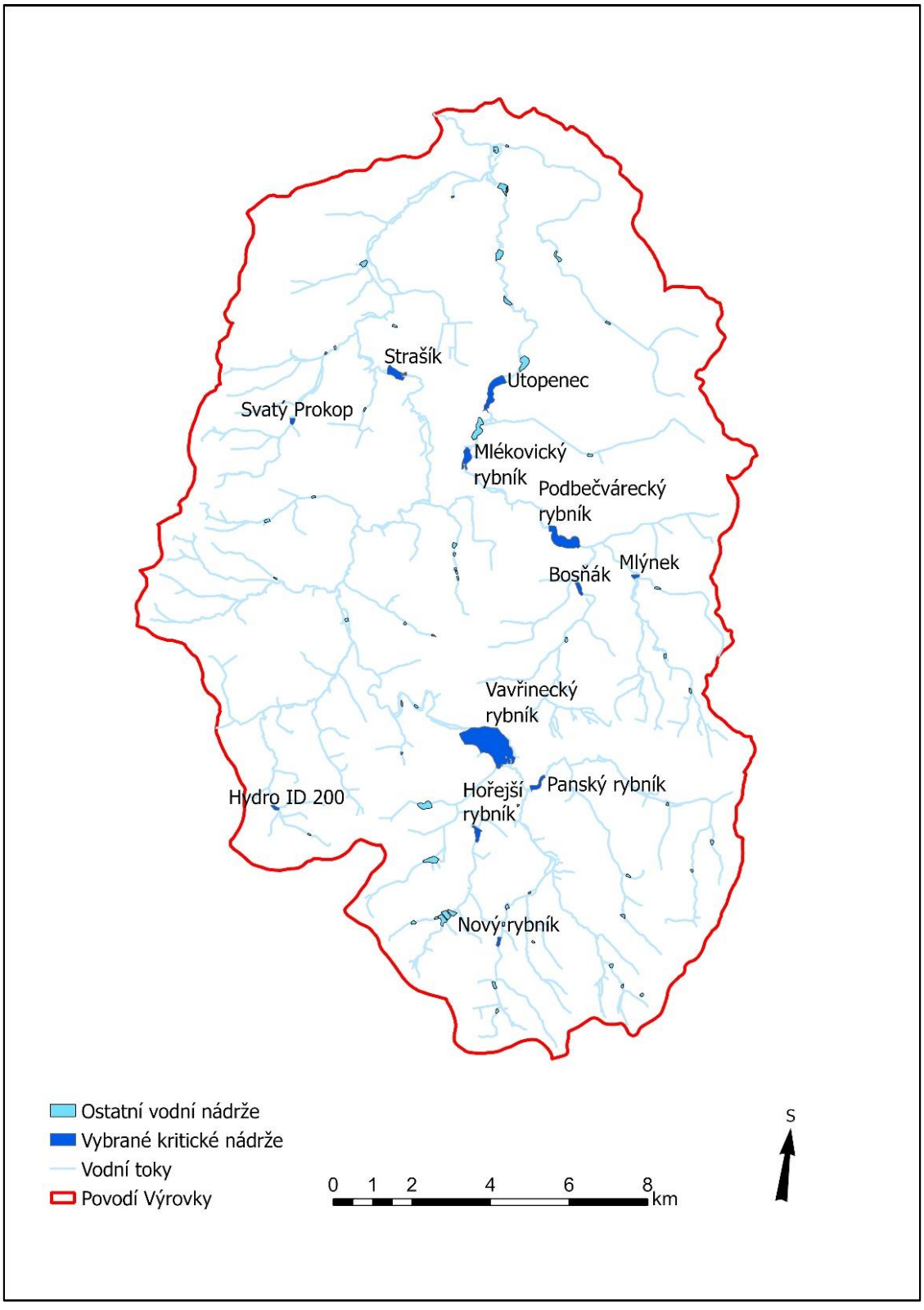
Na obrázcích 20 a 21 můžeme vidět výsledné tabulky z modelu WaTEM/SEDEM. Výsledné hodnoty produkce sedimentu (eroze) a depozice sedimentu (ukládání) se liší pouze o minimální odchylky, které nejsou způsobené rozdíly poměrů zachycení. Hodnoty, které nás zajímají jsou množství sedimentu, které projde uzávěrovým profilem dále z povodí (Total River Export) a množství sedimentu uložené v nádržích (Total Pond Deposition).

Podle výsledků výpočtu s průměrným ročním průtokem 1 (0,5662 m^3/s) vyšla suma materiálu usazeného v nádržích asi 14677 t/rok. Při výpočtu s průtokem 2 (0,764 m^3/s) se snížily hodnoty poměrů zachycení v průměru o 4 %, proto vyšla tato hodnota nižší přibližně o 646 t materiálů, který se ročně usadí v nádržích.

Množství, které se neusadí v nádrži se zákonitě dostává dále do vodního toku, a proto je hodnota celkového exportu sedimentu, který odejde z povodí uzávěrovým profilem, naopak vyšší pro průtok 2. Výsledná hodnota pro průtok 1 vyšla 5515 t/rok.

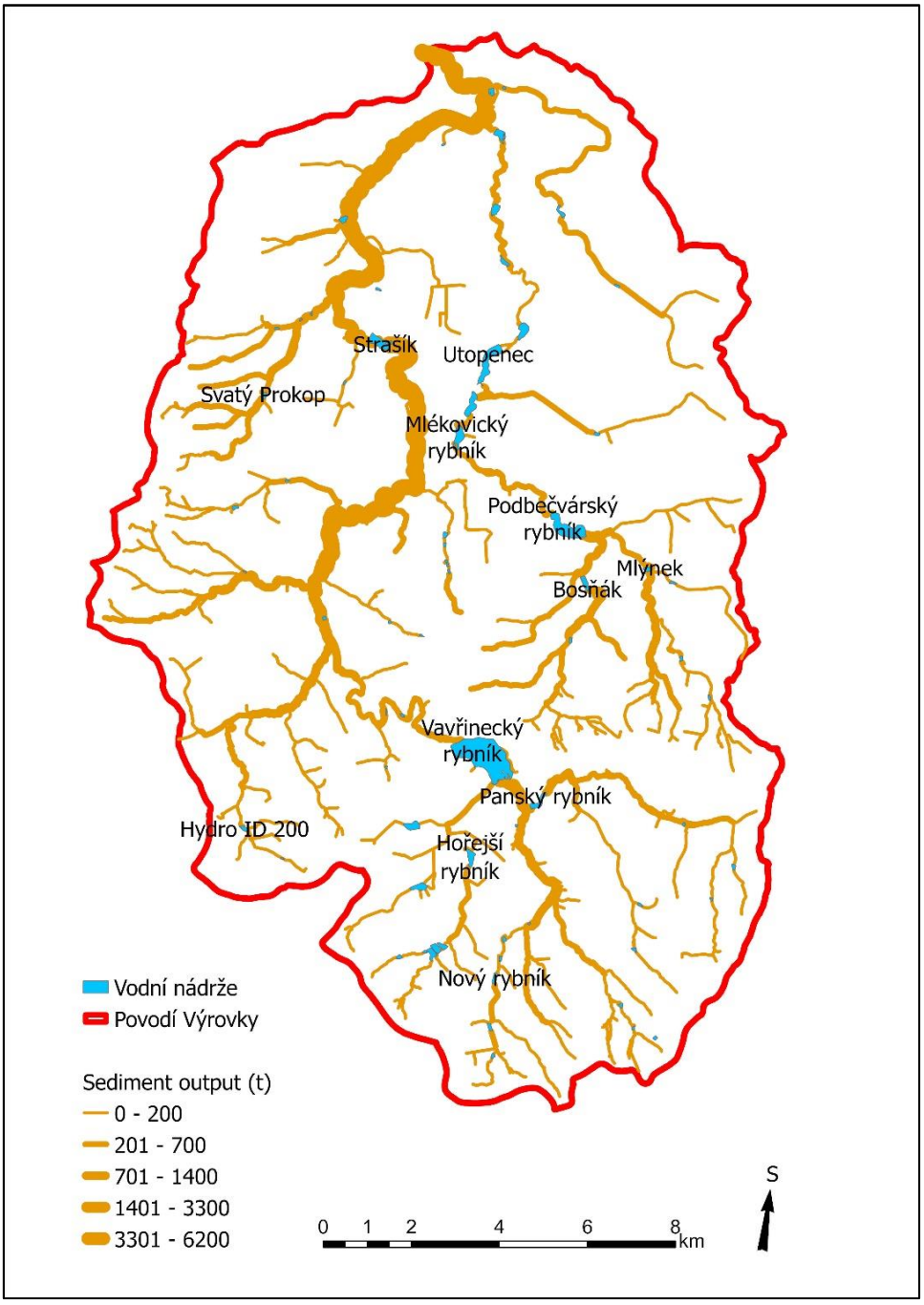
Na tomto případu je možné vidět, jak případné rozdíly v průtocích ovlivňují rovněž celkové bilance sedimentu v povodí. Při zvýšení průtoku se zmenšuje doba zdržení sedimentu v nádrži a stihne se tak usadit nižší množství materiálu. Naproti tomu při snížení rychlosti průtoku dochází k o něco výraznějšímu zanášení vodních nádrží.

Pro další vyhodnocení byly vytipovány nádrže, do kterých přichází největší množství sedimentu. Mapu s kritickými nádržemi můžeme vidět na Obrázku 21. Následně bylo na těchto dvanácti vybraných nádržích provedeno srovnání výsledků dvou variant výpočtů z hlediska množství usazeného sedimentu a rovněž bylo provedeno vyhodnocení v rámci jejich vygenerovaných povodí.



Obrázek 21 - Vybrané kritické nádrže v povodí Výrovky

Výsledná výstupní vrstva Sediment output značí celkové množství, které vstupuje z daného úseku toku do úseku navazujícího. Na vizualizaci výstupu na Obrázku 22 můžeme vidět vliv, který vnesly do výsledků nádrže s určeným poměrem zachycení. U některých nádrží je tak vidět, že množství sedimentu, vystupujícího z nádrže, je menší než to množství, které do nádrže vstupovalo.



Obrázek 22 - Výstup výpočtu s průtokem 2 - Sediment Output (ArcGIS Pro)

8.2. Vyhodnocení kritických nádrží

Vavřinecký rybník

Hodnoty poměrů zachycení nádrže (TE):

- výpočet s průtokem 1: TE=93%
- výpočet s průtokem 2: TE=91%

Do Vavřineckého rybníka ústí dva vodní toky. Jedná se o řeku Výrovku a menší Ostašovský potok. Přichází sem tedy sedimenty ze dvou poměrně významných větví vodních toků. Hlavním zdrojem sedimentu jsou zde tyto dva přitékající toky. Vavřinecký rybník se svojí rozlohou 0,783 km^2 je největším vodní plochou v řešeném povodí. Navzdory své rozloze přijímá minimum sedimentu přímo ze svahů. Podle výstupní vrstvy Hillslope je to pouze 8 tun ročně. Na obrázku můžeme vidět srovnání hodnot z výstupu Sediment output, který značí, kolik sedimentu z daných úseků toku vstupuje a rovněž kolik sedimentu nádrž následně opustí. Z přepočtu je tak možné zjistit přesné množství usazeného sedimentu v konkrétní nádrži.

Obrázek 23 - Vavřinecký rybník-srovnání množství sedimentu (vlevo průtok 1, vpravo průtok 2)

Množství usazeného sedimentu v nádrži za rok:

- výpočet s průtokem 1: 2119 t
- výpočet s průtokem 2: 2157 t

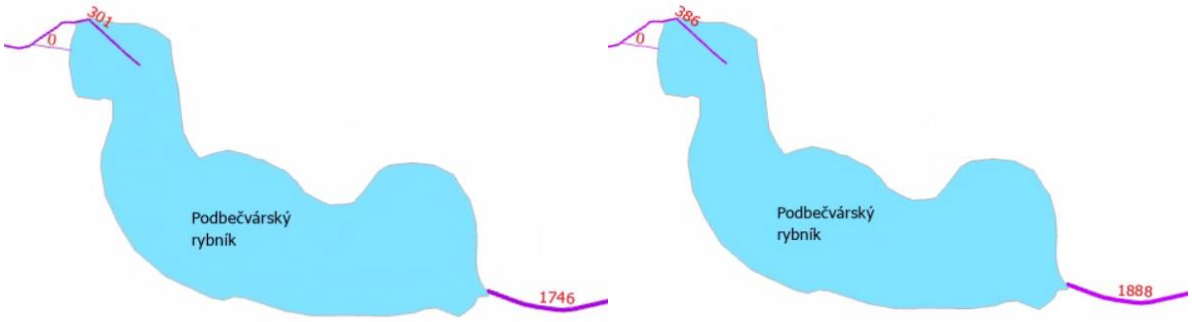
Při výpočtu s větším průtokem a při stejné produkci sedimentu tak dochází k usazení většího množství materiálu v nádrži a dál do povodí se dostane asi o 54 tun materiálu více.

Podbečvárský rybník

Hodnoty poměrů zachycení nádrže (TE):

- výpočet s průtokem 1: TE=85%
- výpočet s průtokem 2: TE=82%

Hlavním zdrojem sedimentu Podbečvárského rybníka je řeka Bečvárka neboli Miletínský potok. Sediment přichází z poměrně rozsáhlé větve spojené z několika dalších menších toků. Narozdíl od Vavřineckého rybníka, poměrně významně přispívá také sediment přímo ze svahů (259 t). Jedná se tak zhruba o jednu osminu celkového množství materiálu procházejícího nádrží.



