

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav hospodářské úpravy lesů a aplikované
geoinformatiky



Lesnická
a dřevařská
fakulta

Mendelova
univerzita
v Brně



Porovnání výškopisných modelů ČR pro výpočet
vodní eroze v okolí obce Horní Dunajovice

Diplomová práce

zde vložit list zadání diplomové práce!

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: Porovnání výškopisných modelů ČR pro výpočet vodní eroze v okolí obce Horní Dunajovice zpracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů⁸ spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne:

Podpis:

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu Ing. Tomáši Mikitovi, Ph.D. za ochotu, trpělivost a cenné rady při zpracování této kvalifikační práce, Ing. et Ing. Stanislavu Carbolovi za rady a konzultace. Rád bych také poděkoval své přítelkyni za její pozitivní energii a motivaci, kterou mě během psaní diplomové práce zásobovala. Chci také vyjádřit díky svým rodičům za umožnění studia a veškerou podporu při něm, bez nich bych studium nemohl začít, natož ho ukončit.

Autor: Bc. Josef Cyrek

Název: Porovnání výškopisných modelů ČR pro výpočet vodní eroze v okolí obce Horní Dunajovice

Abstrakt

Erozní procesy způsobují vážné ekologické a ekonomické problémy vzhledem k jejich negativním dopadům na degradaci půdy a zhoršení kvality vody, jakož i na životní prostředí jako celek. Vodní eroze způsobuje vyplavování jemných půdních částic, živin a organických složek z půdy.

Klíčová slova

Eroze, Geografické informační systémy (GIS), Základní Báze Geografických dat (ZABAGED), Digitální model reliéfu 4. generace (DMR 4G), Digitální model reliéfu 5. generace (DMR 5G), Revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy (RUSLE).

Author: Bc. Josef Cyrek

Title: Comparison of elevation models Czech republic to calculate water erosion near the village of Horni Dunajovice

Abstract

Erosion processes cause serious ecologic and economic problems because of their negative consequences in terms of soil and water deterioration as well as for the environment as a whole. Water erosion implicates that the fine soil particles, nutrients and organic components are washed out.

Keywords

Erosion, Geographic information system (GIS), ZABAGED, DMR 4G, DMR 5G, Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).

OBSAH

ÚVOD	9
1. CÍL PRÁCE	11
2. ÚVOD DO PROBLEMATIKY VÝZKUMU EROZE	12
2.1 Vysvětlení pojmu eroze půdy	12
2.2 Druhy eroze.....	13
2.2.1 Formy vodní eroze	13
2.2.2 Faktory podmiňující vodní erozi.....	14
2.3 Rozšíření eroze	16
2.4 Historie výzkumu eroze ve světě	16
2.5 Důsledky erozních procesů	19
2.6 Ohroženost zemědělských půd vodní erozí	19
2.7 Posouzení erozní ohroženosti	20
2.8 Výzkum vodní eroze	20
2.8.1 Vodní eroze ve světě.....	20
2.8.2 Vodní eroze v České republice	21
2.9 Dopady vodní eroze na zemědělské hospodaření.....	22
2.9.1 Dobrý zemědělský a environmentální stav půdy (DZES)	23
3. MODEL Y PRO VÝPOČET EROZE	26
3.1 Univerzální rovnice ztráty půdy (USLE).....	26
3.2 Model WATEM/SEDEM	28
3.2.1 Popis modelu WATEM/SEDEM.....	28
3.2.2 Výpočet modelu WATEM/SEDEM	29
3.3 Model USLE2D	30
3.4 Model Erosion 3D.....	32
3.4.1 Popis modelu Erosion 3D	32
3.4.2 Vstupní parametry modelu Erosion 3D	33
3.5. Model Atlas EROZE.....	34
3.5.1 Popis modelu Atlas EROZE	34
3.5.2 Výpočet eroze v modelu Atlas EROZE	34
4. PŘÍRODNÍ POMĚRY ÚZEMÍ	36
4.1 Základní údaje o lokalitě.....	36

4.2 Širší územní vztahy.....	37
4.2.1 Geologické a geomorfologické podmínky.....	37
4.2.2 Hydrologické a hydrobiologické poměry	38
4.2.3 Klimatické poměry	39
4.2.4 Pedologické podmínky	41
4.2.5 Současné využití krajiny	43
5. ANALÝZA TVORBY DIGITÁLNÍHO MODELU TERÉNU.....	45
5.1. Tvorba digitálních modelů terénů (DMT)	45
5.1.1. ZABAGED	45
5.1.2. Digitální model reliéfu 4. generace (DMR 4G).....	49
5.1.3. Digitální model reliéfu 5. generace (DMR 5G).....	50
5.2. Analýza výpočtu eroze – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G.....	51
6. DISKUSE.....	59
7. ZÁVĚR	62
8. SUMMARY	63
9. POUŽITÁ LITERATURA	64
10. SEZNAM TABULEK	67
11. SEZNAM OBRÁZKŮ.....	68
12. SEZNAM ZKRATEK	69
13. SEZNAM WEBOVÝCH STRÁNEK	71
13. SEZNAM GRAFŮ	72
14. PŘÍLOHY	73

ÚVOD

Půda jako základní výrobní prostředek zemědělství v různých sférách životního prostředí vyžaduje zejména ochranu. Úbytek kvalitních zemědělských půd je celosvětově vnímán jako velký problém, týkající se nejen rozvojových zemí. Jako hlavní hrozbu pro životní prostředí a zemědělství uvádí Pimentel (1995) vodní erozi. Eroze půdy zapříčiňuje ztráty půdní úrodnosti, redukci hloubky kořenové zóny, odnos živin a úbytek vláhy (Lal, 2001).

Nepříznivé účinky eroze, zvláště urbanizačními a industrializačními procesy, se tedy projevují nejen v ohrožení půdy, ale také v ohrožení dalšího základního přírodního zdroje – vody. Zvýšená pozornost byla erozi a ochraně půdy věnována od 30. a 40. let 20. století. V té době však šlo o složité výpočty analogovou cestou a k rozvoji a širšímu využití došlo teprve s nástupem výpočetní techniky. S rozšířením použití geografických informačních systémů (GIS), zhruba od devadesátých let, umožňuje GIS výpočet eroze. Lidská činnost v souvislosti s odlesněním a obhospodařováním má značný vliv na rozrušování půdy a její erozi. Tento vliv má dalekosáhlý dopad na dané území, proto včasná a účinná predikce erozních jevů může výrazně přispět k ochraně těchto území před ničivými dopady eroze.

Právě k tomuto účelu byly vyvinuty modely a postupy simulující odnos sedimentů z daného území v závislosti na přírodních charakteristikách krajiny nebo na formě hospodaření na daném území. S rozvojem všech technologií v této oblasti došlo k vývoji velkého množství programů pro řešení srážkoodtokového a erozního modelování. Na jednu stranu je výhodou, že lze k řešení využívat mnoho výpočetních modelů a postupů, ale současně tato rozmanitost znesnadňuje výběr, neboť každý model přistupuje k simulaci z jiného pohledu. Právě nesourodost všech vstupů, výstupů, možností a nutnost pochopení procesů i samotného uživatelského prostředí a rozhraní modelů či výpočetních procesů může být matoucí při výběru modelu k srážkoodtokovému řešení erozních procesů.

Dnes je výpočet erozních procesů prováděn takřka výhradně s pomocí výpočetní techniky. Simulační modely se stále rozvíjejí a umožňují dříve nedosažitelné podrobné zkoumání přírodních jevů. Množství ploch, které je nutno takto zkoumat dosahuje mnoha tisíců kilometrů čtverečních. I při využití moderní výpočetní techniky je limitováno objemem dat a náročností výpočtu. I proto nacházejí uplatnění robustní

a jednoduché empirické modely modifikované pro výpočet pomocí GIS, který umožňuje nejen rychlý výpočet, ale i vhodnou prezentaci výsledků.

Matematickým vyjádřením vlivu uvedených faktorů na erozní smyv je tzv. Univerzální rovnice ztráty půdy (USLE) nebo její modifikovaná verze RUSLE (Revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy). Použití RUSLE pro výpočet erozní ohroženosti má i značné nevýhody, které budou v této práci dále diskutovány, pro svoji jednoduchost a přístupnost vstupních dat je však tento postup v podmínkách našeho zájmového území stále nejrozšířenější. Při výpočtu je třeba brát v úvahu všechna jeho omezení.

V rozmezí posledních několika let zaznamenáváme po rozvoji výpočetní techniky i softwarového vybavení významný pokrok také v případě kvality a dostupnosti vstupních dat, která jsou pro nasazení automatizovaných způsobů výpočtů zcela klíčové. Programy, modely a výpočetní systémy jsou dnes vybaveny co nejpřístupnějším uživatelským rozhraním, které umožňuje aplikaci prakticky každému kvalifikovanému uživateli. Většina těchto modelů pracuje na společné GIS platformě, která umožňuje na standardních datových formátech generovat vstupní vrstvy pro jednotlivé analýzy (Dostál a kol., 2014).

1. CÍL PRÁCE

Hlavním cílem práce je porovnání využitelnosti, vhodnosti a přesnosti dostupných výškopisných modelů (Základní Báze Geografických dat - ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G) a zároveň jejich komparace v rámci dvou rozdílných modelů výpočtu LS faktoru (Mitášová, SAGA GIS). Cílem je také srovnání výsledků v prostředí geoportálu SOWAC-GIS (Soil and Water Conservation Geographic Information System). Geoportál SOWAC-GIS je zaměřen na ochranu půdy, krajiny a vody na území České republiky a jeho provozovatelem je Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i. (VÚMOP). Tento ústav poskytnul data pro srovnání potenciální ohroženosti ZPF (zemědělský půdní fond) pro zvolené zájmové území obce Horní Dunajovice. Tato práce se dále bude zabývat pouze erozí vodní, která je v podmínkách zájmového území převažující a přináší tak řadu problémů ve vodohospodářské a zemědělské oblasti.

2. ÚVOD DO PROBLEMATIKY VÝZKUMU EROZE

2.1 Vysvětlení pojmu eroze půdy

Eroze je přírodní proces, při kterém působením vody, větru, ledu a případně jiných činitelů, dochází k rozrušování a přeměně zemského povrchu a transportu půdních částic a jejich následné usazování. Poznání, že člověkem zvýšený rozsah a zrychlený průběh eroze jej může ohrozit je však relativně nové a věda o erozi a protierozní ochraně – erodologie byla ještě začátkem minulého století téměř neznámá (Janeček a kol., 2008).

Slovo „eroze“ je latinského původu a je odvozeno od slova „erodere“ – rozhlodávat. V nejširším smyslu slova pojmem „eroze“ rozumíme rozrušování litosféry, respektive pedosféry pohybující se hmotu erogenního původu. V současné době se eroze definuje jako komplexní proces, zahrnující rozrušování půdního povrchu, transport a sedimentaci uvolněných půdních částic působením vody, větru, ledu a jiných tzv. erozních činitelů.

Hlavními činiteli způsobujícími erozi jsou klima, topografie, vegetace, půda a lidský faktor – způsob hospodaření na půdě. Každý z těchto činitelů vykazuje určitou variabilitu. Proto je určení erozní ohroženosti tím efektivnější, čím detailněji plochu šetříme. Matematickým vyjádřením vlivu uvedených faktorů na erozní smyv je tzv. Univerzální rovnice ztráty půdy Universal soil lost equation – USLE (Janeček, 2005).

Erozním působením se zemský povrch na jedné straně snižuje – degraduje, na druhé straně hromaděním usazených hmot vyvyšuje – agraduje. Výsledkem toho je zarovnání zemského povrchu – planace (Janeček a kol., 2008).

Výraz eroze půdy se v literatuře začal běžně používat ve 30. a zejména ve 40. letech minulého století. Na vymezení a zpřesnění jeho obsahu má hlavní zásluhu světoznámý americký erodolog H. H. Bennet se svými spolupracovníky.

Bennet (1939) rozlišuje erozi normální neboli geologickou, kterou nazývá přirozenou a erozi zrychlenou. Úkolem ochranných opatření je snížení lidským působením zrychlené eroze na úroveň normální, geologické eroze. Je známo, že klima má značný vliv na rychlost eroze. Neuvažujeme-li vliv reliéfu, který je bezesporu největší, je známo, že eroze bývá nejrychlejší v semiaridním klimatu.

Eroze ochuzuje zemědělské půdy o nejurodnější část – ornici, zhoršuje fyzikálně-chemické vlastnosti půd, zmenšuje mocnost půdního profilu, zvyšuje šterkovitost, snižuje obsah živin a humusu, poškozují plodiny a kultury, znesnadňuje pohyb strojů po pozemcích a způsobuje ztráty osiv a sadby, hnojiv a přípravků na ochranu rostlin. Transportované půdní částice a na nich vázané látky znečišťují vodní zdroje, zanášejí akumulární prostory nádrží, snižují průtočnou kapacitu toků, vyvolávají zakalení povrchových vod, zhoršují prostředí pro vodní organismy, zvyšují náklady na úpravu vody a těžbu usazenin (Janeček a kol., 2008).

2.2 Druhy eroze

Podle erozních činitelů je možné erozi třídit na erozi vodní (akvatickou, či fluviální), větrnou (eolickou), ledovcovou (glaciální), sněhovou (niviální) a další.

Působením exogenních činitelů eroze vznikají na svazích, resp. na zemském povrchu určité útvary. Třídění erozních jevů podle těchto útvarů, tzv. forem, naráží na celou řadu překážek, neboť eroze je jednou z forem modelování území (Krása, 2004).

2.2.1 Formy vodní eroze

Vodní eroze se ve svých projevech liší zejména v závislosti na soustředěnosti a množství povrchového odtoku. Rozlišujeme tři hlavní formy povrchové vodní eroze:

- erozi plošnou
- erozi výmolovou
- erozi proudovou

Plošná eroze je charakterizována rozrušováním a smyvem půdní hmoty na celém území. Čím je plocha svahu rovnější, tím jsou podmínky pro soustředování vody menší. Avšak i dokonale urovnaný povrch nemůže zabránit soustředování vody na svahu do rýžek, a proto se dá plošná eroze těžko oddělit od výmolové. Působením plošné eroze se profil půdy postupně snižuje, v některých případech až na skalní podloží (Janeček a kol., 2008).

Plošná eroze je eroze selektivní (výběrová), při níž povrchový odtok odnáší jemné půdní částice a na ně vázané chemické látky. Dochází tak ke změně půdní textury a obsahu živin v půdě. Půdy podléhající selektivní erozi (horní svahové části) se stávají více hrubozrnnými a mají snížený obsah živin, půdy obohacené smyvem (úpatí svahů)

jsou jemnozrnější a bohaté na živiny. Selektivní eroze probíhá pozvolna, často nepozorovaně, a nezanechává viditelné stopy (Janeček a kol., 2012).

Dalším typem eroze je **eroze výmolová**. Vzniká postupným soustředováním povrchově stékající vody, která vyrývá v půdním povrchu zářezy, jež se postupně prohlubují.

První částí výmolové vodní eroze je eroze **rýžková** a **brázdová**. Při rýžkové erozi vznikají v půdním povrchu drobné úzké zářezy, které vytvářejí na postiženém svahu hustou síť. Brázdová eroze se vyznačuje mělkými širšími zářezy, jejich četnost na svahu je menší, než je tomu u eroze rýžkové. Vzhledem k okolnostem, kdy rýžková a brázdová eroze postihují obvykle velkou část povrchu svahu, označuje se tato eroze často za nejvyšší stadium plošné eroze. Z malých rýžek a brázd vznikají soustředěným odtokem hlubší rýhy, které se směrem po svahu postupně prohlubují. Ty jsou pak výsledkem rýhové eroze, a ta následně přechází ve vyšší stupeň – tzv. erozi **výmolovou**, která přechází v nebezpečnou, území devastující erozi **stržovou**. Výsledkem výmolové a stržové eroze jsou hluboké výmoly a strže (Krása, 2004).

Proudová eroze probíhá ve vodních tocích působením vodního proudu. Je-li však rozrušováno pouze dno, mluvíme o erozi dnové, jsou-li naopak rozrušovány břehy, jde o erozi břehovou. **Dnová** eroze je formou podélné eroze, prohlubující podélné osy toku, naproti tomu **břehová** eroze probíhá směrem kolmo na osu toku. Nejvýrazněji se projevuje proudová eroze v bystřinách, které nesou obvykle velké množství splavenin (Krása, 2004).

2.2.2 Faktory podmiňující vodní erozi

Vznik a rozvoj erozních procesů je ovlivněn řadou společně působících faktorů (přírodních nebo způsobených člověkem). Základními faktory vodní eroze jsou:

- Klimatické a hydrologické poměry
- Morfologické poměry
- Půdní a geologické poměry
- Vegetační kryt půdy
- Hospodářsko-technické poměry

Klimatické a hydrologické poměry jsou mimo množství srážek a povrchového odtoku dány také teplotou, vlhkostí ovzduší a povrchem půdy, rychlostí a směrem větru a slunečním zářením (Janeček a kol., 2012).

Morfologické poměry jsou dány sklonem, délkou, členitostí a tvarem (z části i expozicí) svahu. Sklon svahu je z hlediska eroze nejdůležitějším, a zároveň nejhůře ovlivnitelným morfologickým faktorem. S narůstajícím sklonem výrazně roste erozní schopnost povrchového odtoku a jeho soustředování se v rýhách (Janeček a kol., 2012).

Půdní a geologické poměry jsou charakterizovány fyzikálními vlastnostmi půdy, případně mateční horninou zejména texturou, strukturou, obsahem organických látek, vlhkostí, apod. Všechny tyto vlastnosti ovlivňují na jedné straně infiltrační schopnost půdy (velikost a časový průběh infiltrace) a na straně druhé odolnost vůči destrukčním účinkům vodních kapek a povrchového odtoku. Nejnáchylnější k erozi jsou půdy hlinité s velkým obsahem prachových částic, které jsou v zemědělství nejhojněji využívány především díky velkému obsahu humusu. Intenzivním zemědělským využitím, pojezdem těžkými stroji a dalšími činnostmi člověka, se náchylnost těchto druhů půd k erozi z velké části výrazně zvyšuje (zhutnění, snížení propustnosti, ponechávání půdy bez vegetačního pokryvu, atd.) (Janeček a kol., 2008).

Vegetační poměry se protierozně projevují ochranou půdního povrchu před přímým dopadem vodních kapek, zpomalením povrchového odtoku (zvýšením hydraulické drsnosti povrchu) a také podporou vsakovací schopnosti půdy (rozrušením, zvýšením pórovitosti, podporou růstu mikroorganismů, atd.). Zlepšením celkových fyzikálních, chemických i biologických vlastností půdy (údržbou vlhkého mikroklimatu aj.) přispívá vegetace ke zvýšení soudržnosti (zpevnění půdních agregátů), k propojení kořenových systémů a k obohacení o organické látky. Protierozní účinnost jednotlivých vegetačních pokryvů se výrazně liší, a proto je třeba vhodně navrhnout umístění plodin podle svahových (a dalších) poměrů. Podle půdoochranné účinnosti lze plodiny seřadit od nejúčinnějších přibližně takto: lesní porost, trvalý travní porost, dočasné travní porosty, úzkořádkové plodiny (obilniny, atd.), okopaniny a širokořádkové plodiny (kukuřice) (Janeček a kol., 2012).

Hospodářsko-technické poměry ovlivňuje činnost člověka. Jedná se o způsob využívání pozemků, hospodaření, umístování plodin, volby vhodných protierozních opatření atp. (Krása, 2004).

2.3 Rozšíření eroze

Obecně se udává, že zrychlená eroze půdy je vážným světovým problémem. Zrychlená eroze zemědělských půd vážně ohrožuje produkční i mimoprodukční funkce půdy a vyvolává mnohamilionové škody v extravilánech měst a obcí. Ty jsou způsobené povrchovým odtokem a smyvem půdy zejména ze zemědělských pozemků (Janeček a kol., 2007).

Obtížné však je určit rozsah, velikost a rychlost půdní eroze a její důsledky pro hospodářství a životní prostředí. Odhaduje se, že množství sedimentů odnášených do oceánu vzrostlo z 10 miliard t.rok⁻¹ před zavedením intenzivního zemědělství (pastvy) na 25 až 50 miliard t.rok⁻¹ v současnosti. Za tu dobu bylo zničeno erozí 430 mil. ha produktivních ploch (Janeček a kol., 2008).

Eroze, při které se odnos půdy rovná její tvorbě zvětráváním se nazývá erozí vyrovnanou, kompenzační, resp. normální. Intenzita tvorby půdy je dána především vlastnostmi substrátu, jeho tvrdostí a zvětratelností podloží. Udává se, že 1 cm půdy na karbonátových morénách se vytvoří za 10 až 857 let. Zachar (1970) za míru vyrovnané eroze považuje ztrátu 0,75 t.ha⁻¹.rok⁻¹, s kolísáním 0,25 až 1,5 t.ha⁻¹.rok⁻¹. Pokud je půda tvořena mocnější vrstvou půdy (spraše) může být přípustná eroze větší nežli vyrovnaná, aniž by došlo k podstatnému snížení půdní úrodnosti. Odhaduje se, že průměrná rychlost tvorby půdy na celém zemském povrchu se pohybuje okolo 1,2 t.ha⁻¹.rok⁻¹. Všechny tyto údaje jsou jen orientační, protože intenzita a kvalita zvětrávání jsou velmi variabilní.

2.4 Historie výzkumu eroze ve světě

Doklady o degradaci půdy erozí jsou staré více než 7000 let. Nejlépe pojem eroze koncipovali geologové a geomorfologové, kteří hodnotili erozi zejména z hlediska vývoje povrchu Země. Za zakladatele erodologie je považován americký vědec H. H. Bennet, který zpracoval dosud nepřekonané dílo „Soil Conservation“ (1939). Od té doby byla vydána řada významných publikací pojednávajících o výsledcích zkoumání procesů eroze půdy a boji proti ní téměř ve všech zemích světa, včetně České republiky (Janeček a kol., 2008).

Existuje několik významných příkladů historických děl na ochranu půdy, jsou to zejména výstavby teras. Nejznámější jsou terasy Machu Picchu v Peru.

Také v Etiopii se nacházejí příklady teras jednodušší konstrukce než v Peru, ale za to s vyšší potřebou následné údržby (Janeček a kol., 2008).

