



MODELOVÁNÍ EROZNÍCH PROCESŮ V KATASTRÁLNÍM ÚZEMÍ VRBICE POMOCÍ NORSKÝCH A ČESKÝCH PŘÍSTUPŮ

Vyhotoveno: květen 2016

Zpracoval: VUT v Brně, Česká republika a NIBIO, Norsko



NIBIO
NORWEGIAN INSTITUTE OF
BIOECONOMY RESEARCH

*Komplexní plánovací, monitorovací, informační a vzdělávací nástroje pro adaptaci území na dopady klimatické změny
s hlavním zřetelem na zemědělské a lesnické hospodaření v krajině*

Projekt číslo: EHP-CZ02-OV-1-039-2015

Obsah

1. Úvod	3
2. Modelování erozních procesů	4
2.1 V Norsku.....	4
USLE	4
PESERA	8
2.2. Norský přístup ve Vrbici používající procesně založené modely	12
2.3. Odhad erozního smyvu v České republice.....	14
3. Zájmová Lokalita obce Vrbice	17
4. Výsledky.....	19
Kvantitativní srovnání USLE a MMF/MMF+ pro Vrbice.....	19
Výsledky kvantifikace eroze pomocí českého přístupu	24
5. Závěr	27

1. ÚVOD

Tato zpráva je součástí výstupu projektu Komplexního plánování, monitorování, informací a vzdělávacích pomůcek pro přizpůsobení dopadů klimatických změn, AdaptaN. Tento projekt je financován grantem EEA: EHP-CZ02-OV-1-039-2015. Cílem tohoto projektu je navržení integrované strategie pro uchování půdy v Jihomoravském kraji. Následkem nevhodného složení půdy, klimatických podmínek a nevhodné zemědělské činnosti jsou ztráty úrodné půdy tak vysoké, že tato situace vyžaduje okamžitý zásah. Klimatické změny společně s intenzivnějšími srážkami tuto nutnost ještě zvyšují. V rámci tohoto projektu spolupracují české a norské výzkumné ústavy na vyhodnocení, srovnání a návrzích opatření snižujících rizika eroze. Jedním z cílů této mezinárodní spolupráce je porovnání nejen běžných typů opatření, ale také metod a postupů výzkumných ústavů z obou zemí.

Následující kapitoly ukazují, jak se příslušné odlišné modelovací přístupy rozdílně i shodně projevují na jednotlivých úrovních i v celkové šíři simulovaných rizik eroze. V této práci jsou popsány dva zásadně odlišné přístupy k mapování rizik eroze; jedná se o empirický a (z části) fyzikální model. Motivace pro volbu jednoho z modelů bývá dána historicky nebo na základě osobních zkušeností a preferencí a v neposlední řadě také omezením dostupných údajů. Projekt AdaptaN poskytuje partnerům příležitost reagovat na model, který jsme si zvolili.

Projekt AdaptaN je určen ke stanovení opatření na omezení eroze. To znamená, že ať je uplatněn jakýkoliv model pro identifikaci vysokých rizik, tak musí dokázat rozlišovat plochy v prostoru. Různé modely a jejich odlišné provozní kalibrace mohou s vysokou mírou pravděpodobnosti stanovit odlišné úrovně půdních rizik. Toto více platí právě pro Jihomoravský kraj, který na mnoha místech trpí vysokou erozí. Účelem této případové studie ve Vrbici není snaha zjistit, který z přístupů je ten nejlepší, ale posoudit výstupy modelů inteligentním způsobem, tzn. umožnit uživatelům a vývojářům modelů poučit se z toho, jak během průběhu projektu vystupují další možné volby.

To, že jak empirický, tak i fyzikální model popisovaný v této zprávě výhradně simuluje vrstvou erozi, je vlastně jejich omezením. V Norsku i v České republice tak tímto způsobem získáváme jen částečné vysvětlení ročního úbytku půdy. Øygarden (2003) v případové studii uvádí, že během jarního období je ztráta půdy formou koncentrovaných forem eroze (brázdy, potoky, strouhy) až dvakrát silnější, než ztráty způsobené vrstvou erozí. To, že brázdy a zejména strže nebudou zahrnovány do mapování rizik, bude mít zcela jistě vliv na doporučená opatření. Je zde snaha vzít v úvahu také další formy eroze, ale nebudou z nich

činěny žádné kvantitativní závěry. Tato zpráva představuje vyhodnocení ztráty půdy a zahrnuje také ztráty způsobené splachem ze strání do vodních toků.

Norsko a Česká republika se velmi liší po klimatické stránce, pěstování plodin, zemědělské politice, velikosti zemědělských farem apod. Proto nelze norské zkušenosti přímo přenášet na podmínky v České republice a to platí i naopak. Mapování půdních rizik v Norsku se v první řadě soustřeďuje na redukci splachů a odtoků půdy do vodních systémů. Míra těchto rizik je všeobecně nižší než v Jihomoravském kraji a snížení úrodnosti půdy následkem ztráty půdy není tak akutní. Tento rozdíl vysvětluje, proč se volí a vyvíjejí různé modely, a také proč norský partner klade důraz na určitá kontrolní opatření. Přenos sedimentu je klíčovým konceptem pro norské investory. A zatímco aktuálně probíhající zanášení přehrad v Jihomoravském kraji, např. Velký Bílovec, do které řeka Vrbčanka ústí, je stále důležitým aspektem řešení, tak prvotním cílem v České republice v oblasti snížení půdních rizik je ukončení půdní degradace.

Tuto zprávu zahájíme krátkým přehledem modelových přístupů, které v projektu používají čeští a norští partneři. Potom následuje případová studie v oblasti Vrbice společně s přehledem výsledků jednotlivých modelů. Tyto modely se potom použijí k vyhodnocení efektivnosti volby opatření na ochranu půdy. Závěrečná kapitola shrnuje rozbor a uvádí doporučení.

2. MODELOVÁNÍ EROZNÍCH PROCESŮ

2.1 V NORSKU

USLE

Mapa erozních rizik, která se v Norsku používá od osmdesátých let dodnes, je založena na výpočtech pomocí empirického modelu "USLE - Univerzální rovnice ztráty půdy", která je upravena pro norské podmínky. V následujícím odstavci uvádíme stručný popis původního modelu a upravené norské verze.

Univerzální rovnice ztráty půdy (USLE), kterou sestavili a popsali v USA Wischmeier a Smith (1978), vypočítává potenciální dlouhodobý roční průměr ztráty půdy (A) v tunách na hektar následovně:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

kde R je srážkový erozní faktor, K je faktor erodibility půdy, LS je složený faktor délky a sklonu svahu, C je agronomický faktor a P představuje existenci nebo absenci opatření na ochranu půdy.

Erozivita srážek R ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ rok}^{-1}$), je založena na srážkové intenzitě:

$$R = E \cdot I_{30} \quad (2)$$

kde E = srážková kinetická energie (MJ) a I_{30} znamená maximální třicetiminutovou intenzitu (mm h^{-1}).

Faktor erodibility K ($\text{t/ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), znamená riziko oddělení půdy a transport částic, hodnoty tohoto činitele jsou založeny na měřeních ztráty půdy z pozemků s 9 % sklonem, délkou svahu 22,13 m s podzimní orbou s úhorem. K se vypočítá pomocí empirické rovnice:

$$K = (2,1 \cdot M^{1,14}) \cdot (12 - a) \cdot 10^{-6} + (3,25 \cdot (b - 2) + 2,5 \cdot (c - 3)) \cdot 10^{-2} \quad (3)$$

kde

$$M = (\% \text{ nános} + \% \text{ jemný písek}) \times (100 \% - \% \text{ jílu}) \quad (4)$$

a = % organické hmoty

b = třída struktury (hodnota mezi 1 a 4)

c = třída propustnosti (hodnota mezi 1 a 6)

Faktor svahu LS (bez rozměru) je funkce stupně sklonu svahu a jeho délky a vypočítá se:

$$LS = (0,065 + 0,0456 \cdot S + 0,006541 \cdot S^2) \cdot \left(\frac{L}{22,1}\right)^{NN} \quad (5)$$

kde S = sklon (stupně), L = délka svahu (m) a NN = činitel závislý na sklonu (mezi 0,2 a 0,5).

Bezrozměrný faktor C znamená rozdílné kombinace orby a plodin. Jedná se o poměr ztráty půdy a plochy se specifikovanou kombinací hospodaření s půdou a pěstování plodin a ztrátou půdy ve srovnání se stejnou plochou s trvalým úhorem s podzimní orbou.

Faktor opatření: P (bezrozměrový, znamená účinek opatření snižující množství i intenzitu smyvu, tedy snižujících erozi. Je to poměr ztráty půdy s a bez opatření (tj. půda ladem, orba nahoru/dolů).