Obrázek 24 - Podbečvárský rybník-srovnání množství sedimentu (vlevo průtok 1, vpravo průtok 2)

Množství usazeného sedimentu v nádrži za rok:

- výpočet s průtokem 1: 1704 t
- výpočet s průtokem 2: 1761 t

Ve výsledcích Podbečváreckého rybníka se projevily ještě o něco větší rozdíly. Při větším průtoku by se v nádrži usadilo o 57 tun materiálu více a vodním tokem by dále pokračovalo o 85 tun sedimentu více.

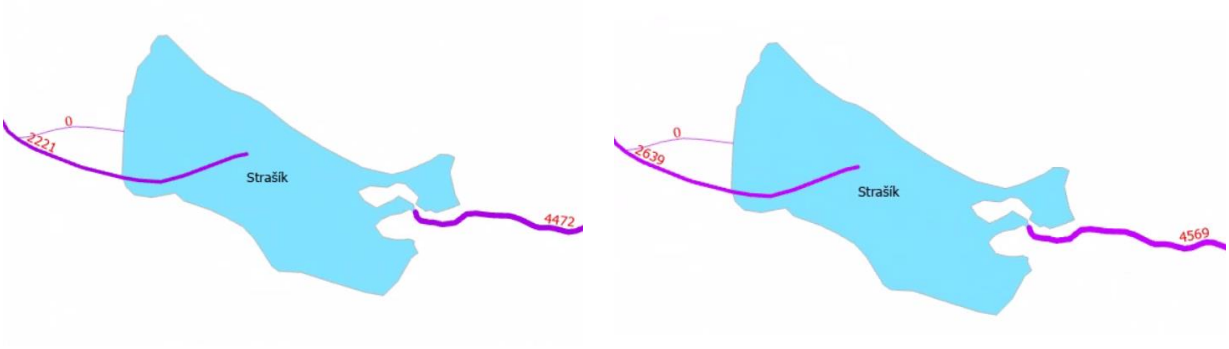
Strašík

Hodnoty poměrů zachycení nádrže (TE):

- výpočet s průtokem 1: TE=51%
- výpočet s průtokem 2: TE=43%

Rybník Strašík je po Vavřineckém rybníku další vodní nádrží, kterou protéká samotná řeka Výrovka. Nachází se v již pokročilejší fázi toku v severní části řešeného povodí a vzhledem k tomu je nejvíce zatíženou vodní plochou s ohledem na množství přicházejícího sedimentu.

Plocha jeho povodí čítá 128,5 km^2, což je zhruba polovina celého řešeného území. Na toku řeky Výrovky se na úseku od Vavřineckého rybníka nenachází žádná další vodní nádrž, a proto se sediment neustále kumuluje až k rybníku Strašík.



Obrázek 25 – Strašík-srovnání množství sedimentu (vlevo průtok 1, vpravo průtok 2)

Množství usazeného sedimentu v nádrži za rok:

- výpočet s průtokem 1: 2311 t
- výpočet s průtokem 2: 1990 t

Při změně poměru zachycení o 8 % se v množství sedimentu projeví větší rozdíly než v předchozích případech. Při výpočtu s průtokem 2 se tentokrát v nádrži zachytí o 321 tun méně materiálu. Zároveň je tak dále do povodí propuštěno o 418 tun sedimentu více.

Při průzkumu bylo zjištěno, že v roce 2013 zasáhla rybník Strašík rozsáhlá povodeň a došlo k protržení jeho hráze. V současnosti je tak Strašík místy zamokřenou lokalitou, která je zarostlá náletovými a ruderálními druhy a je z velké části neprostupná (Vodní zdroje Ekomonitor spol. s r.o.,2021).

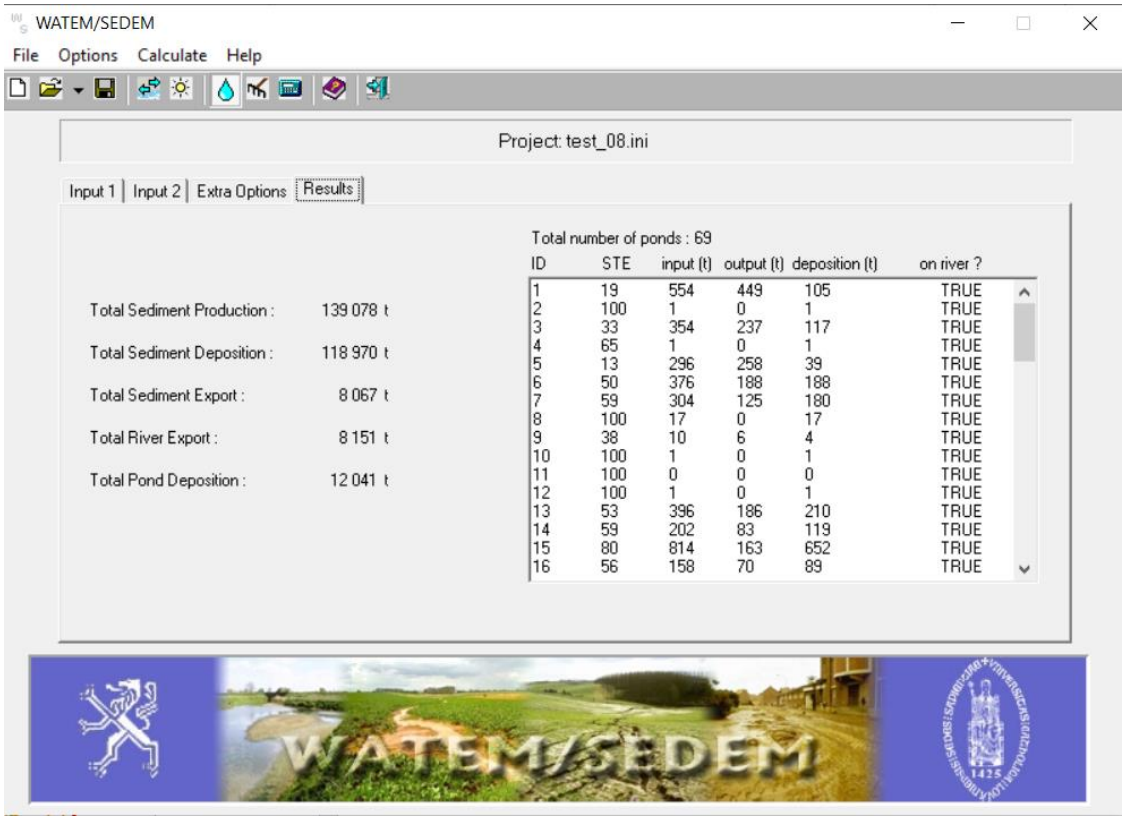
Obrázek 26 - Současný stav hráze rybníka Strašík v roce 2020 (foto: V.Lemberk,2020)

V současnosti je však již připraven záměr na obnovu vodního díla Strašík u Kouřimi, který byl vytvořen společností Vodní zdroje Ekomonitor spol. s r.o.

Záměrem je znovuobnovit zátopu rybníka a zrekonstruovat protrženou hráz. Předpokládaný termín zahájení obnovy rybníka je odhadnut na rok 2024 (Vodní zdroje Ekomonitor spol. s r.o.,2021).

Přestože v budoucnu dojde k obnově rybníka Strašík, byl proveden jeden teoretický výpočet, který počítá se současným stavem a rybník Strašík tak v těchto výpočtech není. Rybník Strašík je poslední nádrží na Výrovce před uzávěrovým profilem, která zachytává sediment, vzhledem k tomu se výsledky budou lišit pouze v hodnotě množství sedimentu, které projde uzávěrovým

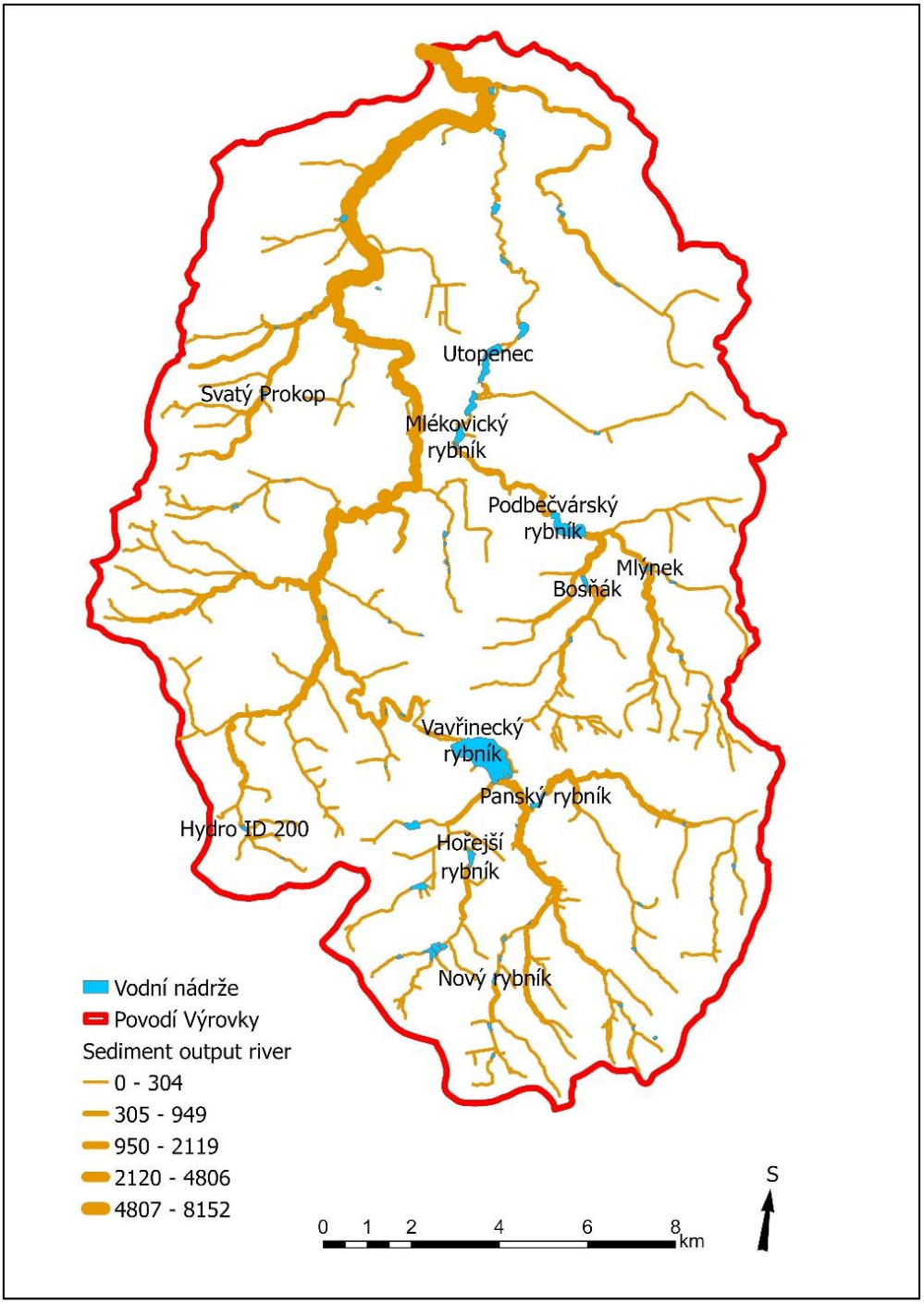
profilem v obci Plaňany. Hodnoty množství sedimentu pro ostatní nádrže nejsou změnou ve výpočtu ovlivněny.



Obrázek 27 – Výsledky výpočtu bez rybníka Strašík (průtok 0,764 m^3/s)

Jediným rozdílem v hodnotách je množství sedimentu, které za normálních okolností rybník Strašík zachytí. Celkové množství sedimentu, zachyceného v nádržích, se tak sníží o hodnotu 1990 t. O stejnou hodnotu se naopak zvýší množství sedimentu, které prochází uzávěrovým profilem ven z řešeného povodí.

Na Obrázku 28 můžeme vidět, že změna výpočtu bez rybníka Strašík spočívá pouze v nezachycení určité části sedimentu, který tak postupuje tokem dále a z řešeného povodí se tak dostává o 1990 t sedimentu více. Z hlediska výsledků pro ostatní řešené nádrže je tento výpočet naprosto totožný.



