

Příspěvek k hodnocení různých přístupů v modelování ztráty půdy vodní erozí v prostředí GIS

autoreferát doktorské disertační práce

PRAHA 2015

Fakulta životního prostředí
Katedra biotechnických úprav krajiny

Příspěvek k hodnocení různých přístupů v modelování ztráty půdy vodní erozí v prostředí GIS

Autoreferát disertační práce

Ing. Michaela Hrabalíková

Praha 2015

Doktorská disertační práce „Příspěvek k hodnocení různých přístupů v modelování ztráty půdy vodní erozí v prostředí GIS“ byla vypracována v rámci doktorského studia na Katedře biotechnických úprav krajiny Fakulty životního prostředí České zemědělské univerzity v Praze.

Uchazečka: Ing. Michaela Hrabalíková

Obor: Úpravy vodního režimu krajiny

Školitel: prof. Ing. Miloslav Janeček, DrSc.

Oponenti:

Doc. Ing. Jakub Štibinger, CSc.

Ing. Jan Vopravil, Ph.D.

Ing. Jana Podhrázská , Ph.D.

Obhajoba disertační práce se koná dne 15. 12. 2015 na Fakultě životního prostředí České zemědělské univerzity v Praze. S disertační prací se lze seznámit na oddělení pro vědu a výzkum Fakulty životního prostředí ČZU v Praze.

OBSAH

1	Úvod.....	4
2	Cíle disertační práce.....	5
3	Modelování vodní eroze	6
4	Výsledky disertační práce	8
4.1	Studie I.	9
4.2	Studie II.	10
4.3	Studie III.	11
4.4	Studie IV.....	13
4.5	Studie V.....	15
5	KOMENTÁŘ	16
6	SUMMARY.....	23
7	PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY	24
8	ODBORNÝ ŽIVOTOPIS.....	29
9	PUBLIKAČNÍ ČINNOST	31

1 ÚVOD

Modelování eroze půdy je důležité nejen z hlediska pochopení erozního procesu jako takového, ale především k predikci chování hydrologických a erozních procesů v určitém systému a za stanovených podmínek. Ve své podstatě modelování chování systému umožňuje tak identifikaci nebo výběr vhodných protierozní opatření.

Půdní eroze je výsledkem složité interakce systému půda-rostlina-atmosféra. Modelování půdní eroze tak vyžaduje multidisciplinární přístup mezi pedology, agronomy, hydrology a dalšími skupinami odborníků. Řádný model musí být schopen integrovat procesy, faktory a příčiny v různých prostorových a časových měřítkách. Správně kalibrovaný model poskytuje tak dobré odhady rizik spojených s erozí půdy.

Během posledních 60 let byly vyvinuty různé modely lišící se ve schopnosti predikce, prostorovém a časovém měřítku. Ovšem, s datovou otevřeností (viz projekt Copernicus, CENIA atd.) a rozvojem moderních technologických nástrojů, jako jsou geografické informační systémy (GIS) a dálkový průzkum země, vznikají další modifikace stávajících modelů (Karydas et al., 2014) anebo nové algoritmy (Tarboton, 1997) či samotné modely (Moore and Burch, 1986) za účelem zpřesňování predikce degradace půdy erozí.

GIS pracuje na základě shromažďování, transformaci a zobrazování prostorových dat (Longley et al., 2004). V důsledku toho, se očekává, že implementace erozních modelů do prostředí GIS a zvyšování podrobnosti dat bude poskytovat podstatně realističtější odhady. Nicméně, v oblasti erozního modelování stále existují jisté problémy (Boardman, 2006), mis-koncepce a mis-aplikace modelů (Govers, 2010). Proto je zde potřeba dále zkoumat roli GIS v hydrologicko-erozním modelování a vyhodnotit tak potenciál ke zlepšení predikcí na základě volby vhodného modelu popř. algoritmu, datových zdrojů, časového a prostorového měřítka.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce předkládá aktuální otázky a přístupy spojené s modelováním potenciální ztráty půdy vodní erozí a povrchového odtoku. Zejména se jedná o propojení klasických přístupů v modelování, především univerzální rovnice ztráty půdy (USLE), s geografickými informačními systémy (GIS).