Úprava rovnice USLE na norské podmínky

Rovnice ztráty půdy, na níž je založena aktuální mapa rizik eroze, je upravenou verzí výše popsané původní rovnice ztráty půdy. Tuto upravenou verzi vypracovala Helga

Lundekvam z katedry hydrologie při Norské Zemědělské Univerzitě. Pokusy v terénu, které poskytly základ pro modifikaci tohoto modelu, prováděli Arnor Njøs a Peder Hove. Účelem mapy rizik eroze je poskytnutí informací o erozních rizicích přednostně ve čtyřech třídách než v jednom přesném odhadu. Jednotlivé třídy odkazují na úroveň priority a dle následků stanovují nejvhodnější opatření vedoucí k redukci daných rizik. Dotace na změnu obdělání se poskytují dle třídy rizika eroze. Tuto rovnici popsali Hole (1988) a je zavedena do výpočtu Norského krajinného a lesnického institutu v následující formě.

$$A = X_e \cdot K \cdot LS + USLE_{grero} \quad (6)$$

X_e znamená erozi v klimaticky homogenním regionu a odpovídá $X_e = R \times C \times P$. Pokud je hodnota A změřena a K a LS jsou také změřeny nebo odhadnuty, tak lze zjistit hodnotu X_e výpočtem $A / K \times LS$. Hodnoty X_e aktuálně používané v mapě rizik eroze byly získány pomocí sledování dat ze smyvu na pozemku Holt v Romerike (1984-1988). Původně byla stanovena hodnota X_e na 320 u nevyrovnaných polí a 1000 na rovnané orné půdě, ale po zvážení odhadovaného rizika eroze větších sběrných oblastí Rømua a LeiraRomerike oproti změřené ztrátě půdy z těchto oblastí byla hodnota X_e na 200 a 700 pro dané typy pozemků. V současné době se tyto hodnoty používají pro celou zemi. V mapě rizik eroze se předpokládá, že se jedná o oblasti s podzimní orbou, kde se pěstují jarní obiloviny a $R \times C \times P = 1$. Za účelem určení faktorů C u různých systémů obdělávání, byly stanoveny pozemky se smyvem, u kterých se sleduje smyv i ztráta sedimentu.

Faktor erodibility K se vypočte jako v původní rovnici a je odvozen od údajů sebraných pro půdní profily v Norsku. V Norsku se velmi jemný písek vyskytuje jen velmi zřídka a hodnota K pro tuto třídu zrnitosti se proto odhaduje z křivky rozložení zrn. Další dva doplňkové faktory popisují strukturu půdy a její přirozenou odvodňovací schopnost.

Faktor LS se vypočítává stejně, jak je uvedeno výše, ale mocnitel 2 byl snížen na 1,8 za účelem snížení vlivu sklonu. V mapě rizik erozí se uvažuje konstantní délka svahu 100 m, přičemž inklinace je průměrná hodnota půdní plochy v mapě.

$USLE_{grero}$ představuje ztrátu půdy trubkovými drény ($\text{kg ha}^{-1} \text{rok}^{-1}$). Toto je určeno strukturou norné vrstvy, rychlostí odvodnění, a zda je druh půdy klasifikován jako podzol či nikoliv. Předpokládá se, že hrubší struktury bez ohledu na rychlost odvodnění mají dobré drenážní vlastnosti a nedochází na nich k erozi trubkovými drény. U jemnějších struktur eroze trubkovými drény roste až na $5 \text{ kg ha}^{-1} \text{rok}^{-1}$ při mírně dobrém odvodnění a 10 (podzol) nebo 20 (jiné půdy než podzol) $\text{kg ha}^{-1} \text{rok}^{-1}$ u neúplné až k velmi špatné odvodňovací schopnosti.

Meze rovnice USLE v Norsku

NIBIO a norské služby v oblasti zemědělství a koneční uživatelé zjistili, že mapy založené na výpočtech USLE, vykazují jisté rozpory mezi modelovanými a skutečnými půdními

ztrátami. Tato zjištění se soustřeďují do oblastí s odlišnými klimatickými a půdními podmínkami od těch, které mají pozemky pro parametrizaci smyvu.

Mezi obecná omezení této rovnice patří:

- Rovnice je z větší části založena na empirických údajích z pokusných ploch ve Spojených Státech, a tak její aplikace na norské klima a půdní podmínky může být složitá.
- Zdá se, že model je nadměru citlivý na svahový faktor.
- Rovnice pro faktor K neuvažuje další faktory, jako jsou obsah štěrku a kamene, typ jílových minerálů a obsah prvků jako vápník a sodík a jejich vliv na strukturu půdy, a tedy i erozní vymílatelnost - erodibilitu. Jako příklad uvádíme, že obsah kamene je velmi důležitý, protože kameny dokáží snížit vymílatelnost půdy až o 30% (Poesen *et al.*, 1994).
- Protože tato rovnice vyhodnocuje dlouhodobé roční průměry půdních ztrát, nedokáže rozlišovat sezónní spouštěče půdních ztrát.

Navíc má tato rovnice další meze ohledně své úpravy na norské podmínky:

- V její současné podobě nejsou zahrnuty žádné klimatické odlišnosti (intenzita srážek, promrzlá půda, tání sněhu).
- Údaje použité pro ztráty půdy drenážemi se zakládají na relativně malém množství empirických údajů.
- Při výpočtu faktoru K budou všechny hlinité a organické půdy hodnoceny velmi nízko z hlediska zrnitosti. Toto je velmi nepříznivé pro písčité jíly a lehké jílovité půdy (morénové půdy), které mají často velmi dobrou strukturu.
- Při výpočtu faktoru svahu se používá konstantní délka svahu 100m. To může mít za následek nadhodnocení erozí u kratších svahů a naopak její podcenění u svahů delších.
- Faktor svahu se vypočítává pomocí průměrné hodnoty sklonu svahu změřené v terénu. Použití dostupných digitálních dat terénu zpřesní odhad lokálních hodnot svahů a přitom nebude tolik založen na práci expertů.
- Faktor K je založen na přirozené odvodňovací schopnosti půdy. Zatímco rovnice USLE předpokládá, že půda je uměle odvodňována.
- Vyhodnocení faktoru K pro uměle strukturované půdy lze považovat za norskou úpravu. Tento faktor by měl odrážet vysoký obsah bahna, nízkou průchodnost, slabou strukturu a nízký obsah organické hmoty. Tyto faktory jsou aktuálně zastoupeny

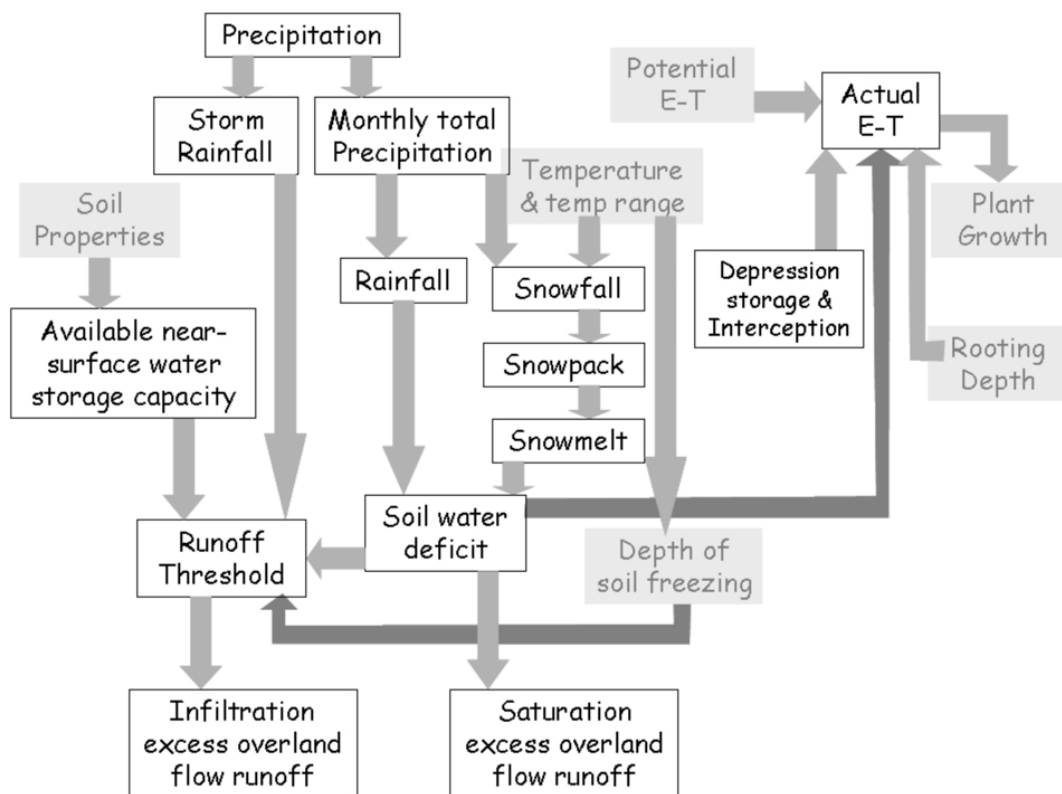
v jednotném hromadném parametru X_e , který popisuje vztah smyvu a klimatu (pro nivelizované půdy třikrát vyšší než u půd nenivelizovaných).