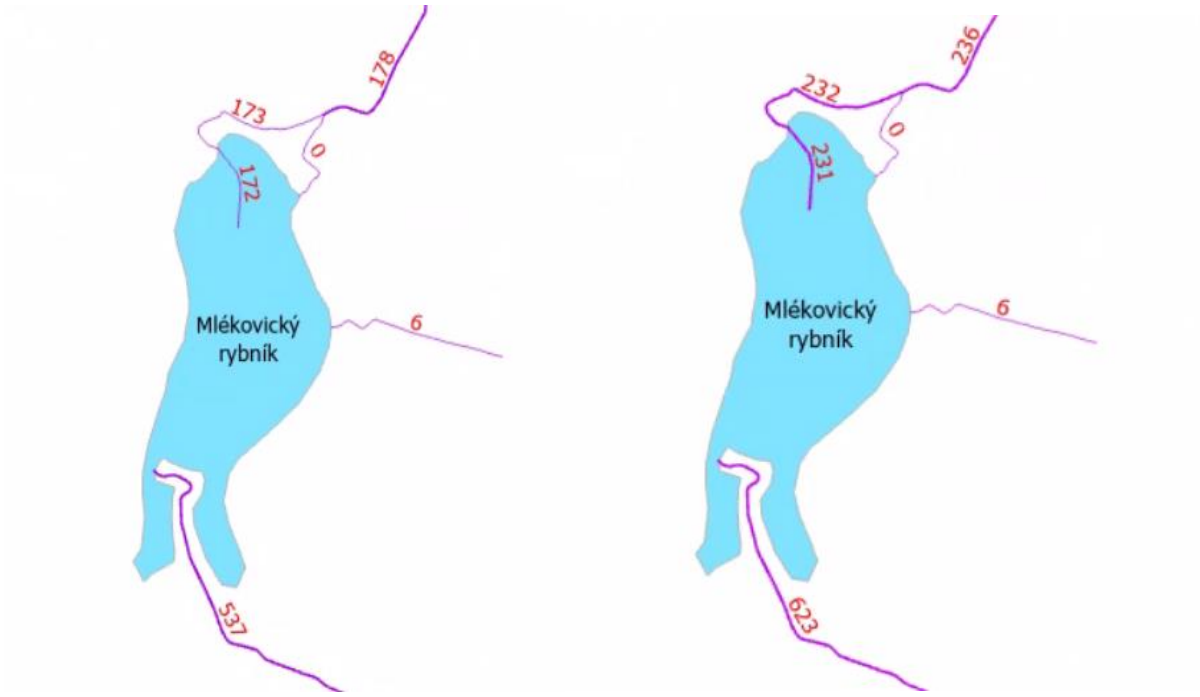
Obrázek 28 - Výstup-Sediment output bez rybníka Strašík

Mlékovický rybník

Hodnoty poměrů zachycení nádrže (TE):

- výpočet s průtokem 1: TE=71%
- výpočet s průtokem 2: TE=66%

Mlékovický rybník se nachází na toku Bečvárka, která je také hlavním přispěvatelem přicházejícího sedimentu. Množství sedimentu je zredukováno o část, kterou zachytí Podbečvárecký rybník, který se nachází jižněji. Ze svahů se do rybníka dostává zhruba 51 tun.



Obrázek 29 – Mlékovický r.-srovnání množství sedimentu (vlevo průtok 1, vpravo průtok 2)

Množství usazeného sedimentu v nádrži za rok:

- výpočet s průtokem 1: 422 t
- výpočet s průtokem 2: 449 t

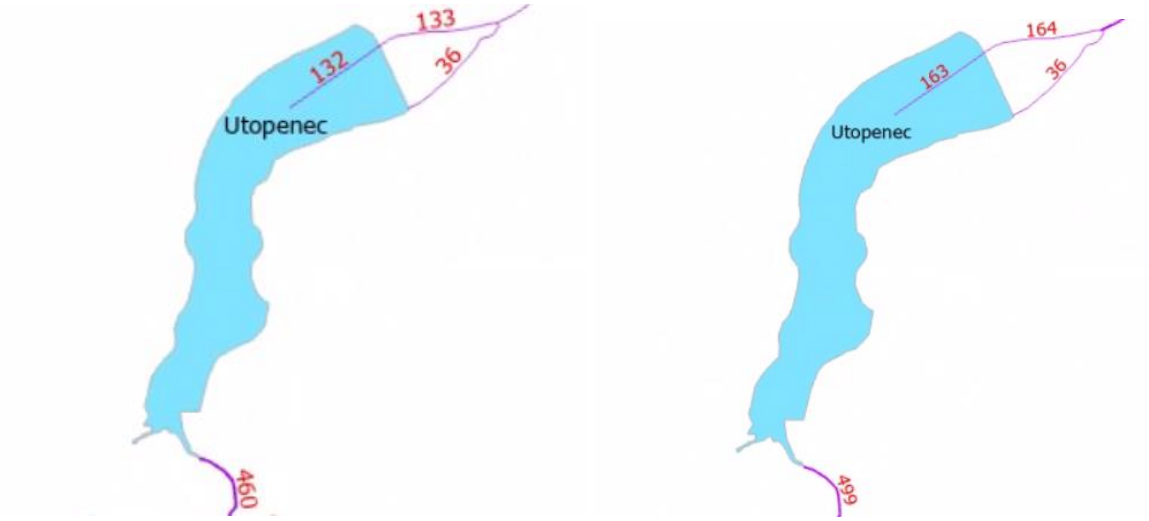
Jak můžeme vidět, rozdíly v množství zachyceného sedimentu jsou minimální. Při průtoku 2 se dále do povodí dostane asi o 60 tun více.

Utopenec

Hodnoty poměrů zachycení nádrže (TE):

- výpočet s průtokem 1: TE=83%
- výpočet s průtokem 2: TE=80%

Rybník Utopenec se nachází v kaskádě několika vodních ploch na řece Bečvárce. Před ním se nachází Mlékovický rybník a rybník Stojespal. Velká část sedimentu je tak těmito dvěma rybníky zachycena. Z hlediska přívodu sedimentů hraje roli přítok Voděradského potoka, který se do Bečvárky vlévá před Utopencem a přináší více než polovinu celkového vstupního materiálu. Nezanedbatelná část sedimentu (315 t) se do Utopence dostane přímo ze svahu



Obrázek 30 - Utopenec-srovnání množství sedimentu (vlevo průtok 1, vpravo průtok 2)

Množství usazeného sedimentu v nádrži za rok:

- výpočet s průtokem 1: 643 t
- výpočet s průtokem 2: 651 t

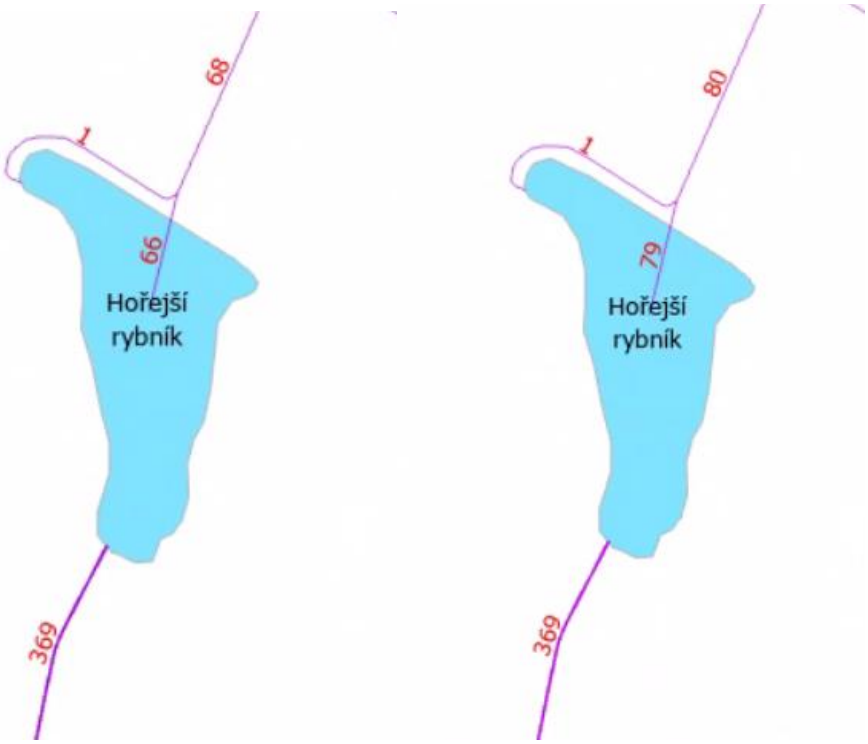
Malý rozdíl v poměrech zachycení způsobuje, že i celková množství zachyceného a výstupního sedimentu se příliš neliší. Při variantě s průtokem 2 se zachytí o něco více sedimentu i přes nižší stupeň zachycení. Na tomto příkladu je v malých rozdílech vidět odlišný vliv zachycení nádrží, které se na toku nachází před Utopencem.

Hořejší rybník

Hodnoty poměrů zachycení nádrže (TE):

- výpočet s průtokem 1: TE=84%
- výpočet s průtokem 2: TE=81%

Shodou okolností se v povodí nachází dvě vodní plochy s názvem Hořejší rybník. Zde se jedná o větší z nich, který se nachází na toku Ostašovického potoka. Největší přívod sedimentu způsobuje jeho přítok Slivánský potok. Před Hořejším rybníkem tok neprotéká jinou vodní nádrží. Veškerá zátěž sedimentu tak přichází sem.



Obrázek 31 - Hořejší rybník-srovnání množství sedimentu (vlevo průtok 1, vpravo průtok 2)

Množství usazeného sedimentu v nádrži za rok:

- výpočet s průtokem 1: 349 t
- výpočet s průtokem 2: 336 t

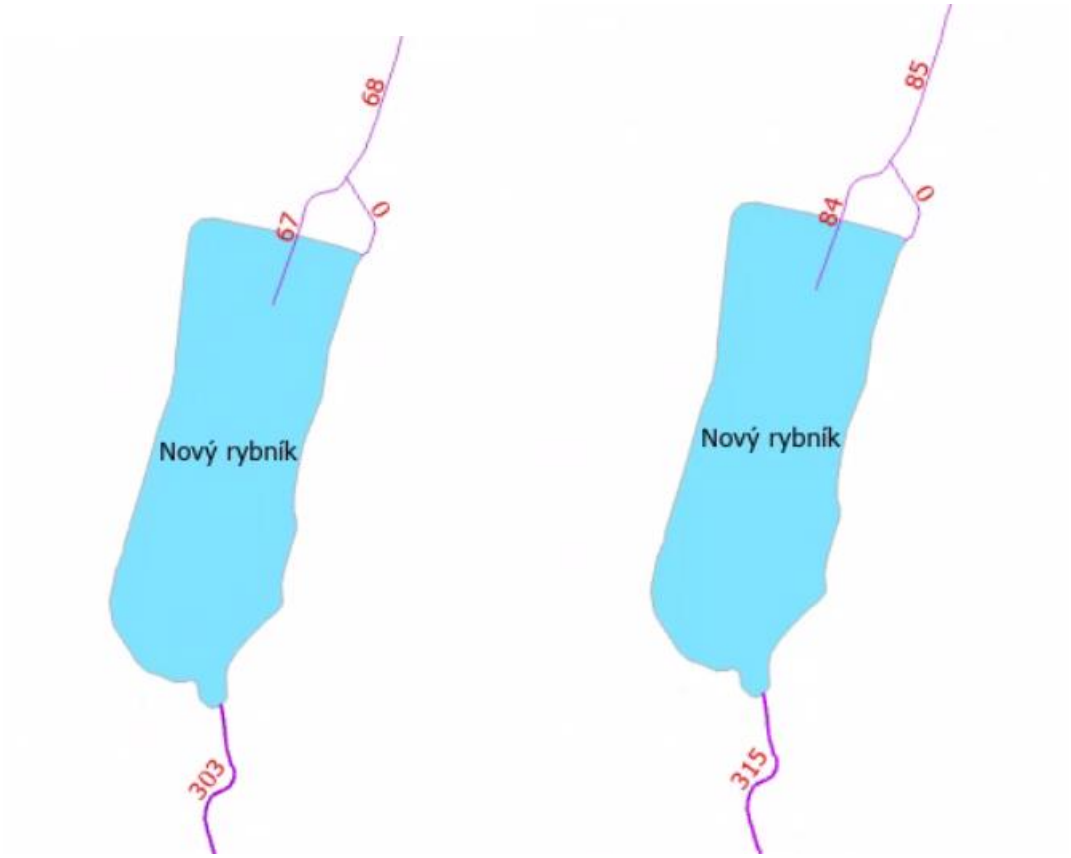
U tohoto konkrétního rybníku se hodnoty liší minimálně. Hlavním důvodem je absence jiných nádrží před Hořejším rybníkem. Přichází tak stejné množství sedimentu a malá odchylka v poměrech zachycení vytvoří pouze malý rozdíl.

Nový rybník

Hodnoty poměrů zachycení nádrže (TE):

- výpočet s průtokem 1: TE=80%
- výpočet s průtokem 2: TE=76%

Nový rybník se nachází v ranější fázi toku Výrovky. Pod ním se na toku nachází rybník Bobr, který mírně redukuje množství sedimentu. Zhruba třetinu celkového vstupního sedimentu přivádí pravostranný bezejmenný přítok Výrovky.