Specifické oblasti práce jsou následující:

- 1) Výběr vhodného modelu a možné datové zdroje v prostředí GIS:
 - Porovnání různých modelů a identifikace jejich silných a slabých stránek,
 - Vyhodnocení protierozní funkce historických mezí na základě vstupních dat odvozených v prostředí GIS,
- 2) Vliv různého časového kroku v modelování:
 - Do nově vzniklé databáze REDES přispět za Českou republiku výpočtem faktoru erozní účinnosti deště (*R*-faktor) pro 32 stanic v České republice za období 1960 – 2000,
 - Výpočet kalibrační funkce pro harmonizaci datové sady erozní účinnosti deště v evropském měřítku
- 3) Vliv topografie na ztrátu půdy erozí v prostředí GIS:
 - Porovnání různých přístupů ve výpočtu topografického (*LS*) faktoru
 - Vyhodnocení vlivu použitého algoritmu na výpočet *LS*-faktoru na celkový výstup výpočtu ztráty půdy v (R)USLE

3 MODELOVÁNÍ VODNÍ EROZE

Modelování půdní eroze má poměrně dlouhou historii, kdy první modely již začaly vznikat ve 40. letech 20. století (Garen et al., 1999). Od té doby se modelování vodní eroze stále vyvíjí, i když ne zrovna nepřetržitě (Morgan a Nearing, 2011). Erozní modely byly v počátku založeny pouze na definování hlavních řídicích faktorů erozních procesů a určení jejich vlivu na erozní procesy na základě výsledků pozorování, měření, experimentů a statistických metod (Wischmeier a Smith, 1965).

Průkopnická práce Meyera a Wischmeiera (1969) představuje základní koncepční rámec pro modelování vodní eroze, který položil základ mnoha dalším modelům, jako je např. v praxi stále nejčastěji užívaný model USLE (Wischmeier a Smith, 1965, 1978) nebo jeho revidovaná forma RUSLE (Renard, 1997). Meyer a Wischmeier (1969) navázali na výzkum Ellisona (1947) a koncipovali erozní proces jako dvoufázový proces zahrnující rozrušení půdního krytu, čili uvolnění půdní částice, a následně její transport povrchovým odtokem.

Jedny z prvních koncepčních erozních modelů, které adaptovaly přístup Meyera a Wischmeiera (1969) generují povrchový odtok a transport sedimentů na základě koncepce stavby hydrologických modelů. Jedná se např. o AGNPS (Young et al., 1989, Young a Onstad, 1990) a ANSWERS (Beasley et al., 1980). Tyto modely uživateli nabízí volbu simulace v denním časovém kroku na základě čísel odtokové křivky (Boughton, 1989) a simulace jedné události na základě výpočtu odtokového součinitele a infiltrace vody do půdy. Tato generace modelů má však koncepčně zpracovanou pouze hydrologickou část, v popisu erozního procesu se opírá o faktory USLE – erodovatelnost půdy (K), délka svahu, vliv vegetačního pokryvu (C) a protierozních opatření (P).

Další zásadní přístup v popisu erozního procesu uvádí Morgan (2005), kdy erozi už popisuje jako tři fázový systém:

- fáze uvolnění půdních částic,
- fáze transportu půdních částic, a

- fáze sedimentace půdních částic.

Další generace modelů, jako např. WEPP (Nearing a Nicks, 1998) již nahrazuje faktory týkající se erodibility půdy, vegetačního pokryvu a sklonu parametry, které vychází fyzikálních zákonů a přímých měření. Tudíž modely popisují, např. náchylnost půdy k erozi parametry, jako jsou koheze, drsnost povrchu a tangenciální napětí (Moussa, 2003). Pokrok a nové směry v modelování shrnuje ve své práci Brazier (2004).

V průběhu let, tak vznikla řada modelů, které sice nebyly prostorově orientované (Boughton, 1989, Moore a Burch, 1986, Grayson et al., 1992), Další vývoj v modelování se již výhradně orientuje na vývoj prostorově distribuovaných modelů (Beven a Alcock, 2012, Quinn et al., 1991, Quinn et al., 1995, Grayson et al., 1992, Moore et al., 1991, Zhang et al., 2013). Řada modelů, tak disponuje svým vlastním GIS prostředím, např. LISEM, WATEM/SEDEM, tvoří jeho nadstavbu, např. WEPP (Nearing a Nicks, 1998), SWAT, anebo jsou přímo implantovány do GIS prostředí, např. USPED, RUSLE 3D, TOPMODEL (Beven, 2011), MMF. Tyto všechny simulace v prostředí GIS vychází z analýzy digitálního modelu reliéfu (DMR), kde základ tvoří výpočet primárních (např. sklonitost, orientace ke světovým stranám, směr a akumulace povrchového odtoku) a sekundárních atributů (např. specifická přispívající plocha, zakřivení svahů atd.) (Zhang et al., 1996, Oliveira et al., 2013, Moore et al., 1991).