PESERA

Při zvážení nutnosti provádět extenzivní měření pro zajištění dostatečné základny pro empirický model, následující generace map erozních rizik v Norsku musela být vypracována s použitím fyzikálního modelu. Vzhledem k různorodým spouštěčům eroze půdy během roku musí být také tento model procesně orientovaný. Fyzikální model také umožní mnohem robustnější modelovou kalibraci. PESERA (celoevropský model pro stanovení rizik eroze) (Kirkby *et al.*, 2008) je modelem, jehož použitelnost byla prokázána v prostorové škále včetně široké palety různých půdních a klimatických podmínek. Model PESERA byl zvolen pro vypracování nových map erozních rizik v Norsku a v současné době NIBIO tuto mapu dokončuje.

PESERA simuluje rizika eroze jako funkce krajiny, jejího využití, půdy a klimatu v měsíčních krocích. Nejdříve vypočítává měsíční smyv jako přesycenost půdy a potom využívá tohoto smyvu k nastavení hladiny rizika eroze. Model opakuje měsíční simulace poměrů vody - půdy až do stanovení stabilního režimu po dané období. Běžně stačí od 10 do 20 opakování. Na Obrázek 1 je znázorněno, jak model zahrnuje a kombinuje různé erozivní spouštěče a procesy. Krátký přehled těchto odlišných procesů uvádíme v této kapitole namísto formálního popisu modelu.

Precipitation	srážky
Storm rainfall	bouřkové srážky
Monthly total precipitation	měsíční úhrn srážek
Soil properties	vlastnosti půdy
Available nearsurface water storage capacity	dostupná podpovrchová schopnost půdy zadržovat vodu
Runoff threshold	práh smyvu
Rainfall	děšť
Soil water deficit	deficit půdní vláhy
Infiltration excess overland flow runoff	infiltrační přebytek smyvem a povrchovým odtokem
temperature and temp range	teplota a teplotní rozsah
snowfall	spad sněhu
snowpack	akumulace sněhu
snowmelt	tání sněhu
depth of soil freezing	hloubka zámruzu půdy
saturation excess overland flow runoff	povrchový odtok a smyv nevzáknutého přebytku
potential E-T	potenciální E - T
actual E-T	aktuální E - T
depression storage and interception	zachycení a uložení dešťových srážek v prohlubních
plant growth	růst rostlin
rooting depth	kořenící hloubka



Obrázek 1 PESERA fyzikální model

(zdroj: www.geog.leeds.ac.uk/fileadmin/images/research/PESERA/fig1.jpg)

Vstupem modelu popisujícího srážky je 12 map měsíčních srážek, měsíční srážky na deštivý den a jeho variační koeficient. Budou-li srážky ve formě sněhu či nikoliv, to určuje 12 vstupních map s průměrnou měsíční teplotou a teplotním rozsahem. Tento rys modelu, zahrnující prostorově odlišná klimatická data je pro Norsko s jeho různorodým klimatem a významnou ztrátou půdy na jaře velmi důležitý. Pro srážkové a teplotní mapy se použily údaje z běžného období 1980-2009. Základ výpočtu klimatických map tvořily denní srážkové a teplotní mapy z norského meteorologického ústavu. Měsíční potenciální evapotranspirace byla odvozena ze satelitních dat MODIS za období 2000 -2005.

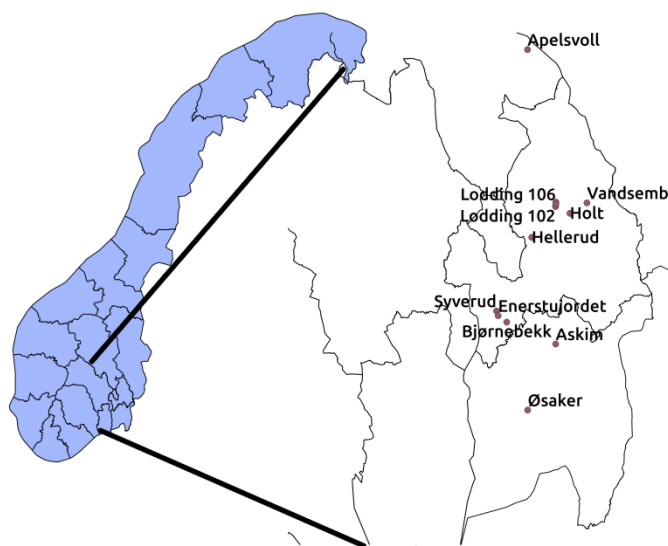
Ve standardní verzi modelu nebylo možné stanovit jednotnou kalibraci pokrývající celou zemi pro model akumulace sněhu a jeho tání. Byl vyvinut nový, jednoduchý přístup a zahrnut do modelu. Byl upřesněn pomocí měření výšky sněhu z několika lokalit v krajích Østfold, Akershus a Oppland.

Uchování vody v půdě je funkcí typu půdy a geologie. V norské adaptaci modelu byl nahrazen tabulkový přístup pedotransferními funkcemi odvozenými z národní databáze půd a experimentálních údajů (Riley *et al.*, 2011).

Model PESERA zahrnuje také model růstu vegetace za účelem doplnění měsíční bilance půda - voda. Pro zemědělské oblasti nahrazuje tento model tabulka s vývojovými stadii plodin. Dny osevu a sklizně v jednotlivých norských regionech vycházejí ze záznamů farmářů.

Jakmile je stanoven smyv, model PESERA vypočítá rychlost eroze na svahové stupnici. V původní verzi je sklon svahu vypočítán jako standardní odchylka od výšky terénu v rámci stanoveného úseku (500 až 1000 m). Erodibilita půdy je parametrizována jako funkce úhrnné stability, která je stanovena na funkcích pedostransferu uvedených výše.

Typické prostorové rozlišení pro běh modelu je 100 m. Protože účelem modelu pro norské konečné uživatele je stanovení rizika eroze na zemědělskou jednotku, je model provozován se souhrnnými daty na terénní jednotku. Průměrné úrovně svahů byly vypočítány pomocí národního výškového modelu DTM10 (rozlišení 10 m).



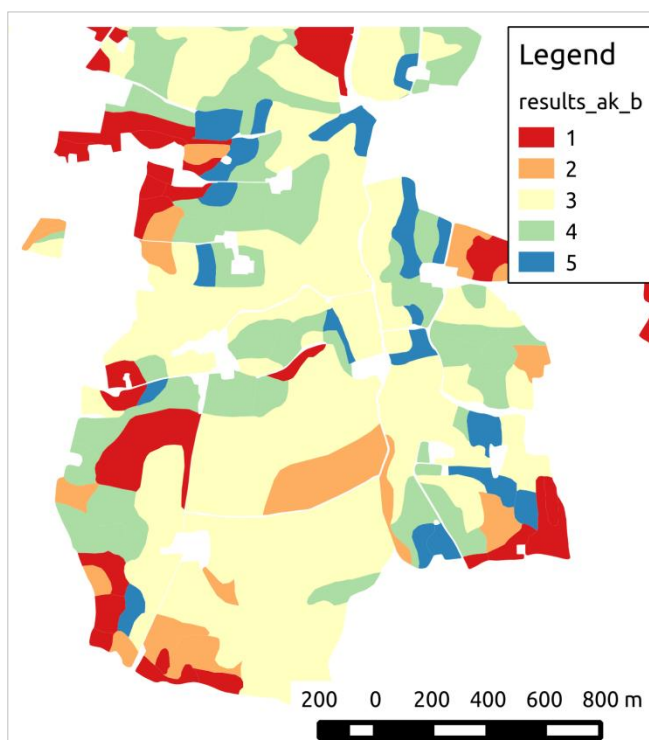
Obrázek 2 Lokality pozemků se smyv v jihovýchodní části Norska

Modelová kalibrace byla provedena pomocí sesbíraných dat ze sedmi pozemků se smyv na několika lokalitách v zemi (viz. Obrázek 2). I když tyto pozemky zahrnují celou řadu půdních typů, jsou soustředěny v oblastech se spíše podobnými klimatickými podmínkami (délka zimního období, teploty, srážky). Nejdříve byla upřesněna ta část modelu, která simuluje smyv. Posledním kalibračním parametrem ke stanovení reálných rizik eroze bylo stanovení půdní erodibility.