Obrázek 32 - Nový rybník-srovnání množství sedimentu (vlevo průtok 1, vpravo průtok 2)

Množství usazeného sedimentu v nádrži za rok:

- výpočet s průtokem 1: 267 t
- výpočet s průtokem 2: 265 t

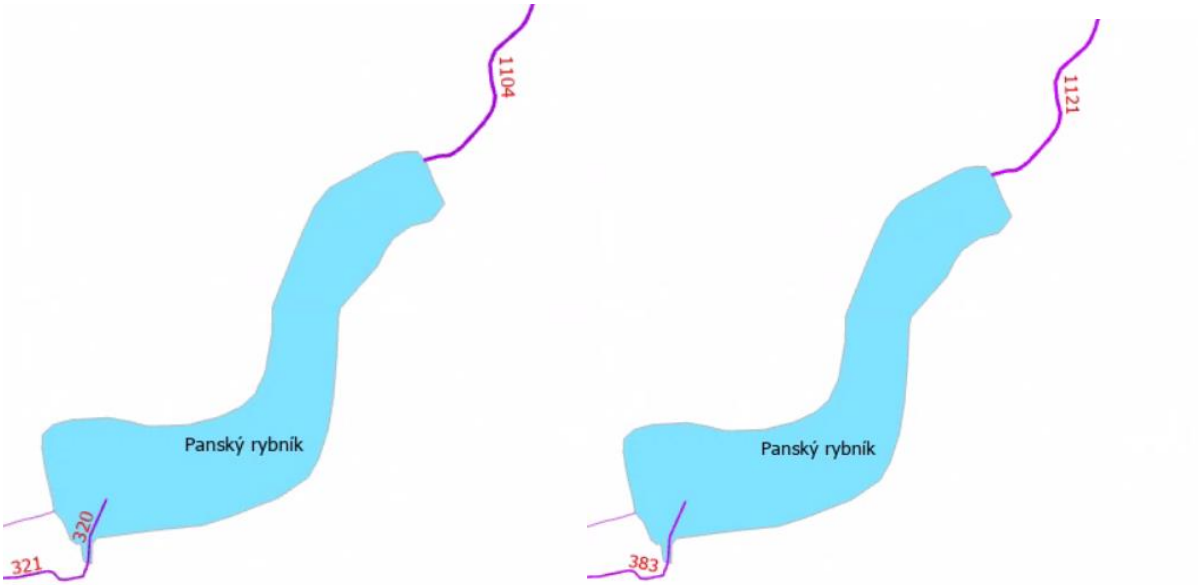
Opět můžeme vidět, že rozdíly hodnot sedimentů jsou poměrně zanedbatelné. To znamená, že změna průtoku v nádržích podobného typu hraje pouze malou roli.

Panský rybník

Hodnoty poměrů zachycení nádrže (TE):

- výpočet s průtokem 1: TE=72%
- výpočet s průtokem 2: TE=67%

Panský rybník se nachází vedle Vavřineckého rybníka v místě, kde ústí Mančický potok do Výrovky. Do Panského rybníka přichází sediment z povodí dvou poměrně rozsáhlých vodních toků (Mančický potok, Onomyšlský potok). Jedná se o rozsáhlou větev toků, která navíc postrádá jiné vodní nádrže na tocích. Na Panský rybník tak ve výsledku vychází velké množství sedimentu.



Obrázek 33 - Panský rybník-srovnání množství sedimentu (vlevo průtok 1, vpravo průtok 2)

Množství usazeného sedimentu v nádrži za rok:

- výpočet s průtokem 1: 823 t
- výpočet s průtokem 2: 777 t

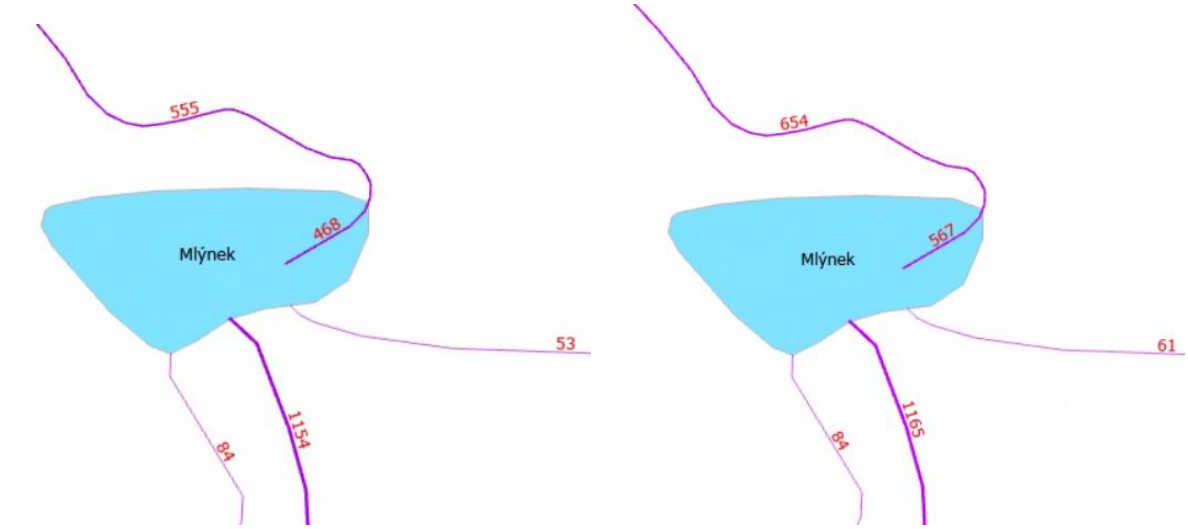
Při větším množství přicházejícího sedimentu se rozdíly v poměrech zachycení mírně projevily. Při výpočtu s větším průtokem 2 se usadilo asi o 46 tun materiálu méně.

Mlýnek

Hodnoty poměrů zachycení nádrže (TE):

- výpočet s průtokem 1: TE=64%
- výpočet s průtokem 2: TE=57%

Rybník Mlýnek se nachází na toku řeky Bečvárky, která ze svého povodí přivádí velké množství sedimentu. A proto, i přes svou malou rozlohu, musí spadat mezi vytipované kritické nádrže. Do rybníka se vlévají další dva bezejmenné vodní toky, které však oproti Bečvárce přináší mnohem menší množství materiálu.



Obrázek 34 - Mlýnek-srovnání množství sedimentu (vlevo průtok 1, vpravo průtok 2)

Množství usazeného sedimentu v nádrži za rok:

- výpočet s průtokem 1: 831 t
- výpočet s průtokem 2: 751 t

I přes nižší hodnoty poměrů zachycení Mlýnek zachytává značné množství sedimentu. Proto patří, i s ohledem na jeho malou rozlohu, mezi nejvíce zasažené vodní nádrže z hlediska zanášení.

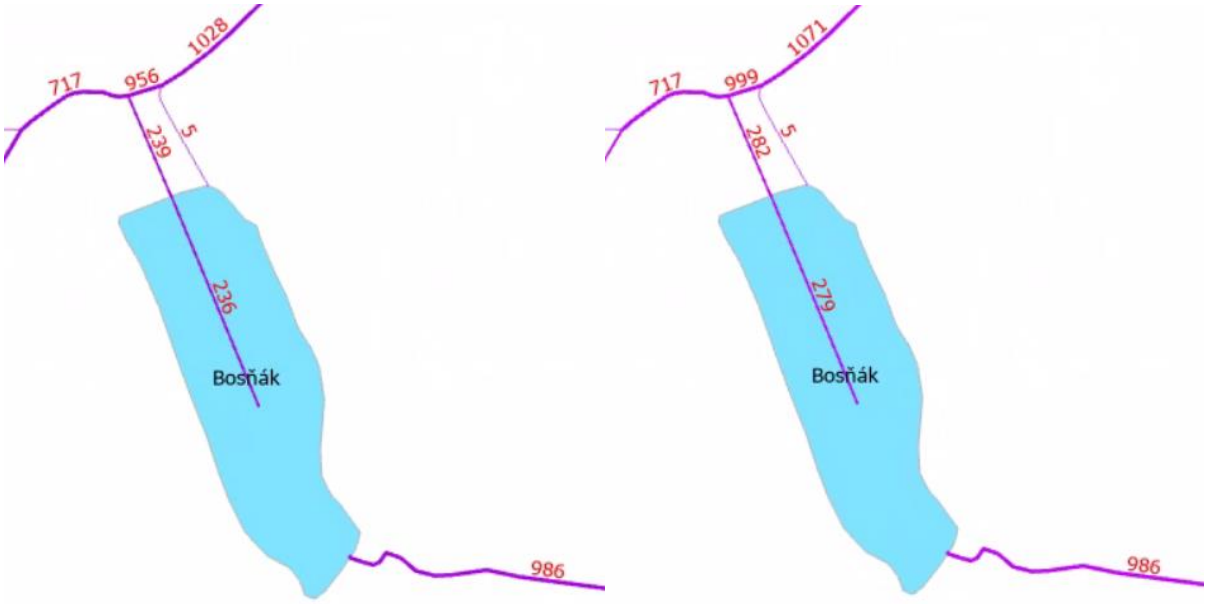
Při průtoku 2 vyšlo množství zachyceného sedimentu o 80 tun nižší a tokem Bečvárka se dále transportovalo zhruba o 100 tun materiálu více.

Bosňák

Hodnoty poměrů zachycení nádrže (TE):

- výpočet s průtokem 1: TE=64%
- výpočet s průtokem 2: TE=57%

Rybník Bosňák se nachází na toku Drahobudického potoka a je do něj přiváděn sediment z celého jeho povodí, jelikož jiná nádrž, která by zachytávala část sedimentu, na toku potoka není. Přímo ze svahů se do vodní nádrže dostává zhruba 90 tun sedimentu ročně.



Obrázek 35 - Bosňák-srovnání množství sedimentu (vlevo průtok 1, vpravo průtok 2)

Množství usazeného sedimentu v nádrži za rok:

- výpočet s průtokem 1: 687 t
- výpočet s průtokem 2: 612 t

Stejné vstupující hodnoty sedimentu značí nepřítomnost jakýchkoliv vodních nádrží na toku pod Bosňákem. Hodnoty jsou obvykle ovlivněny rozdílnými poměry zachycení předchozích nádrží na toku.

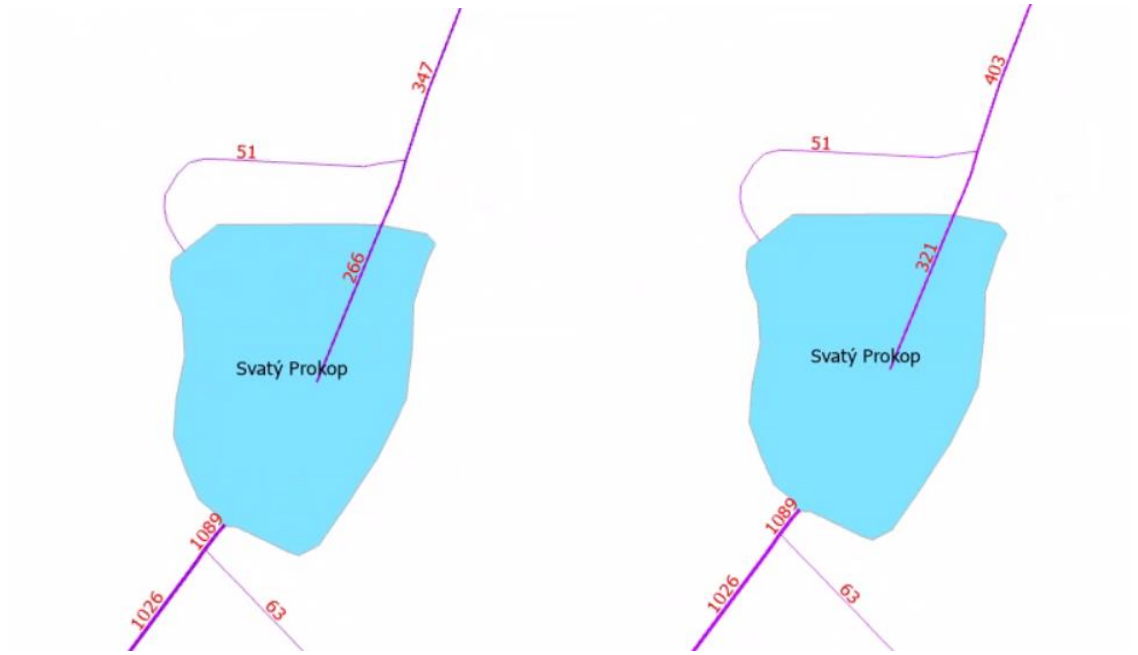
Při průtoku 2 vyšlo množství zachyceného sedimentu o 75 tun nižší.

Svatý Prokop

Hodnoty poměrů zachycení nádrže (TE):

- výpočet s průtokem 1: TE=76%
- výpočet s průtokem 2: TE=71%

Rybník Svatý Prokop na toku Střebovka se nachází v podobné situace jako rybník Mlýnek. S poměrně malou rozlohou čelí velkému množství přicházejícího sedimentu nejen ze Střebovky, ale rovněž z jejího levostranného přítoku, který v ústí přivádí 540 tun (zhruba polovinu celkového množství).



Obrázek 36 - Svatý Prokop-srovnání množství sedimentu (vlevo průtok 1, vpravo průtok 2)

Množství usazeného sedimentu v nádrži za rok:

- výpočet s průtokem 1: 841 t
- výpočet s průtokem 2: 786 t

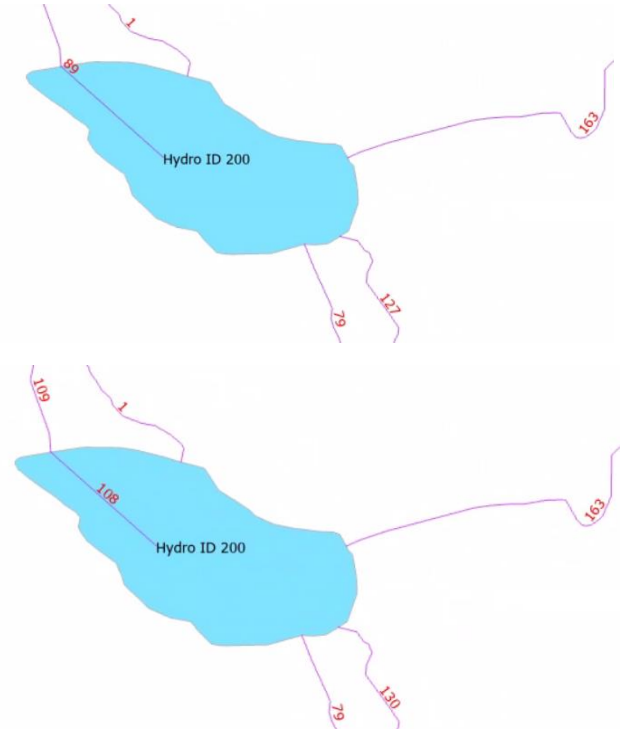
Můžeme vidět, že hodnoty vstupující do nádrže nejsou rozdílné. To opět značí, že na toku pod Svatým Prokopem se jiná nádrž, která by zachytila sediment, nenachází. Při průtoku 2 vyšlo množství zachyceného sedimentu nižší o 55 tun a dále tokem postupuje naopak o 55 tun sedimentu více.