4 VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE

- I. Kovar P, Hrabalíkova M, Neruda M, Neruda R, Srejber J, Jelinkova A, Bacinova H (2015) *Choosing an Appropriate Hydrological Model for Rainfall-Runoff Extremes in Small Catchments*. Soil and Water Research 10:137-146
- II. Kovar P, Vassova D, Hrabalíkova M (2011) *Mitigation of Surface Runoff and Erosion Impacts on Catchment by Stone Hedgerows*. Soil and Water Research 6:153-164
- III. Panagos P, Ballabio C, Borrelli P, Meusburger K, Klik A, Rousseva S, Tadic MP, Michaelides S, Hrabalíkova M, Olsen P, Aalto J, Lakatos M, Rymaszewicz A, Dumitrescu A, Begueria S, Alewell C (2015) *Rainfall erosivity in Europe*. Science of the Total Environment 511:801-814
- IV. Panagos P, Borrelli P, Spinoni J., Ballabio C., Meusburger K., Klik A., Rousseva S., Tadić MP, Michaelides S, Hrabalíková M, Olsen P, Aalto J, Lakatos M, Rymaszewicz A, Dumitrescu A, Beguería S, Kostalova J, Petan S, Banasik K, Alewell C (2015): *Monthly rainfall erosivity: conversion factors for different time resolutions and regional assessments*.

Příspěvek je přijat k publikaci v Science of the Total Environment po úpravě článku dle připomínek oponentů

- V. Hrabalíkova M., Janecek m. (2015): *Comparison of different approaches of LS factor calculations based on measured soil loss under simulated rainfall*.

Příspěvek je přijat k publikaci v Soil and Water Research po úpravě článku dle připomínek oponentů

4.1 STUDIE I.

Choosing an Appropriate Hydrological Model for Rainfall-Runoff Extremes in Small Catchments

Pavel Kovář, Michaela Hrabalíková, Martin Neruda, Roman Neruda, Jan Šrejber, Andrea Jelínková and Hana Bačínová

Soil & Water Res., 10, 2015 (3): 137–146

Abstract: Real and scenario prognosis in engineering hydrology often involves using simulation techniques of mathematical modelling the rainfall-runoff processes in small catchments. These catchments are often up to 50 km² in area, their character is torrential, and the type of water flow is super-critical. Many of them are ungauged. The damage in the catchments is enormous, and the length of the torrents is about 23% of the total length of small rivers in the Czech Republic. The Smědá experimental mountainous catchment (with the Bílý potok downstream gauge) in the Jizerské hory Mts. was chosen as a model area for simulating extreme rainfall-runoff processes using two different models. For the purposes of evaluating and simulating significant rainfall-runoff episodes, we chose the KINFIL physically-based 2D hydrological model, and ANN, an artificial neural network mathematical “learning” model. A neural network is a model of the non-linear functional dependence between inputs and outputs with free parameters (weights), which are created by iterative gradient learning algorithms utilizing calibration data. The two models are entirely different. They are based on different principles, but both require the same time series (rainfall-runoff) data. However, the parameters of the models are fully different, without any physical comparison. The strength of KINFIL is that there are physically clear parameters corresponding to adequate hydrological process equations, while the strength of ANN lies in the “learning procedure”. Their common property is the rule that the greater the number of measured rainfall-runoff events (pairs), the better fitted the simulation results can be expected.