Po vypracování map a dokončení kalibrace modelu byla sestavena databáze obsahující 128 vstupních parametrů pro každou pozemkovou jednotku.

Výstup modelu zahrnuje měsíční hodnoty ztráty půdy, smyv, výšku sněhu, obsah organické hmoty v horní vrstvě půdního profilu (0,3m). Všechny tyto výstupy byly použity pro částečnou kalibraci a opětovné vypracování modelových programů.

Na Obrázek 3 je typické zobrazení mapy erozních rizik ve volně přístupné online formě. Na této mapě jsou právě jednotlivé stupně rizik eroze namísto ročních rychlostí.



Obrázek 3 Roztříděná rizika eroze ve formě předložené konečným uživatelům.

2.2. NORSKÝ PŘÍSTUP VE VRBICI POUŽÍVAJÍCÍ PROCESNĚ ZALOŽENÉ MODELY

Z popisu modelu PESERA je zřejmé, že se jedná o vstupní intenzivní model. Ve skutečnosti velká část úsilí a času se v rámci projektu věnovala vypracování, výpočtu a zajištění kvality vstupních map. Takový úkol by nebyl proveditelný v rámci a časovém omezení projektu AdaptaN. Namísto toho se použil podobný projekt, představující stejné konceptuální znázornění erozních procesů.

Český partner poskytl hydrologická data, údaje o půdních podmínkách, topografii a využití půdy pro zájmovou oblast (katastrální území Vrbice).

Model Morgan, Morgan a Finney (Morgan, 2001) je podobný modelu PESERA v tom, že nejdříve vypočítává bilanci půda - voda a potom používá přesycenost povrchového odtoku

(ronu) pro odhad rizik eroze. Tento model je stejně elegantní jako jednoduchý, ale vyznačuje se výpočtovými zkratkami, které z něj činí hybridní empiricko - fyzikální model.

Podobně jako modely PESERA nebo USLE je tento model ve své původní verzi jako distribuovaný a nikoliv prostorově jednoznačný model. Vypočítává půdní ztráty pro mřížkové buňky na základě parametrů bez topologie. Ve snaze lépe vyhodnotit opatření na ochranu půdy v prostorovém kontextu, NIBIO zavedlo směrovací program toku do tohoto modelu. Před uvedením výsledků zde nejdříve popíšeme, jak původní, tak i upravený model.

MMF vypočítává smyv a ztrátu půdy následovně:

$$Q = R \cdot \exp(-R_c/R_0) \quad (7)$$

kde Q je hloubka ročního smyvu (mm), R roční úhrn srážek (mm), R_0 je průměrný denní úhrn srážek (mm) a R_c je vodní zadržovací schopnost půdy (mm). Zadržovací schopnost půdy (vlhkost) je odhadována na základě výpočtu:

$$R_c = 1000 \cdot MS \cdot BD \cdot EHD \cdot (E_t/E_0) \quad (8)$$

kde MS je obsah vlhkosti k objemu hmoty pozemku (%), BD je objemová hmotnost (10^3 kg m^{-3}), EHD je efektivní hydrologická hloubka (mm), míra pro maximální vrstvu půdy ovlivňující výskyt smyvu, E_t/E_0 je poměr aktuální a potenciální evapotranspirace (-).

Vymílatelnost půdy je důsledkem dopadu srážek a smykové síly povrchového toku. Roční rychlost vymílatelnosti půdy vlivem spadu srážek udává rovnice:

$$F = K \cdot KE \cdot 10^{-3} \quad (9)$$

kde F je rychlost oddělení částic (kg m^2), K je erodibilita půdy (g J^{-1}) a KE je kombinovaný dopad přímých srážek a splachu z olistěných ploch (J m^{-2}).

Oddělení částic jako funkce smyvu se počítá následovně:

$$H = Z \cdot Q^{1.5} \cdot \sin(S) \cdot (1-GC) \quad (10)$$

kde H je roční rychlost oddělení částic (kg m^{-2}), Z je míra půdní koheze (-), S je svah (ve stupních) a GC je procento rostlinného porostu.

A to, jestli jsou oddělené částice po oddělení dále odnášeny, je určeno transportní kapacitou (TC ; kg m^{-2}) povrchového toku (transport následkem splachu není brán v potaz).

$$TC = C \cdot Q^2 \cdot \sin(S) \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

kde C je faktor vegetačního pokryvu (-).

Ztráta půdy se tedy vyhodnocuje následovně:

pokud platí $TC > H + F$, ztráta půdy je $H + F$

pokud platí $TC < H + F$, ztráta půdy je $H + F$

Všechny výpočty byly provedeny v systému GRASS GIS (*GRASS Development Team, 2014*).

V naší úpravě tohoto modelu, dále označovaného jako MMF+ byl přidán algoritmus směřování toku pro akumulovaný tok a výsledné navýšení oddělování částic smyvem a odnosové kapacity. V případech, kdy smyv je racionalizován na spodní sousedící buňky podle relativního výškového rozdílu, byl použit zjednodušený přístup Vícesměrového toku. (MFD) Tato volba byla motivována snahou napodobit přirozené vzory tras odtoku a v konečném důsledku nebyl časově náročnější, než jednosměrný tok. V prvotní fázi tento model počítá Q a TC stejně jako u původního modelu. V dalším kroku se použije modul směřování toku pro výpočet kumulativních hodnot H (oddělování částic smyvem) a TC . V této zjednodušené verzi se neumožňuje opětovný vsak s výjimkou kontrolních scénářů eroze (viz další odstavec). Rychlosti erozivních rizik se vyhodnocují stejně jako u původního modelu. Vzhledem k tomu, že pole působnosti pro obě rovnice pro TC a H jsou omezeny hodnotami typickými pro vrstvou erozi, byla uplatněna prahová hodnota, a výpočtové výstupy za touto hodnotou jsou považovány za nerealistické. Grafická kontrola mapy kumulativních smyvů přinesla prahovou hodnotu $1,3 \cdot 10^5 \text{ mm rok}^{-1}$, ale zde záleží na interpretaci. V takto vytvořených oblastech s dominujícím drážkovým proudem byly vypočteny hodnoty eroze a odnosu půdy, ale platnost těchto výsledků je diskutabilní. Je třeba najít lepší řešení pro simulaci smyvu na svazích a v rýhách. Model MMF+ byl programován v C++.

2.3. ODHAD EROZNÍHO SMYVU V ČESKÉ REPUBLICCE

Pro výpočet vodní eroze bylo ze strany českého partnera použito univerzální rovnice Wischmeier - Smith s využitím programu USLE2D. Tento přístup k odhadu dlouhodobého

průměrného erozního smyvu je v České republice nejrozšířenější a je například využíván i jako jeden z podkladů v rámci udělování finančních podpor v zemědělství.

Zde použita modifikace univerzální rovnice s využitím programu USLE2D vychází z klasické metody a počítá smyv v závislosti na šesti faktorech ovlivňujících hodnotu smyvu podle vztahu:

$$G = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}) \quad (12)$$

Kde jednotlivé faktory označují:

faktor **R** – erozní účinek deště,

faktor **K** – půdní faktor stanovený podle BPEJ,

faktor **L** – délka svahu,

$$L = \left(\frac{l_d}{22,13} \right)^m \quad (13)$$

kde l_d horizontální projekce délky svahu (uvažuje se nepřerušená délka svahu); není to vzdálenost rovnoběžná s povrchem půdy;

m – exponent vyjadřující náchylnost svahu k tvorbě rýžkové eroze.

faktor **S** – sklon svahu,

$$S = \frac{0,43 + 0,30s + 0,043s^2}{6,613} \quad (14)$$

kde s je sklon svahu v %.

faktor **C** – faktor protierozního účinku plodin,

faktor **P** – faktor vlivu protierozních opatření.

Jednotlivé faktory univerzální rovnice se stanovily pomocí těchto podkladů:

- R faktor – hodnota = $40 \text{ (MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$,
- C faktor byl stanoven na základě zjištěného stavu druhů pozemků a struktury plodin na jednotlivých blocích,
- L a S faktor byl stanoven na základě DMT s využitím programu USLE 2D,

- mapy BPEJ pro určení faktoru K,
- LPIS a zaměření skutečného stavu pro stanovení rozmístění druhů pozemků.