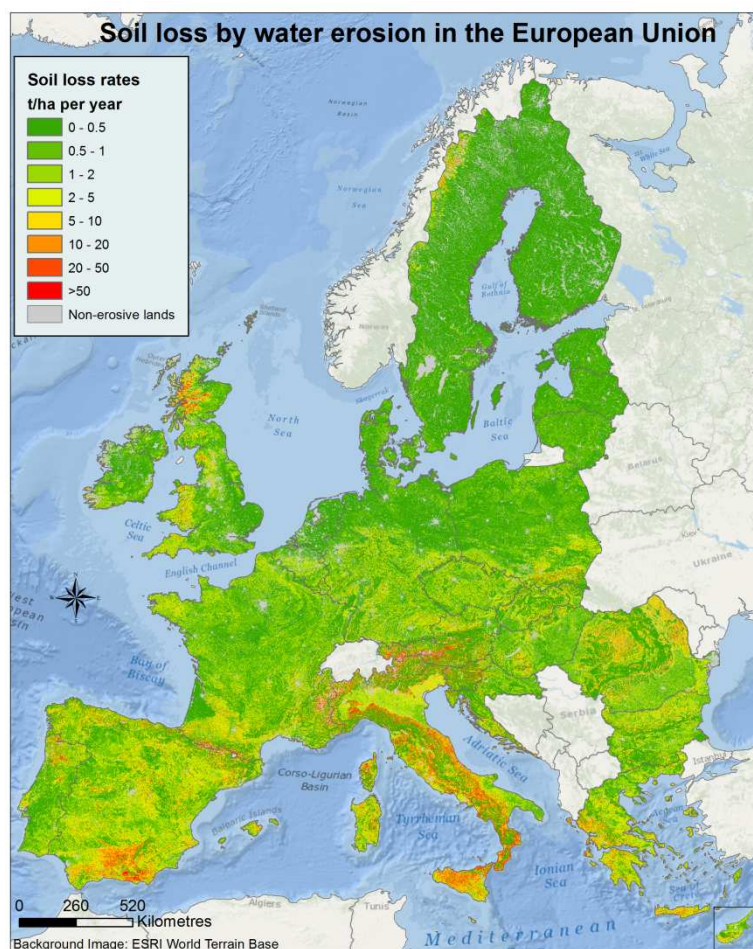
Voda pomáhala udržovat zemi úrodnou a velké množství splavenin přinášejících proudem řek (Nil) sloužilo za přírodní hnojení. V Číně, zemi s ničivými záplavami vod, byly za císaře YU při regulacích hlavních řek budovány nádrže k zachycování sprašových splavenin a zemědělci je periodicky využívali k zúrodnění půdy. Tyto řeky zůstaly ve svých nově vybudovaných řečištích téměř 1 700 let.

V oblastech mírného klimatu lze nalézt terasy např. v jižní Francii, jejichž výstavba před 2 500 lety se připisuje Féniciánům. Také např. Ve spisech Heroldových, který navštívil území Ruska asi před 2 400 lety a ve starých ruských letopisech v knize „Bolšova čertěža“ se nacházejí zmínky o působení vodní a větrné eroze.

Koncem dvacátých let 20. století byla zřízena v USA služba na ochranu půdy (Soil Conservation Service, nyní přejmenovaná na Natural Resources Conservation Service).

Ve Spojených státech po rychlé kolonizaci v minulém století docházelo k rozšiřování větrné eroze. Po zveřejnění rozsáhlého výzkumu, zaměřeného na výzkum eroze ve státech Missouri a Texasu a osvětové kampani ministerstva zemědělství USA pod vedením H. H. Benneta, schválila sněmovna reprezentantů dodatek k rozpočtu na dotace zemědělství pro finanční rok 1930, přidávající 160 000 dolarů na výzkum eroze a metod jejího sledování. Toto zákonné opatření znamenalo začátek významného a rozsáhlého programu boje proti erozi v USA, jehož průběh a výsledky znají zemědělci i veřejnost celého světa. Snížení škod je výsledkem především zdokonalené technologie zpracování půdy a setí pěstovaných plodin (Janeček a kol., 2008).

Mezi jednu z nejvíce erozně postižených zemí patří Turecko, uvádí se, že střední nebo silnou erozí je ohroženo 78% plochy celého tureckého území. Je odhadováno, že každý rok je průměrně přemístěno 1,2 miliardy tun půdy a 500 milionu tun je nenávratně ztraceno v jezerech, nádržích a v moři – to odpovídá asi průměrné roční ztrátě půdy z celé Evropy a Austrálie dohromady. Je to způsobeno velkoplošným odlesňováním, špatným hospodařením na orné půdě a příliš intenzivní pastvou (Janeček a kol., 2008).



Obr. 1 Ztráty půdy vodní erozi v Evropě

Zdroj: www1

Je výmluvné, že činy v protierozní ochraně zpravidla následují až po katastrofách. Ve světě ročně ubývá, respektive se ztrácí, 7,5 mil. ha zemědělské půdy a 17 – 20 mil. ha lesa (Janeček a kol., 2008).

Problém eroze zemědělsky využívaných půd je problémem světovým, který má za následek každoroční úbytek tisíců km² zemědělské půdy. Vysoké úrovně dosáhla protierozní ochrana v USA, kde byla pro tyto účely zřízena již zmíněná speciální státní služba na ochranu půdy (Soil Conservation Service), která zahrnuje kromě poradenské i výzkumnou činnost. Pokud se týká Evropy, nedosahují sice problémy s erozí takových rozměrů jako v rozvojových zemích Afriky a Asie, ale vzhledem k intenzitě zemědělského využívání půdy je situace vážná v celé řadě zemí jižní a i střední Evropy včetně České republiky (Janeček a kol., 2008).

2.5 Důsledky erozních procesů

Ztráta půdy při erozních procesech postihuje nejvíce zemědělství. Uvolňování a odnos půdních částic se často děje ve velkém měřítku. Mnohdy se při intenzivních srážkách smyje mělká půdní vrstva a obnaží se půdní podklad, což má při dlouhodobém procesu tvorby nové půdy pro zemědělskou i lesní výrobu velmi nepříznivé důsledky (Holý, 1994).

Úrodnost půdy je snižována odnosem rostlinných živin. Je velmi obtížné určit kvantitativní hodnoty tohoto odnosu, neboť záleží na množství, druhu, formě, způsobu a době aplikace živin, jež se do půdy dodávají, a také na půdních vlastnostech (Holý, 1994).

Po většinu případů probíhá tato činnost obvykle zvolna, v rovnoměrném stavu s ostatními přírodními procesy. Eroze normální je ta, při které je odnesený půdní profil ve velké míře nahrazován z podloží. Oproti tomu v poměrně intenzivně využívané krajině dochází velmi často k erozi abnormální, která se projevuje výrazným zrychlením erozních procesů při narušení přírodní rovnováhy, značným transportem půdních částic i chemických látek v půdě obsažených, a tím tak následným znečištěním cílového prostředí sedimentu. Dochází tak ke ztrátám a ohrožení půdního profilu, který nedokáže být v dostatečně rychlé míře nahrazován půdotvorným procesem (Holý, 1994).

2.6 Ohroženost zemědělských půd vodní erozí

Vodní eroze je vyvolávána destrukční činností vodních kapek a povrchového odtoku a následným transportem uvolněných půdních částic. Intenzita vodní eroze je dána charakterem srážek a povrchového odtoku, půdními rozměry, morfologií území (sklonem, délkou a tvarem svahů), vegetačními poměry a způsobem využití pozemků, včetně používaných agrotechnologií. Uvolňování a transport částic může být vyvolán i odtokem tajícího sněhu (Janeček a kol., 2012).

Vodní eroze postupuje selektivně – tedy odnáší nejprve nejjemnější nebo nejlehčí půdní částice. V praxi to znamená ztrátu organické složky, snížení schopnosti vázat živiny, vyrovnávat pH a vůbec celkové snížení sorpční kapacity. Spolu s jemnou frakcí půdních částic a organickým materiálem dochází k přímé ztrátě vázaných živin. Ztráta živin znamená vedle snížení výnosu i zhoršení kvality sklizně (www5).

Částice transportované za hranice pozemků se dostávají do hydrologické sítě, kde vytvářejí splaveniny. Ty sedimentují v nádržích a úsecích toků se sníženou transportní schopností. Z hlediska objemu splavenin je jejich největším zdrojem smyvné půdy; je však třeba počítat i s erozí ploch stavenišť, s erozí lesní půdy, zejména při mechanizované těžbě dřeva, s břehovou a dnovou erozí v tocích. Tyto zdroje se mohou rovněž podstatnou měrou podílet na zvýšeném transportu splavenin (Janeček a kol., 2012).

2.7 Posouzení erozní ohroženosti

Použitím příslušných hodnot faktorů pro vyšetřovaný pozemek v univerzální rovnici se určí dlouhodobá průměrná ztráta půdy vodní erozí v ($t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$) při současném či navrhovaném způsobu využívání řešeného pozemku. Pokud vypočtená ztráta půdy překročí hodnotu přípustné ztráty půdy je zřejmé, že způsob využívání pozemku nezabezpečuje dostatečnou protierozní ochranu. Proto je nutné uplatnit účinnější protierozní opatření, jejichž vliv se vyjádří změnou faktorů univerzální rovnice. Opětovným výpočtem se lze přesvědčit, zda jsou navržená ochranná opatření dostatečná a zajišťují snížení ztráty půdy erozí pod hodnotou přípustné ztráty půdy. Hodnoty přípustné ztráty půdy erozí jsou stanoveny především z hlediska dlouhodobého zachování funkcí půdy a její úrodnosti. Pozemky s mělkými půdami s hloubkou do 30 cm by neměly být využívány pro polní výrobu, a proto se doporučuje jejich převedení do kategorie trvalých travních porostů (TTP) nebo jejich zalesnění (Janeček a kol., 2008).

2.8 Výzkum vodní eroze

2.8.1 Vodní eroze ve světě

V celosvětovém měřítku je vodní eroze vážným problémem, kde se navíc ke druhům vyskytujícím na našem území přičleňuje zejména eroze na mořských březích působící společně se zátopou ztráty celých oblastí mnoha zemí. Dále můžeme zaznamenat erozní jevy, které se u nás vyskytují zcela výjimečně (např. strže), degradují v některých územích planety téměř veškerou dostupnou půdu a jsou zdrojem vážných ekonomických problémů (Krása, 2004).

V odhadu celosvětové zasažené plochy a objemu odnášení půdy se hodnoty liší zdroj od zdroje. Dle Holého (1994) je každoročně zasaženo erozí asi 24 miliard tun

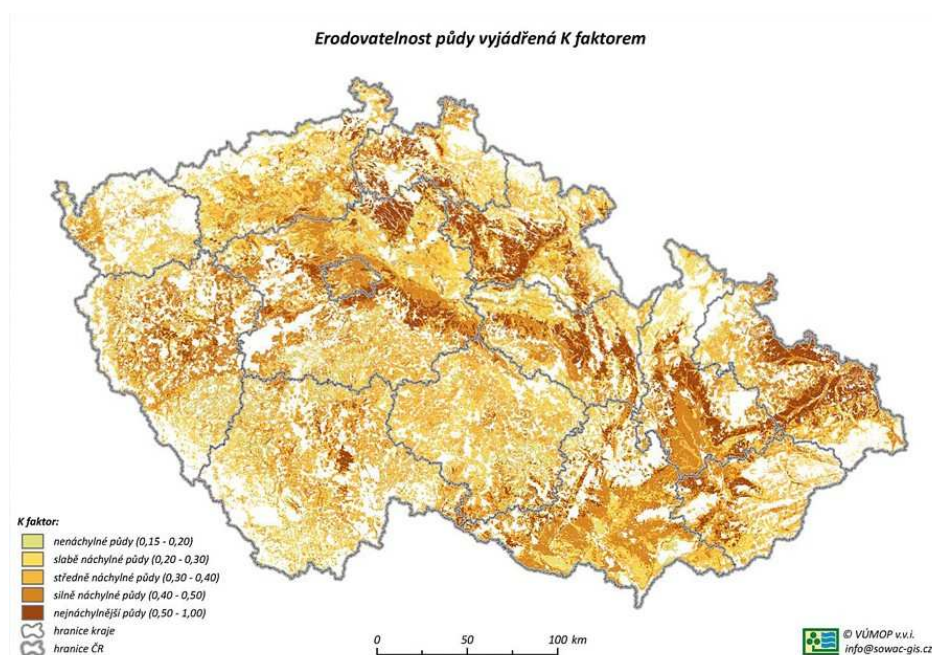
ornice, odpovídající rozloze veškeré ornice na území Austrálie, kde se pěstuje pšenice. Toto množství tak představuje ztrátu 9 milionů tun potenciální sklizně obilí.

V posledních letech se snaží celosvětový výzkum eroze koordinovat World Association of Soil and Water Conservation (WASWC). Pod touto nevládní organizací je sdruženo téměř 500 členů z celého světa, včetně České republiky. WASWC podporuje výzkum a vývoj a pořádá mezinárodní konference o erozi (Krása, 2004).

2.8.2 Vodní eroze v České republice

Dle odhadu je v České republice zhruba 50 % zemědělsky využívané půdy ohroženo vodní erozí (Holý, 1994).

Hodnoty takzvané přípustné ztráty půdy pro ČR odpovídají podmínkám zachování požadované úrodnosti půdy (Dostál, 1998).



Obr. 2 Ztráty půdy vodní erozí v ČR

Zdroj: VÚMOP (www2)

Hlavním pracovištěm zabývajícím se výzkumem erozních procesů v podmínkách ČR je Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd (VÚMOP) se sídlem v Praze Zbraslavi. VÚMOP je jedním z iniciátorů využívání USLE v podmínkách ČR. Převedením hodnot základních parametrů rovnice pro podmínky ČR stanovil postupně aktualizovanou oficiální metodiku výpočtu ztráty půdy pomocí Univerzální rovnice.

Podle této metodiky byla počítána ztráta půdy řadu let v zemědělských organizacích. V posledních letech se však ukazuje, že některé z parametrů uvedených v metodice zcela neodpovídají skutečným hodnotám v našich podmínkách (jedná se zejména o erozní účinnost srážek), a proto je třeba provést řadu dalších verifikací (Janeček a kol., 1992).

Výzkumem vodní eroze se zabývá také řada specializovaných pracovišť, a především vysokých škol. Do popředí se však dostala v minulých 30. letech Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství na stavební fakultě ČVUT v Praze pod vedením Prof. Miloše Holého, kde byla napsána pravděpodobně jedna z nejrozšířenějších českých publikací o erozi „Eroze a životní prostředí“ (Holý, 1994) společně s řadou velice zajímavých publikací a mezinárodních projektů, díky kterým se zúčastnila několika mezinárodních konferencí.

2.9 Dopady vodní eroze na zemědělské hospodaření

V protierozní ochraně se za poslední roky podařilo učinit výrazný pokrok, i přesto ztráta půdy vodní erozí stále představuje jedno z největších ohrožení trvale udržitelného hospodaření na zemědělské půdě v podmínkách ČR. Neustále se zvyšující požadavek hospodářících subjektů na rozšíření ploch, kde by bylo možné pěstovat erozně nebezpečné plodiny (širokořádkové plodiny a plodiny s nižší pokrývností půdy), může mít v blízké době značný vliv na stav a kvalitu půd v ČR. V případě zanedbání či nesprávného používání protierozních technologií může vést k nadměrným ztrátám nejúrodnější části půdy (ornice). Obnova takto poškozených půd je velice obtížná, nákladná a mnohdy nenávratná (Ministerstvo zemědělství, 2015).

Jedním z nástrojů v boji proti vodní erozi je standard Dobrého zemědělského a environmentálního stavu DZES (dříve GAEC – Good Agricultural and Environmental Conditions), který obsahuje základní normy pro životní prostředí, změnu klimatu a stanovuje zásady pěstování erozně nebezpečných plodin na ohrožených půdách. Podmíněnost pro vyplácení plné výše přímých plateb je hlavní motivací pro hospodářící subjekty k plnění podmínek standardu. Tento přístup je plošným řešením, které zlepšuje současný stav zemědělských půd, snižuje působení vodní eroze a omezuje tak škody způsobené povrchově odtékající vodou. Jejím cílem je přispět k rozvoji udržitelného zemědělství zvyšováním povědomí o tom, že požadavky podmíněnosti je potřeba dodržovat (Ministerstvo zemědělství, 2015).

2.9.1 Dobrý zemědělský a environmentální stav půdy (DZES)

Standardy Dobrého zemědělského a environmentálního stavu půdy (DZES), které jsou definovány v nařízení vlády č. 309/2014 Sb., o stanovení důsledků porušení podmíněnosti poskytování některých zemědělských podpor a jejich dodržování je pro zemědělce žádající o dotace v České republice povinné od roku 2004, zajišťují hospodaření ve shodě s ochranou životního prostředí. „Standardy DZES individuálně definují členské země Evropské unie na základě rámce stanoveného v příloze č. II nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 1306/2013, jež obsahuje tyto tematické okruhy: voda, půda a zásoby uhlíku, krajina, minimální úroveň péče.“

Rok 2015 je po skončení přechodného období dotačních programů EU, prvním rokem nového programového období Společné zemědělské politiky 2014 – 2020, dochází proto na základě nových legislativních předpisů v podmínkách standardů DZES k celé řadě změn (Ministerstvo zemědělství, 2015).

Podmínky některých standardů byly v minulosti uváděny samostatně, v aktuální podobě jsou sloučeny do jednoho znění standardu DZES, a proto dochází ke snížení počtu definovaných standardů na celkový počet sedm.

V rámci plnění Standardu Dobrého zemědělského a environmentálního stavu DZES 5, (dříve GAEC 2), jsou zemědělci směřováni k zákazu pěstování erozně nebezpečných plodin a povinnosti uplatňovat půdoochranné technologie, které se vztahují na díly půdního bloku (DPB), veškeré zemědělské půdy označené v LPIS (základní systém evidence půdy) jako půda silně erozně ohrožená (SEO) nebo mírně erozně ohrožená (MEO).

Dle standardu DZES 5 je žadatel povinen na ploše DBP, které jsou v evidenci označené jako SEO vodní erozí zajistit, aby se na ohrožené půdě nepěstovaly erozně nebezpečné plodiny v podobě kukuřice, brambor, řepy, bobu setého, sóji, slunečnice a čiroku. Porosty ostatních obilnin a řepky olejné na takto označené ploše budou zakládány s využitím půdoochranných technologií. V případě ostatních obilnin nemusí být podmínka půdoochranných technologií při zakládání dodržena v případě, že budou pěstovány s podsevem jetelovin, jetelotravních nebo travních směsí (Ministerstvo zemědělství, 2015).

Na ploše DBP označené v evidenci jako půda MEO vodní erozí má žadatel povinnost zajistit, že erozně nebezpečné plodiny kukuřice, brambory, řepa, bob setý, sója, slunečnice a čirok budou zakládány pouze s využitím půdoochranných technologií.

Půdoochranné technologie spadají mezi agrotechnická protierozní opatření a využívají se ke zlepšení vsakovací schopnosti půdy. Snižují její náchylnost k erozi a chrání její povrch převážně v období největšího výskytu přívalových srážek v letních měsících, kdy erozně nebezpečné plodiny nekryjí půdu svým zapojením a vzrůstem dostatečně (Ministerstvo zemědělství, 2015).

Standart DZES 5 dále stanovuje, že podmínky pro půdu v obou výše zmíněných případech (SEO a MEO), nemusí být dodrženy na ploše, jejíž celková výměra nepřesáhne výměru 0,40 ha zemědělské půdy z celkové žadatelem obhospodařované plochy za předpokladu, že směr řádků erozně nebezpečné plodiny je orientován ve směru vrstevnic s maximální odchylkou od vrstevnice do 30 stupňů a pod plochou erozně nebezpečné plodiny se nachází pás zemědělské půdy o minimální šíři 24 metrů, který na erozně nebezpečnou plodinu navazuje a přerušuje všechny odtokové linie procházející erozně nebezpečnou plodinou na erozně ohrožené ploše. Na tomto pásu zemědělské půdy má být žadatelem pěstován travní porost, víceletá pícnina nebo jiná než erozně nebezpečná plodina. Výjimka na výměru 0,40 ha se vztahuje k žadateli s tím, že plochy erozně nebezpečné plodiny se mohou počítat i na více půdních blocích obhospodařované žadatelem, které však v konečném součtu nesmí přesáhnout hodnotu 0,40 ha (Ministerstvo zemědělství, 2015).

Za „ostatní obilniny“ jsou považovány všechny ostatní druhy obilnin kromě vyjmenovaných ve znění standardu tj. kromě čiroku a kukuřice. Je třeba připomenout, že do rodu „slunečnice“ patří vedle slunečnice roční i topinambur, která je tedy rovněž erozně nebezpečnou plodinou. Omezení DZES 5 se netýkají pěstování erozně nebezpečných plodin jako meziplodin ve směsi s jinou než erozně nebezpečnou plodinou (Ministerstvo zemědělství, 2015).

Hlavním cílem standardu je ochrana půdy před vodní erozí a s tím spojenému předcházení důsledkům eroze například zaplavením nebo zanesením komunikací a dalších staveb splavenou půdou. Protierozní ochrana půdy je řešena stanovením požadavků na způsob pěstování vybraných hlavních plodin na silně a mírně erozně ohrožených plochách zaznamenaných v LPIS. Podmínky standardu se vztahují na veškerou zemědělskou půdu (Ministerstvo zemědělství, 2015).

Obecnými půdoochrannými technologiemi pro SEO a MEO plochy jsou Průvodcem zemědělce kontrolou podmíněnosti vyjmenovány jako technologie představující bezorebné setí/sázení (technologie přímého setí do nezpracované půdy), setí/sázení do mulče, sázení do ochranné plodiny (např. do vymrzající meziplodiny –

hořčice bílá nebo svazenka vratičolistá) nebo setí/sázení do mělké podmítky s ponecháním části rostlinných zbytků.

Pro MEO plochy jsou uplatňovány mimo jiné také specifické půdoochranné technologie, kam můžeme zařadit přerušovací a zasakovací pásy, setí po vrstevnici, pásové zpracování půdy (strip-till), odkameňování, podkrývání u cukrové řepy pěstování luskoobilných směsí, důlkování nebo hrázkování.

Dostupnost praktických funkcí prostřednictvím Portálu farmáře, které napomáhají v možnosti realizace půdoochranných technologií v terénu a fakt, že je provádění protierozních opatření kontrolními orgány kontrolováno, je pro zemědělce dostatečným důvodem pro to, aby v LPIS předepsané půdoochranné technologie využívali. Vzhledem k tomu, že žádný obecně závazný právní předpis užívání specifických půdoochranných technologií na zemědělské půdě nestanoví, je hlavním postihem, který žadateli za nesplnění podmínek standardu DZES 5 hrozí, že mu bude v případě nedodržení pravidel podmíněnosti snížena platba zemědělské dotace. LPIS umožňuje zobrazení příslušného půdního bloku, mimo jiné také výpis kompletních informací o konkrétním použití půdoochranné technologie na zvoleném DPB a v neposlední řadě důležité podkladové informace jako je největší délka odtokové linie, průměrná sklonitost, výměry jednotlivých kategorií erozní ohroženosti a mnohé další. (Ministerstvo zemědělství, 2015).