4.2 STUDIE II.

Mitigation of Surface Runoff and Erosion Impacts on Catchment by Stone Hedgerows

Pavel Kovář, Darina Vaššová and Michaela Hrabalíková

Soil & Water Res., 6, 2011 (4): 153–164

Abstract: This paper presents the results of a study on the influence of hedgerows on the process of the surface runoff in the experimental catchment Verneřice 1, Ústí n. L. region, the Czech Republic. The influence of hedgerows on the surface runoff was simulated using the KINFIL rainfall-runoff model. The model parameters were assessed from the field measurements of the soil hydraulic parameters, in particular the saturated hydraulic conductivity and sorptivity. The catchment area is characterised by stone hedgerows constructed by land users throughout the past centuries, using stones collected from the adjacent agricultural fields. Presently, the hydraulic properties of these hedgerows reflect the characteristics of the mixture of stones, deposited soil, and vegetation litter, and they are more permeable than soil on the areas between them. Due to this fact, the permeability of the hedgerows produces a higher infiltration and a lower surface runoff. Therefore, the overland flow vulnerability and impact of water erosion decrease if they are situated in parallel to the contour lines system. The model was applied for two scenarios in the catchment – with and without hedgerows – to assess their effects on extreme rainfalls with a short duration. The surface runoff caused by extreme rainfall was simulated in order to show how hedgerows can mitigate the resultant flood and erosion. This paper provides relevant hydrological data and summarises the influence of man-made hedgerows on the overland flow control, i.e. on long and steep slopes surface runoff.

4.3 STUDIE III.

Rainfall erosivity in Europe

Panos Panagos, Cristiano Ballabio, Pasquale Borrelli, Katrin Meusburger, Andreas Klik, Svetla Rousseva, Melita Perčec Tadić, Silas Michaelides, Michaela Hrabalíková, Preben Olsen, Juha Aalto, Mónika Lakatos, Anna Rymaszewicz, Alexandru Dumitrescu, Santiago Beguería, Christine Alewell

Science of the Total Environment 511 (2015) 801–814

Abstract: Rainfall is one the main drivers of soil erosion. The erosive force of rainfall is expressed as rainfall erosivity. Rainfall erosivity considers the rainfall amount and intensity, and is most commonly expressed as the R-factor in the USLE model and its revised version, RUSLE. At national and continental levels, the scarce availability of data obliges soil erosion modellers to estimate this factor based on rainfall data with only low temporal resolution (daily, monthly, annual averages). The purpose of this study is to assess rainfall erosivity in Europe in the form of the RUSLE R-factor, based on the best available datasets. Data have been collected from 1541 precipitation stations in all European Union (EU) Member States and Switzerland, with temporal resolutions of 5 to 60 min. The R-factor values calculated from precipitation data of different temporal resolutions were normalized to R-factor values with temporal resolutions of 30 min using linear regression functions. Precipitation time series ranged from a minimum of 5 years to a maximum of 40 years. The average time series per precipitation station is around 17.1 years, the most datasets including the first decade of the 21st century. Gaussian Process Regression (GPR) has been used to interpolate the R-factor station values to a European rainfall erosivity map at 1 km resolution. The covariates used for the R-factor interpolation were climatic data (total precipitation, seasonal precipitation, precipitation of driest/wettest months, average temperature), elevation and latitude/longitude. The mean R-factor for the EU plus Switzerland is $722 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, with the highest values ($> 1000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) in the Mediterranean and alpine regions and the lowest

(< 500 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹) in the Nordic countries. The erosivity density (erosivity normalized to annual precipitation amounts) was also the highest in Mediterranean regions which implies high risk for erosive events and floods.

4.4 STUDIE IV.

Monthly rainfall erosivity: conversion factors for different time resolutions and regional assessments

Panos Panagos, Pasquale Borrelli, Jonathan Spinoni, Cristiano Ballabio, Katrin Meusburger, Andreas Klik, Svetla Rousseva, Melita Perčec Tadić, Silas Michaelides, Michaela Hrabalíková, Preben Olsen, Juha Aalto, Mónika Lakatos, Anna Rymaszewicz, Alexandru Dumitrescu, Santiago Beguería, Julia Kostalova, Sašo Petan, Kazimierz Banasik, Christine Alewell

Science of the Total Environment (přijatý manuskript, v oponentském řízení)

Abstract: Recently a Rainfall Erosivity Database at European Scale (REDES) has been established and a mean annual R-factor map based on high temporal resolution data was created. This study deals with the expansion of REDES by 140 rainfall stations, covering areas where monthly R-factor values were missing (Slovakia, Poland) or where former data density was low (Austria, France, and Spain). The different time resolutions (5 minutes, 10 minutes, 15 minutes, 30 minutes and 60 minutes) of high temporal data require a conversion of monthly R-factor based on a pool of stations with available data at all-time resolutions. On average, the R-factor at 5-minutes is 10% higher than the one estimated at 15-minutes and 95% higher than the one estimated with hourly data. However, those factors have a monthly variability as the smoother differences are found in winter months (January: 1.54) and the sharper ones in summer months (August: 2.13). The estimated monthly conversion factors allow transferring the measured R-factor to the desired time resolution. After the normalization of the monthly R-factor values at a 30- min temporal resolution, it is possible to estimate the monthly rainfall erosivity values in Europe. The June to September period contributes to around 53% of the annual rainfall erosivity in Europe with different spatial and temporal patterns depending on the region. The study has also identified the seasonal patterns in different regions of Europe (Mediterranean, Alpine, North/West Europe, and Central/North). There are heterogeneous patterns in seasonal rainfall erosivity