Vstupní data

Pro výpočet erozní ohroženosti byla velikost gridu 10.

Program USLE 2D pro výpočet LS-faktoru vyžaduje jako vstupní data DMT (digitální model terénu) a grid tzv. "parcel". Grid parcel převodem z uvedených dat rozčleňuje území na dílčí plochy vkládáním bariér - hranic mezi dílčími plochami, které působí jako překážky pro plošný povrchový odtok a dochází zde k přerušení odtoku. Tím se snižuje délka odtokové dráhy a faktor L délky svahu. V programu USLE 2D je faktor LS počítán zvlášť pro každý rastrový element. Délka odtokové dráhy je nahrazena zdrojovou plochou rastrového elementu. Z metod výpočtu byl použit "Routing Algorithm: flux decomposition" (umožňuje větvení odtokové dráhy) a "LS Algorithm: Mc Cool" (standardní metoda výpočtu LS-faktoru v RUSLE).

Pro výpočet erozního smyvu byl použit rastrový kalkulátor ArcGIS, kde se vynásobily jednotlivé vytvořené rastrové vrstvy se zadanými konstantami.

$$G = 40 * (K_faktor) * (LS_faktor) * (C_faktor) * 1 \quad (15)$$

Kde:

40.....zvolená konstanta R faktoru

(K_faktor)..... rastrová vrstva K faktoru

(LS_faktor).....rastrová vrstva LS faktoru

(C_faktor)..... rastrová vrstva C faktoru

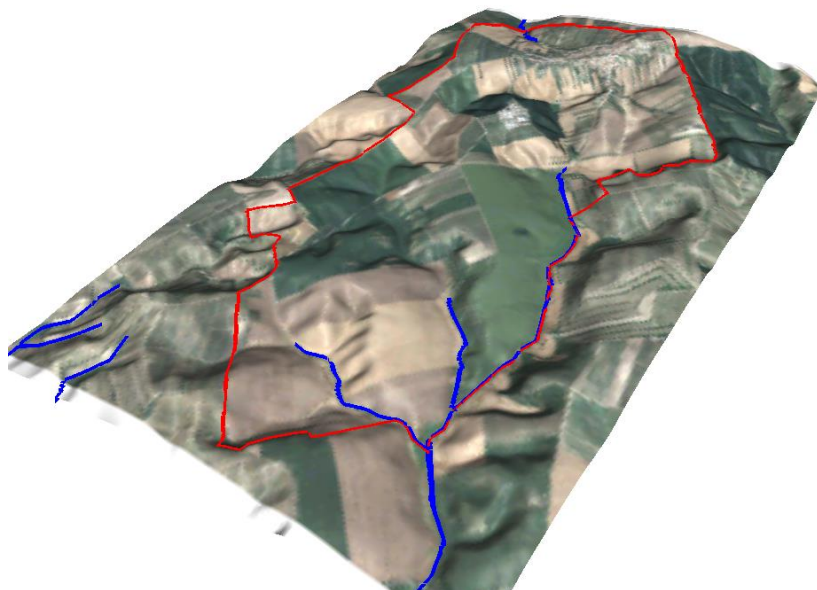
1.....konstanta P faktoru

Výše popsaná univerzální rovnice odhaduje pouze plošný smyv a není zde zahrnuta rýhová eroze. Pro kvantifikaci rýhové erozne zatím v České republice neexistuje jednotná metodika. Lokalizace takto erozně ohrožených linií za účelem návrhu protierozních opatření se v praxi provádí pomocí hydrologických nástrojů dostupných např. v prostředí ArcMap. Následná verifikace je prováděná pomocí terénního průzkumu řešené lokality.

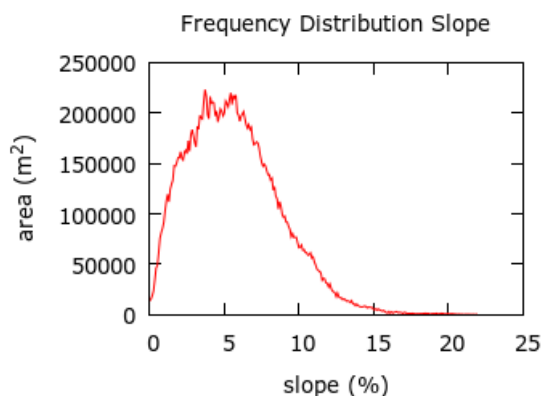
3. ZÁJMOVÁ LOKALITA OBCE VRBICE

Vrbice je obec v okrese Břeclav asi 40 km jihovýchodně od Brna. Má celkovou výměru 9,4 km² a přibližně 1200 obyvatel, z nichž většina žije v místní zástavbě (obec Vrbice, zcela nahoře na Obrázku 4). Její rozloha z větší části spadá do horního povodí řeky Vrbičanky, která stéká do přehradní nádrže Velký Bílovec, která je umístěna několik kilometrů od obce. Půda se zde využívá většinou zemědělsky, většinou se jedná o komerční farmy umístěné v okolí Vrbice. Převažujícími zemědělskými plodinami jsou obiloviny a víno. Krajina je kopcovitá se svahy do 20 % sklonu s průměrnou hodnotou okolo 5 % (viz Obrázek 5).

V současné době jsou zde zavedena již některá opatření na ochranu půdy, např. ve vinicích je každá řada oddělena travnatým pásem. Také se v této oblasti vyskytují terasy, ale stav péče o ně není znám. Nicméně modelovaná případová studie nejdříve předpokládá ten nejhorší scénář, kdy je veškerá půda využívána zemědělsky.



Obrázek 4 Pohled na obec Vrbice a řeku Vrbičanku



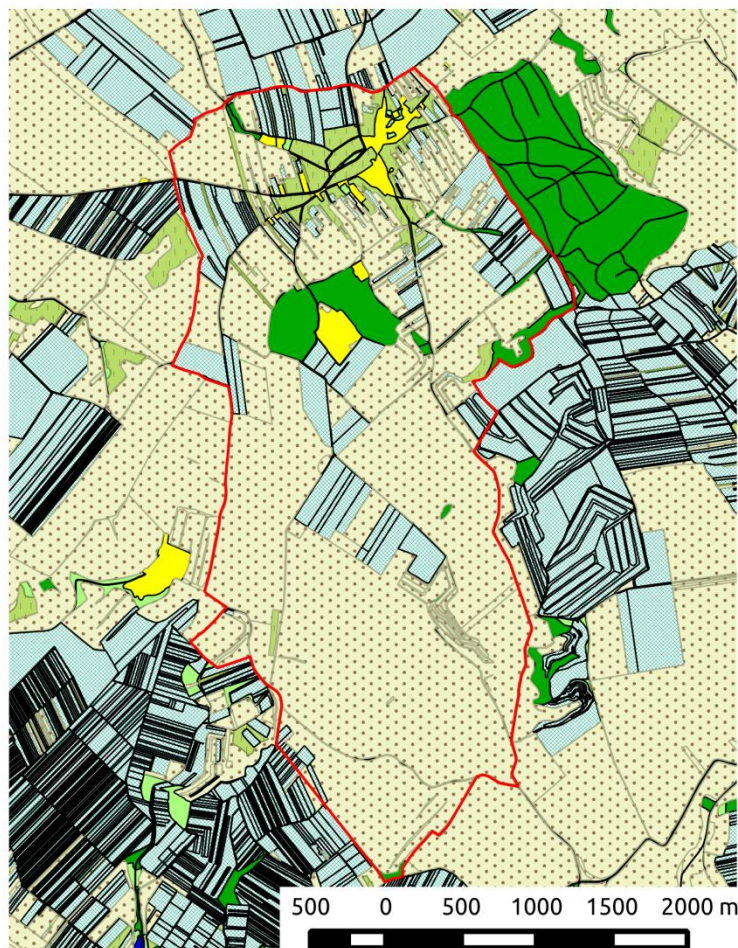
Obrázek 5 Frekvenční rozložení svahů (%) ve Vrbici

Legend

 cadastre_Vrbice

land_use

-  Arable land
-  Arable land - with other land
-  FastGrowTree-likeOrchard
-  field road
-  Forest
-  garden - like orchard
-  Garden - like orchard
-  Grass
-  Grass - park
-  Orchard
-  railway road
-  Road, Midway
-  solar power station - like grass
-  Urban area - built up area
-  Urban area - cemetery
-  Urban area - other area
-  Urban area - parking place
-  Urban area - railway station
-  Urban area - sedimentation tank
-  Urban area - station
-  Vineyard
-  Water_area
-  Water_stream