3. MODELÝ PRO VÝPOČET EROZE

První snahy o určení ohroženosti pozemků či celých území erozí sahají již do 30. a 40. let 20. stol., kdy se k výpočtu srážkoodtokových procesů a eroze využívalo tzv. empirických modelů, které byly odvozeny na základě dlouhodobého terénního pozorování přírodních procesů a na laboratorních experimentech. Svůj základ tedy mají v analýze a zpracování časových řad. V polovině 70. let se díky rozvoji výpočetní techniky, informačních technologií a také teoretickému rozvoji v oblasti hydrauliky povrchového odtoku, infiltrace a mechanismu erozních procesů postupně přecházelo od empirických vzorců a postupů k řešení erozního jevu jako dynamického procesu proměnného v prostoru a v čase.

Pro popis eroze a transportu splavenin existuje celé řada metod a nástrojů, které lze dělit podle řady kritérií. Nejpoužívanějším je členění z hlediska způsobu popisu modelové veličiny, kdy se modely dělí na empirické (např. USLE), které byly odvozeny statistickou analýzou velkého souboru měřených dat, a modely konceptuální (např. SWAT), které využívají fyzikálního popisu jevů ve velmi zjednodušené podobě. Poslední skupinou jsou metody fyzikálně založené (např. EROSION-3D), které jsou postaveny na aplikaci základních řídicích fyzikálních rovnic, popisujících vlastní probíhající modelový proces.

3.1 Univerzální rovnice ztráty půdy (USLE)

Rovnice USLE byla vyvinuta v tehdejší americké Službě pro ochranu půdy (Soil Conservation Service) a je dlouhodobě vyžívána nejen v USA, ale i v mnoha jiných zemích, včetně ČR. Rovnicí odvozenou z rovnice USLE je RUSLE, neboli Revised Universal Soil Loss Equation, která je v této diplomové práci použita pro výpočty erozní ohroženosti. V posledních 15 letech je stále více využívána ve spojitosti s GIS pro výpočty v celých povodích.

Univerzální rovnice ztráty půdy (USLE – Universal Soil Loss Equation) je empirický matematický model, který je používán k popisu erozních procesů a určení půdního smyvu. Jejím výstupem je průměrná roční hodnota ztráty půdy v tunách na hektar (t/ha.rok). Tuto rovnici vyvinuli vědci Walt Wischmeier a Dwight Smith v roce 1965 pro americké ministerstvo zemědělství na základě údajů o erozi půdy shromažďovaných od roku 1930 (Wischmeier a kol., 1978).

V 90. letech byla na základě prověření a aktualizace USLE odvozena revidovaná universální rovnice ztráty půdy (RUSLE – Revised Universal Soil Loss Equation) (Renard et al., 1993).

Nevýhodou rovnice USLE, nebo novější RUSLE, zůstává především velká generalizace výpočtu a výstup v dlouhodobých průměrných hodnotách, který nepopisuje základní fenomén erozního procesu, tj. jeho nahodilost a silně epizodní charakter.

Využití geoinformačních technologií pro výpočet ztráty půdy dle metody RUSLE přináší výrazné zpřesnění a vyšší komplexnost řešení i jeho automatizaci pro velká území, vyžaduje však kvalitní znalost problematiky GIS a používaných dat.

Základním faktorem určujícím dosažitelnou přesnost výpočtu je podrobnost a kvalita vstupních dat (digitální model terénu, půdní mapy, mapy vegetačního pokryvu a půdoochranných technologií, přesnost faktoru R; Kadlec a kol., 2014).

Revidovaná universální rovnice ztráty půdy (2.1) je tvořena součinem šesti faktorů:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (2.1)$$

- A Průměrná roční ztráta půdy (t/ha.rok)
- R Faktor erozní účinnosti srážek, definovaný jako součin kinetické energie deště a jeho největší 30 minutové intenzity $R=E.i$, pro danou úlohu (sečtený pro dobu celého roku) je tedy závislý také na četnosti výskytu srážek (MJ/ha.cm/h).
- K Faktor erodovatelnosti půdy, vyjadřující náchylnost půdy k erozi v závislosti na struktuře půdy, její propustnosti a dalších vlastnostech (určen např. z nomogramu) ($t.h.MJ^{-1}.cm^{-1}$).
- L Faktor délky svahu zohledňující vliv nepřerušené délky svahu na velikost ztráty půdy. Vyjadřuje poměr ztráty půdy z vyšetřovaného pozemku a ztráty půdy z jednotkového pozemku délky 22,13 m.
- S Faktor sklonu svahu. Velikost sklonu svahu (zohledněná tímto faktorem) erozi velmi výrazně ovlivňuje. Faktor vyjadřuje opět poměr ztráty půdy z vyšetřovaného pozemku a z jednotkového pozemku se sklonem 9%. Existují také zpřesnění tohoto faktoru pro tvar svahu.
- LS Součin faktorů LS bývá často určován pomocí kombinovaného vzorce nebo společného postupu. Dohromady je potom nazýván „topografický faktor“.

- C Faktor vyjadřující vliv osevního postupu a agrotechniky, udává poměr ztráty půdy z vyšetřovaného pozemku a z jeho jednotkového pozemku s trvalým úhorem při zachování zbylých parametrů. Zohledňuje tedy ochranný vliv vegetace. Nesmíme zapomenout brát ohled na změnu vegetačního pokryvu během roku a z toho pak případně utvořit žádaný roční průměr ve shodě s ostatními parametry RUSLE.
- P Faktor vyjadřující vliv protierozních opatření. Opět poměr ztráty půdy z vyšetřovaného pozemku a z jeho jednotkového pozemku obdělávaného ve směru sklonu svahu. Hodnoty součinitele jsou dány tabulkově.

3.2 Model WATEM/SEDEM

3.2.1 Popis modelu WATEM/SEDEM

WATEM/SEDEM (Van Rompaey a kol., 2001, Van Oost a kol., 2000, Vestraeten a kol., 2002) je empirický model erozních a transportních procesů. Tento model byl vyvinut jedním z předních evropských výzkumných týmů v oblasti erozních problematiky na univerzitě v Lovani v Belgii a je volně dostupný ke stažení (www3) včetně podrobného manuálu. Jak už je patrné z názvu, tento model je spojením dvou různých modelů: WATEM (Water and Tillage Erosion Model) a SEDEM (Sediment Delivery Model), které byly vyvinuty na stejném výzkumném pracovišti. Model nemá přílišné nároky na vstupní data a je tedy předpoklad pro jeho široké využití.

Model se vyznačuje snadno ovladatelným uživatelským rozhraním. Byl vyvinut za účelem hodnocení vlivu zemědělského hospodaření na krajinu a následného posouzení účinnosti protierozních opatření. Využit se dá při odhadu ztráty půdy vodní erozí, označení míst potenciálně ohrožených vodní erozí a simulování vlivu krajiny na erozi. Pomocí modelu lze předvídat i sedimentaci erodovaných půdních částic. Plánování efektivních protierozních opatření je jedním z hlavních výsledků tohoto modelu a využívání vhodných osevních postupů na jednotlivých pozemcích (Van Rompaey a kol., 2001, Van Oost a kol., 2000, Vestraeten a kol., 2002).

Oproti jiným dynamickým modelům, které jsou podstatně složitější, se WATEM/ SEDEM zaměřuje na prostorovou variabilitu erozních faktorů. V menší míře se zabývá i časovou variabilitou. K výpočtu průměrné roční ztráty půdy využívá tento model rovnici RUSLE (Renard a kol., 1993), probíhající na pravidelné čtvercové síti. Vhodná verze pro výpočet transportu sedimentu z povodí je WATEM/SEDEM 2.1,

jehož hlavní výhodou je plně automatizovaný výpočet včetně transportu říční sítě a zachycení v nádržích, výstupní tabulka hodnot eroze, transportu i sedimentace pro celé povodí a její podrobné mapové výstupy. Model je nadstavbou GIS softwaru IDRISI a pracuje se soubory v jeho formátu. Povrchový odtok je počítán na základě algoritmu, který bere v úvahu velikost pozemků, změny kultury, rozdílné odtokové poměry území, směr orby a cestní síť.

3.2.2 Výpočet modelu WATEM/SEDEM

Model WATEM/SEDEM počítá dlouhodobou průměrnou roční ztrátu vodní erozí na základě rovnice USLE (2.7):

$$E = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (2.7)$$

kde:

- E dlouhodobá průměrná roční ztráta vodní erozí ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$)
- R faktor erozní účinnosti deště ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$)
- K faktor erodovatelnosti půd ($\text{kg} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$)
- LS faktor délky a sklonu svahu
- C faktor ochranného vlivu vegetace
- P faktor protierozních opatření

Poznámka: L, S, C, P jsou bezrozměrné koeficienty.

Transportní kapacita jednotlivých elementů DEM je vztažena k potenciálu rýhové eroze v daném bodě dle vztahu (2.8):

$$TC = kTc \cdot EPR, \quad (2.8)$$

kde:

- TC transportní kapacita ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$)
- kTc koeficient transportní kapacity (m)
- EPR potenciál náchylnosti půdy k rýhové erozi ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$)

Celková potenciální eroze je teoretická hodnota ztráty půdy z holé půdy a je dána součtem eroze rýhové a plošné. Potenciál rýhové eroze je určen vztahem (2.9):

$$\mathbf{EPR = EPT - EPIR,} \quad (2.9)$$

kde:

- EPT potenciální rýhová eroze ($\text{kg.m}^{-2}.\text{rok}^{-1}$)
- EPIR potenciální plošná eroze ($\text{kg.m}^{-2}.\text{rok}^{-1}$)

EPT a EPIR jsou dány vztahy (2.10, 2.11):

$$\mathbf{EPT = E . K . L . S,} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{EPIR = a . R . KIR . SIR,} \quad (2.11)$$

kde:

- R, K, L, S faktory USLE
- a koeficient, kterému je přiřazena hodnota 0,6 (Govers a Poesen, 1988)
- KIR K faktor pro plošnou erozi = K faktoru pro celkovou erozi
- SIR faktor sklonu svahu pro plošnou erozi

Z uvedených rovnic vyplývá výsledný vztah pro transportní kapacitu (Van Rompaey, 2001). (2.12):

$$\mathbf{TC = kTC . R . K . (L . S - a SIR)} \quad (2.12)$$

Koeficient transportní kapacity kTc udává množství sedimentu, který by mohl být transportován po svahu. Toto množství je rovno množství sedimentu, který by vznikl na holém půdním povrchu. Čím vyšší je koeficient transportní kapacity, tím více sedimentů je přesunuto na úpatí svahů. Pro každé využití půdy je hodnota koeficientu transportní kapacity odlišná (Verstraeten, 2006).

3.3 Model USLE2D

Jako základní modelový prostředek pro určení LS faktoru při výpočtu v aplikaci RUSLE v prostředí rastrového GIS lze využít program USLED2D (Desmet&Govers, 1996), vyvinutý v roce 2000 na Katolické univerzitě v Leuvenu v Belgii. Hodnota S faktoru je určována pro každý pixel na základě lokálního sklonu podle jedné ze čtyř rovnic. Mezi tyto rovnice patří mimo jiné i rovnice Wischmeiera s Smitha dle původní metodiky (Wischmeier a kol., 1978) a rovnice McCoola dle metodiky RUSLE

(McCool, 1989). Každá z těchto dvou rovnic je vhodná pro odlišné podmínky vzniku erozního procesu (Krása, 2010).

Hlavním přínosem modelu je výpočet jednotkové plochy povodí každého pixelu pomocí několika metod, zejména optimalizovaného odtoku (multiple flow) na základě DMT a vrstvy pozemků.

Využití výpočetní techniky přináší další zřejmou výhodu a to snadné propojení s GIS. Pokud jsou dostupná data o „land use“ a půdě (hodnoty pro faktory K, C a P), lze pak pomocí rastrových operací a operací mapové algebry předvídat ztrátu půdy. LS faktor je vytvořen z digitálního modelu terénu (DMT) a tzv. vrstvy parcel (pozemků), které rozdělují území na dílčí plochy. Výpočet vychází z předpokladu, že hranice mezi dílčími plochami působí jako překážka pro plošný povrchový odtok, kde dochází k přerušení odtoku. Tím se zmenšuje délka odtokové dráhy a také hodnota faktoru L. Podle výpočetního algoritmu je faktor LS vypočítán zvlášť pro každý rastrový element (Efe a kol., 2000).

Program hodnoty jednotkové plochy povodí a sklonu se dosadí do rovnice (2.13 – 2.15) a do rovnice pro výpočet S faktoru, kterou si zvolí uživatel.

L faktor dle Desmeta a Goverse (Desmet et al., 1996):

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j),in} + D^2)^{(m+1)} - A_{(i,j),in}^{(m+1)}}{x_{(i,j)}^m \cdot D^{(m+2)} \cdot (22,13)^m}$$

$L_{(i,j)}$	faktor L pro daný pixel o souřadnicích i,j
D	rozlišení rastru (šířka buňky)
$A_{(i,j),in}$	celková zdrojová plocha na vstupu do buňky,
m	exponent pro výpočet L faktoru zohledňující sklon svahu

(2.13)

Exponent m (původně dle Wischmeier, 1978) je v rovnici určen dle nových vztahů:

$$m = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

(2.14)

kde

$$\beta = \frac{\sin \theta}{0,0896 \cdot (3,0 \sin^{0,8} \theta + 0,56)}$$

$\theta_{(i,j)}$	sklon (%) pro daný pixel o souřadnicích i,j
------------------	---

(2.15)

Omezení programu USLE2D jsou formáty souborů. Program používá (IDRISI rastr), nicméně ArcGIS a ostatní GIS programy umožňují konverzi do příslušného formátu. Dalším problémem je podpora tohoto programu pro novější operační systémy a s tím spojenou instalaci programu do systému Windows Vista a vyšší.

3.4 Model Erosion 3D

3.4.1 Popis modelu Erosion 3D

Erosion 3D je fyzikálně založený matematický simulační model ztráty půdy z povodí. Byl vyvinutý v letech 1992 – 1996 v rámci vzdělávacího programu Spolkového ministerstva pro technologie (BMBF) (Werner a Schmidt, 1998).

Starší verze modelu Erosion 3D simulovala povrchový odtok, ztrátu půdy a transport sedimentu včetně jeho zrnitostního složení jako dopad jedné přívalové srážky. Nová verze modelu (2000 - 2002) obsahuje funkci zadávání sekvence srážek a tím umožňuje simulovat erozní procesy v povodí v delších časových úsecích.

Model Erosion 3D popisuje proces na základě známých fyzikálních zákonů a veškeré výpočty provádí pomocí fyzikálně podložených rovnic (např. rovnice pro uvolnění částic z povrchu půdy nebo pro transport sedimentu povrchovým odtokem). Rovnice jsou částečně zjednodušené a to z důvodu, že není možné popsat veškeré okolnosti (např. pohyb půdních částic v mikroskopickém měřítku v trojrozměrném systému).

Simulace ztráty půdy probíhají v modelu pro jednotlivou srážku, která je rozdělena do několika časových kroků. Srážka je charakterizována délkou trvání a intenzitou. V modelu je možné zadat posloupnost jednotlivých srážkových událostí a to formou výpočtu různých srážek (např. konkrétních měřených dešťů během roku) nebo je zde možnost vícenásobného opakování jedné srážky.

Velikost modelovaného prostoru není omezena velikostí plochy povodí, ale je určena počtem prvků v rastru. Vstupní parametry, které popisují vlastnosti půdy, není pro velké území možné detailněji určit a to z důvodů především časové a finanční náročnosti terénního průzkumu (odběru dostatečného množství půdních vzorků a jejich následnou analýzou v laboratoři). Simulace pro větší plochy povodí umožňuje přehled o pohybu materiálu postiženého erozí bez získání přesných hodnot výstupů. Pro malá povodí je možné zvolit detailnější popis všech vstupních parametrů. Výsledkem takové

simulace bude poměrně přesná znalost množství erodovaného, transportovaného a ukládaného materiálu a určení nejohroženějších lokalit zkoumaného území.

3.4.2 Vstupní parametry modelu Erosion 3D

Výhodou modelu Erosion 3D je omezený počet vstupních parametrů. Potřebná vstupní data lze rozdělit do tří skupin: parametry popisující morfologické vlastnosti simulovaného území, půdní vlastnosti a charakter srážek.

Parametry povrchu:

- digitální model terénu (DMT) [kg/m^3]

Parametry půdy:

- objemová hmotnost [kg/m^3]
- počáteční půdní vlhkost [obj. %]
- obsah organického uhlíku [hm. %]
- erodibilita [N/m^2]
- drsnostní součinitel (dle Manninga) [$\text{s}/\text{m}^{1/3}$]
- stav vegetačního pokryvu (přítomnost a stav vegetace) [%]
- zrnitost rozdělená do 9 kategorií (od jílu po hrubé písky dle klasifikace DIN) [%]
- opravný faktor hydraulické vodivosti
- příslušnost ke srážkoměrné stanici

Parametry srážky:

- doba trvání srážky [min]
- intenzita srážky [mm]

Výstupem modelu Erosion 3D je celkový objem odtoku [m^3/m], ztráty půdy [kg/m^2], transportovatelné množství sedimentu [kg/m], koncentrace sedimentu [kg/m^3] a zrnitost sedimentu [%]. Za pomoci posloupnosti jednotlivých srážek je možno v modelu popsat i dlouhodobé ztráty půdy z povodí (Dostál, 2002).

3.5. Model Atlas EROZE

3.5.1 Popis modelu Atlas EROZE

Atlas EROZE je model pro výpočet erozního smyvu a optimalizaci návrhu protierozních opatření. Model je plně integrovaný pro prostředí programu ATLAS DMT, který obsahuje specializované funkce. Uživatel tak má při práci s programem k dispozici všechny nástroje programu Atlas pro editaci, práci s modelem terénu a následnou tvorbu tiskových sestav. Tento model navíc nabízí řadu nástrojů pro import dat, optimalizaci návrhů opatření, editaci a export výstupů. Výpočet smyvu je v modelu řešen pomocí Univerzální rovnice ztráty půdy v klasické profilové variantě. V rámci něho je topografický faktor (LS) počítán metodou hustot odtokových drah na trojúhelníkové síti (TIN), která umožňuje naplno využít potenciálu přesných podrobných výškopisných dat (např. DMR 5G, DMR 4G, ZABAGED, aj.). Rozlišení výstupních dat je dáno hustotou vstupní mřížky bodů, ze kterých jsou generovány odtokové linie. Odtokové linie, směry odtoku, i velikosti zdrojových ploch jsou počítány přímo na TIN modelech terénu.

Cílem nového modelu Atlas EROZE je vytvořit uživatelsky vstřícný a přímočarý nástroj pro variantní navrhování ochrany proti vodní erozi na zemědělské půdě při komplexních pozemkových úpravách (KPU) i při dalších projekčních činnostech v krajinném inženýrství. Model může také sloužit jako účinný kontrolní nástroj pro posouzení stávajícího stavu či navrhovaných řešení. Z tohoto důvodu jsou formáty výstupů, vstupní data i výstupní protokoly a mapy standardizovány v souladu s metodikami používanými v pozemkových úpravách v České republice.

Metodou výpočtu je tudíž plošně distribuovaná (2D) verze Univerzální rovnice ztráty půdy (USLE) s řadou inovací, aktualizací a optimalizací doplněných dle nejnovějších poznatků v ČR i v zahraničí.

Software je výsledkem projektu TA ČR TA02020647 ve spolupráci s ČVUT v Praze a VÚMOP, v.v.i..

3.5.2 Výpočet eroze v modelu Atlas EROZE

Model Atlas EROZE pro výpočet smyvu využívá Univerzální rovnici ztráty půdy (USLE) (Wischmeier a kol., 1978) a revidovanou rovnici (RUSLE) (Renard a kol., 1997):

$$G = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (2.1)$$

Hlavním rozdílem výpočtu je součin faktorů L a S, který bývá nejčastěji určován pomocí kombinovaného vzorce nebo společného postupu. Délka svahu je v modelu Atlas EROZE nahrazena normalizovanou zdrojovou plochou povrchového odtoku (redukovaným dílčím povodím) v rámci EUC, výsledný vztah topografického faktoru LS je dán kombinací rovnic dle Mitášové (1996), Desmeta a Goverse (1996) a Nearinga (1997) v následujícím tvaru (2.2):

$$LS = \left(\frac{F_{acc}}{22.13 \cdot resolution (|\sin(aspect)| + |\cos(aspect)|)} \right)^{\frac{beta}{beta+1}} \left(-1.5 + \frac{17}{[1 + e^{(2.3-6.1\sin(sklon))}]} \right) \quad (2.2)$$

kde:

LS	výsledný topografický faktor
F _{acc}	plocha povodí k řešenému pixelu (bodu) [m ²]
aspect	azimut ve směru odtokové linie (maximálního sklonu) [°]
resolution	rozlišení vstupního rastru (délka hrany pixelu) [m]
sklon	úhel sklonu odtokové linie (lokální maximální sklon) [°]
beta	parametr sklonu pro výpočet L-faktoru

$$beta = \frac{\sin(sklon)}{0.0896[3\sin^{0.8}(sklon) + 0.56]} \quad (2.3)$$

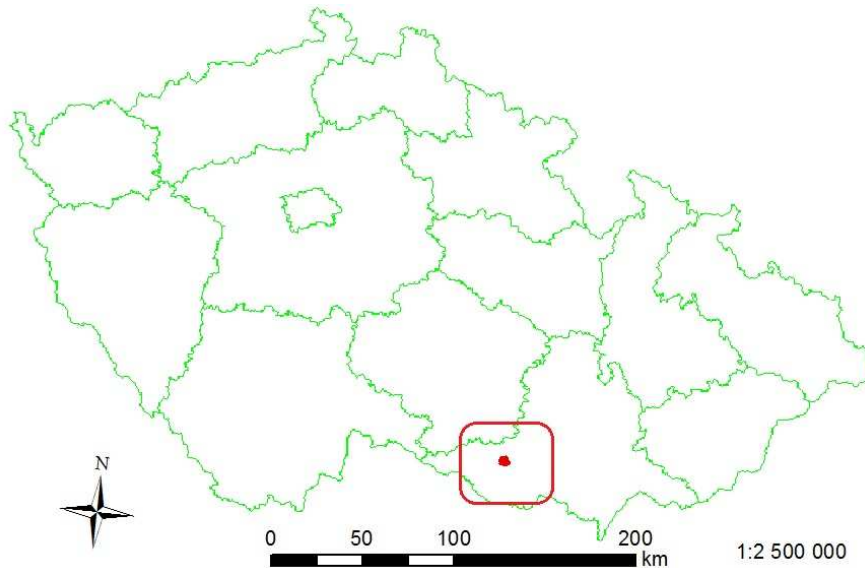
V modelu Atlas EROZE se plocha dílčího povodí počítá pomocí unikátního algoritmu identifikace odtokových linií přímo na modelech typu TIN, výstupem je rastrový model LS faktoru. Výsledná hodnota průměrného LS faktoru a jeho ztráta půdy na pozemku je na tzv. hladkých modelech terénu nezávislá na rozlišení. Pro méně podrobná rozlišení vlivem průměrného sklonu, a také díky nezachycení drobných detailů je na modelech terénu vnímán mírný nárůst průměrného LS faktoru.