in Europe. On average, the Northern and Central European countries exhibit the highest R-factor values in summer, while the Southern European countries from October to January. In almost all countries (excluding Ireland, United Kingdom and North France), the seasonal variability of rainfall erosivity is high. Very few areas and stations showed the highest erosivity during late winter to early spring period (February – April). In the majority of the stations, the rainfall erosivity is higher during summer and lower in autumn.

4.5 STUDIE V.

Comparison of different approaches of LS factor calculations based on measured soil loss under simulated rainfall

Michaela Hrabalíková, Miloslav Janeček

Soil & Water Res. (accepted manuscript, under revision)

Abstract: Geographic information System (GIS) combined with soil loss models can enhance the evaluation of soil erosion estimation. SAGA and ARC/INFO geographic information system were used to estimate topographic (*LS*) factor of the Universal soil loss equation (USLE) soil erosion on a long-term experimental plots near Prague in the Czech Republic. Digital elevation model with high accuracy (1x1 m) and measured soil loss under simulated rainfall provided input for five alternate GIS based procedures in computing the combined slope length and steepness factor in (R)USLE for determining the influence of chosen algorithm in soil erosion estimates. Results of GIS based (R)USLE erosion estimates from the five procedures are compared with measured soil loss from experimental plot of given length 11 m from 38 rainfall simulations which were performed during 15 years. Results indicate GIS based (R)USLE predicted soil erosion estimates are in most variant lower than the observed measured average annual soil loss, only two methods over-predicted measured soil loss. One of them is the original manual method of the USLE which, however, predicted average soil of the lowest difference with measured average annual soil loss. The results from this study show the need for further work in using GIS and USLE for soil erosion estimation.

5 KOMENTÁŘ

Volba nejen erozního, ale i srážko-odtokového modelu, je závislá na povaze mnoha parametrů, ale především na tom, co daný uživatel od modelu chce. Boardman (2006) a Morgan (2010) shrnují podmínky a faktory, které je třeba vzít v úvahu při výběru modelu, z nich jsou tyto pravděpodobně nejzásadnější:

- Efektivita modelu,
- Datové zdroje,
- Časové a prostorové měřítko modelu,
- Volba vhodného algoritmu, popř. operačních rovnic.

V literatuře je možné nalézt velké množství porovnání modelů a jejich parametrů, jako je tomu např. ve STUDII I. a v další literatuře. Amore et al. (2004) porovnával efektivitu modelu WEPP a USLE na třech povodích v Sicílii. Zhang et al. (1996) hodnotil simulace modelu WEPP pro roční ztrátu půdy před optimalizací parametrů ($R^2 = 0.50 - 0.65$) a po optimalizaci parametrů ($R^2 = 0.54 - 0.68$). K podobným výsledkům také došel Tiwari (2000).

Využitím prostorových dat a GIS konceptu v modelování se také zabývalo mnoho autorů, jako např. Zhang et al. (1996), Vrieling (2006), de Vente et al. (2009, 2014) a další. STUDIE I. a II. názorně představují využití prostorových dat a GIS analýz k vytvoření vstupních parametrů do koncepčních modelů kde je jsou v prostředí GIS analyzovány fyziografie a geometrie zkoumaných povodí. STUDIE III. zas naopak představuje příklad, kdy se vytváří databáze pro budoucí využití v erozním modelování.

Karydas et al. (2014) uvádí, že významnou roli včetně kvality vstupních dat hraje i časové a prostorové měřítko (např. rozlišení DMR). Časové měřítko v GIS můžeme chápat z dvojího pohledu, buď:

- Jako časovou řadu záznamu dat (např. analýza leteckých ortofot pořizených v různých časových obdobích), anebo
- Jako časový krok, který byl použit pro výpočet nebo záznam dat (např. záznam úhrnu srážky v minutovém kroku nebo hodinovém kroku).