Rybník Hydro ID – 200

Hodnoty poměrů zachycení nádrže (TE):

- výpočet s průtokem 1: TE=76%
- výpočet s průtokem 2: TE=71%

Posledním vybranou vodní nádrží je bezejmenný rybník, který je popsán číslem konkrétního říčního úseku Hydro ID 200. Nachází se v povodí Bohouňovického potoka. Kromě něj do rybníka ústí další dva bezejmenné toky, které jsou rovněž zdrojem sedimentu.



Obrázek 37 – Hydro ID 200 - srovnání množství sedimentu (nahoře průtok 1, dole průtok 2)

Množství usazeného sedimentu v nádrži za rok:

- výpočet s průtokem 1: 281 t
- výpočet s průtokem 2: 265 t

Rozdíly ve výsledcích jsou minimální. Odlišné průtoky tedy zde hrají jen velmi malou roli.

8.3. Vyhodnocení zanášení nádrží

K další části byly využity hodnoty množství zachyceného sedimentu, které byly pro každou vodní nádrž určeny pomocí modelu WaTEM/SEDEM. Cílem bylo určit, kolik procent z objemu nádrže je zaneseno sedimentem za rok.

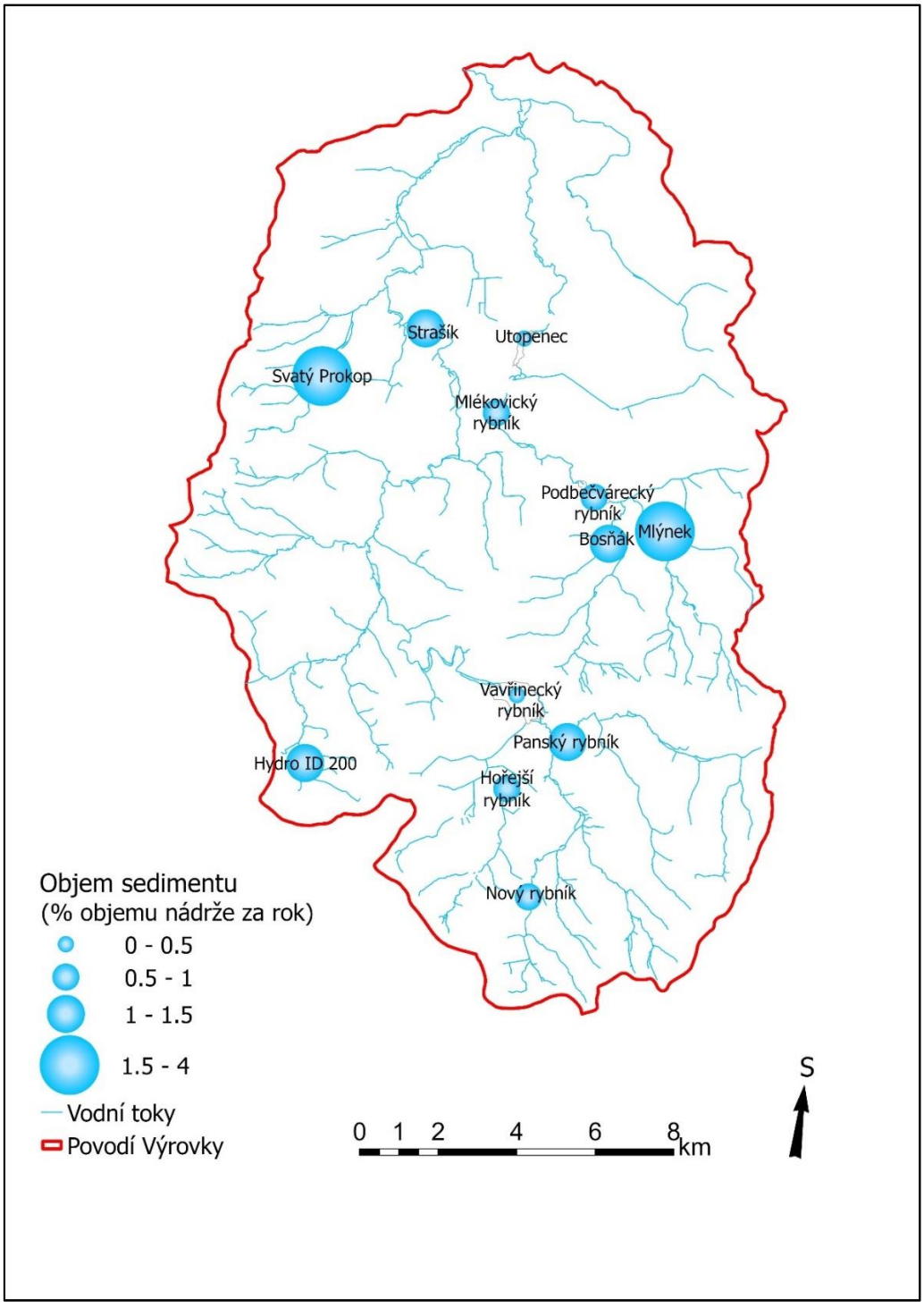
Hodnoty množství zachyceného sedimentu, které jsou u každé nádrže uvedeny v předchozích kapitolách, byly převzaty z výsledků výpočtu pro variantu s průtokem 2. Pro objemovou hmotnost sedimentu byla zvolena hodnota 1,25 t/m^3. Následně byl jednoduchým výpočtem nejdříve zjištěn objem sedimentu, který byl poté vydělen celkovým objemem nádrže. Výsledkem byl procentuální podíl zanesení nádrží sedimentem.

Kritické nádrže	Množství sedimentu (t/rok)	Objemová hmotnost (t/m3)	Přísun sedimentu za rok (m3)	Objem nádrže (m3)	Podíl ročního přísunu sedimentu v objemu nádrže (%/rok)
Vavřinecký rybník	2157	1,25	1725.6	1 200 000	0.14 %
Podbečvárský rybník	1761	1,25	1408.8	256 000	0.55 %
Strašík	1990	1,25	1592	118 000	1.35 %
Mlékovický rybník	449	1,25	359.2	100 000	0.36 %
Utopenec	651	1,25	520.8	320 000	0.16 %
Hořejší rybník	336	1,25	268.8	50 000	0.54 %
Nový rybník	265	1,25	212	23 000	0.92 %
Panský rybník	777	1,25	621.6	50 000	1.24 %
Mlýnek	751	1,25	600.8	15 900	3.78 %
Bosňák	612	1,25	489.6	40 000	1.22 %
Svatý Prokop	786	1,25	628.8	17 102	3.68 %
Hydro ID 200	265	1,25	212	14 986	1.41 %

Tabulka č.2- Procentuální podíl zanášení kritických nádrží

Následně byla na základě výsledných podílů vytvořena přehledová mapa, která přibližuje míru zanášení nádrží v závislosti na jejich objemu.

Z výsledků můžeme vidět, že nejvíce zasaženými nádržemi jsou především rybníky Mlýnek a Svatý Prokop. Objemnější nádrže jako např. Vavřinecký rybník nebo Podbečvárský rybník jsou výrazně pomaleji zanášeny, i přes větší přísun sedimentu. Výjimkou v tomto ohledu je poměrně hodně zanášený rybník Strašík.



Obrázek 38 – Změna objemu sedimentu ve vodních nádržích

Poté byl proveden menší teoretický výpočet s přihlédnutím k budoucímu vývoji, z hlediska zanášení těchto konkrétních nádrží. Jedná se o výpočet míry zanesení nádrží za konkrétní časová období, při stejném ročním vývoji.

Kritické nádrže	za 15 let	za 30 let	za 50 let	za 75 let
Vavřinecký rybník	2.2 %	3.6 %	7 %	10 %
Podbečvárský rybník	8.3 %	16.5 %	28 %	41 %
Strašík	20.2 %	40.5 %	67 %	101 %
Mlékovický rybník	5.4 %	10.8 %	18 %	27 %
Utopenec	2.4 %	4.9 %	8 %	12 %
Hořejší rybník	8.1 %	16.1 %	27 %	40 %
Nový rybník	13.8 %	27.7 %	46 %	69 %
Panský rybník	18.6 %	37.3 %	62 %	93 %
Mlýnek	56.7 %	113.4 %	189 %	283 %
Bosňák	18.4 %	36.7 %	61 %	92 %
Svatý Prokop	55.2 %	110.3 %	184 %	276 %
Hydro ID 200	21.2 %	42.4 %	71 %	106 %

Tabulka č.3 – Zanášení objemu nádrží v časovém horizontu

Výsledky vychází z předpokladu, že nádrže zachytí každý rok stejné průměrné množství sedimentu. Můžeme vidět, že za dobu menší než 30 let by rybníky Mlýnek a Svatý Prokop byly kompletně zaneseny. Při stejném postupu by za 75 let zmizely i rybníky Hydro ID 200 a Strašík, přičemž Bosňák a Panský rybník by byly zaneseny z více než 90 %.

8.4. Vyhodnocení povodí nádrží – export sedimentu

Pro další vyhodnocení byla využita již dříve vygenerovaná povodí pro konkrétní nádrže. Pomocí výstupní vrstvy Netto water erosion bylo možné získat data o celkové erozi a depozici půdy. Následně byla provedena zonální statistika na pozemcích LPIS. Díky sumě záporných hodnot eroze a kladných hodnot depozice byly zjištěny hodnoty exportu sedimentu z pozemků orné půdy (LPIS).

Poté byly vytvořeny mapové výstupy na konkrétních povodích. Tyto mapy pomáhají určit pozemky LPIS, které exportují největší množství sedimentu za rok a jsou tak výraznou zátěží pro konkrétní nádrže.

Celkem bylo pro 12 kritických nádrží vytvořeno 5 mapových výstupů. Povodí některých nádrží mají menší plochu a jsou dílčí součástí dalšího většího povodí jiné nádrže. Proto bylo v několika případech vyhodnoceno více povodí v rámci jediné mapy. V mapových výstupech nalezneme pouze pozemky, které exportují sediment. V případě, že je hodnota depozice větší než eroze, k exportu nedochází a takové pozemky v mapě nejsou zobrazeny.

Pro označení a lepší identifikaci konkrétních pozemků LPIS bylo použito unikátní označení pro každý díl půdního bloku DPB. Pro některá povodí jsou uvedeny kódy pozemků, které vykazují vysoké hodnoty exportu sedimentů. Pomocí těchto zkrácených kódů je následně možné konkrétní půdní bloky vyhledat ve veřejném registru půd (eAGRI).

Vrstva Hillslope znázorňuje množství sedimentu, které ze svahů vstupuje do konkrétního úseku vodního toku. S pomocí použití výstupní vrstvy Hillslope bylo možné určit, které pozemky LPIS v povodí přispívají sedimentem nejvíce.

Povodí Vavřineckého rybníka

Povodí Vavřineckého rybníka má celkovou plochu téměř 60 km^2. Jeho dílčí součástí jsou rovněž další povodí kritických nádrží:

- povodí Hořejšího rybníka – plocha 8,2 km^2
- povodí Nového rybníka – plocha 5,25 km^2
- povodí Panského rybníka – plocha 19,7 km^2

Pozemky, které exportují nejvíce materiálu na území Hořejšího rybníka se pohybují v rozmezí 50–70 t sedimentu za rok. Tyto pozemky jsou hlavním zdrojem sedimentu, jelikož se nacházejí přímo u vodního toku.