Atlas EROZE poskytuje na běžných modelech terénu podobné průměrné hodnoty LS faktoru s modelem USLE2D. Zároveň díky směřování odtoku na TIN poskytuje podrobnější informaci o rizikových drahách soustředěného odtoku. Na detailních modelech terénu (např. DMR 5G) poskytuje Atlas EROZE podrobnější výsledky, než modely určené pro řešení za pomoci rastrových dat (Krása, 2014).

4. PŘÍRODNÍ POMĚRY ÚZEMÍ

4.1 Základní údaje o lokalitě

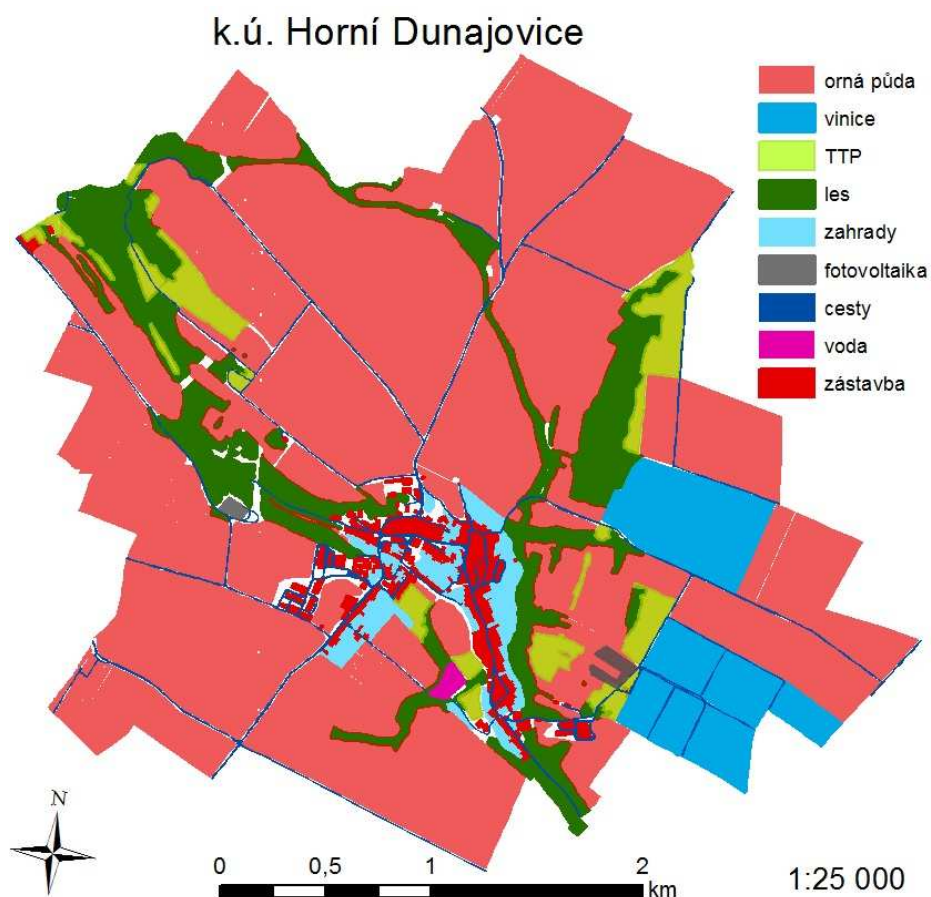
Zájmové území v okolí obce Horní Dunajovice leží v okrese Znojmo, v jihozápadní části Jihomoravského kraje (Obr. 3) a je tvořeno dvěma katastry, katastrem Horní Dunajovice a katastrem Domčice. Velikost katastrálního území je 1 008 ha. Horní Dunajovice sousedí s katastrálními územími Mikulovice u Znojma, Morašice, Trstěnice u Moravského Krumlova, Višňové, Výrovce, Žerotice, Želetice u Znojma (Obr. 4). Výběr území probíhal na základě dostupnosti použitých výškopisných modelů – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G.



Obr. 3 Zájmové území k.ú. Horní Dunajovice (Česká republika)

Z hlediska reliéfu jde o mírně zvlněnou krajinu intenzivně hospodářsky obdělávanou s vysokým procentem zornění. Tyto faktory, společně s velmi dobrou znalostí území autorem, byly důvody výběru tohoto území pro zpracování práce.

Katastry Horních Dunajovic a Domčic se nachází celé v povodí řeky Jevišovky.



Obr. 4 Zájmové území k.ú. Horní Dunajovice (současný stav)
 Stav k 10.2.2016. Zdroj dat: ČÚZK, vlastní zpracování

4.2 Širší územní vztahy

4.2.1 Geologické a geomorfologické podmínky

Zájmové území leží na hranici dvou soustav:

soustava **Česko-moravská soustava**

 podsoustava Česko-moravská vrchovina

 celek Jevišovická pahorkatina

 podcelek Znojemská pahorkatina

 okrsek Výrovická pahorkatina

soustava **Vněkarpatské sníženiny**

 podsoustava Západní vñekarpatské sníženiny

 celek Dyjsko-svratecký úval

 podcelek Drnholecká pahorkatina

 okrsky Jevišovická niva a Hostěradická pahorkatina

Území okresu Znojmo, jehož součástí je i zájmová oblast této práce, se nachází na rozhraní dvou geomorfologických jednotek – Česká Vysočina (Český masív) a Karpaty. Hranice mezi těmito komplexy leží na linii probíhající přes okres Znojmo do Rakouska – okolo rakouského Retzu přes západní část Šatova směrem ke Znojmu, Miroslav, Vedrovicím až k Brnu a odtud dále pokračuje na severovýchod. Jižní a jihovýchodní část okresu je součástí mladých karpatských systémů, kde jsou převážně usazené horniny. Do západní části okresu Znojmo zasahuje předhůří Českomoravské a Brněnské vrchoviny, která je složena z vyvřelých a přeměněných hornin Českého Masívu. Českomoravskou vrchovinu zde zastupuje Jevišovická pahorkatina, členitá pahorkatinou s výškami 350-550 m n. m., ta je tvořena z krystalických břidlic a žul. Oblast Brněnská vrchovina je tvořena Bobravskou vrchovinou a Boskovickou brázdou. Severovýchodní části okresu, zejména blízké okolí Moravského Krumlova a údolí řeky Rokytne, leží v mírně zvlněné krajině s výškami 220-350 m n. m., jež tvoří jižní část Boskovické brázdy, ta je tvořena permokarbonskými horninami s pokryvem miocenních písků a jílu. Do severovýchodní části okresu zasahuje také Bobravská vrchovina složená z grannodioru, dioritu a diabasu, jež představuje členitou vrchovinu s vinicemi a lesy s výškami 300-365 m n. m..

Východní část okresu leží v Dyjsko-svrateckém úvalu. Tato oblast je tvořena mírně zvlněnou zemědělskou krajinou s výškami od 200-270 m n. m., jež je vyplněna neogenními sedimenty, čtvrtohorními náplavy Svratky, Jihlavy a Dyje a sprašemi.

Téměř středem obce Horní Dunajovice protéká potok Křepička, který má s 240 m n. m. nejnižší nadmořskou výšku. Nejvyšší naměřená nadmořská výška, která se nachází v severovýchodní části katastru, je 325 metrů.

4.2.2 Hydrologické a hydrobiologické poměry

Území znojmského okresu náleží do povodí řeky Dyje. Na jejím horním toku byla ve třicátých letech minulého století vybudována Vranovská údolní nádrž, která slouží nejen jako zásobárna vody pro část okresů Znojmo a Třebíč, ale také vyrábí elektrickou energii a vyrovnává průtok na střední části toku. V současné době slouží tato přehrada jako letní rekreační centrum. V roce 1966 byla na okraji Znojma na řece Dyji vybudována vodní nádrž Znojmo, v dnešní době hlavně významná zásobárna vody pro město. Vůbec nejstarší moravskou přehradou a zároveň jedna z nejstarších přehrad

ve střední Evropě se od roku 1896 nachází na dolním toku řeky Jevišovky. Další významnou řekou v povodí je Rokytá (www6).

Celé katastry Horních Dunajovic a Domčic se nachází v povodí řeky Jevišovky (č.h.p. 4-14-03-001 /IV/), která pramení u Komárovic ve výšce 560 m n. m., ústí zprava do řeky Dyje u obce Jevišovka v nadmořské výšce 171 m n. m.. Plocha povodí je 782,5 km², délka toku 79,9 km s průměrným průtokem u ústí 1 m³/s.

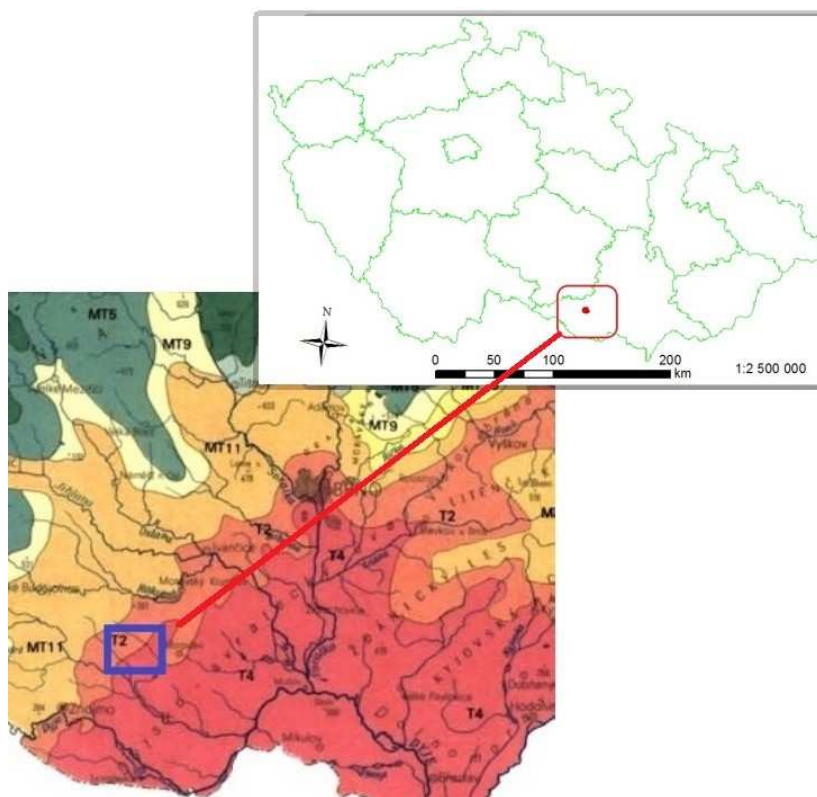
Vodní toky v katastru obce jsou velice významné, jejich síť je však řídká. Od severozápadu k jihovýchodu protéká katastrem obce potok Křepička, který pramení severně od Běhařovic na Znojemsku v nadmořské výšce 390 m. Severovýchodně od Prosiměřic ústí v nadmořské výšce 198 m n. m. zleva do Jevišovky s průměrným ročním průtokem 0,07 m³/s. Na horním toku Křepičky se nachází vodní nádrž, která slouží v létě k rekreaci. Délka toku je 19,1 km. V severní části katastru pramení občasný vodní tok Rosavka. Ten se vlévá do Křepičky na jihovýchodním okraji Domčic. Vodní toky se vyznačují nevyrovnaným vodním režimem. Uvedené území je extrémně suché. Koncem léta trpí vodní toky nedostatkem vody, v suchých létech i na delší dobu zcela vysychají (www7).

4.2.3 Klimatické poměry

Klimatologicky se území nachází v teplém a mírně teplém klimatickém pásmu, kde dochází k pravidelnému střídání čtyř ročních období a ke kombinaci vlivů oceánského a kontinentálního proudění. V severní a západní oblasti okresu panují méně příznivé klimatické podmínky. Dle Quitta (1984) leží území ve velmi teplé oblasti T4 (nejteplejší v ČR) a teplé oblasti T2 (Obr. 6). Oblast T4 charakterizuje velmi dlouhé, teplé a suché léto s velmi krátkým přechodným obdobím, teplé jaro a podzim, krátká mírně teplá a suchá až velmi suchá zima s velice krátkým trváním sněhové pokrývky. Oblast T2 je charakterizována dlouhým teplým a suchým létem, velmi krátkým přechodným obdobím s teplým až mírně teplým jarem a podzimem a krátkou, mírně teplou, suchou až velmi suchou zimou s krátkým trváním sněhové pokrývky.

Průměrná dlouhodobá roční teplota vzduchu v oblasti je 7,8 °C, nejméně teplejším měsícem je leden (- 2,8 °C) a nejteplejším červenec (17,5 °C). Průměrný roční úhrn srážek v období od roku 1960 - 1990 činí 590 mm a je ovlivněn srážkovým stínem Českomoravské vrchoviny.

V území se vyskytují přívalové deště při častém jihovýchodním proudění. Významné západní a jihovýchodní větry působí letní sucho a bouřky a v předjaří silnou větrnou erozi. Průměrná doba slunečního svitu za rok je 1798 hodin (www6).



Obr. 5 Mapa klimatických regionů ČR (dle Quitt, 1971)

Tab. 1 Klimatické charakteristiky oblasti T2

Klimatické charakteristiky oblasti T2 (Quitt E., 1971)	
Počet letních dnů	50 – 60
Počet dnů s průměrnou teplotou > 10 °C	160 – 170
Počet mrazových dnů	100 – 170
Počet ledových dnů	30 – 40
Průměrná teplota v lednu v °C	-2 až -3
Průměrná teplota v dubnu v °C	8 – 9
Průměrná teplota v červenci v °C	18 – 19
Průměrná teplota v říjnu v °C	7 – 9
Průměrný počet dnů se srážkami 1 mm a více	90 – 100
Srážkový úhrn ve vegetačním období	350 – 400
Srážkový úhrn v zimním období	200 – 300
Počet dnů se sněhovou pokrývkou	40 – 50
Počet dnů zamračených	120 – 140
Počet dnů jasných	40 – 50

Tab. 2 Klimatické charakteristiky oblasti T4

Klimatické charakteristiky oblasti T4 (Quitt E., 1971)	
Počet letních dnů	60 – 70
Počet dnů s průměrnou teplotou > 10 °C	170 – 180
Počet mrazových dnů	100 – 110
Počet ledových dnů	30 – 40
Průměrná teplota v lednu v °C	-2 až -3
Průměrná teplota v dubnu v °C	9 – 10
Průměrná teplota v červenci v °C	19 – 22
Průměrná teplota v říjnu v °C	9 – 10
Průměrný počet dnů se srážkami 1 mm a více	80 – 90
Srážkový úhrn ve vegetačním období	300 – 350
Srážkový úhrn v zimním období	200 – 300
Počet dnů se sněhovou pokrývkou	40 – 50
Počet dnů zamračených	110 – 120
Počet dnů jasných	50 – 60

4.2.4 Pedologické podmínky

Velká část zemědělských ploch je výrazněji náchylná k vodní erozi, časté je i zvýšené ohrožení erozí větrnou. Současná organizace půdního fondu neumožňuje protierozní ochranu. Velké půdní celky ztěžují prostupnost krajiny a v řadě případů jsou půdy rozdílných vlastností slučovány do jednoho pozemku.

Následující charakteristika hlavních půdních jednotek ČR je dána vyhláškou č. 327/1998 Sb., kterou se stanoví charakteristika bonitovaných půdně ekologických jednotek a postup pro jejich vedení a aktualizaci, ve znění vyhlášky č. 546/2002 Sb.

Dle bonitace zemědělských půd (BPEJ) se v řešeném území nejčastěji vyskytují tyto hlavní půdní jednotky (Obr. 7):

HPJ 01 – Černozemě modální, černozemě karbonátové, na spraších nebo karpatském flyši, půdy středně těžké, bez skeletu, velmi hluboké, převážně s příznivým vodním režimem

HPJ 04 – Černozemě luvické na sprašových pokryvech, středně těžké, bez skeletu, převážně s příznivým vodním režimem

HPJ 06 – Černozemě pelické a černozemě černické pelické na velmi těžkých substrátech (karpatském flyši, jílech, slínech a tercierních sedimentech), těžké až velmi těžké s vylehčeným orničním horizontem, ojediněle šterkovité, s tendencí povrchového převlhčení v profilu

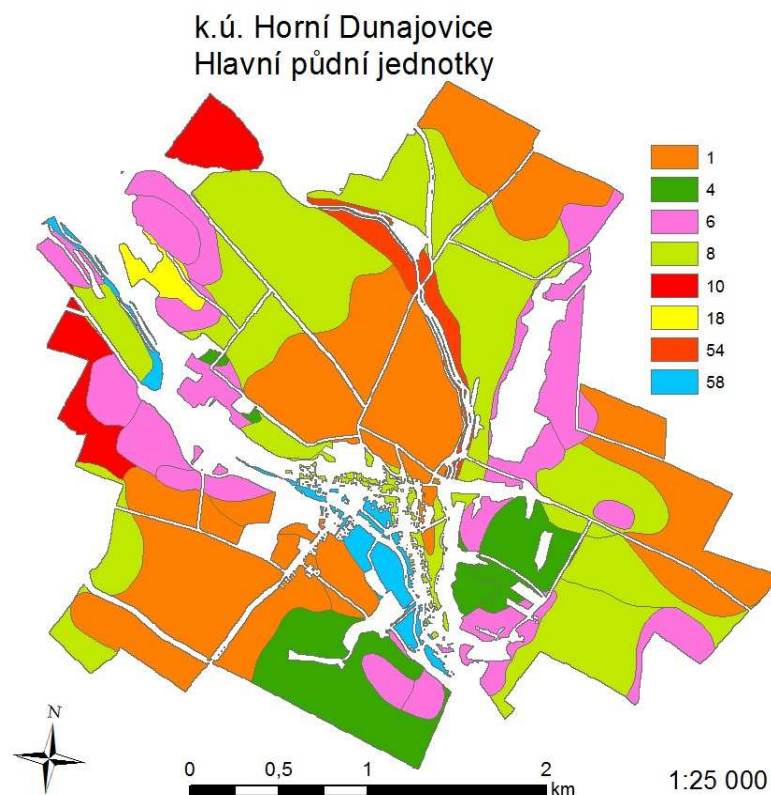
HPJ 08 – Černozemě modální a černozemě pelické, hnědozemě, luvizemě popřípadě i slabě kambizemě luvické, smyté, kde dochází ke kultivaci přechodného horizontu nebo substrátu na ploše větší než je 50 %, na spraších, sprašových a svahových hlínách, středně těžké i těžší, převážně bez skeletu a ve vyšší sklonitosti

HPJ 10 - Hnědozemě modální včetně slabě oglejených na spraších, středně těžké s mírně těžší spodinou, bez skeletu, s příznivými vláhovými poměry až sušší

HPJ 18 – Rendziny modální, rendziny kambické a rendziny vyluhované na vápencích a travertinech, středně těžké lehčí až těžké, slabě až středně skeletovité, méně vododržné

HPJ 54 – Pseudogleje pelické, pelozemě oglejené, pelozemě vyluhované oglejené, kambizemě pelické oglejené, pararendziny pelické oglejené na slínech, jílech mořského neogenu a flyše a jílovitých sedimentech limnického terciéru, těžké až velmi těžké, s velmi nepříznivými fyzikálními vlastnostmi

HPJ 58 - Fluvizemě glejové na nivních uloženinách, popřípadě s podloží teras, středně těžké nebo středně těžké lehčí, pouze slabě skeletovité, hladina vody nižší než 1 m, vláhové poměry po odvodnění příznivé (Němeček a kol., 2001).



Obr. 6 Mapa hlavních půdních jednotek k.ú. Horní Dunajovice

Stav k 15.1.2016. Zdroj dat: SPÚ., vlastní zpracování

4.2.5 Současné využití krajiny

Současnou krajinu zkoumaného území lze definovat jako krajinu převážně zemědělskou, silně antropogenně ovlivněnou a dlouhodobě obhospodařovanou (Obr. 7). Dominantní je zde převážně krajina polní, ve které se v malé míře vyskytují lesy. Ve využití území převažuje orná půda, zabírající 83,4 % z rozlohy zájmového území. Z hlediska reliéfu lze za hlavní znaky území považovat zvlněné plošiny bez nápadných pahorků, které jsou rozčleněny malými údolími. Tato krajina je intenzivně hospodářsky obdělávána s vysokým procentem zornění. Rozsáhlá pole na plošinách a na mírných svazích kontrastují s pestřejší krajinou pahorků a niv, údolí řek jsou hluboce zaříznutá a jsou většinou předmětem ochrany přírody.

Koeficient ekologické stability je v této lokalitě velmi nízký. Zalesněných ploch je na řešeném území nedostatek s převažující nevhodnou druhovou skladbou. V druhové skladbě se nejvíce vyskytuje borovice lesní, modřiny a akáty. U vodních toků se objevují kanadské topoly, jasany, olše a také akáty (www7).

V katastrálním území zájmové oblasti je vymezena evropsky významná lokalita Pod Šibeničním kopcem (kód lokality EVL CZ0620013). V přírodní památce Pod Šibeničním kopcem je motivem ochrany dle vyhlášovacího předpisu unikátní společenstvo *Teucro botryos-Melicetum ciliatae* vytvořené na podkladu krystalických vápenců. Vzhledem k naprosté převaze silikátových hornin na jihovýchodním okraji Českého masivu je flóra a vegetace této lokality v širším regionu zcela výjimečná. Z významných druhů rostlin zde najdeme např. strdivku brvitou, oman oko Kristovo, rýt žlutý a len tenkolistý. Cílem ochrany území je zachování podmínek pro existenci travino-bylinných společenstev se zastoupením vzácných, významných a zvláště chráněných druhů (Němcová, 2014).

Výrazně negativním jevem je nízká lesnatost řešeného území a stav povrchových a podzemních vod. Vzhledem k poměrně nízké lesnatosti je i koeficient ekologické stability nízký. Na území je vhodné zvyšovat podíl lesní a krajinné zeleně (www7).

Zájmovým územím jsou vedeny dvě větve lokálního ÚSES.

- První větev přechází z katastrálního území Višňové, Horní Dunajovice obchází od severu a je vedena po svazích jižní expozice nad potokem Křepičkou, poté lokální biokoridor překoná tok Rosavky a po svazích nad tímto tokem pokračuje

k jihu. V blízkosti jižního okraje Domčic se biokoridor stáčí k východu a v polní trati Dolní Frédy přechází do katastrálního území Želetice. V tomto biokoridoru jsou vložena dvě biocentra, první LBC 1 - Dolní Kravky se nachází v lesním porostu pod tratí, druhé LBC 4 - Nad Rosavkou je umístěno u východního okraje Horních Dunajovic.

- Druhá větev je vázána na tok a nivu potoku Křepička. Lokální biokoridor je rovněž veden z katastrálního území Višňové a pokračuje katastrem po toku Křepičky. Do trasy biokoridoru jsou vložena dvě biocentra, první LBC 2 - U Lomu je v místě rozšíření nivy u poutního místa západně od Horních Dunajovic, druhé LBC 3 - Domčice se nachází v místě, kde tok opouští obec a v nivě je rozsáhlejší lesní porost (www7).