Například Yin et al. (2007) nebo Williams a Sheridan (1991) uvádí, že se s klesajícím časovým krokem výpočtu výsledná hodnota R-faktoru podhodnocuje. Toto tvrzení dokládají i výsledky obsažené STUDII III. a IV., které ovšem již prezentují výsledky pro celou EU. Pro lepší přehlednost, se zde uvádí i obr. 4, který ukazuje graf hodnot R-faktoru vypočítaného na základě různého časového kroku.



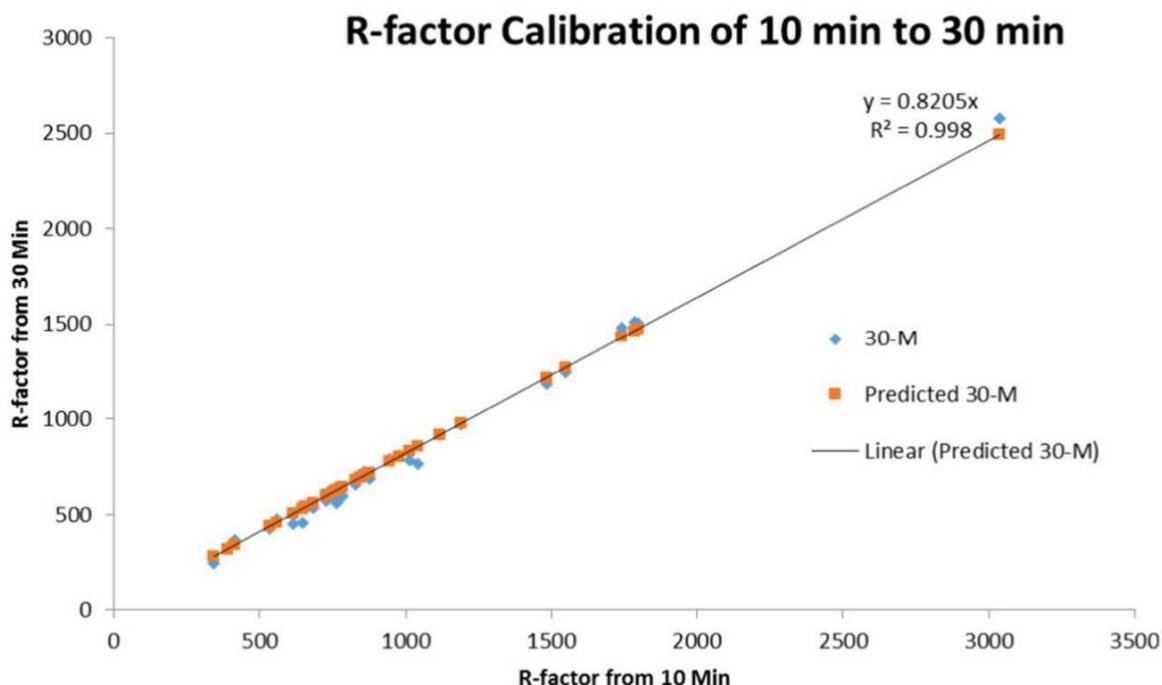
Obr. 4: R-faktor pro stanici Velké Meziříčí vypočítaný v časovém kroku: 1 min, 5 min, 10 min, 30 min a 60 min

STUDIE III. a IV. se zabývá výpočtem R-faktoru pro celou EU, kdy v rámci spolupráce mezi dalšími státy, a jako jeden z cílů této práce, se za Českou republiku:

- Vypočítal R-faktor pro 32 stanic,
- Data ze stanic převážně pokrývala období 1961 – 1999.

Vzhledem prostorovému měřítku (EU) a množství vstupujících dat bylo třeba homogenizovat časový krok výpočtu pro všechny státy, které použily jiný časový krok. Stejnou homogenizaci dat v rámci USA provedl např. Renard et al. (1997), kdy se na základě doplňujících výpočtů v různém časovém kroku stanoví přepočítávací koeficient. Konverze 60-min dat např. na 10-min data v sobě

zahrnuje poměrně velkou chybovost (nejistoty) a tak bylo zvoleno jako jednotný časový krok 30 min. Regresní funkcí se stanovil koeficient pro přepočítání (viz obr. 5)



Obr. 5: Kalibrace dat pro přepočítání R faktoru z 10 min kroku na 30 min časový krok

Faktor pro přepočítání časového rozlišení dat:

Časový krok zdroj. dat	Počet stanic	Země	Regresní funkce	R ²
60-min	82	BE, CZ , CH, CY, DE, EE, FR, IT, LU, RO	$R_{30 \text{ min}} = 1.5597 * R_{60 \text{ min}}$	0.994
15-min	31	BE, ES	$R_{30 \text{ min}} = 0.8716 * R_{15 \text{ min}}$	0.998
10-min	31	CZ , CY, CH, DE, EE, HR, HU, LU, RO	$R_{30 \text{ min}} = 0.8205 * R_{10 \text{ min}}$	0.998
5-min	12	CZ , CY, FR, HR, LU	$R_{30 \text{ min}} = 0.7984 * R_{5 \text{ min}}$	0.998

Jak již bylo zmíněno v úvodu, R-faktor je jedním z faktorů rovnice USLE, který s sebou nese jistá úskalí v podobě nedostatku dat. Podle literatury je minimální délka časové řady pro reprezentativní odhad R faktoru:

- Foster et al. (2003): 15 let
- Wishmeier, Smith (1978): 22 let
- Verstraeten et al. (2006): 22 let a více

Základním vstupním souborem, včetně dlouhodobých dat nebo dat z kvalitních databází, do prostorově distribuovaných modelů, jako je například TOPMODEL, TOPOG a Model Erozního indexu nebezpečnosti (BEHI) je především digitální model reliéfu (DMR) je. DMR může být integrován do sub-povodí a modelovat dopady změny parametrů sub-povodí na erozi půdy v rámci celého povodí. Výhoda prostorově distribuovaného přístupu v modelování přístupu spočívá v tom, že může být rozšířena i do 3-D prostoru (Hengl and Reuter, 2008).

Zásadním zlomem v hydrologickém a erozním modelování v prostředí GIS bylo vytvoření konceptu „Specific catchment area“ (specifické přispívající plochy) v 70 letech minulého století (Speight, 1974). Na základě tohoto konceptu autoři jako např. Moore a Wilson (1992), Desmet a Govers (1996) Mitášová et al. (1997) odvodili platné vztahy pro výpočet LS faktoru modelu USLE v prostředí GIS. Moore a Wilson (1992) odvodili vztah pro LS faktor v prostředí GIS na základě „unit stream teorie“ z operativních rovnic pro model WEPP. Studie 5 se zabývá porovnáním několika přístupů k výpočtu LS faktoru. Pro výpočet ztráty půdy v GIS je třeba také vzít v úvahu nejen použitou rovnici pro LS faktor, ale také jaký algoritmus byl zvolen pro výpočet:

- 1) „Specific catchment area“: zde existuje hned několik přístupů, které popisuje Hengl a Reuter (2008), Desmet a Govers (1996) nebo Wilson a Galant (2000)
- 2) Sklonitosti: Florinsky (1998) shrnuje, že k výpočtu rastru sklonitosti z DMR je k dispozici 6 přístupů. Dunn a Hickey (1998) provedli porovnání několika algoritmů pro výpočet sklonu a orientace ke

světovým stranám a došli k závěru, že výsledné rastry se významně od sebe neliší.

- 3) Směr odtoku: na základě tohoto algoritmu se modelují všechny hydrologické parametry v GIS, tedy i LS faktor. V současné době existuje hned několik přístupů
- Jednosměrný odtok: D8 (O'Callaghan a Mark, 1984), Rho8 (Fairfield a Leymarie, 1991),
 - Více-směrný odtok:
 - o MFD8 – tato skupina algoritmů je souhrnně nazývána buď jako MFD (Holmgern, 1994), nebo algoritmus implementovaný v TOPMODEL (Quinn et al., 1991), nebo také jako FD8 (Freeman, 1991).
 - o D-infinity (D^∞): vytvořen Tarbotnem (1997)

Využívání geoinformačních systémů v prostorově distribuovaném modelování a v oblasti tzv. „up-scaling“ modelů je díky překotnému vývoji v oblasti dálkového průzkumu země (např. projekty Copernicus, Corine nebo LUCAS, nebo přímo data ze satelitů jako jsou např. Sentinel, Landsat atd.) v centru vědeckého zájmu. Nespornou výhodou prostředí GIS je přímé propojení databázového systému obsahující půdní záznamy (např. digitalizace starých záznamů KPP, SOTER), obsahující informace o srážkách (databáze REDES) nebo i informace o využití půdy (např. propojení s LPIS) s digitálním modelem reliéfu (DMR) v různém rozlišení (např. ČÚZK poskytuje DMR ve vysokém rozlišení z LIDAR mapování).