Obrázek 6 Využívání půdy ve Vrbici

Legend

 cadastre_Vrbice

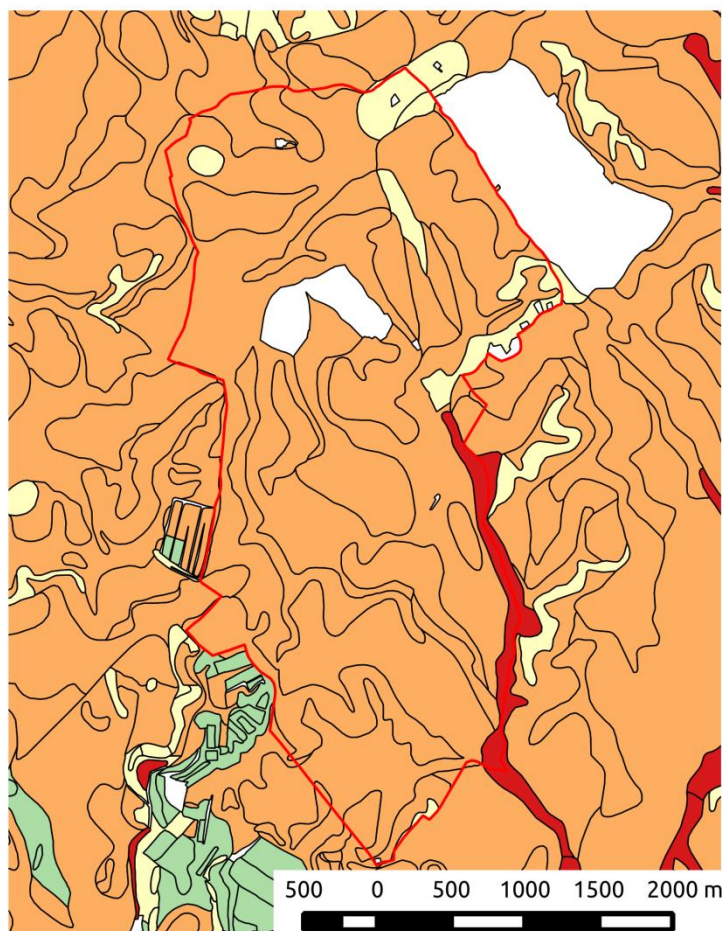
soil

 alluvial and gley soil

 black soil

 brown soil

 rendzinas



Obrázek 7 Půdní druhy z hydrologického hlediska ve Vrbici

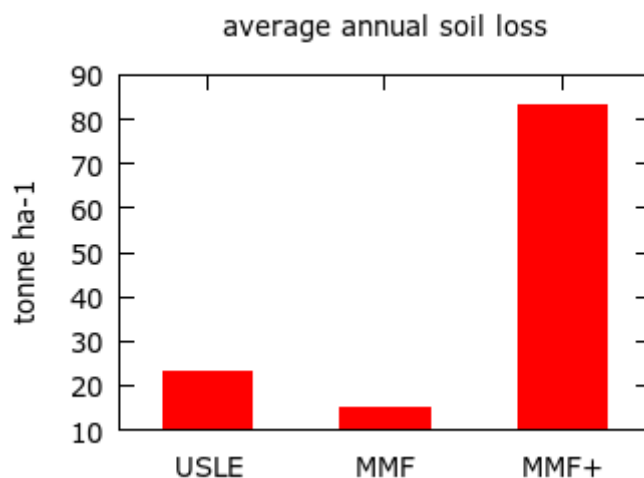
4. VÝSLEDKY

KVANTITATIVNÍ SROVNÁNÍ USLE A MMF/MMF+ PRO VRBICE

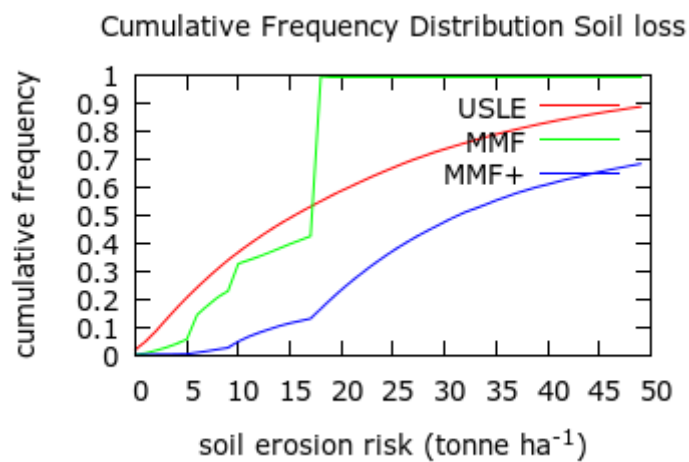
V tomto oddílu představíme výsledky třech modelů (USLE, MMF, MMF+). Rozdíl mezi modely je markantní, průměrná simulovaná půdní ztráta vypočtená modelem MMF+ je daleko vyšší než u modelů USLE a MMF (Obrázek 8). Dále se také velmi odlišují šablony erozních rizik (Obrázek 10 a až c). Obrázek 9 uvádí kumulativní rozložení funkcí těchto tří modelů, zvláště nápadný je náhlý nárůst okolo 18 tun ha⁻¹ u MMF.

Nejpravděpodobnějším důvodem pro extrémní průměrnou hodnotu vypočtenou modelem MMF+ je, že smyková akumulace bez opětovné infiltrace podél trasy toku má za

následek exponenciálně přehnaný odhad ročního povrchového toku. Protože ztráta půdy je zároveň exponenciálou smyvu, tak tento dopad je ještě více umocněn.

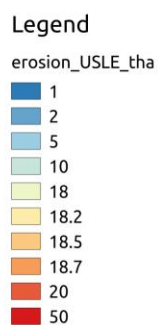


Obrázek 8 Průměrná simulovaná ztráta půdy pro tři modely

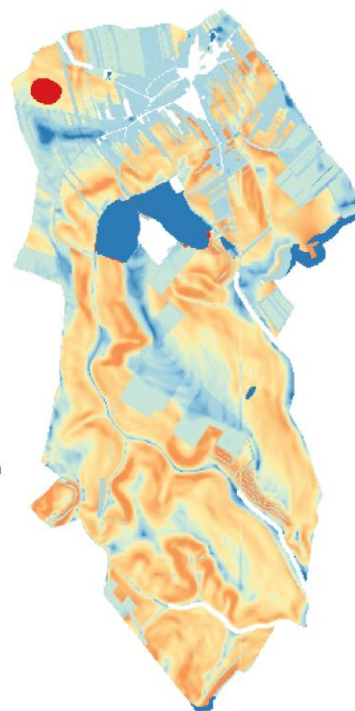
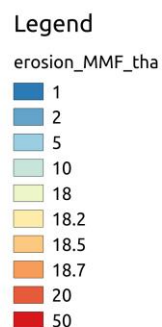


Obrázek 9 Kumulativně distribuční funkce tří modelů

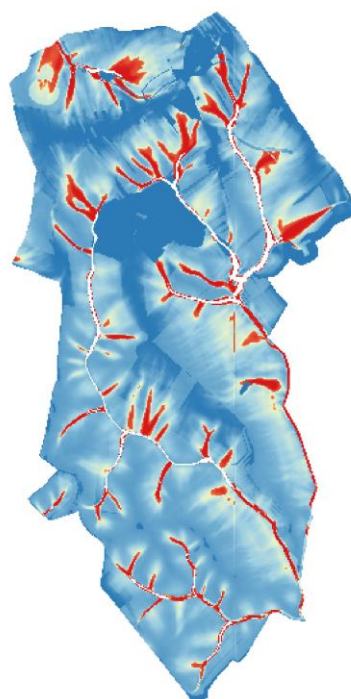
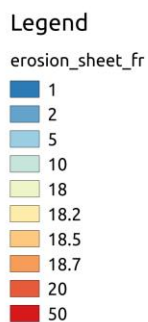
a