5. ANALÝZA TVORBY DIGITÁLNÍHO MODELU TERÉNU

Pro tvorbu digitálního modelu terénu (dále jen DMT) byl zvolen software ESRI ArcGIS 10.2.2, jehož aplikace ArcMap obsahuje nástroje umožňující tvorbu DMT. Konkrétně se jedná o nástroje 3D Analyst a Spatial Analyst. Ty umožňují jak tvorbu modelů s využitím interpolačních metod, tak také povrchové analýzy daného modelu jako např. tvorbu odtokových linií, výpočet sklonu a orientaci reliéfu, aj.

Veškeré výstupy i vlastní výpočet jsou provedeny v souřadném systému JTSK (realizace S-JTSK/Krovak East North – EPSG:102067, kdy $x = -y_{\text{JTSK}}$ a $y = -x_{\text{JTSK}}$).

Nejčastějšími používanými datovými formáty jsou v případě vektorových vrstev ESRI shapefile a v případě rastru GeoTIFF.

V této kapitole je představena konkrétní aplikace výpočtu ztráty půdy a transportu sedimentu do vodních toků pomocí Revidované univerzální rovnice půdy – RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation).

Veškerá podkladová data pro výpočet a všechny faktory RUSLE jsou převedeny do podoby informačních mapových vrstev geografických informačních systémů (GIS) a následně upraveny do rastrových vrstev v požadovaném rozlišení (nejčastěji jednotky až desítky metrů). Základní analýza probíhá na bázi rastru. Klíčovou vrstvou je výškopis v podobě DMT.

Veškerá výškopisná data pro modely ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G (2015) byla poskytnuta Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním (ČÚZK). C faktor a potenciační ohroženost ZPF – pomocí G faktoru (ohrožení vodní erozí) byla získána od Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy v.v.i. (VÚMOP). V měřítku rozsáhlých povodí lze jako podrobný zdroj doporučit databázi BPEJ (K-faktor odvozený z této databáze), jehož poskytovatelem je Státní pozemkový úřad. Nevýhodou této databáze je však pokrytí pouze plochy ZPF, která se ne vždy shoduje s celým rozsahem zemědělské půdy zájmového území a případně je třeba vhodným způsobem doplnit chybějící lokality.

5.1. Tvorba digitálních modelů terénů (DMT)

5.1.1. ZABAGED

Výškopisnou část ZABAGED tvoří 3 typy vrstevnic se základním intervalem 5 m, 2 m, nebo 1 m. Obsah datové sady ZABAGED - výškopis - 3D vrstevnice je

doplňen vybranými dalšími výškopisnými prvky – klasifikovanými hranami a body, které byly vyhodnoceny stereofotogrammetrickou metodou při zpřesňování vrstevnicového výškopisu a jsou nabízeny k případnému dalšímu využití. Jako zdroj výškopisných dat ZABAGED byly použity základní, zesílené a doplňkové vrstevnice. Jednou ze základních možností tvorby modelu je využití nástroje Topo to Raster, který je použit při zpracování DMT ZABAGED. Tento nástroj byl navržen pro tvorbu hydrologicky korektních DMT. Algoritmus pracuje primárně s vrstevnicemi a vychází z předpokladu, že hlavním činitelem modelování reliéfu jsou hydrologické procesy. Za pomoci této funkce je tedy možno vytvořit rastrový model přímo z vrstevnic. Oproti následující metodě je výhodou, že není nutné převádět vrstevnice na body. Nevýhodou pak je, že nastavení všech podmínek a parametrů funkce je poměrně složitější.

Ve formuláři nástroje Topo to Raster je třeba nastavit Output surface raster (název výstupního reliéfu – DMT ZABAGED), Output cell size (velikost buňky – 10 metrů), Drainage enforcement (ENFORCE), Primary type of input data (CONTOUR), Roughness penalty (40), Disretisation error factor (1), Tolerance 1 (2,5) a Tolerance 2 (100).

Výsledný DMT ZABAGED byl pomocí nástroje Extract by Mask oříznutý na požadované území ZPF (zemědělský půdní fond) s rozlišením rastru 10 metrů (Obr. 17).

Druhou možností je generování terénního modelu z bodového pole, a proto je nutné nejprve linie tvořící vrstevnice převést na body. Pro tuto operaci nabízí ArcMap samostatný nástroj Feature To Point. Jsou-li výškopisná data v podobě bodů, je možné si zvolit, jakým způsobem bude model vytvořen. Jednou z možností je tvorba modelu pomocí nepravidelné trojúhelníkové sítě – triangulated irregular network (TIN). Jeho tvorbu nabízí v aplikaci ArcMap extenze 3D Analyst.

Třetí možností tvorby rastrového modelu je využití některé z interpolačních metod, které jsou tedy rovněž založeny na nutnosti využití shapefile v podobě bodového pole. ArcMap nabízí čtyři interpolační metody, jimiž jsou Natural Neighbors, IDW (Inverse Distance Weighted), Spline a Kriging. Nejvíce se hodí z hlediska reliéfu metoda Natural Neighbors.

V České republice je pro výpočet faktoru LS v GIS velmi často využíván volně dostupný program USLE2D využívající formát souborů GIS Idrisi, který je součástí výpočtu v rámci služby geoportál SOWAC-GIS provozované Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půdy, v.v.i.. Výhodou programu USLE2D je několik dostupných

rovníc kalibrovaných pro odlišné půdní podmínky, několik variant výpočtu směřování odtoku a automatizované řešení pro zájmové území.

Hlavním rozdílem a přínosem GIS je jeho využití při výpočtu topografického faktoru LS. Vstupem pro výpočet je rastrový DMT a mapa pozemků ve stejném rozlišení. Nejdříve je třeba vždy v rámci jednoho osamocenému pozemku (resp. odtokově uzavřené oblasti) určit dílčí velikost povodí každého jednotlivého pixelu. Z komerčních GIS softwarů je v ČR nejrozšířenější ESRI ArcGIS, který nabízí nadstavby pro práci s rastry (3D Analyst a s Spatial Analyst), které umožňují manuální výpočet LS faktoru na základě akumulace odtoku (Flow Accumulation). Oproti USLE2D nabízí ArcGIS pouze jednoduché směřování odtoku ve směru maximálního sklonu (tzv. D8, tedy výběrem jedné z osmi sousedních buněk). Toto zjednodušení v mírně členitých terénech může vést k nesprávnému odhadu konvergence a k určení špatných drah soustředěného odtoku (Kadlec a kol., 2014).

Faktor LS je možné vypočítat za pomoci různých vztahů, která jsou kalibrována pro odlišné oblasti a data. Pro použití ve vybrané lokalitě nejvíce vyhovuje postup dle Mitášové (Obr. 9). Aby se zahrnul vliv soustředěného odtoku, je L faktor nahrazen hodnotou A – tzv. přispívající plochou nad počítanou buňkou zahrnující odtok vtékající do dané buňky. Pomocí hodnoty A lze vyjádřit vliv koncentrace odtoku na proces vodní eroze.

Jedná se o následující rovnici (4.2):

$$LS_{(x,y)} = (m + 1) \left[\frac{A_{(x,y)}}{22,13} \right]^m * \left[\frac{\sin b_{(x,y)}}{0,09} \right]^n$$

Kde:

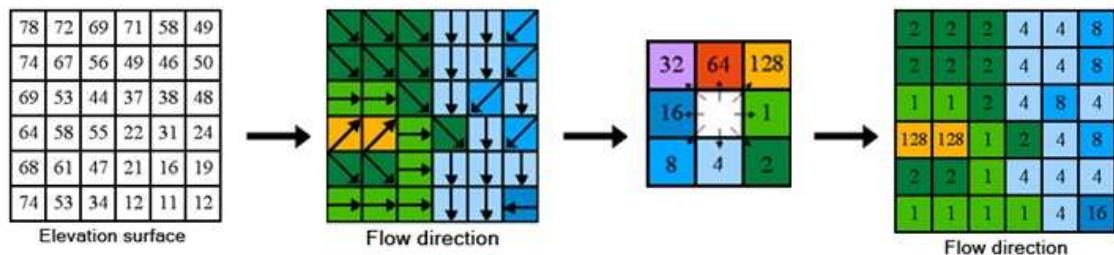
- $LS(x,y)$ faktor LS pro daný pixel o souřadnicích x, y ,
- A jednotková zdrojová plocha na vstupu do buňky (m^2 na bm)* ,
- m kalibrační parametr (obvykle 0,6),
- n kalibrační parametr (obvykle 1,3),
- b sklon buňky (rad),

(4.2)

Poznámka: Typické hodnoty pro uvedené parametry jsou $m = 0,4$ až $0,6$ a $n = 1,0$ až $1,4$. Zadaná hodnota je závislá na převažujícím typu odtoku: vyšší hodnoty patří soustředěnému odtoku o malé hloubce (odtok v erozních rýhách) a nižší hodnoty pro plošný odtok. Vyšší hodnoty pro m a n mohou být použity pro erodované území, kde se vyskytují rýhy způsobené turbulencí odtoku. Naopak nižší hodnoty m a n mohou

být použity pro území s převažujícím plošným odtokem, jako je území pokryté vegetací (Mitášová a kol., 1998).

Výpočet kvalitativních (směr) a kvantitativních (množství) charakteristik odtoku patří k základním hydrologickým charakteristikám zjišťovaným z DMT. Stanovení směru odtoku funguje dle algoritmu D8 (eight direction flow model), kterým je pro každou buňku určena sousední buňka s největším spádem. Samotný spád je počítán z rozdílu výšek se sousední buňkou a vzdálenosti jejich středů. Každé buňce je následně přiřazena hodnota 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 nebo 128 podle daného směru, kterým voda odtéká z buňky (Obr. 7).



Obr. 7 Princip tvorby vrstvy směrů odtoku (Flow Direction)

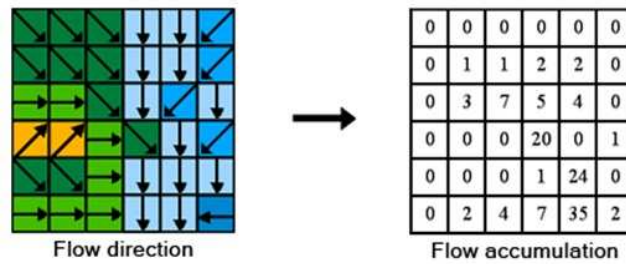
Zdroj: www4

Akumulace odtoku udává souhrnný počet buněk, ze kterých voda odtéká do každé konkrétní buňky (Obr. 8). Vstupním parametrem je předchozí vrstva směrů odtoků, výstupem je rastrová vrstva akumulace odtoku. Buňky s vysokou hodnotou akumulace představují plochy soustředění odtoku. Po vytvoření těchto vrstev se provede vlastní výpočet vrstvy LS faktoru nástrojem Raster Calculator v nadstavbě Spatial Analyst Tools použitím následujícího vztahu (4.1):

$$\text{Pow}([\text{Flowacc}] \times \text{resolution}/22.1, 0.4) \times \text{Pow}(\text{Sin}([\text{Slope}] \times 0.01745) \times 0.09, 1.4) \quad (4.1)$$

kde:

- [Flowacc] je vygenerovaná vrstva akumulace odtoku,
- [Slope] představuje vrstvu sklonu svahu [°],
- resolution udává velikost buňky (pixelu) – v tomto konkrétním výpočtu je to hodnota 5 [m], 0.01745 je převodní konstanta ze [°] na [-].



Obr. 8 Princip nástroje Flow Accumulation

Zdroj: www4

Druhou možností, která byla použita pro porovnání výpočtu s postupem dle Mitášové, byl výpočet LS faktoru za pomoci volně dostupného open source softwaru SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses), který díky svému zaměření na geovědní obory, nabízí velký počet výpočetních algoritmů a jeho využití je vhodné při analýzách DMT (Obr. 11). Software je navržen jako velký flexibilní a užitečný nástroj pro geovědní komunitu a díky tomu jsou jeho jednotlivé části zaměřeny na velmi specifické oblasti (Hengel a Reuter, 2009).

Postup výpočtu LS faktoru v programu SAGA GIS je podobný jako v ArcGIS, pouze se používají odlišné nástroje a jejich rozdílné nastavení (Freeman, 1991).

5.1.2. Digitální model reliéfu 4. generace (DMR 4G)

Digitální model reliéfu 4. generace (dále jen DMR 4G) představuje zobrazení přirozeného nebo lidskou činností upraveného zemského povrchu v digitálním tvaru ve formě výšek diskretních bodů v pravidelné síti 5 x 5 m bodů o souřadnicích X, Y, H. Množina těchto bodů však obsahuje zbytkové chyby s nesprávné klasifikace, které jsou následně manuálně editovány. DMR 4G je model dodávaný ve formě pravidelné mříže GRID s rozlišením 5 x 5 m, s úplnou střední chybou výšky 0,3 m v odkrytém terénu a 1 m v terénu pokrytém vegetací. Jelikož se jedná o rastrový model (pravidelná čtvercová síť), nevystihuje zcela přesně malé terénní anomálie (www9).

Pro účely vytvoření DMT byla použita data z DMR 4G, který je jedním z konkretizovaných výstupů společného projektu Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (ČÚZK), Ministerstva obrany (MO) a Ministerstva zemědělství (MZe).

Nejprve musela být data z datového formátu (*.xyz) převedena do textového formátu (např. *.csv, *.txt, *.doc nebo *.xls) a následně upravení zdrojového souboru tak, aby bylo možné následující zpracování DMT. Je třeba si ovšem dávat pozor

na verzi v případě použití MS Office (Word) a jeho omezení počtu řádků. Pro zájmové území bylo zpracováváno celkem 7 mapových listů, které bylo třeba za pomoci nástroje Merge sloučit v jednotný celek.

Pro tvorbu rastrového modelu byla použita jedna z interpolačních metod, které využívají shapefile v podobě bodového pole. Konkrétně pro vytvoření DMT byl použit nástroj Natural Neighbors, který můžeme najít ve Spatial Analys Tools – Interpolation. Jako vstupní soubor je vybrán vytvořený sloučený datový formát, dále hodnota Z, která byla upravena v úvodu v rámci textového editování zdrojového souboru a jako velikost buňky byla stanovena hodnota 5 metrů. Jako poslední byl zvolen a pojmenován výstupní soubor - DMT 4G.

Následně byl DMT 4G ořezán nástrojem Extract by Mask, který najdeme ve Spatial Analys Tools – Extraction, na požadované území. Ořez zájmového území byl používán při všech ostatních výpočtech (Obr. 17).

Pro výpočet topografického faktoru LS (Obr. 9) byla využita metoda dle Mitášové (Mitášová a kol., 1998), která byla již detailněji popsána v kapitole 4.1.1., tento faktor byl zároveň porovnán s výpočtem v programu SAGA GIS (Obr. 10).

5.1.3. Digitální model reliéfu 5. generace (DMR 5G)

Digitální model reliéfu 5. generace (DMR 5G) je model tvořený ve formě výšek diskrétních bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v terénu pokrytém vegetací. Konstrukce vlastních trojúhelníků je řízená tzv. Delaunayho triangulací. V zalesněném terénu a výrazně členitém terénu (skály) zcela automatické zpracování nefunguje a je třeba manuální úpravy chyb. Oproti DMR 4G je u modelu DMR 5G další fází po robustní filtraci manuální zpracování dat, která spočívá v interaktivní vizuální kontrole dat (www10).

Stejně jako tomu bylo při tvorbě DMT 4G, bylo nejprve třeba upravit získaná data z datového formátu (*.xyz) převedením do textového formátu (např. *.csv, *.txt, *.doc nebo *.xls) a následně upravením zdrojového souboru tak, aby bylo možné zhotovení DMT.

Totožný postup byl proveden i při vytvoření DMT, kde byl použit nástroj Natural Neighbors a výsledný DMT byl znovu oříznut nástrojem Extract by Mask. Jako velikost buňky byla stanovena hodnota 1 metr (Obr. 17).

Výpočet LS faktoru (Obr. 9 a Obr. 10) byl stejně jako v předchozích dvou případech zpracován dvojitým způsobem a to dle Mitášové a v programu SAGA GIS, který byl následně použit pro výpočet dlouhodobé ztráty půdy vodní erozí.

5.2. Analýza výpočtu eroze – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G

Hlavním odlišností výpočtu erozní ohroženosti a přínosem aplikace GIS je jeho využití při výpočtu topografického faktoru LS. Jako základní vstupní podklad pro výpočet LS faktoru slouží DMT v rastrové podobě s rozlišením 10, 5 a 1 m. Nejdříve je třeba vždy v rámci jednoho osamocené pozemku (resp. odtokově uzavřené oblasti) určit dílčí velikost povodí každého jednotlivého pixelu. V prostředí ArcGIS 10.2.2 pomocí nástroje Spatial Analyst s využitím hydrologických nástrojů je nejdříve generována z vrstvy Flow Direction (směr odtoku) vrstva Flow Accumulation (akumulace odtoku) a dále vrstva Slope (sklonitost) a to ve stupních [°]. Upravený rastr DMT se za pomoci nástroje Fill použije jako vstupní vrstva v následujících výpočtech směrů odtoků (Flow Direction) a akumulace odtoku (Flow Accumulation). Výsledný rastr ořízneme na zájmové území v Raster Calculatoru. Pro výpočet nepřerušené délky svahu využijeme nástroj Flow Length (délka odtoku = nepřerušená délka svahu). Vstupní vrstvou bude v přechodném kroku vytvořená vrstva Flow Direction.

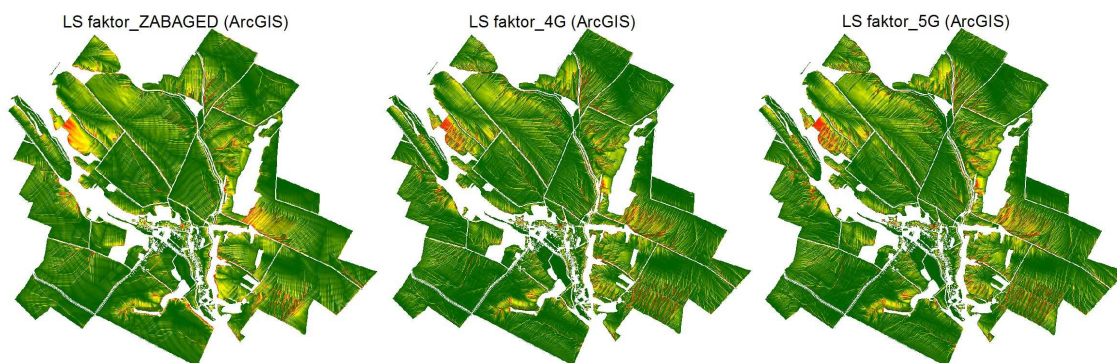
Pro výpočet LS faktoru je také důležité zpracovat sklon svahu všech výškopisných modelů. Sklon svahu představuje změnu nadmořských výšek ve směru spádové křivky. Z principu funkce algoritmu Slope (Obr. 16), který využívá rozdílů nadmořských výšek mezi ní a osmi sousedními buňkami, vyplývá, že čím větší bude rozdíl těchto výšek, tím větší bude i sklon. Převýšení lze definovat jako rozdíl nadmořských výšek dvou bodů.

Jak je patrné z doložených výsledků (Tab. 3), při tvorbě sklonu svahu z výškopisného modelu ZABAGED je zřejmá nedostatečná kvalita vrstevnicového výškopisu ve srovnání s DMR 4G a DMR 5G, kde se výsledné hodnoty tolik neliší.

Tab. 3 Hodnoty sklonu svahu – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G

Sklonitost	Minimum	Maximum
ZABAGED	0	27,48
DMR 4G	0	51,06
DMR 5G	0	50,5

LS faktor je v případě využití metody výpočtu průměrných ročních ztrát půdy prostřednictvím rovnice RUSLE jediným rozdílným faktorem. Zbylé faktory použité ve výpočtu RUSLE mají stejná vstupní data (Tab. 8).



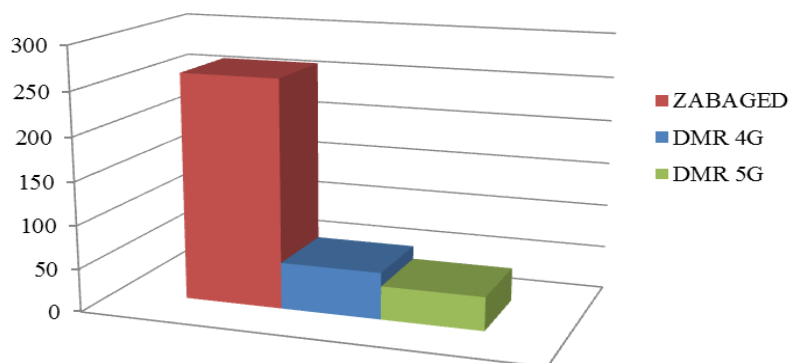
Obr. 9 Výpočet LS faktoru – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G (Mitášová, 1998)

Podobně jak tomu bylo v doložených výsledcích u sklonu svahu, tak i v případě výpočtu topografického faktoru LS (Tab. 4) jsou patrné značné rozdíly z dat ZABAGED, kdy je hodnota několikanásobně vyšší oproti přesnějším DMR (Graf 1).

Tab. 4 Hodnoty výpočtu LS faktoru (Mitášová, 1998) – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G

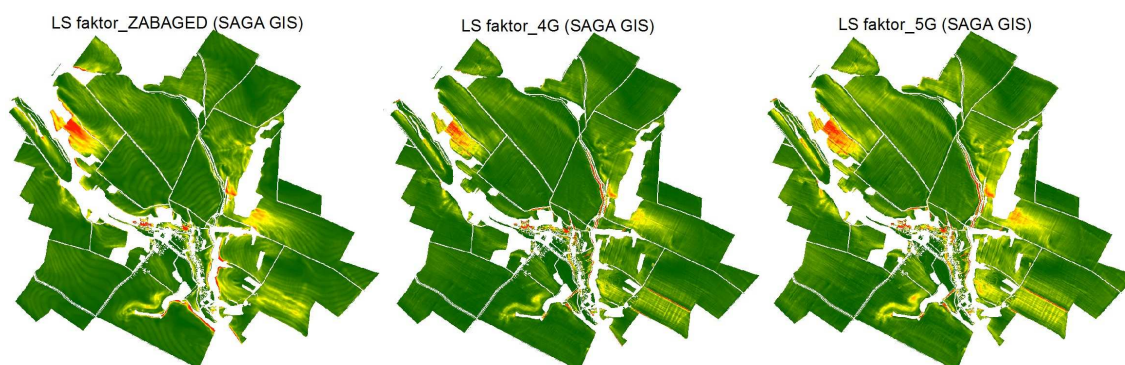
LS faktor (Mitášová, 1998)	Minimum	Maximum
ZABAGED	0	261,99
DMR 4G	0	53,85
DMR 5G	0	38,63

Srovnání výsledků výpočtu LS faktoru (Mitášová, 1998)



Graf 1 Srovnání výsledků výpočtu LS faktoru (Mitášová, 1998) – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G

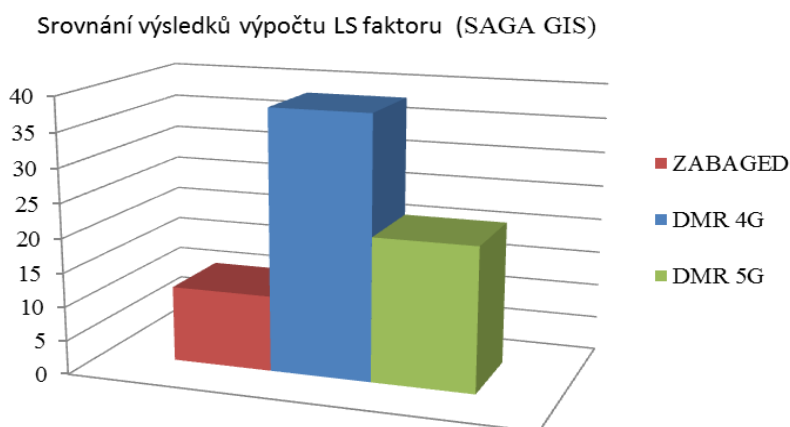
Společně s metodou výpočtu LS faktoru dle Mitášové (1998) bylo v práci použito srovnání rozdílů z prostředí programu SAGA GIS (Obr. 10), který využívá odlišného přístupu výpočtu topografického faktoru LS. Oba tyto modely výpočtu byly porovnány s daty zpracovanými v geoportálu SOWAC-GIS (VÚMOP).