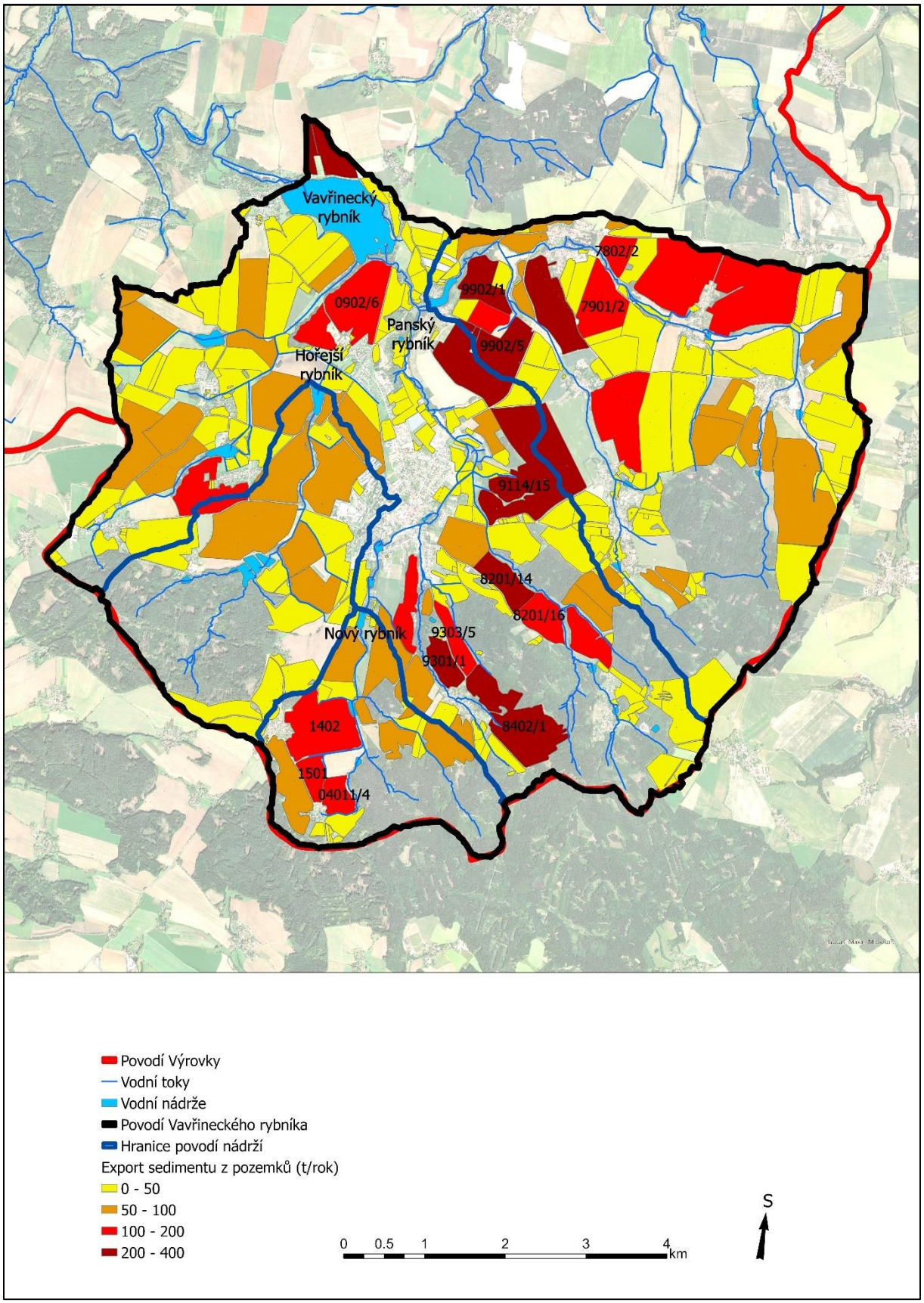
V povodí Nového rybníka se nachází tři pozemky, jejichž celkový export čítá 100-150 t sedimentu za rok a nejvýrazněji přispívají k množství, které vstupuje do nádrže. Jedná se o pozemky s označením (1402, 1501, 0401/4).

Hořejší a Nový rybník celkově patří mezi méně zasažené vodní nádrže.

Jak můžeme vidět v mapě, v povodí Panského rybníka se nachází hned několik pozemků, které exportují značnou část sedimentu, vybráno bylo několik nejvýznamnější z nich (9902/5, 9902/1, 7901/2, 7802/2).

Na celkové zanášení Vavřineckého rybníka mají vliv i již vyhodnocená dílčí povodí, ze kterých přichází přibližně 550 tun sedimentu ve vodních tocích. V části povodí, která nebyla vyhodnocena se nachází hodně pozemků, které zásobují toky sedimentem. Především jde o pozemky ve spodní části povodí v okolí vodních toků. Opět jsou zde uvedeny kódy DPB pro lepší identifikaci vybraných sedmi pozemků (8402/1, 9114/15, 9301/1, 8201/14, 8201/16, 9303/5, 0902/6).

V mapě na Obrázku 39 můžeme vidět rozložení pozemků LPIS a jednotlivých Povodí.



Obrázek 39 - Vyhodnocení povodí rybníka Vavřinec (podkladová mapa: GUGiK)

Povodí rybníka Strašík

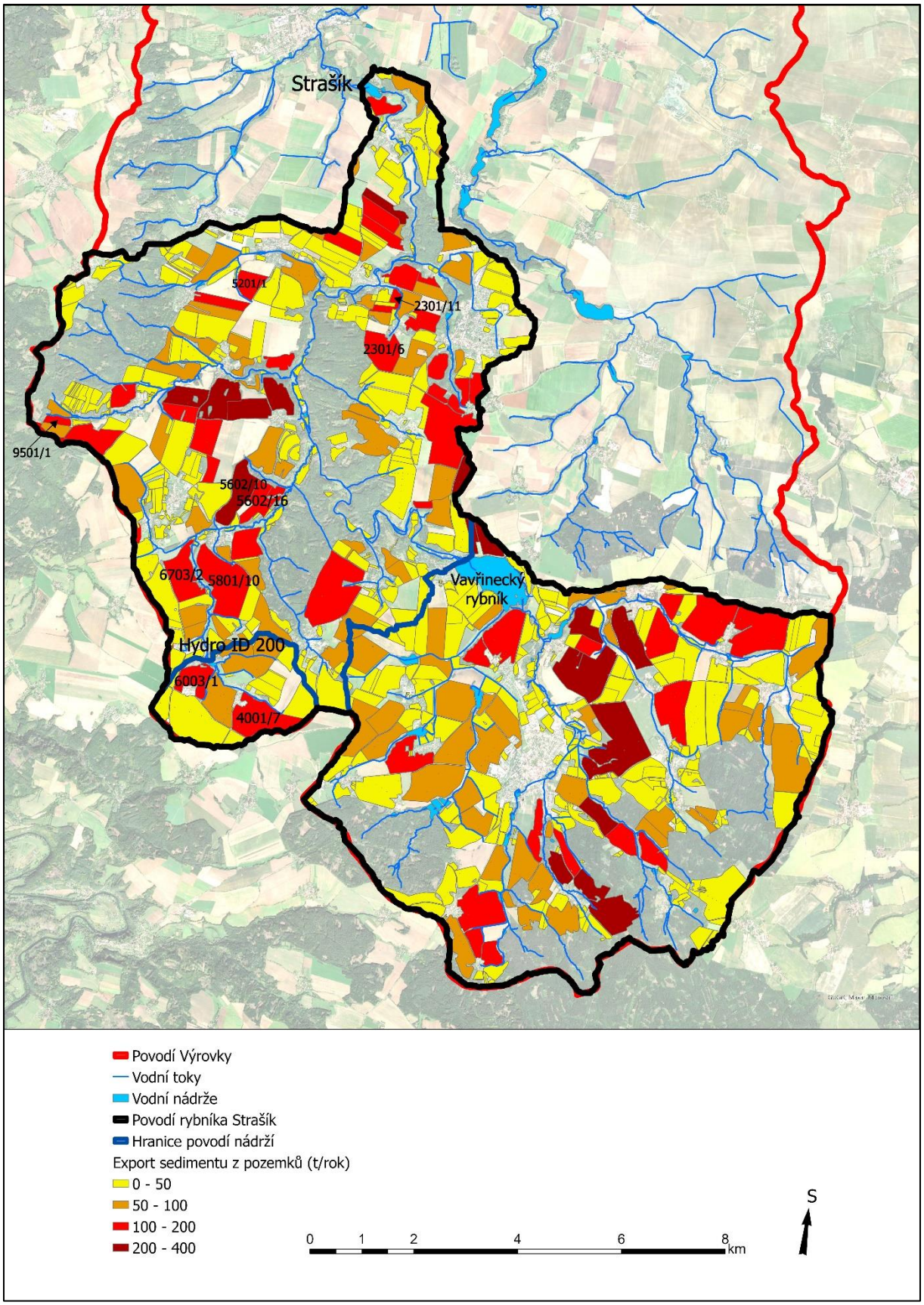
Celková plocha povodí rybníka Strašík zaujímá asi 128,5 km^2, což je zhruba polovina rozlohy řešeného povodí. Dílčí částí je i povodí Vavřineckého rybníka, které bylo celkově vyhodnoceno již v předchozí části. V této kapitole tak bylo hlavním předmětem vyhodnocování oblasti povodí za rybníkem Vavřinec. Nachází se zde také menší povodí rybníka Hydro ID 200, které má rozlohu 4,7 km^2.

V rámci povodí rybníka Strašík zachytí Vavřinecký rybník asi 91 % sedimentu, a tak se dále do povodí dostane 215 tun sedimentu. V následující části bude vyhodnocena zbývající plocha povodí nad Vavřineckým rybníkem.

Pozemků, které exportují do toků velké množství sedimentu, je v takto rozsáhlém území hodně. Na Obrázku 40 je snadné zhruba určit, které půdní bloky jsou největší zátěží. Vesměs se jedná o pozemky, které mají červenou nebo hnědou barvu a nachází se v blízkosti vodních toků. Pro lepší určení tohoto povodí by bylo třeba provést bližší analýzu výsledných hodnot exportu sedimentu na pozemcích. Přesto je opět pro identifikaci uvedeno několik kódů půdních bloků, které zde hrají významnou roli. (5801/10, 5602/10, 6703/2, 2301/6, 5602/16, 5201/1, 9501/1, 2301/11)

V rámci této kapitoly je řešeno i malé povodí bezejmenného rybníka s označením Hydro ID 200. Zde je snadné z mapy konkrétně určit, které půdní bloky přivádí do vodních toků nejvíce sedimentu.

Na Obrázku 40 můžeme vidět, že se jedná o dva červené a čtyři oranžové pozemky, které obklopují vodní toky v povodí a zásobují je materiálem. Dva pozemky s největší exportem sedimentu mají kódy 4001/7 a 6003/1.



Obrázek 40 - Vyhodnocení povodí rybníka Strašík (podkladová mapa: GUGiK)

Povodí Podbečvárského rybníka

Rybník se nachází na řece Bečvárce a jeho povodí zaujímá plochu 37,9 km^2. Součástí jsou povodí dalších dvou kritických nádrží.

- povodí rybníka Mlýnek – plocha 9,9 km^2
- povodí rybníka Bosňák – plocha 10,5 km^2

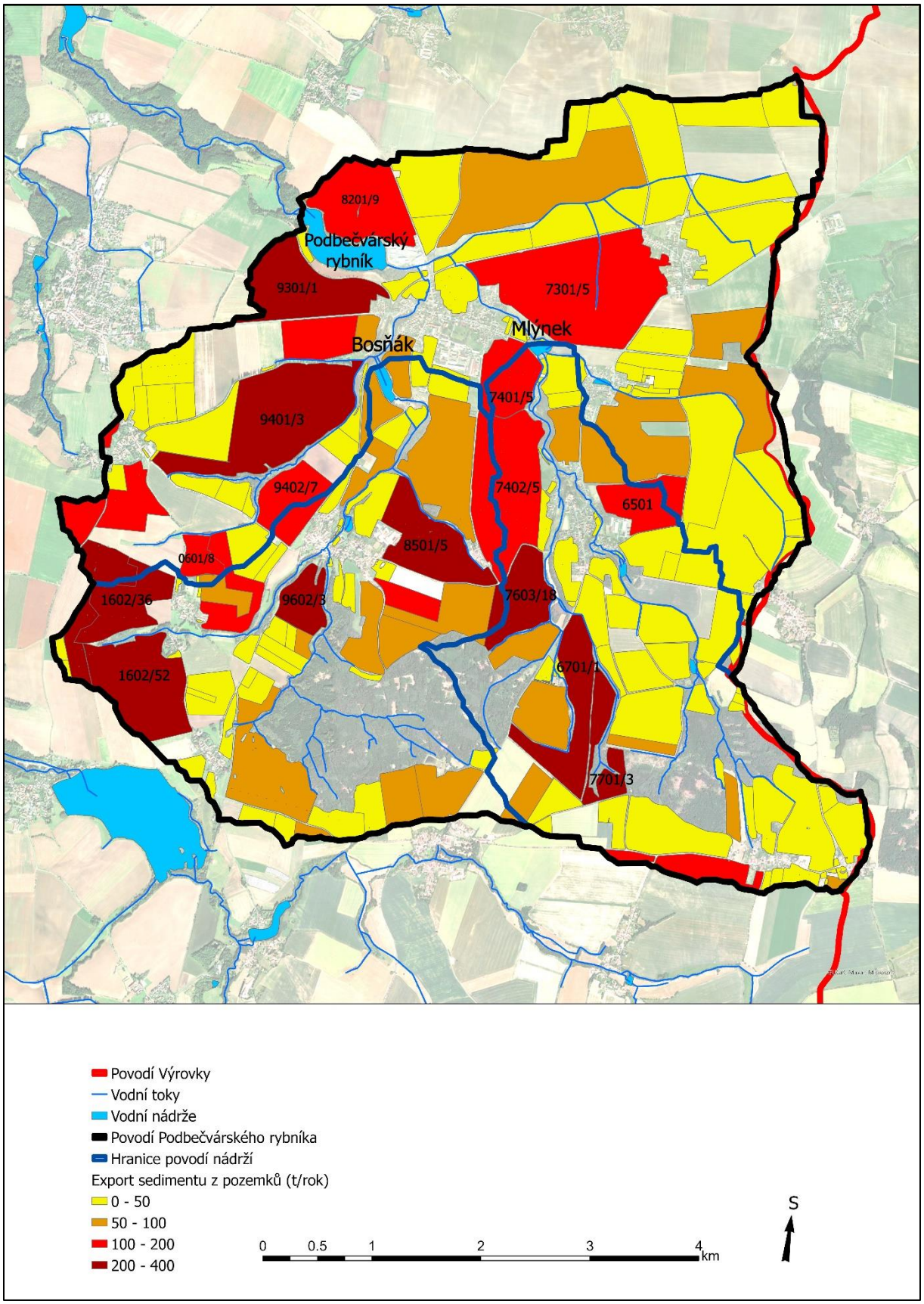
Z povodí se do rybníka Bosňák dostává téměř 1000 tun sedimentu ročně. V okolí vodních toků se nachází hned 4 pozemky, které ročně ze svého území exportují více než 200 tun sedimentu. I s přihlédnutí k datům Hillslope je vidět, že právě tyto pozemky mají největší vliv na množství sedimentu. Jedná se konkrétně o pozemky se zjednodušenými kódy DPB 8501/5, 9602/3, 1602/36, 1602/52.