b

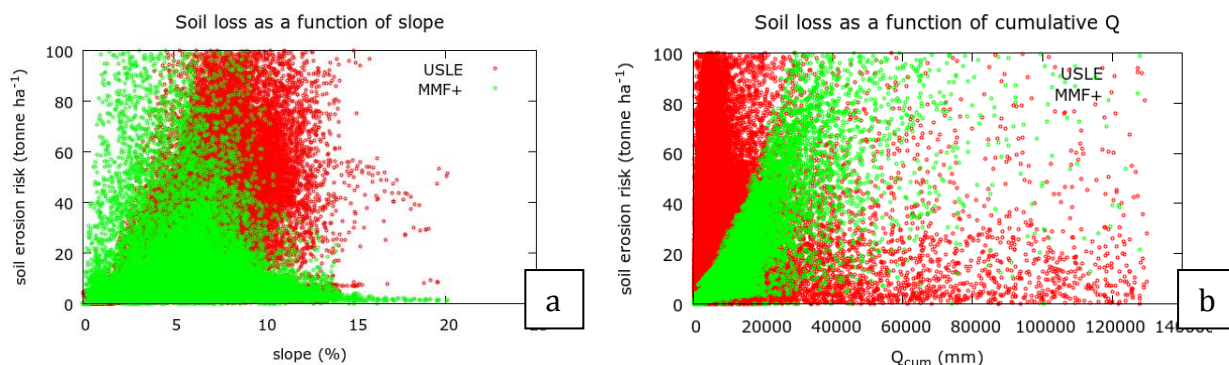


c



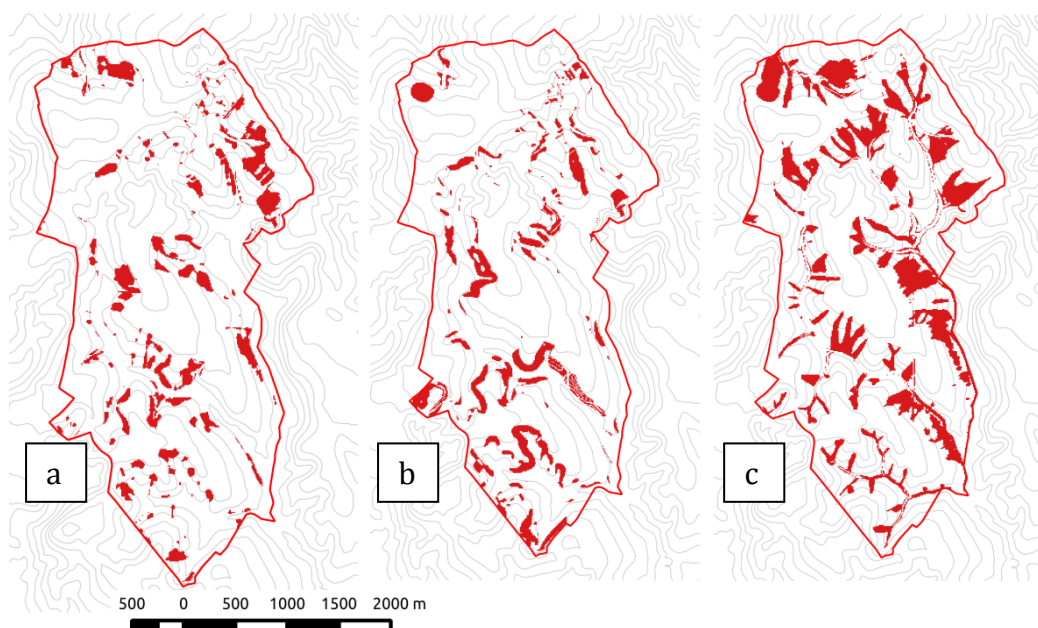
Obrázek 10 a. Riziko eroze USLE, b. MMF, c. MMF+ (tuna/ha⁻¹).

Odlišné prostorové šablony odhalují rozdílné primární spouštěče vyplývající z modelů. Vysoké rychlosti dle USLE lze nalézt na příkrých svazích, vysoké hodnoty MMF zase v oblastech, kde využití půdy a její typ mají za následek nadměrný povrchový tok a vysoké hodnoty dle modelu MMF+ se objevují v oblastech koncentrace pozemních toků. Tento efekt lze ukázat pomocí rozptýleného zobrazení uvedených faktorů oproti ztrátě půdy dle jednotlivých modelů (Obrázek 11 a a b).



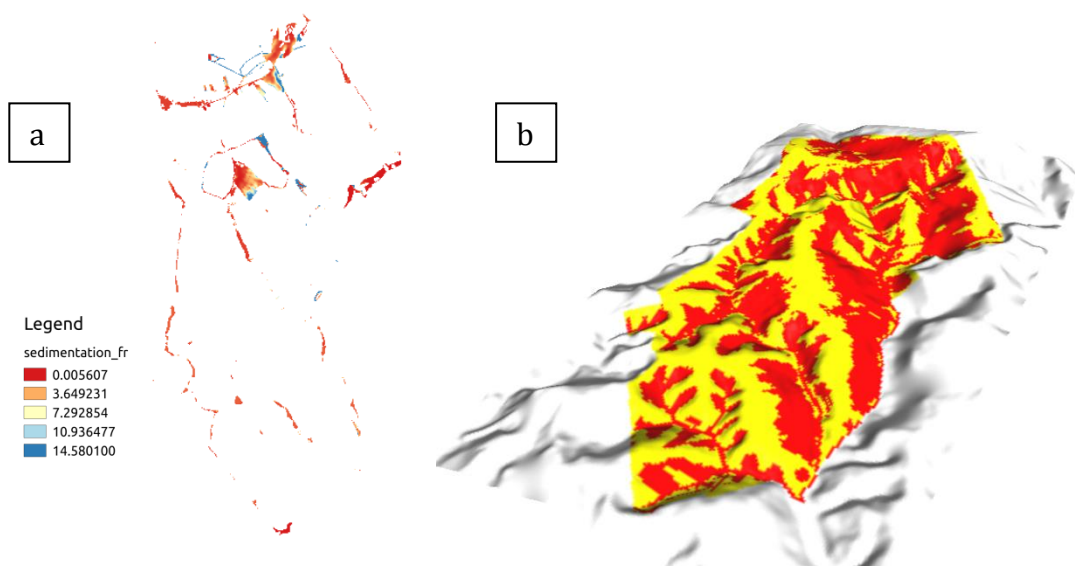
Obrázek 11 a Ztráta půdy dle jednotlivých modelů jako funkce svahu, b. Ztráta půdy dle jednotlivých modelů jako funkce kumulativní hodnoty Q.

Mapování rizik je charakteristické volbou oblastí s nejvyššími riziky. Toto je obzvlášť důležité při zvažování prioritních zón pro uplatnění kontrolních opatření. Oblasti vytyčené těmito třemi modely jsou zobrazené na mapách 5 a až c. Modely USEL a MMF zobrazují spíše podobnou šablonu zatímco MMF+ se od nich výrazně liší. Znovu tedy uvádíme, že se nejedná o nic překvapivého, protože kumulativní smyv je pro tento model primárním spouštěčem ztráty půdy.



Obrázek 12 Oblast s nejvyšším rizikem (10%) podle USLE (a), MMF (b) a MMF+ (c)

Model MMF+ k mapě erozních rizik ještě poskytuje i sedimentační mapu (Obrázek 13 a). To proto, že pro každou buňku se porovnává přepravní kapacita s přichozím tokem sedimentu. Pokud je TC nižší než tento tok, tak dochází k ukládání sedimentu.



Obrázek 13 a. Sedimentace podle modelu MMF+ (t/ha^{-1}), b. Oblasti, ve kterých je prvotní příčinou vymílání dopad dešťových srážek (žlutě).

Rychlá analýza sedimentačních zón ukazuje, že většina těchto oblastí se nachází přímo pod vyvýšeninami v krajině. Zde také dochází ke ztrátě půdy, ale odnosová kapacita podél

tokové trasy se nevyvíjí natolik, aby docházelo k dalšímu odnosu materiálu směrem dolů. Sedimentace se také vyskytuje v oblasti zastavěných ploch, kdy náhlý pokles TC má za následek náhlou sedimentaci. Příčinou by mohlo být přecenění ztráty půdy z městských a příměstských oblastí, a že skutečné hodnoty ukládání mimo tyto oblasti jsou ve skutečnosti o něco nižší. V průměru 17 z 83 tun vymleté země na hektar zůstává ve Vrbici, což je 20 %. Tyto sedimenty způsobují místní škody, například na infrastruktuře. V závislosti na ročním období také způsobují škody na mladých plodinách.

Dalším rysem MMF je to, že odlišuje mezi oddělením částice vlivem dopadu dešťových srážek a vlivem smyvu. Rozdílné spouštěče eroze vyžadují odlišná kontrolní opatření. Obrázek 13 b ukazuje oblasti, ve kterých je prvotní příčinou dopad dešťových srážek (žlutě).

VÝSLEDKY KVANTIFIKACE EROZE POMOCÍ ČESKÉHO PŘÍSTUPU

Níže v tabulce jsou uvedeny výsledky odhadu průměrného dlouhodobého erozního smyvu pro jednotlivé půdní bloky LPIS v katastru Vrbice. Odhad byl proveden na základě výše popsané modifikace univerzální rovnice (viz kapitola 2.3).