Obr. 10 Výpočet LS faktoru – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G (SAGA GIS)

Tab. 5 Hodnoty výpočtu LS faktoru (SAGA GIS) – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G

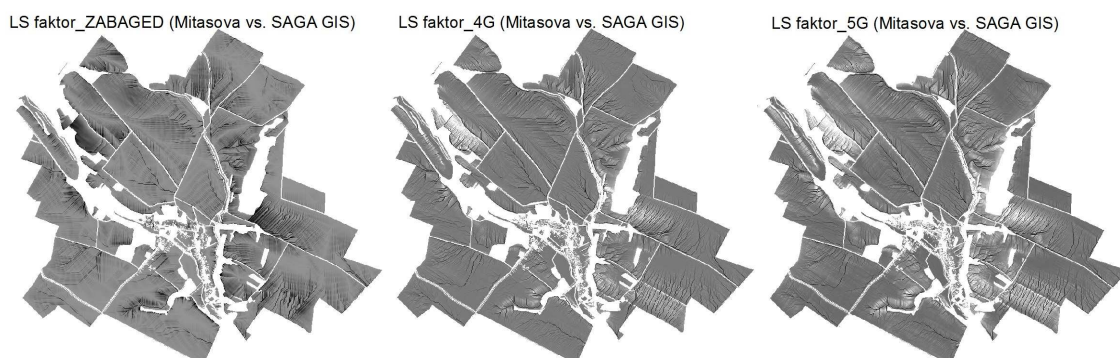
LS faktor (SAGA GIS)	Minimum	Maximum
ZABAGED	0	11,13
DMR 4G	0	38,23
DMR 5G	0	21,07



Graf 2 Srovnání výsledků výpočtu LS faktoru (SAGA GIS) – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G

Při porovnání výsledných hodnot (Tab. 5) v programu SAGA GIS je na první pohled patrný rozdíl metodiky výpočtu oproti metodice výpočtu v prostředí ArcGIS, kde kvalita dostupných dat ZABAGED ovlivňuje výsledek v takové míře, že byla data vyhodnocena jako nevyhovující (Graf 2). Data ZABAGED byla vyhodnocena jako nevhodná na základě použitého nástroje při interpolaci, kde díky značným

vrstevnicovým rozdílům (sklon a délka svahu) dochází ke změnám hodnoty odtoku. DMR 4G a DMR 5G se svými výsledky oproti hodnotám z ArcGIS na první pohled tolik neliší, ovšem při následném vyhodnocení rozdílů (Obr. 11, Tab. 6) za pomoci nástroje Raster Calculator je zjevné, nakolik je výběr metodiky výpočtu LS faktoru rozhodující a zásadní.



Obr. 11 Porovnání rozdílů LS faktoru – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G (Mitášová vs. SAGA GIS)

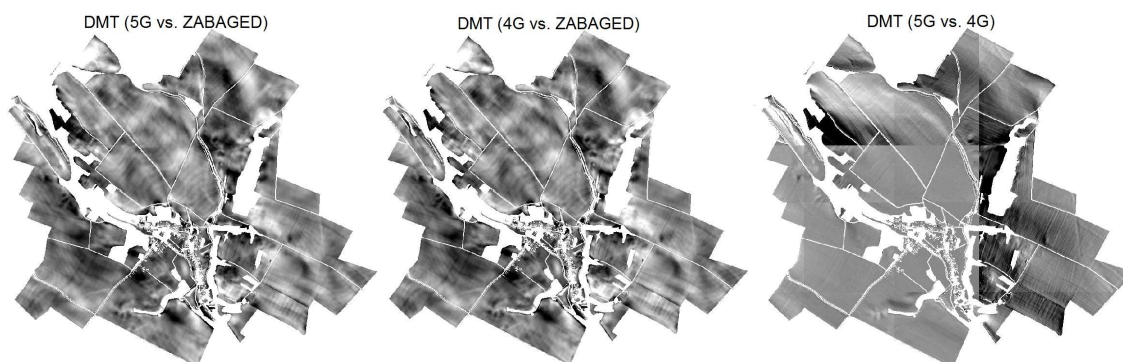
Nejčastěji využívanou metodou pro kvantifikaci systémových a náhodných chyb je výpočet střední kvadratické chyby (RMSE), která určuje rozptyl rozdělení četnosti odchylek mezi původními výškovými daty a daty vygenerovaného DMR. Vyšší hodnota RMSE odpovídá většímu rozptylu mezi dvěma datovými sadami (Wood, 1996).

Tab. 6 Porovnání rozdílů LS faktoru (Mitášová vs. SAGA GIS) – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G

LS faktor (Mitášová vs. SAGA GIS)	Minimum	Maximum	Střední odchylka	Směrodatná odchylka	RMSE ^a
ZABAGED	-5,92	234,4	0,48	2,4	6,24
DMR 4G	-31,86	41,46	-0,32	0,97	1,26
DMR 5G	-16,56	29,27	-0,45	0,87	1,21

^a Root Mean Square Error (RMSE)

Při porovnání DMT byl nejdříve řešen výpočet odchylek mezi DMR 5G jakožto nejpřesnějším modelem a jeho srovnání se zbývajícími výškopisnými modely. Na základě odečítání DMT 5G, DMR 4G a ZABAGED byly zpracovány výsledné mapy (Obr. 12) a tabulka s výslednými hodnotami (Tab. 7), ve kterých je patrný největší rozdíl mezi modely DMR 5G a ZABAGED. Oproti tomu rozdíl mezi DMR 5G a DMR 4G není tak výrazný, přesto však můžeme bezesporu říci, že při využití DMR 5G je zobrazení terénu přesnější a i lokální terénní anomálie jsou lépe rozpoznatelné.



Obr. 12 Vzájemné porovnání modelů výpočtu DMT (odečtením) – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G

Tab. 7 Porovnání rozdílů DMT (ArcGIS) – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G

Výškopisné modely	Minimum	Maximum	Střední odchylka	Směrodatná odchylka	RMSE ^a
DMR 5G vs. ZABAGED	-6,5	7,88	-0,07	0,74	0,81
DMR 4G vs. ZABAGED	-5,56	7,89	-0,11	0,73	0,64
DMR 5G vs. DMR 4G	-1,82	3,04	0,02	0,17	0,049

^a Root Mean Square Error (RMSE)

Jako první byla vypočítána průměrná roční hodnota ztráty půdy dle Mitášové (Tab. 8 a 9) a následně porovnání výškopisných modelů mezi sebou a vypočítání jejich rozdílů (Graf 3). Rozdíly v případě DMR 5G a DMR 4G s modelem ZABAGED (Obr. 13) jsou ve statistické hodnocení velmi výrazné (Tab. 10). V případě statistického srovnání (Tab. 9) lze bezesporu určit DMR 5G jako vhodnější pro výpočet erozního smyvu půdy.

Tab. 8 Vstupní data pro výpočet RUSLE (dle Mitášové, 1998)

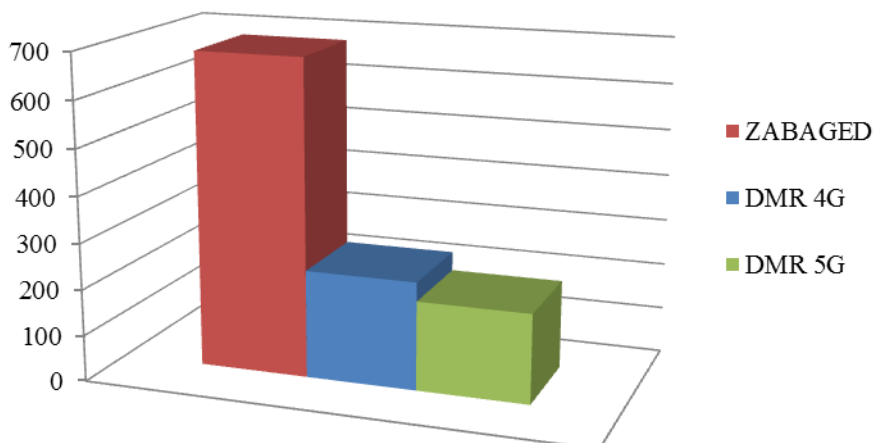
Faktor ^a	Vstupní digitální data	Zdroj	Metoda odvození	Hodnota
R	Ombrografická měření	ČHMÚ	Janeček a kol. (2012)	40 MJ/ha/cm/h-1
K	Půdní mapa BPEJ	SPÚ	Janeček a kol. (2012)	HPJ 01-0,41; HPJ 08-0,49 HPJ 10-0,53; HPJ 29-0,32 HPJ 37-0,16; HPJ 40-0,24 HPJ 56-0,4; HPJ 58-0,42
LS	DMT, vodní toky, hranice pozemků, cesty	ČÚZK, LPIS	Mitášová a kol. (1998)	ZABAGED: 0-261,99 DMT 4G: 0-53,85 DMT 5G: 0-38,63
C	Využití pozemků a pěstované plodiny	VÚMOP	Janeček a kol. (2012)	TTP (louky) - 0,005 obilniny - 0,266 zahrady, vinice - 0,26
P	-	-	Janeček a kol. (2012)	1

^a dle Revidované rovnice pro výpočet dlouhodobé ztráty půdy erozí (t/ha.rok)

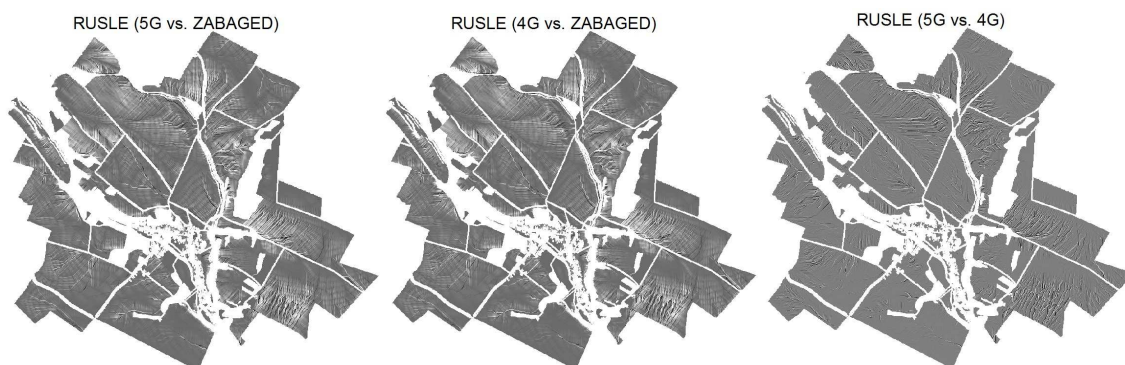
Tab. 9 Výpočet průměrné roční ztráty půdy (t/ha.rok) – RUSLE (Mitášová, 1998)

Výpočet RUSLE ^a	Minimum	Maximum
ZABAGED	0	684,66
DMR 4G	0	234,34
DMR 5G	0	193,55

Srovnání výsledků výpočtu erozní ohroženosti (Mitášová, 1998)



Graf 3 Srovnání výsledků výpočtu erozní ohroženosti (Mitášová, 1998) – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G



Obr. 13 Vzájemné porovnání modelů výpočtu RUSLE (odečtením) – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G

Tab. 10 Hodnoty rozdílových faktorů výpočtu RUSLE výškopisných modelů (Mitášová, 1998)

Výškopisné modely	Minimum	Maximum	Střední odchylka	Směrodatná odchylka	RMSE ^a
DMR 5G vs. ZABAGED	-616,22	181,53	-5,15	9,1	87,96
DMR 4G vs. ZABAGED	-628,08	172,94	-5,2	9,3	91,69
DMR 5G vs. DMR 4G	-168,62	193,54	-0,85	3,79	15,21

^a Root Mean Square Error (RMSE)

Stejným způsobem jako v případě výpočtu s využitím modelu Mitášová, byla zpracována i průměrná roční hodnota ztráty půdy v programu SAGA GIS (Tab. 12, Graf 4).

Tab. 11 Vstupní data pro výpočet RUSLE (SAGA GIS)

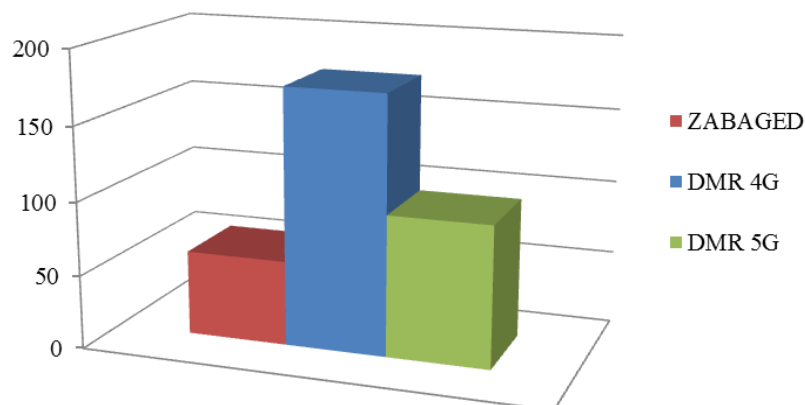
Faktor ^a	Vstupní digitální data	Zdroj	Metoda odvození	Hodnota
R	Ombrografická měření	ČHMÚ	Janeček a kol. (2012)	40 MJ/ha/cm/h-1 HPJ 01-0,41; HPJ 08-0,49
K	Půdní mapa BPEJ	SPÚ	Janeček a kol. (2012)	HPJ 10-0,53; HPJ 29-0,32 HPJ 37-0,16; HPJ 40-0,24 HPJ 56-0,4; HPJ 58-0,42
LS	DMT, vodní toky, hranice pozemků, cesty	ČÚZK, LPIS	SAGA GIS	ZABAGED: 0-11,13 DMT 4G: 0-38,23 DMT 5G: 0-21,07
C	Využití pozemků a pěstované plodiny	VÚMOP	Janeček a kol. (2012)	TTP (louky) - 0,005 obilniny - 0,266 zahrady, vinice - 0,26
P	-	-	Janeček a kol. (2012)	1

^a dle Revidované rovnice pro výpočet dlouhodobé ztráty půdy erozí (t/ha.rok)

Tab. 12 Výpočet průměrné roční ztráty půdy (t/ha.rok) – RUSLE (SAGA GIS)

Výpočet RUSLE ^a	Minimum	Maximum
ZABAGED	0	57,58
DMR 4G	0	174,58
DMR 5G	0	95,74

Srovnání výsledků erozního ohrožení v programu SAGA GIS



Graf 4 Srovnání výsledků výpočtu eroze v programu SAGA GIS – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G

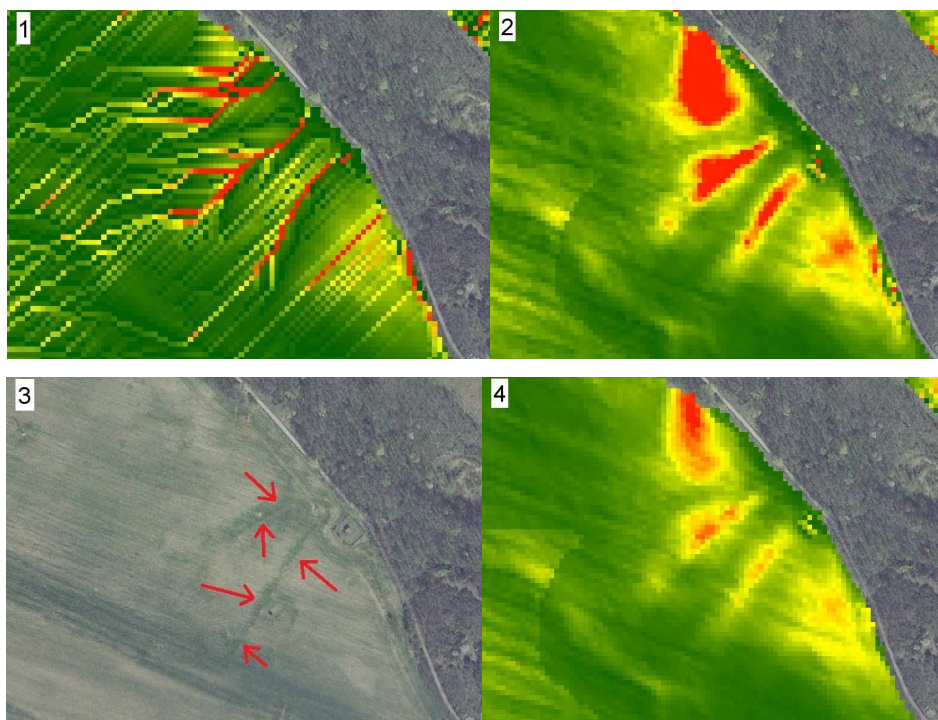
S využitím nástroje Zonal Statistics (Spatial Analyst Tools - Zonal) byla provedena zonální statistika ArcGis, která identifikovala nejvíce ohrožené erozní plochy a sumarizovala průměrné množství smyvu půdy pro jednotlivé PBD (Obr. 20). Nejvíce jsou ohrožena území v oblasti vinic v jihovýchodní části a částečně odlesněná lokalita na severozápadě území, ve které v průběhu dokončování práce proběhla obnova společně se zatravněním. Hlavním důvodem ohrožení je v těchto dvou oblastech velikost sklonu svahu, která se pohybuje v rozmezí 8 – 13 stupňů [°].

6. DISKUSE

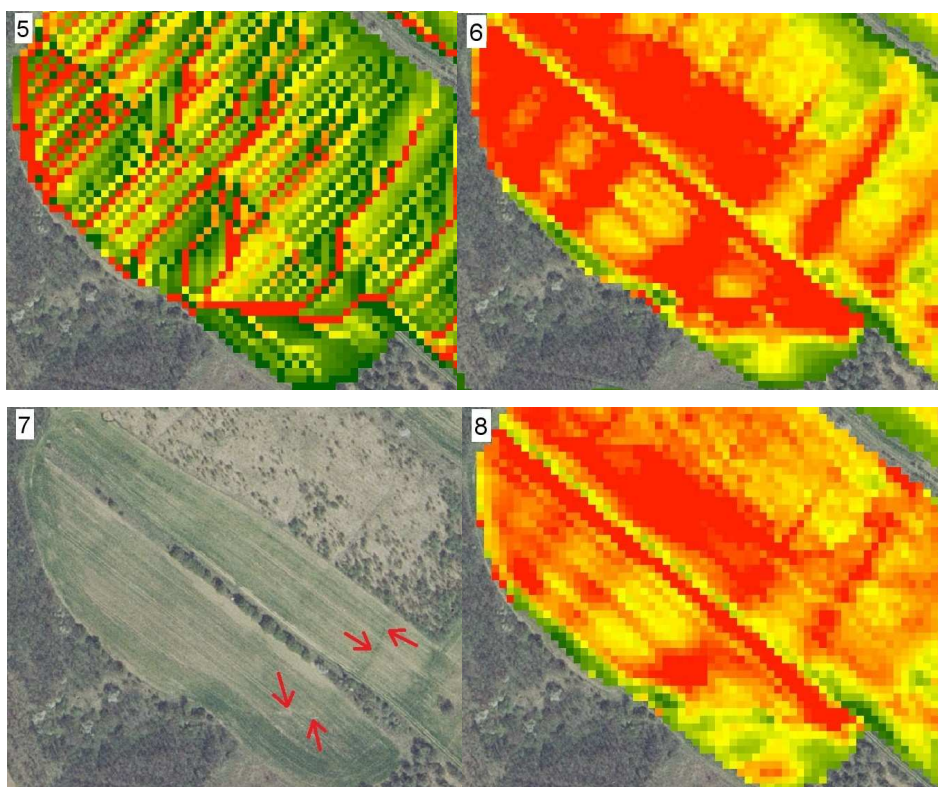
Metoda RUSLE je vhodná pro rychlé a jednoduché zhodnocení erozního ohrožení území a jeho výsledky odpovídají hypotetické dlouhodobé potenciální ztrátě půdy erozí v tunách z hektaru za rok. V tomto konkrétním případě je ovšem důležité si uvědomit, že RUSLE neumožňuje řešit kontinuitu erozního procesu v rámci sledovaného území. Eroze je simulována jen z hlediska odnosu půdních částic z plochy a neřeší ji z hlediska transportu a depozice v rámci povodí a hydrografické sítě. Z časového i prostorového hlediska se tedy jedná o model statický. Pro potřeby hodnocení rizik či plánování v krajině je RUSLE plně dostačující, chceme-li však simulovat reálnou erozi a zejména dynamiku transportu a depozice sedimentů v povodí, je třeba zvolit jinou metodu, respektive jiný matematický model či jejich kombinaci – např. SWAT (Unucka, Říhová et Hořínková, 2010).

Pro zhodnocení erozních procesů byly vybrány modely výpočtu dle Mitášové (1998) v prostředí programu ArcGIS a volně dostupný software SAGA GIS. Tyto modely byly vybrány na základě dostupnosti a vhodnosti použití vstupních dat a následná zpracování. Metody výpočtu (ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G) byly mezi sebou navzájem porovnány a následně srovnávány s dostupnými daty v prostředí geoportálu SOWAC-GIS, který využívá metodu výpočtu USLE2D. Omezení USLE2D nicméně přináší jeho použití v operačním systému Windows XP a nižší, což může činit problém a jeho využití v aktuálně využívaných operačních systémech se tím výrazně snižuje. Konkrétní srovnání modelů (resp. výsledků) bylo pro výškopisná data DMR 4G, se kterými pracuje VÚMOP v prostředí aplikace SOWAC-GIS.