Rybník Mlýnek je z hlediska množství sedimentu jedním z nejohroženějších rybníků. Z výpočtu je patrné, že se současným tempem zanášení by za poměrně krátkou dobu byl rybník z velké části zanesený. Z mapy jsou opět vybrány pozemky s největším exportem sedimentu. Pozemky se převážně nachází v západní části povodí rybníka Mlýnek. Vybráno bylo 6 pozemků s největší produkcí sedimentu a jejich kód DPB jsou 7603/18, 6701/1, 7701/3, 7401/5, 6501, 7402/5.

Z povodí těchto dvou rybníků dále projde zhruba 850 tun sedimentu. To znamená, že zbývající neřešená část povodí Podbečvárského rybníka přivede vodními toky zhruba dalších 1000 tun sedimentu. Kritické pozemky, které nejvíce přispívají mají kódy DPB: 9401/3, 7301/5, 9402/7, 0601/8.

Podbečvárský rybník rovněž přijímá 259 tun sedimentu přímo ze svahů. Důležité je tedy zmínit dva pozemky, které rybník obklopují a přivádí takové množství sedimentu. (9301/1, 8201/9)

Na Obrázku 41 opět můžeme vidět řešenou oblast s označenými rizikovými pozemky LPIS.



Obrázek 41 - Vyhodnocení povodí Podbečvárského rybníka (podkladová mapa: GUGiK)

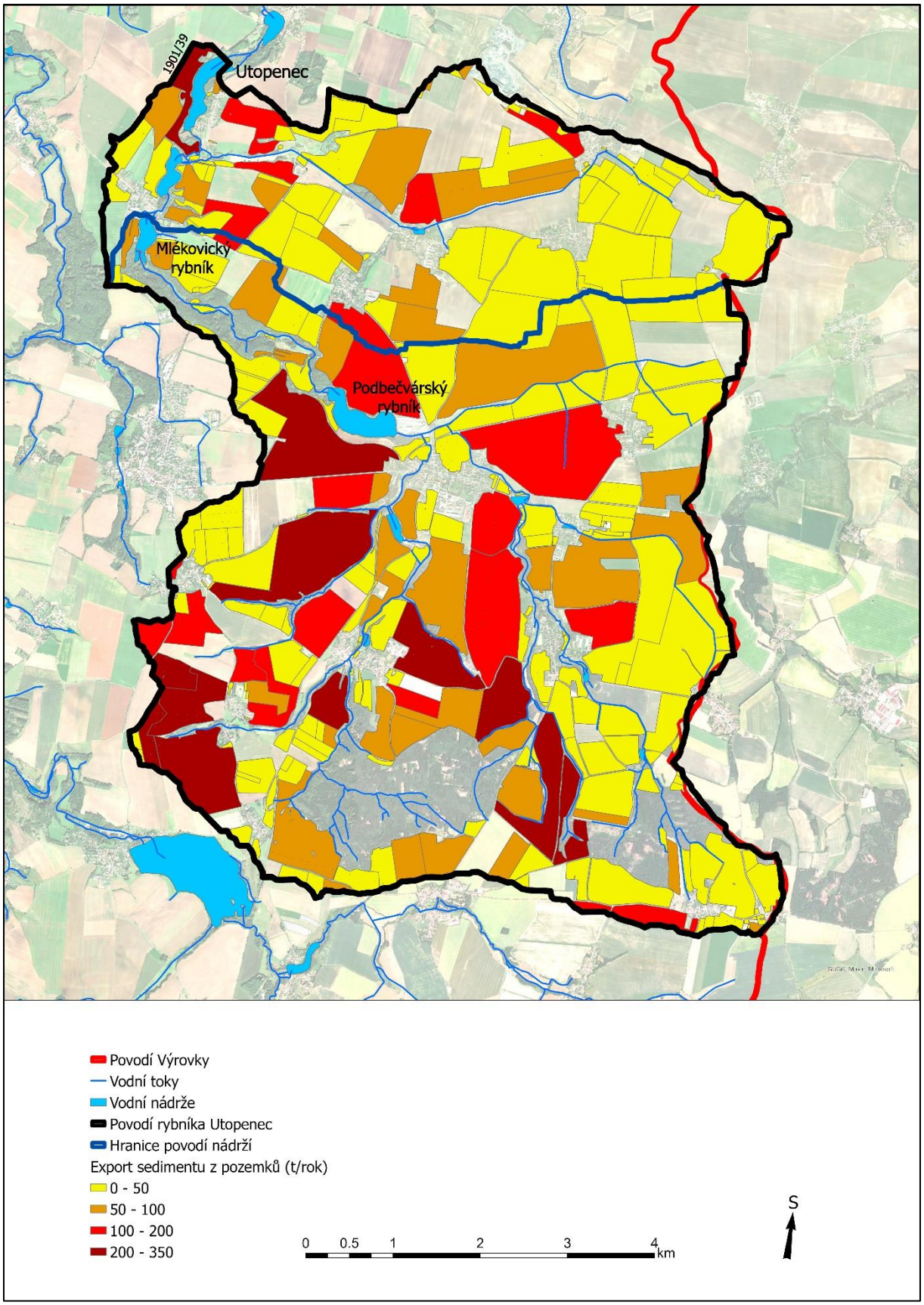
Povodí rybníka Utopenec

Utopenec leží rovněž na řece Bečvárce a jeho povodí má rozlohu 57 km^2. Velkou část plochy tvoří povodí Podbečvárského rybníka, které bylo vyhodnocováno v předchozí kapitole. Součástí je rovněž povodí Mlékovického rybníka (plocha 41,4 km^2), který se však nachází poměrně blízko za Podbečvárským rybníkem. K vyhodnocení tak zbývá malé množství pozemků. Před Utopencem se z pravé strany vlévá Voděradský potok, který výrazně přispívá k jeho zanášení právě díky exportu sedimentu z pozemků orné půdy.

Do povodí Mlékovického rybníka se za Podbečvárským rybníkem dále dostává asi 385 tun sedimentu. Nejvíce sedimentu vstupuje do vodního toku hned za výpustí z rybníka. Zde se nachází několik pozemků, u kterých se hodnoty exportu sedimentu pohybují v rozmezí 30-60 t. Na úseku toku mezi rybníky se ze svahů dostane do řeky zhruba 240 t sedimentu.

Část sedimentu, který se dostane dále, před Utopencem zachytí rybník Stojespal a dále se tak dostává poměrně malé množství. Nicméně, jak již bylo zmíněno, z pravé strany přitéká Voděradský potok, který je dalším zdroj sedimentu. Z této části přichází zhruba 200 t sedimentu. Zdrojem je několik pozemků s průměrným exportem 30-70 t.

Důležitou roli zde hraje pozemek, (kód DPB: 1901/39) který se nachází hned vedle rybníka Utopenec v horní části povodí. Tento půdní blok má celkový export sedimentu asi 350 t ročně. Nachází se přímo u rybníka a rovnou do Utopence se z něj dostává 315 t sedimentu (zhruba polovina množství, které rybník zachytí). Významnou měrou tak přispívá k větší ztrátě půdy a výraznějšímu zanášení nádrže.

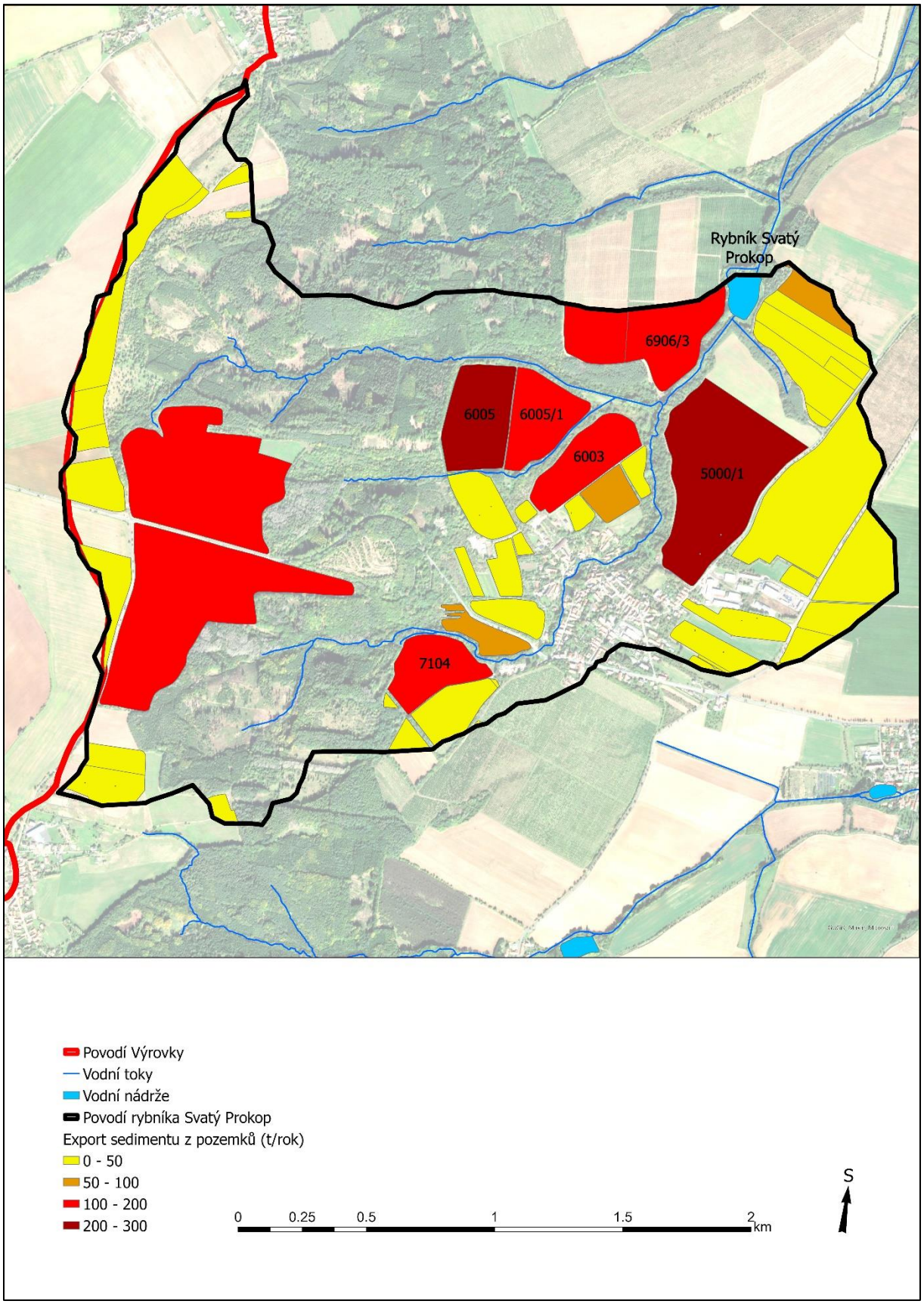


Obrázek 42 - Vyhodnocení povodí rybníka Utopenec (podkladová mapa: GUGiK)

Povodí rybníka Svatý Prokop

Rybník Svatý Prokop, nacházející se na vodním toku Střebovka, má povodí o ploše 5,5 km^2. Mezi kritickými nádržemi se řadí k těm nejmenším. Proto ho vysoké množství přicházejícího sedimentu řadí k ohroženým rybníkům. Malá plocha povodí značí, že pozemky zde exportují velké množství sedimentu.

V malém povodí rybníka Svatý Prokop je možné dobře identifikovat hlavní zdroje sedimentu. Rybník se nachází v začátku toku Střebovka. V povodí se nenachází jiná vodní nádrž, a tak veškerý sediment ve vodním toku přichází až do rybníka. V území se nachází hned několik pozemků s výrazným exportem. Dva z nich s hodnotami 260-280 t sedimentu ročně (kódy DPB: 6005, 5001/1) a k nim se přidává několik dalších s exportem 120-170 t (kódy DPB: 6005/1, 6003, 6906/3, 7104). Celkem se v povodí dostane do vodního toku téměř 1100 t sedimentu. Taková hodnota je pro menší rybník (s poměrem zachycení 71 %) poměrně výraznou zátěží. Stejně jako u rybníka Mlýnek tak hrozí, že současným tempem by byl rybník v řádu několika let z velké části zanesený.



Obrázek 43 - Vyhodnocení povodí rybníka Svatý Prokop (podkladová mapa: GUGiK)

9. Závěr

Cílem práce bylo provedení analýzy řešeného území z hlediska eroze půdy a následného transportu sedimentů.

V úvodní části práce proběhlo seznámení s řešeným povodím řeky Výrovky (265 km^2), ve kterém se nachází 70 vodních nádrží. Byla provedena analýza na základě využití území a přírodních poměrů. Pro cíl práce byly hlavní částí hydrologické poměry v území.

Následovalo detailní popsání problematiky eroze půdy a jejích důsledků. Přiblíženy byly konkrétní druhy eroze. Hlavním předmětem práce však byla vodní eroze půdy. Ve stručnosti byly rozebrány rovněž možnosti ochrany proti erozi a metoda USLE pro výpočet ztráty půdy.