Tabulka 1 Odhad průměrného dlouhodobého erozního smyvu pro jednotlivé půdní bloky LPIS v katastru Vrbice u Velkých Pavlovic

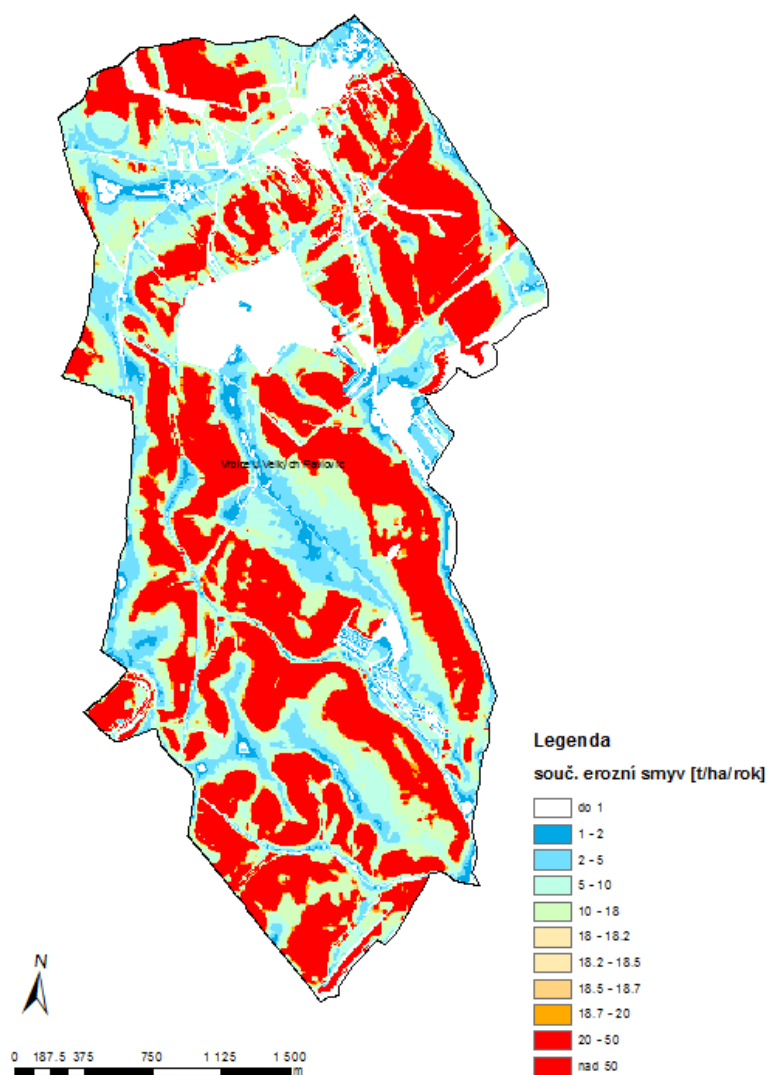
Kód půdního bloku LPIS	Plocha půdního bloku [ha]	Dlouhodobý průměrný erozní smyv [t/ha/rok]	Dlouhodobý průměrný erozní smyv z bloku LPIS [t/rok]
0701/27	165,4	26,11	4319,41
0701/19	82,6	22,16	1830,28
1601/16	79,57	23,62	1879,21
9803/3	50,62	27,01	1367,16
9401/3	24,75	30,87	763,96
0701/28	21,25	13,84	294,19
0501/4	16,49	29,13	480,43
0405/1	12,97	23,67	306,98
1401/1	12,94	15,67	202,80
9402/4	10,6	51,33	544,10
9402/2	9,70	6,93	67,25
1401/17	9,69	24,83	240,57
3701/48	8,62	25,40	218,96
1402/52	8,15	8,32	67,82
1601/4	6,91	7,08	48,94
0501/6	6,62	28,05	185,72
0701/25	6,05	14,62	88,46
1601/8	6,00	34,71	208,29
1402/51	5,97	17,70	105,66
1402/17	5,64	12,78	72,10
0701/20	5,29	14,57	77,09
0701/10	5,08	13,48	68,50
0404/31	4,96	18,98	94,12
1402/21	4,92	6,05	29,79

Jak je patrné z tabulky uvedené výše, odhad dlouhodobého erozního smyvu ukazuje na všech půdních blocích na překročení limitů přípustného smyvu. Průměrný smyv překračuje $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$.

Výše popsaná univerzální rovnice navíc odhaduje pouze plošný smyv a není zde zahrnuta rýhová eroze. Pro kvantifikaci rýhové eroze zatím v České republice neexistuje jednotná metodika.

Obrázek 14 znázorňuje vymezení erozně ohrožených ploch v barevné stupnici podobné stupnici použité norskými partnery. Při srovnání výstupů obou partnerů znázorňujících

odhad erozně ohrožených ploch pomocí univerzální rovnice (USLE) je vidět, že se mapky shodují.



Obrázek 14 Lokalizace erozně ohrožených ploch pomocí českého postupu ($t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$)

5. ZÁVĚR

Tato zpráva je jedním z dílčích výstupů projektu s názvem Komplexní plánovací, monitorovací, informační a vzdělávací nástroje pro adaptaci území na dopady klimatické změny s hlavním zřetelem na zemědělské a lesnické hospodaření v krajině.

Cílem této dílčí zprávy bylo porovnat přístupy a metody modelování erozních procesů českých a norských partnerů projektu.

Zpráva popisuje metodologický základ jednotlivých přístupů k modelování erozního smyvu používaného oběma partnery. Dále je ve zprávě popsána aplikace metod modelování, a to v ploše obce Vrbice (katastrální území Vrbice u Velkých Pavlovic).

Na podkladu výsledků jednotlivých modelů je zde prezentováno srovnání použitých přístupů a jsou zdůrazněny rozdíly v úrovni a rozsahu simulovaných erozních procesů. Jsou zde popsány dva zásadně odlišné přístupy k odhadování rizika vzniku eroze: empirický a "částečně" fyzikální model.

Oba partneři provedli modelování erozního ohrožení pomocí univerzální rovnice Wischmeier - Smith (USLE). I přes fakt, že byly použity různé přístupy a modifikace univerzální rovnice, bylo dosaženo srovnatelných výsledků a plošná lokalizace erozně ohrožených míst byla shodná. Jak je známo, tento model slouží k odhadu dlouhodobého průměrného plošného erozního smyvu a nezohledňuje jiné typy eroze. Norský partner dále srovnal výstupy USLE s výsledky dané "částečně" fyzikálním modelem, který pracuje s erozními procesy mnohem komplexněji (zohledňuje rýhovou erozi, off-site efekty atd.).

Mimo jiné i vzhledem k malému počtu přímých měření není využití fyzikálních modelů pro simulaci komplexního erozního procesu v podmínkách jižní Moravy rozšířené. Jak bylo představeno norskými partnery, instituce NIBIO disponuje množstvím výzkumných ploch. Přímá měření z takovýchto výzkumných ploch mohou být využita pro stavbu či kalibraci robustního erozního modelu. Závěrem je tedy vhodné doporučit rozšíření počtu výzkumných ploch v regionu jižní Moravy, z nichž by bylo možné získat data potřebná ke stavbě či kalibraci komplexního fyzikálně orientovaného erozního modelu.

6. POUŽITÁ LITERATURA

GRASS Development Team, 2014. *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 6.4.4. Open Source Geospatial Foundation.* <http://grass.osgeo.org>

Hole, J., 1988. Primær Rapport om Stofftapsmodell Brukt på Jæren og Romerike. Norwegian Institute of Land Inventory, Ås.

Kirkby, M.J., B.J. Irvine, R.J.A. Jones, G. Govers and the PESERA team. The PESERA coarse scale erosion model for Europe. I. – Model rationale and implementation. *European Journal of Soil Science* 59(6), p. 1293-1306. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2008.01072.x

Morgan, R.P.C., 2001. A simple approach to soil loss prediction: A revised Morgan-Morgan-Finney model. *Catena* 44, p. 305-322. DOI: 10.1016/S0341-8162(00)00171-5

Poesen, J. and H. Lavee, 1994. Rock fragments in soil; significance and processes. *Catena* 23(1–2), p. 1-28.

Riley, H., S. Kværnø and L. Haugen, 2011. Performance of pedotransfer functions in predicting soil water characteristics of soils in Norway. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B - Soil and Plant Science* 61(3), p 264-280.

Wischmeier, W.H. and D.D. Smith, 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses; A Guide to Conservation Planning.* Agricultural Handbook 537, United States Department of Agriculture. 69 pp.

Øygarden, L., 2003. Rill and gully development during an extremewinter runoff event in Norway. *Catena* 50, p. 217-242.