Z detailního vyobrazení jednotlivých částí zájmového území (Obr. 14 a 15) při použití modelu výpočtu dle Mitášové (1998), v porovnání s modely SOWAC-GIS a SAGA GIS, je na první pohled evidentní odlišnost výpočtu erozního odnosu půdy. Model dle Mitášové (1998) detailně zobrazuje dopady výmolové (rýhové) eroze, oproti tomu modely SOWAC-GIS a SAGA GIS se svým výpočtem soustřeďují na možné dopady eroze plošné. Ve vybraných oblastech lokality bylo za pomoci ortofota v nejvíce ohrožených oblastech území možné dohledání konkrétních dopadů výmolové eroze na ZPF (Obr. 14 a 15 - 3, 7).

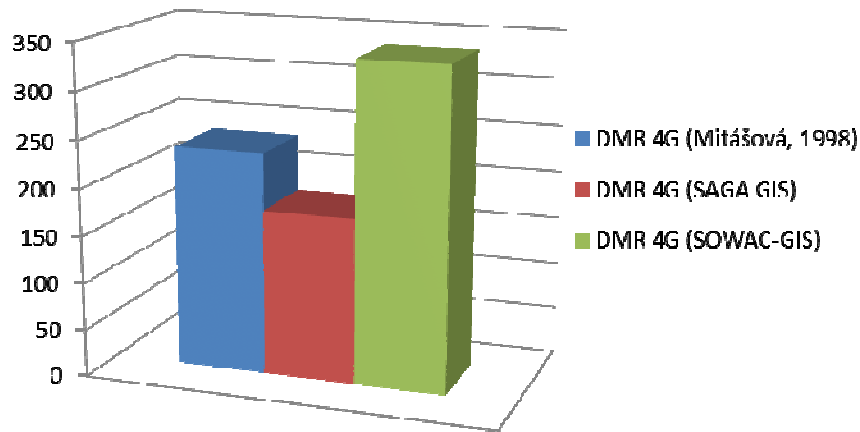


Obr. 14 Srovnání modelů – Mitášová (1), USLE2D (2), ortofoto (3) a SAGA GIS (4)



Obr. 15 Srovnání modelů – Mitášová (5), USLE2D (6), ortofoto (7) a SAGA GIS (8)

Srovnání výsledků erozní ohroženosti dle různých modelů (t/ha.roč)



Graf 5 Srovnání výsledků výpočtu erozní ohroženosti DMR 4G – Mitášová, SAGA GIS, SOWAC-GIS

Při používání DMR 4G (Graf 5) je vždy nezbytné vzít v úvahu skutečnost, že se terén mohl v období od provedení LLS (letecké laserové skenování) výrazně změnit ať již v důsledku přírodních jevů tak v důsledku lidské činnosti. Současně je nutné vždy brát ohled na možnosti a omezení generalizované reprezentace terénního reliéfu pomocí čtvercové sítě bodů (GRID), která pochopitelně nemůže vystihnout lokální terénní anomálie a hrany. Je třeba používat přesnější modely, např. detailnější DMR 5G, ve tvaru nepravidelné trojúhelníkové sítě (TIN), které zobrazují přesněji i lokální terénní anomálie. V případě DMR 5G nebyla však v době zpracovávání kvalifikační práce dostupnost výškopisného modelu pro celé zájmové území ČR, což omezuje její využití (v březnu 2016 byl DMR 5G dokončen na 70 % území; ČÚZK, 2016).

Standard DZES upravuje podmínky pěstování erozně nebezpečných plodin na MEO a SEO půdách vymezených v evidenci půdy podle uživatelských vztahů (LPIS), jehož cílem je ochrana půdy před vodní erozí a předcházení erozních důsledků. V průběhu řešení práce nebyla na zájmovém území vysázena žádná z uvedených erozně nebezpečných plodin. Samotné zavedení doporučených jednotlivých protierozních opatření v rámci DZES, je pro území ČR jedním z důležitých faktorů ke snížení vodní eroze na zemědělsky využívaných půdách. Proto by měl být kladem velký důraz nad dodržováním těchto standardů při čerpání dotací a pravidelná kontrola určených orgánů. Použitý vstupní podklad pro výpočet eroze ovlivní výsledek mapy erozního ohrožení, která se pak promítá do těchto standardů a tak by špatný výpočet z nepřesného podkladu mohl negativně ovlivnit způsob hospodaření.

7. ZÁVĚR

Zrychlená eroze půdy je globálním problémem a jako taková se dotýká i naší krajiny, která je chráněna proti tomuto poškození standarty DZES a jejich protierozními přístupy. V kvalifikační práci bylo provedeno zhodnocení erozních procesů na ZPF katastru obce Horní Dunajovice, které bylo vyhodnoceno za pomoci vybraných erozních modelů v prostředí programu ArcGIS (Mitášová, 1998) a SAGA GIS. Modely byly vybrány na základě jejich nenáročnosti na vstupní data a uživatelské prostředí, které je pro uživatele koncipováno velice intuitivně. Výsledné hodnoty byly vzájemně porovnány a konfrontovány s údaji publikovanými na geoportálu SOWAC-GIS (VÚMOP).

Rozdílné metody výpočtů jsou jednou z hlavních odlišností v celkovém porovnání výsledných hodnot. V tomto ohledu je třeba nezapomenout, že každý model svojí odlišností upozorňuje na různé druhy problematiky eroze. Lze říci, že všechny použité modely jsou navrženy na nějakou konkrétní situaci, pro konkrétní analýzu. Na druhou stranu je tato specifikace funkce modelů velice užitečná, pokud máme data různé kvality a jasnou představu o tom, jaké výstupy chceme získat. Díky vhodnému výběru modelu můžeme výrazně ušetřit čas a zároveň ovlivnit náročnost výpočtu, která má vliv na konečné výstupy. Jedním z rozhodujících momentů je výběr modelu výpočtu LS faktoru. Tímto krokem ovlivníme celkovou analýzu výpočtu a výsledné hodnoty po všech stránkách.

Interpretované výsledky porovnávaných modelů poukázaly na odlišný přístup výpočtu topografického faktoru LS a s tím spojenou možnost výběru modelu při rozhodování pro konkrétní využití a danou situaci. Jednoznačně nelze rozhodnout, který model výpočtu je tím nejvhodnějším, ovšem v posledních letech lze jednoznačně říci, že volně dostupný nekomerční program USLE2D je právě tím nejhojněji využívaným. Pro běžné použití v ČR vyhovuje následující rovnice (Mitášová a kol., 1998). Bezesporu lze ale říci, že využití DMR 5G poukázalo na přesnější zpracování a možnost vyobrazení lokálních terénních anomálií. V případě statistického srovnání v rámci této práce lze určit DMR 5G jako vhodnější pro výpočet erozní ohroženosti.

8. SUMMARY

Accelerated soil erosion is a global problem and as such, it affects also our landscape, which is protected against this damage by GAEC standards and their anti-erosion approaches. In the thesis there was made an assessment of the erosion processes on the ZPF land registry Horní Dunajovice, which was evaluated by using selected erosion models in the ArcGIS (Mitášová, 1998) and SAGA GIS program. The models were selected based on their low demands on the input data and the user interface, which is designed for users very intuitively. The resulting values were mutually compared and confronted with data that are published on geoportal SOWAC-GIS (VÚMOP).

The different methods of the calculations are one of the main differences in the overall comparison of the resulting values. In this regard it is important to remember that every model with its varieties shows different kinds of problems of erosions. We can say that all the models are designed for the specific situation, for the specific analysis. On the other hand, this specification of the models function is useful if we have data of the varying quality and the clear idea of what outcomes we want to get. Thanks to the appropriate choice of model we can save time significantly and also we can influence the severity of calculation, which has an impact on the final outcomes. One of the decisive moments is the selection of the model for the LS factor calculation. We influence the whole analysis of the calculation and the final values in all aspects by this step.

The interpreted results of the compared models pointed to the different approach for the calculation of the topographic factor LS and the associated possibility of the model selection during the decision for the specific situation and the particular purpose. We cannot decide definitely which model of the calculation is the most appropriate but in recent years we can definitely say that freely available USLE2D program is the most widely used. For a normal use in the Czech Republic is the following equation satisfying (Mitášová a kol., 1998).

Undoubtedly we can say that the use of the DMR 5G pointed to more accurate processing and to the possibility of the local field anomalies representation.

9. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BADALÍKOVÁ, Barbora a Jan HRUBÝ. Využití netradičních meziplodin při protierozní ochraně půdy. Troubsko: Zemědělský výzkum, 2009, 10 s. ISBN 978-80-254-5693-4.
- [2] DOBROVOLNÝ, P.: Dálkový průzkum Země, Digitální zpracování obrazu. Brno, 1998. ISBN 80-210-1812-7. Masarykova univerzita v Brně.
- [3] DOSTÁL T., KRÁSA J., VÁŠKA J., VRÁNA K., KOLÁČKOVÁ J., NOVÁKOVÁ H., NYKL J. Metody odhadu erozní ohroženosti a transportu sedimentu z povodí. Dílčí zpráva Projektu COST. FSv ČVUT v Praze. 2002
- [4] DOSTÁL, Tomáš. Využití dat a nástrojů GIS a simulačních modelů k navrhování TPEO: metodika. 1. vyd. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 2014, 69 s. ISBN 978-80-87361-30-6.
- [5] EFE, R., EKINCI, D., CUREBEL, I. Erosion analysis of Sahin watershed (NW of Turkey) using GIS based on RUSLE (3d) method; J. Appl. Sci. 8(1) 49–58. 2000. ISSN 1812-5654.
- [6] FREEMAN, G.T. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. Computers and Geosciences, 1991, 17:413-22.
- [7] HOLÝ, Miloš. Eroze a životní prostředí. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1994, 283 s. ISBN 80-01-01078-3.
- [8] HENGEL, T. a REUTER, H. I. (eds). (2009): Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science, vol. 33, Elsevier, 772 pp. ISBN 978-0-12-374345-9.
- [9] JAKUBÍKOVÁ, A.: Použití programu RUSLE pro určení erozního ohrožení v podmínkách České republiky. [Doktorská práce (Ph.D.)]. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2004. 225 s.
- [10] JANEČEK, Miloslav. Ochrana zemědělské půdy před erozí: metodika. Vyd. 1. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 2007, 76 s. ISBN 978-80-254-0973-2.
- [11] JANEČEK, Miloslav. Základy erodologie. Vyd. 1. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2008, 165 s. ISBN 978-80-213-1842-7.
- [12] JANEČEK, Miloslav. Ochrana zemědělské půdy před erozí: metodika. 1. vyd. Praha: Powerprint, 2012, 113 s. ISBN 978-80-87415-42-9.

- [13] KADLEC, Václav. Navrhování technických protierozních opatření: metodika. 1. vyd. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 2014, 101 s. ISBN 978-80-87361-29-0.
- [14] KRÁSA J.: Hodnocení erozních procesů ve velkých povodích za podpory GIS. Dizertační práce. ČVUT, Praha, 2004.
- [15] KRÁSA J.: Atlas EROZE – moderní nástroj pro hodnocení erozního procesu. Manuál programu. ČVUT v Praze, Atlas s.r.o. VÚMOP, v.v.i., Praha 2014.
- [16] LAL, 2001. Soil Degradation by Erosion. Land Degradation and Development, 12, pp. 519 – 539.
- [17] MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ. Kontrola podmíněnosti: Průvodce zemědělce Kontrolou podmíněnosti platný pro rok 2015. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2015. ISBN 978-80-7434-208-0.
- [18] MITASOVA H., MITAS L., BROWN W. M., JOHNSTON D. M., 1998: Multidimensional soil erosion/deposition modeling and visualization using GIS. Geographic Modeling and Systems Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign, for U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories, Final report 1993–1998, Urbana, Illinois.
- [19] MORGAN, R. Soil erosion and conservation. 3rd ed. Malden, MA: Blackwell Pub., 2005, 304 s. ISBN 978-1-4051-1781-4.
- [20] NĚMEČEK, Jan. Taxonomický klasifikační systém půd České republiky. Vyd. 1. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2001. ISBN 80-238-8061-6.
- [21] OWENS, P N., COLLINS, A J. Soil erosion and sediment redistribution in river catchments : measurement, modelling, and management. Wallingford, UK: CABI Pub., 2006. 328 s. ISBN 978-0-85199-050-7.
- [22] PIMENTEL, D., HARVEY, C., RESOSUDARMO, P., SINCLAIR, K., KURZ, D., MCNAIR, M., CRIST, S., SHPRITZ, L., FITTON, L., SAFFOURI, R., BLAIR, R., 1995. Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. *Econ61*, 267, pp. 1117-1123. Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K.
- [23] PODHRÁZSKÁ, Jana a Jana DUFKOVÁ. Protierozní ochrana půdy. Vyd. 1. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2005, 95 s. ISBN 80-7157-856-8.
- [24] RENARD, K.G., FOSTER, G.R., WEESIES, G.A., MCCOOL, D.K. and YODER, D.C.: Predicting soil erosion by water: a guide to conservation

- planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Draft August 1993. 1993.
- [25] ROMERO, C.C., 2005. A multi-scale approach for erosion assessment in the Andes. Dissertation thesis, Wageningen University and Research Centre, The Netherlands.
- [26] SCHAWB, G., D. FANGMEIER, W. ELLIOT and R. FREVERT., 1993. Soil and water conservation engineering. Fourth Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- [27] ŠACH, František a Vladimír ČERNOHOUS. Metodické postupy ochrany lesních pozemků proti erozi: recenzovaná metodika. Strnady: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, 2009, 54 s. ISBN 978-80-7417-004-1.
- [28] VAN DER KNIJFF J.M., JONES R.J.A., MONTANARELLA L.. Soil Erosion Risk Assessment in Europe, Space Application Institute, European Soil Bureau, Italy, 2000
- [29] VAN ROMPAY, A., VERSTRAETEN, G., VAN OOST, K., GOVERS, G., POESEN, J.. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Processes and Landforms* 26 (11), 2001, p. 1221-1236.
- [30] VERSTRAETEN, G.. Regional scale modelling of hillslope sediment delivery with SRTM elevation data. *Geomorphology* 81, 2006, p. 128 – 140.
- [31] VOPRAVIL, Jan a kol. Půda a její hodnocení v ČR. 1. vyd. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 2009-2011. 2 sv. ISBN 978-80-87361-02-3.
- [32] WERNER, M. v., SCHMIDT, J.: EROSION 3D, BAND III, Modellgrundlagen – Bedienungsanleitung, Freiberg, manuál k programu, angl. verze, 1996
- [33] WHITEMAN, C. D., 2000. Mountain meteorology. Fundamentals and applications. Oxford University Press. 355 pp.
- [34] WISHMEIER, W.H., SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. USDA, Agriculture handbook 537. US Dept. of Agriculture, Washington, DC., 1978
- [35] WOOD, J.D.: The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models. Ph.D. thesis, University of Leicester, UK, 1996, 466 pp. [online], dostupný z: <https://lra.le.ac.uk/handle/2381/34503>

10. SEZNAM TABULEK

- [1] Tab. 1 Klimatické charakteristiky oblasti T2
- [2] Tab. 2 Klimatické charakteristiky oblasti T4
- [3] Tab. 3 Hodnoty sklonu svahu – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G
- [4] Tab. 4 Hodnoty výpočtu LS faktoru (Mitášová, 1998) – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G
- [5] Tab. 5 Hodnoty výpočtu LS faktoru (SAGA GIS) – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G
- [6] Tab. 6 Porovnání rozdílů LS faktoru (Mitášová vs. SAGA GIS) – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G
- [7] Tab. 7 Porovnání rozdílů DMT (ArcGIS) – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G
- [8] Tab. 8 Vstupní data pro výpočet RUSLE (dle Mitášové, 1998)
- [9] Tab. 9 Výpočet průměrné roční ztráty půdy (t/ha.rok) – RUSLE (Mitášová, 1998)
- [10] Tab. 10 Hodnoty rozdílových faktorů výpočtu RUSLE výškopisných modelů (Mitášová, 1998)
- [11] Tab. 11 Vstupní data pro výpočet RUSLE (SAGA GIS)
- [12] Tab. 12 Výpočet průměrné roční ztráty půdy (t/ha.rok) – RUSLE (SAGA GIS)

11. SEZNAM OBRÁZKŮ

- [1] Obr. 1 Ztráty půdy vodní erozi v Evropě
- [2] Obr. 2 Ztráty půdy vodní erozi v ČR
- [3] Obr. 3 Zájmové území k.ú. Horní Dunajovice (Česká republika)
- [4] Obr. 4 Zájmové území k.ú. Horní Dunajovice (okres Znojmo)
- [5] Obr. 5 Mapa klimatických regionů ČR (dle Quitt, 1971)
- [6] Obr. 6 Mapa hlavních půdních jednotek k.ú. Horní Dunajovice
- [7] Obr. 7 Princip tvorby vrstvy směrů odtoku (Flow Direction)
- [8] Obr. 8 Princip nástroje Flow Accumulation
- [9] Obr. 9 Výpočet LS faktoru – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G (Mitášová, 1998)
- [10] Obr. 10 Výpočet LS faktoru – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G (SAGA GIS)
- [11] Obr. 11 Porovnání rozdílů LS faktoru – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G (Mitášová vs. SAGA GIS)
- [12] Obr. 12 Vzájemné porovnání modelů výpočtu DMT (odečtením) – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G
- [13] Obr. 13 Vzájemné porovnání modelů výpočtu RUSLE (odečtením) – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G
- [14] Obr. 14 Srovnání modelů – Mitášová (1), USLE2D (2), ortofoto (3) a SAGA GIS (4)
- [15] Obr. 15 Srovnání modelů – Mitášová (1), USLE2D (2), ortofoto (3) a SAGA GIS (4)
- [16] Obr. 16 Porovnání modelů sklonitosti – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G
- [17] Obr. 17 Porovnání modelů DMT – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G
- [18] Obr. 18 Srovnání rozdílů modelů výpočtu eroze – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G (Mitášová)
- [19] Obr. 19 Srovnání rozdílů modelů výpočtu eroze – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G (Mitášová)
- [20] Obr. 20 Srovnání rozdílů modelů za pomoci výpočtu průměrného smyvu – Mitášová, SAGA GIS, SOWAC-GIS
- [21] Obr. 22 Srovnání modelů DMR 4G – Mitášová (9), USLE2D (10), ortofoto (11) a SAGA GIS (12)

12. SEZNAM ZKRATEK

- [1] ArcGIS - Software ArcGIS for Desktop patří k nejrobustnějším programům v oboru geoinformačních technologií
- [2] BMBF - Bundesministerium für Bildung und Forschung
- [3] BPEJ - Bonitovaná půdně ekologická jednotka
- [4] ČVUT - České vysoké učení technické v Praze
- [5] ČZU - Česká zemědělská univerzita v Praze
- [6] DBP - díl půdního bloku
- [7] DEM - Digital elevation model
- [8] DMR 4G - Digitální model reliéfu 4. generace
- [9] DMR 5G - Digitální model reliéfu 5. generace
- [10] DMT – digitální model terénu
- [11] DZES - Dobrý zemědělský a environmentální stav půdy
- [12] ESRI - je společnost zabývající se vývojem softwaru určeného pro práci s geografickými informačními systémy (GIS)
- [13] HPJ – hlavní půdní jednotka
- [14] PEO – protierozní opatření
- [15] RUSLE - Revised Universal Soil Loss Equation = Revidovaná universální rovnice ztráty půdy
- [16] SAGA GIS - System for Automated Geoscientific Analyses
- [17] LAND USE – využívání krajiny
- [18] LLS - letecké laserové skenování
- [19] LPIS - základní systém evidence půdy
- [20] MEO – mírně erozně ohrožené
- [21] SEDEM - Sediment Delivery Model
- [22] SEO – silně erozně ohrožené
- [23] SOWAC-GIS - Soil and Water Conservation Geographic Information System = Geografický informační systém ochrany vody a půdy
- [24] SPÚ – Státní pozemkový úřad
- [25] SWAT - Soil and Water Assessment Tool
- [26] TIN - Triangulated irregular network
- [27] USDA-ARS - United States Department of Agriculture – Agriculture research Service

- [28] USLE - Universal Soil Loss Equation = Univerzální rovnice ztráty půdy
- [29] UTM - Univerzální transverzální Mercatorův systém souřadnic
- [30] VÚT - Vysoké učení technické v Brně
- [31] VÚMOP - Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy v.v.i..
- [32] WASWC - World Association of Soil and Water Conservation
- [33] WaTEM - Water and Tillage Erosion Model
- [34] WGS - World Geodetic System
- [35] ZPF – Zemědělský půdní fond

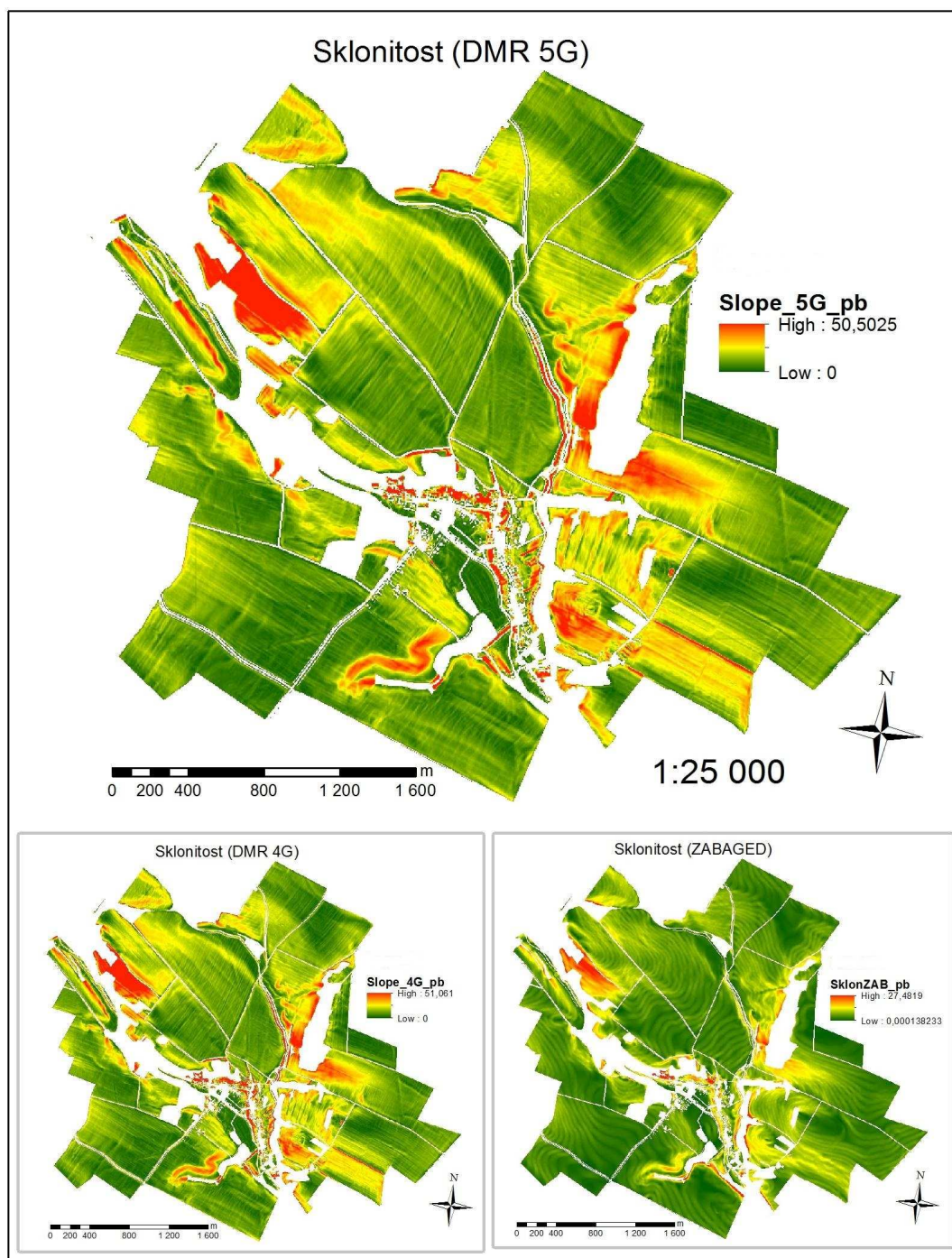
13. SEZNAM WEBOVÝCH STRÁNEK

- [1] <http://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/soil-erosion-water-rusle2015> (13.11.2015)
- [2] <http://www.vumop.cz/index.php?p=index&site=default> (15.11.2015)
- [3] <http://geo.kuleuven.be/geography/modelling/> (25.10.2015)
- [4] http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/printBooks_topics.cfm?pid=6050
(15.10.2015)
- [5] http://eagri.cz/public/web/file/37011/_14_techicka_protierozni.pdf (1.10.2015)
- [6] www.pmo.cz (10.2.2016)
- [7] http://gis.muznojmo.cz:8080/mapserv/znojmo/vyhlasiky/hdunajovice_up_n_vj_text_oduv.pdf (10.11.2015)
- [8] <http://geoportal.cuzk.cz/> (15.1.2016)
- [9] http://www.vumop.cz/sites/File/Seminare/1406_PU_Brno/13_Pochop.pdf
(4.11.2015)
- [10] http://www.atlasltd.cz/_files/upload/content/manual_atlas_eroze.pdf
(23.1.2016)