Další část práce byla věnována modelu WaTEM/SEDEM. Po uvedení hlavních principů modelu a nahlédnutí do prostředí modelu byla popsána nejdříve vstupní a poté i výstupní data modelu.

Praktická část bakalářské práce se skládá ze dvou částí. Pomocí požadovaných charakteristik vodních nádrží byly vypočteny poměry zachycení pro každou nádrž a následně bylo možné přistoupit k samotnému výpočtu v modelu WaTEM/SEDEM. Výsledkem těchto výpočtů byly stěžejní hodnoty množství sedimentu v povodí. Jednalo se především o množství vyprodukovaného materiálu, export sedimentu do vodních toků, část sedimentu, která projde dále uzávěrovým profilem dále a rovněž o množství splavenin, které bylo zachyceno ve vodních nádržích.

V druhé části šlo o vyhodnocení získaných dat. Nejdříve bylo vybráno 12 kritických nádrží a na nich bylo provedeno vyhodnocení z hlediska množství zachyceného sedimentu. Na základě těchto výsledků byla provedena teoretická predikce míry ročního zanášení kritických nádrží.

Závěrečnou částí bylo vyhodnocení povodí konkrétních nádrží. Na jejich povodích byly zobrazeny pozemky LPIS s určenými hodnotami množství sedimentu, který pozemky ze svých ploch ročně exportují.

Hodnoty, které jsou výsledkem této práce, značí, že i na dílčí části povodí jednoho z přítoků Labe ročně registrujeme značná množství sedimentů ve vodních zdrojích. Je tak zřejmé, že procesy eroze a transportu sedimentů je třeba intenzivně řešit, jelikož ovlivňují prostředí kolem nás více, než se na první pohled může zdát.

10. Použitá literatura a podklady

- BAUER, Miroslav, 2018. Posuzování erozní ohroženosti vodních nádrží sedimentem s využitím modelu WATEM/SEDEM. Disertační práce, ČVUT, Praha [Online]. [cit. 04/2022]. 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.
- ČHMÚ, Hlásná a předpovědní povodňová služba [Online]. Evidenční list hlásného profilu č. 60 – Plaňany. Český hydrometeorologický ústav [cit. 24.4.2022]. Dostupné z: https://hydro.chmi.cz/hpps/popup_hpps_prfdyn.php?seq=307024
- ČHMÚ, 2021. Resort životního prostřední. Český hydrometeorologický ústav. Územní srážky [Online]. [cit. 19.4.2022]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-srazky
- ČHMÚ, 2021. Resort životního prostřední. Český hydrometeorologický ústav. Územní teploty [Online]. [cit. 19.4.2022]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty#
- ČÚZK, Geoportál ČÚZK, 2010. RÚIAN-výstupy [Online]. [cit. 04/2022]. Dostupné z: https://geoportal.cuzk.cz/(S(ao5zz3jkaw1ftjgzzbas001i))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=dSady_RUIAN_vse&text=dSady_RUIAN_vse&head_tab=sekce-02-gp&menu=331

- ČÚZK, Geoportál ČÚZK, 2010. Základní báze geografických dat České republiky (ZABAGED®) – polohopis. [Online]. [cit. 04/2022]. Dostupné z: https://geoportal.cuzk.cz/(S(ao5zz3jkaw1ftjgzzbas001i))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=zabaged&metadataID=CZ-CUZK-ZABAGED-VP&mapid=8&head_tab=sekce-02-gp&menu=241
- 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. 04/2022]. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=DtKAYefXXbkC&oi=fnd&pg=P#v=onepage&q&f=false
- DOSTÁL, Tomáš, 2021. 2.přednáška [online]. Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, Fakulta stavební, ČVUT v Praze. [cit. 20.4.2022]. Dostupné z: https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/YPEO/eroze%2002_klasifikace.pdf
- DOSTÁL, Tomáš, 2021. 5.přednáška-Predikce erozních procesů [online]. Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, Fakulta stavební, ČVUT v Praze. [cit. 24.4.2022]. Dostupné z: https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/YPEO/eroze%2005_USLE.pdf
- DOSTÁL, Tomáš, 2021. 7.přednáška-Protierozní opatření [online]. Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, Fakulta stavební, ČVUT v Praze. [cit. 20.4.2022]. Dostupné z: https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/YPEO/eroze%2007_technicka%20PEO.pdf

- Esri. ArcGIS Pro. An overview of the Hydrology toolset [Online]. Copyright © 1995–2020 Esri. [cit. 27.4.2022]. Dostupné z: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm
- GUGik, 2022. Główny Urząd Geodezji i Kartografii in Warsaw (Head Office od Geodesy and Cartography) [cit. 10.5.2022].
- HOLÝ, M., 1994. Eroze a životní prostředí, ČVUT, Praha.
- Horniny GeoČR50, Geologická mapa 1:50 000. In: Geovědní mapy 1:50 000 [online]. Praha: Česká geologická služba [cit. 2.5.2022]. Dostupné z: https://mapy.geology.cz/geocr50/
- Hydroekologický informační systém VÚV TGM, 2012. Listy Základní vodohospodářské mapy 1:50000 [Online]. [cit. 04/2022]. Dostupné z: https://heis.vuv.cz/data/webmap/datovesady/HEIS/ZVM50/
- Hydroekologický informační systém VÚV TGM [Online]. Mapa Vodní hospodářství a ochrana vod. Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka [cit. 04/2022]. Dostupné z: https://heis.vuv.cz/data/webmap/isapi.dll?map=mp_heis_voda&TMPL=HVMAP_MAIN&IFRAME=0&lon=15.4871695&lat=49.7692482&scale=3870730
- JANEČEK, Miloslav a kol., 2012. Ochrana zemědělské půdy před erozí: Metodika [Online]. [cit. 2.5.2022]. ISBN 978-80-87415-42-9. Dostupné z: https://knihovna.vumop.cz/files/90
- KADLEC, Václav a kol., 2014. Navrhování technických protierozních opatření. [Online]. Praha [cit. 10.4.2022]. Dostupné z: http://www.cmkpu.cz/upload/files/Metodika_TPEO.pdf

- KLÍMOVÁ, Hana, 2022. Kvantifikace zdrojů erozního sedimentu v povodí Výrovky. Diplomová práce, ČVUT, Praha [Online]. [cit. 04/2022]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/99724/F1-DP-2022-Klimova-Hana-DP_Klimova.pdf?sequence=-1&isAllowed=y
- KOZLOVSKY DUFKOVÁ, Jana, 2019. Větrná eroze-literární rešerše [online]. [cit. 20.4.2022]. Dostupné z: https://www.ctpz.cz/vyzkum/vetrna-eroze-a-literarni-reserse-912
- KRÁSA, Josef a kol., 2013. Hodnocení ohroženosti vodních nádrží sedimentem a eutrofizací podmíněnou erozí zemědělské půdy [Online]. [cit. 04/2022]. Dostupné z: https://eagri.cz/public/web/file/319818/metodika_nadrze_2013.pdf
- KRÁSA, Josef, 2010. Empirické modely vodní eroze v ČR. Habilitační práce, ČVUT, Praha [Online]. [cit. 04/2022]. Dostupné z: https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/osobni%20stranky/Krasa%20Josef/habilitace_krasa_2010.pdf
- KRÁSA, Josef, 2004. Hodnocení erozních procesů ve velkých povodí za podpory GIS. Disertační práce, ČVUT, Praha [online]. [cit.04/2022]. Dostupné z: https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/osobni%20stranky/Krasa%20Josef/Dizertace_krasa.pdf
- KUKOL, Jan, 2013. Eutrofizace vodních nádrží. Bakalářská práce, VUT, Brno [online]. [cit. 4.4.2022]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=75437

- K.U. Leuven, Physical and Regional Geography Research Group, 2006. WaTEM / SEDEM version 2006 Manual [Online]. [cit. 1.5.2022]. Dostupné z: https://ees.kuleuven.be/geography/modelling/watemsedem2006/manual_watemsedem_122011.pdf
- KUNZE, David, 2017. Eutrofizace povrchových vod. Bakalářská práce, Mendelova univerzita v Brně [Online]. [cit. 10.4.2022]. Dostupné z: https://theses.cz/id/vqsegy/21354177
- LEMBERK, V., 2020. Současný stav hráze rybníka Strašík v místě protržení. [Fotografie]. In: VD Strašík, obnova vodního díla. Vodní zdroje Ekomonitor spol. s r.o., 2021. [Online]. Str.52 [cit. 3.5.2022]. Dostupné z: https://portal.cenia.cz/eiasea/download/RUlBX1NUQzIzODhfb3puYW1lbmlET0NfNzYyNDMxODg1MTE0MDA4MTMzOS5wZGY/STC2388_oznameni.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, 2022. Veřejný export dat LPIS (Portál farmáře, eAGRI) [online]. [cit. 05/2022]. Dostupné z: https://eagri.cz/public/web/mze/farmar/LPIS/uzivatelske-prirucky/prirucky-pro-verejny-lpis/export-dat-lpis.html
- Ministerstvo zemědělství, 2018. Vodní eroze půdy (Portál farmáře, eAGRI) [online]. [cit. 29.3.2022]. Dostupné z: https://eagri.cz/public/web/mze/puda/ochrana-pudy-a-krajiny/degradace-pud/vodni-eroze-pudy/
- MISTR, Martin a kol., 2016. Stanovení faktoru ochranného vlivu vegetace pomocí simulátoru deště [Online]. [cit. 22.4.2022]. Dostupné z: https://knihovna.vumop.cz/files/903

- NOVOTNÝ, Ivan a kol., 2017. Příručka ochrany proti erozi zemědělské půdy [Online]. [cit. 22.4.2022]. ISBN 978-80-7434-362-9. Dostupné z: https://eagri.cz/public/web/file/293635/MZE_prirucka_ochrany_proti_erozi_zemedelske_pudy_2017.pdf
- Půdní typologie, Půdní mapa. In: Půdní mapa 1:50 000 [online]. Praha: Česká geologická služba [cit. 2.5.2022]. Dostupné z: https://mapy.geology.cz/pudy/
- RENARD, K. et al., 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). US Department of Agriculture, Washington, DC, USA. [Online]. [cit. 04/2022]. Dostupné z: https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/64080530/RUSLE/AH_703.pdf
- SKLENÁŘOVÁ, Martina, 2008. Eroze půdy v ČR. Diplomová práce, Univerzita Palackého v Olomouci. [online]. [cit. 30.3.2022]. Dostupné z: https://geography.upol.cz/soubory/studium/dp/2008/2008_Sklenarova.pdf
- SMITH V H., 2009. Eutrophication [Online]. University of Kansas, Lawrence, KS, USA. [cit. 10.4.2022]. Dostupné z: http://globalpnetwork.net/sites/default/files/Smith_2009_eutrophication_review.pdf
- SMRČEK, Lubomír, 2010. Eroze zemědělské půdy pohledem pro poradce pro zemědělce [Online]. [cit. 04/2022]. Dostupné z: http://bioinstitut.cz/documents/Lubomir_SmrcekANTI.pdf
- STŘEDOVÁ, Hana, STŘEDA, Tomáš a ROŽNOVSKÝ, Jaroslav, 2017. Snow as a cause of soil erosion – methodological approach of determination [online]. [cit. 22.4.2022]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/319964644_Snow_as_a_cause_of_soil_erosion_-_methodological_approach_of_determination

- 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.
- VLÁČILOVÁ, Markéta, 2016. Protierozní ochrana – 5.cvičení. Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, Fakulta stavební, ČVUT v Praze. [cit. 11.5.2022]. Dostupné z: https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/PROZ/PROZ_cviceni/2015_proz_cvic_5.pdf
- Vodní zdroje Ekomonitor spol. s r.o., 2021. VD Strašík, obnova vodního díla [Online]. [cit. 3.5.2022]. Dostupné z: https://portal.cenia.cz/eiasea/download/RUlBX1NUQzIzODhfb3puYW1lbmlET0NfNzYyNDMxODg1MTE0MDA4MTMzOS5wZGY/STC2388_oznameni.pdf
- VÚMOP v.v.i., 2019. eKatalog BPEJ. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd v.v.i. [online]. [cit. 04/2022]. Dostupné z: https://bpej.vumop.cz/
- VÚMOP v.v.i. 2022. Eroze půdy. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd v.v.i. [online]. [cit. 22.4.2022]. Dostupné z: https://www.vumop.cz/eroze-pudy
- Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd, v.v.i., 2017. Webová encyklopedie [online]. [cit. 24.4.2022]. Dostupné z: https://encyklopedie.vumop.cz/index.php/Soubor:4-5.png

- Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd, v.v.i., 2017. Webová encyklopedie [online]. [cit. 24.4.2022]. Dostupné z: https://encyklopedie.vumop.cz/index.php/Soubor:4-17.jpg
- Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, veřejná výzkumná instituce – Odbor ochrany vod a informatiky, 2020. Struktura Dibavod [online]. [cit. 04/2022]. Dostupné z: https://www.dibavod.cz/27/struktura-dibavod.html
- WINTEROVÁ, Julie, 2020. Transport splavenin v povodí VN Vrchlice. Diplomová práce, ČVUT, Praha [Online]. [cit. 27.4.2022]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/93140/F1-DP-2021-Winterova-Julie-Winterova_DP.pdf?sequence=-1&isAllowed=y
- WISCHMEIER, W.H. and SMITH, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses. Agriculture handbook No.537 [Online]. [cit. 04/2022]. Dostupné z: https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF. In Klímová, 2022.