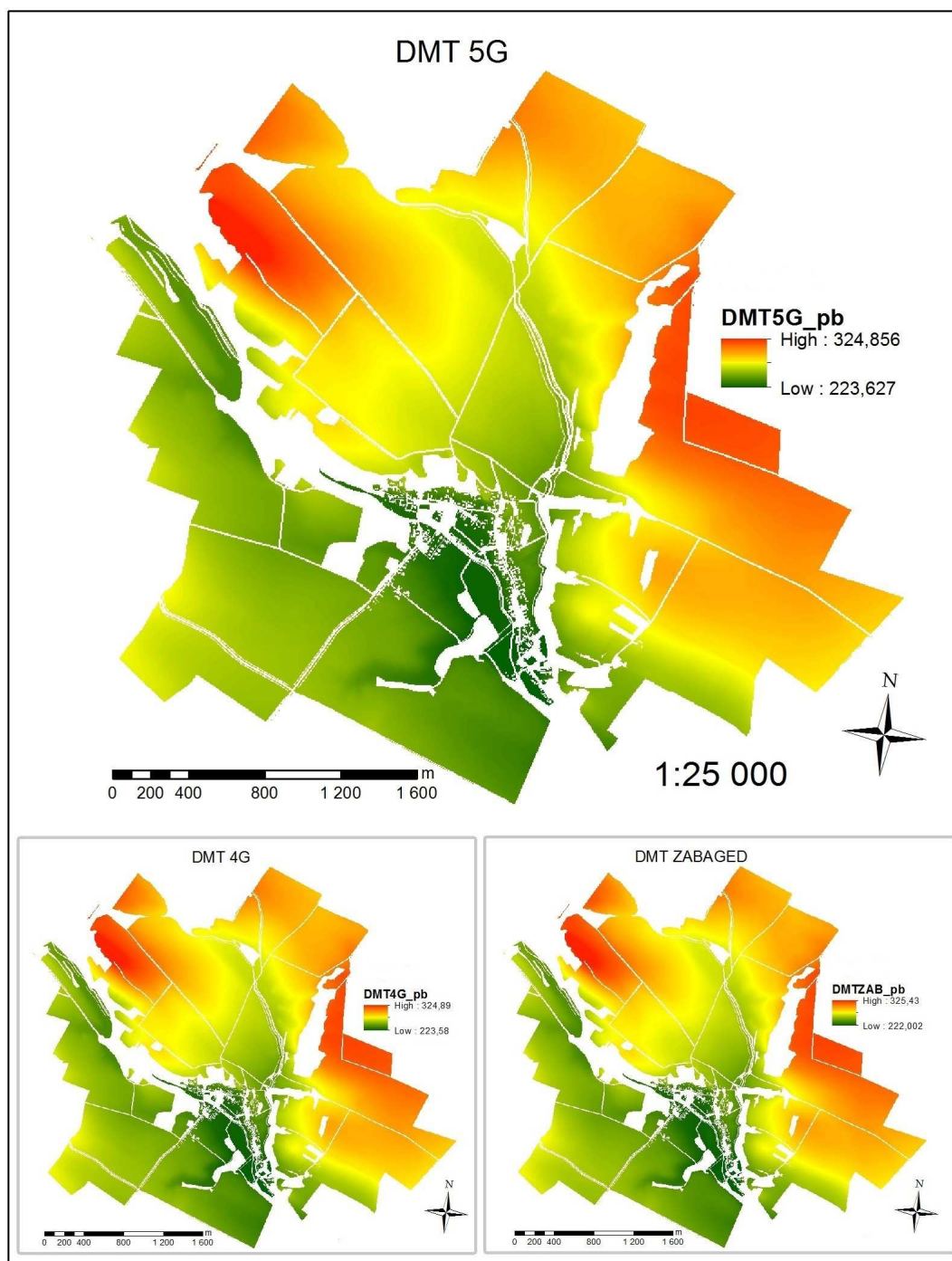
13. SEZNAM GRAFŮ

- [1] Graf 1 Srovnání modelů výpočtu eroze DMR – Mitášová, SAGA GIS, SOWAC-GIS
- [2] Graf 2 Srovnání výsledků výpočtu LS faktoru (SAGA GIS) – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G
- [3] Graf 3 Srovnání výsledků výpočtu erozní ohroženosti (Mitášová, 1998) – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G
- [4] Graf 4 Srovnání výsledků výpočtu eroze v programu SAGA GIS – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G
- [5] Graf 5 Srovnání výsledků výpočtu erozní ohroženosti DMR 4G – Mitášová, SAGA GIS, SOWAC-GIS

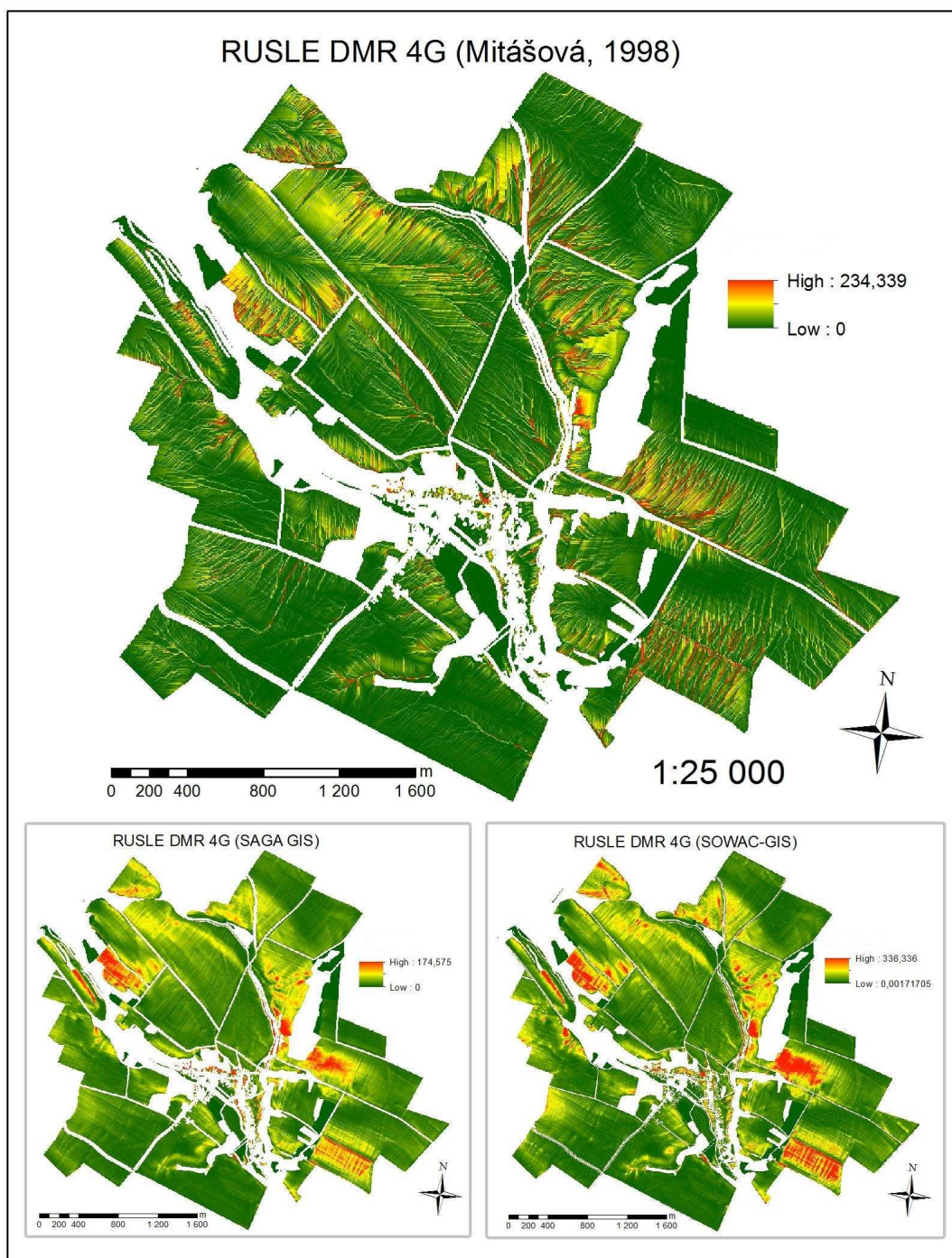
14. PŘÍLOHY



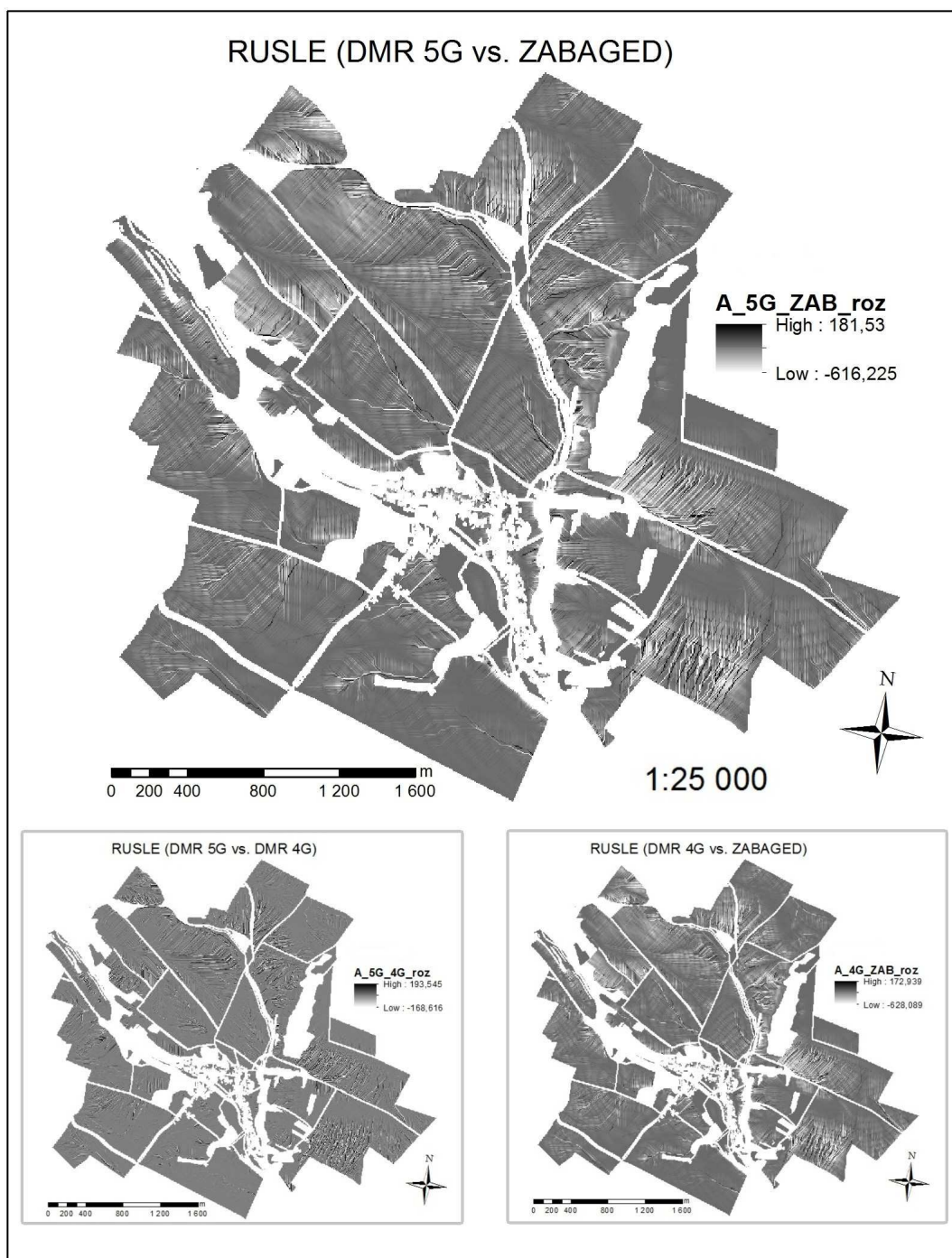
Obr. 16 Porovnání modelů sklonitosti – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G
Zdroj: ČÚZK (vlastní zpracování)



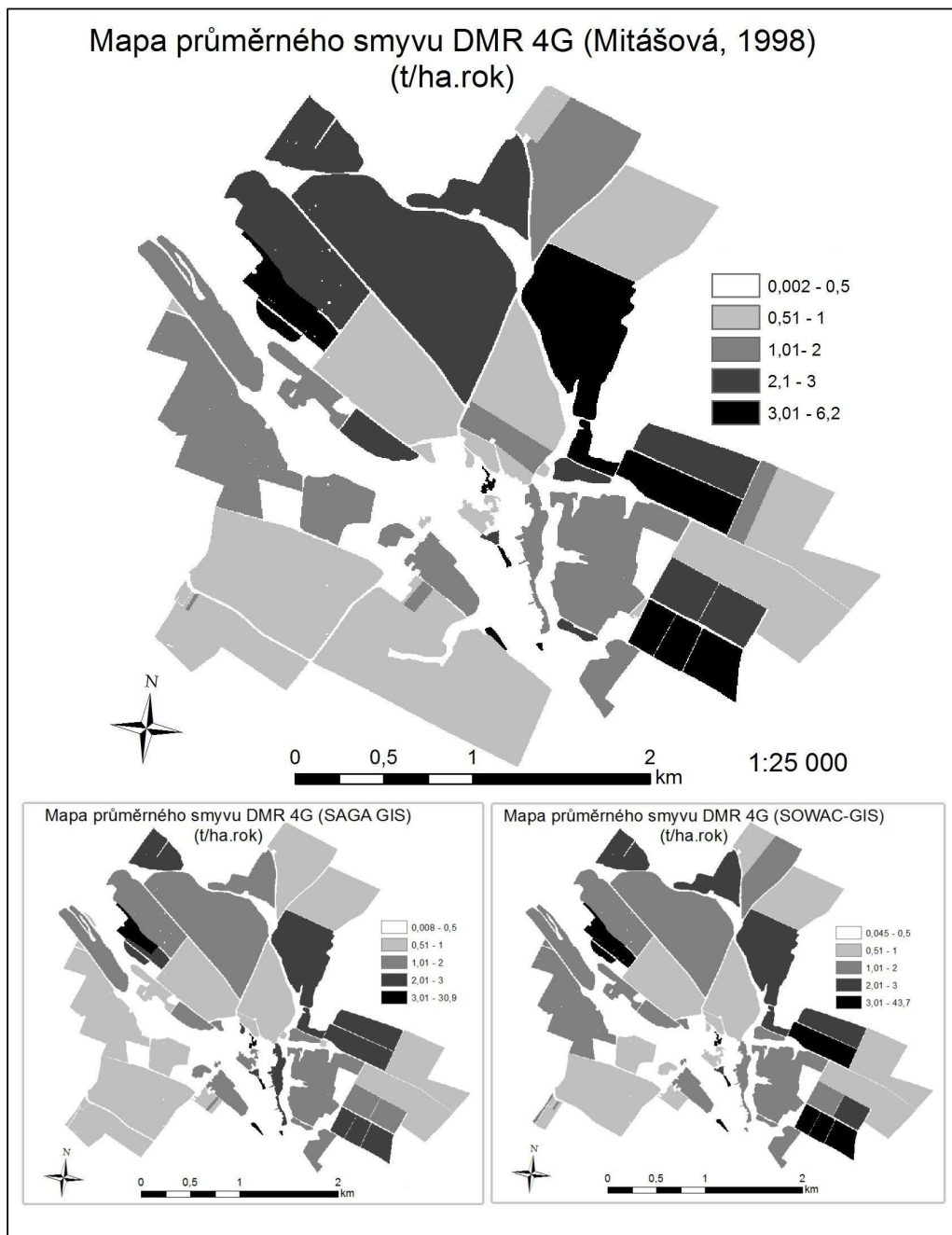
Obr. 17 Porovnání modelů DMT – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G
Zdroj: ČÚZK (vlastní zpracování)



Obr. 18 Srovnání modelů výpočtu eroze DMR 4G – Mitášová, SAGA GIS, SOWAC-GIS
Zdroj: ČÚZK, SPÚ (vlastní zpracování)

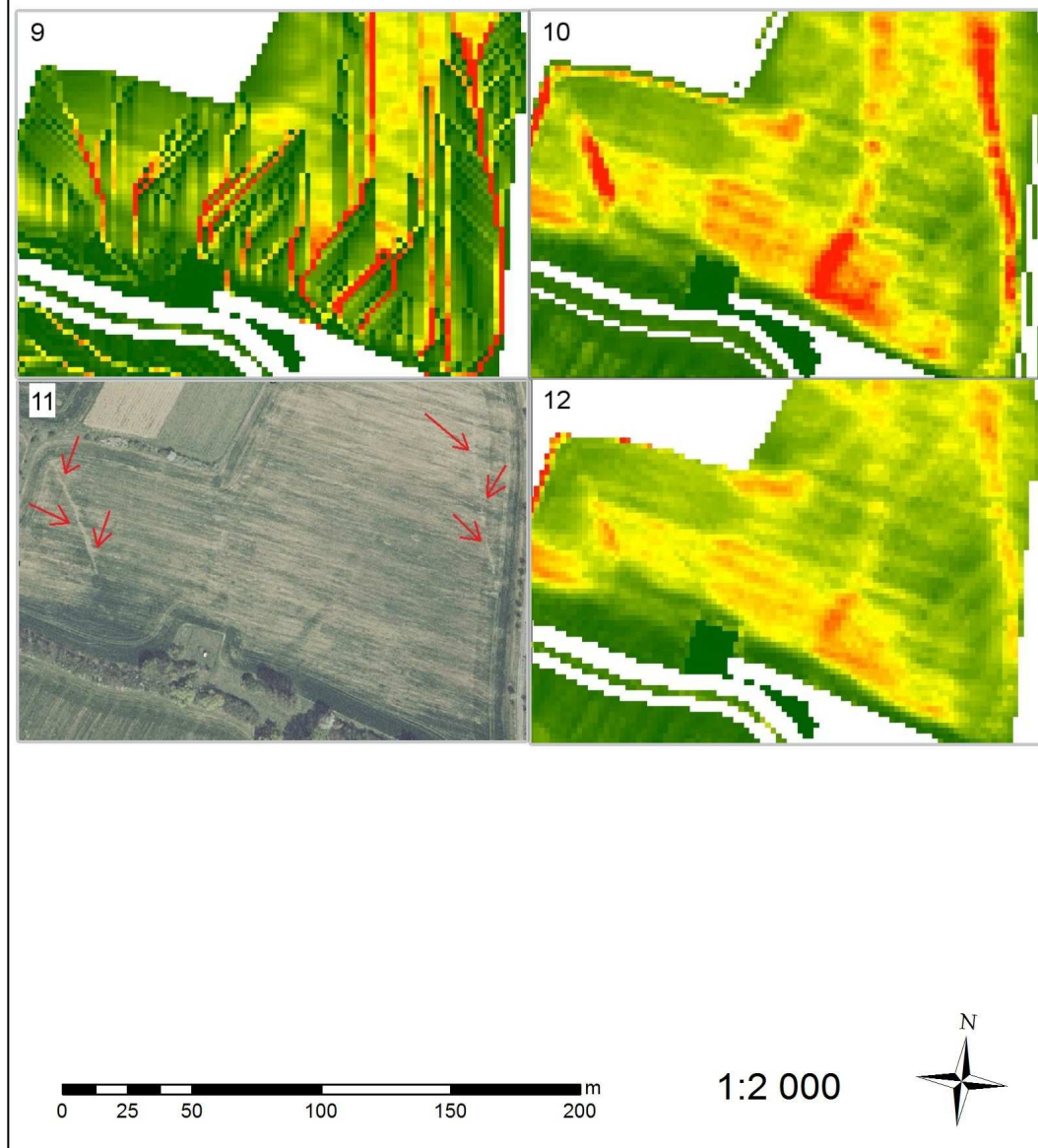


Obr. 19 Srovnání rozdílů modelů výpočtu eroze – ZABAGED, DMR 4G a DMR 5G (Mitášová)
 Zdroj: ČÚZK, SPÚ (vlastní zpracování)



Obr. 20 Srovnání rozdílů modelů za pomoci výpočtu průměrného smyvu – Mitášová, SAGA GIS, SOWAC-GIS
Zdroj: ČÚZK, SPÚ (vlastní zpracování)

Srovnání modelů výpočtu
(Mitášová, SAGA GIS, SOWAC-GIS)



Obr. 21 Srovnání modelů DMR 4G – Mitášová (9), USLE2D (10), ortofoto (11) a SAGA GIS (12)
Zdroj: ČÚZK (vlastní zpracování)