Obecně dlouhodobým hlavním omezením, se kterým se v současnosti erozní modelování potýká, je nedostatek dlouhodobých dat a tudíž kvalitní kalibrace a validace modelů pro specifické podmínky. Podle Nearinga a Hairsine (2010) má tento trend z velké části na svědomí nastavení financování výzkumu, kdy se udělují granty v horizontu dvou až pěti let a tudíž vznikají různá úskalí z hlediska sběru dlouhodobých dat, která jsou přitom pro práci s modely nezbytnými.

Pokračování sběru dat a vytváření databázových systémů pro účely nejen erozního modelování bude mít i v budoucnu zásadní význam, protože nedostatek dat znamená omezení vývoje „spolehlivých“ modelů (Walling, 2005). Z praktického hlediska je do budoucna vyžadován takový model, který bude splňovat následující kritéria:

- Dostupná a spolehlivá vstupní data,
- Jednoduché uživatelské prostředí,
- Schopnost modelovat srážko-odtokové poměry,
- Schopnost určit trend ve vývoji degradace půdy erozí jakožto funkci protierozních opatření a měnícího se klimatu.

I přes velké množství podrobných dat, která jsou v současné době k dispozici, je empirické modelování stále jedním z nejvyužívanějších konceptů v erozním modelování v praxi. Svědčí o tom vznik RUSLE (Renard et al., 1997) a dalších modelů, které se řadí do tzv. „USLE family“, tj. základní koncept modelu je založen na USLE (např. SWAT). Velká výhoda této skupiny modelů spočívá v jejich jednoduchosti na pochopení pro uživatele, ale velmi často se již do úvahy neberou omezení a limity těchto modelů (Bagarello et al., 2015, Foster, 1982).

Nicméně v této oblasti je stále ještě třeba vyřešit mnoho problémů spojených s nejistotami spojenými se vstupními daty (např. DMR), ale i přímo nejistotami spojenými přímo s modelem. Nejistoty budou podle Bevena a Alcocka (2012) hrát významnou roli v modelování i v budoucnu a možná povedou i k novým způsobům v myšlení a v modelování eroze (Wainwright et al., 2010). Přičemž ale propojení modelů s geoprostorovými informacemi bude i nadále hrát velmi významnou roli ve vývoji nových modelů (Wainwright et al., 2010, Hengl and Reuter, 2008).

Do budoucna je velmi důležité, aby se vzájemně porovnaly nejen samotné modely (ať už empirické, koncepční nebo fyzikálně založené), ale především algoritmy a další koncepty spojené s analýzou DMR a z nich odvozených atributů. Je třeba stanovit u jednotlivých algoritmů míru nejistoty, vstupní data

(prostorové rozlišení) a pro uživatele jasně definovat jejich limity v použití, tak aby se zamezilo mis-aplikacím či mis-intepretaci výsledků modelu.

6 SUMMARY

Dissertation thesis: *Contribution to the evaluation of different approaches to the modelling of soil loss by water erosion in GIS*, is a set of five studies published or accepted for publication in scientific journals. Thematically the work deals with the question of linking the erosion modelling together with geographic information systems. The work is divided into five chapters. In the first chapter, the issue of erosion and rainfall-runoff modelling is described. A particular focus is placed on the concept and the basic equations underlying erosion modelling. The second chapter contains 2 studies that deal with modelling rainfall-runoff conditions in the area of experimental area using KINFIL model. The chapter also discusses the selection of a suitable model and source datasets that forms the basis for the evaluation of physiographic parameters of a catchment. The third chapter is thematically focused in calculating the rainfall factor based on long-term precipitation records from 32 meteorological stations in the Czech Republic. It partially overlaps with the previous chapter because one of the outcomes of the study is the REDES database containing values of R -factor. However, the chapter focuses more on the time scale, and especially the influence of the time step in the simulation on resulting outcomes of the model. The fourth chapter is dealing by erosion modelling in GIS based on analysis of digital terrain models. It contains a study that addresses the influence of various algorithms and/or equations to calculate topographical factor and its effect on the overall prediction of soil loss.

7 PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY

- AMORE, E., MODICA, C., NEARING, M. A. & SANTORO, V. C. 2004. Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins. *Journal of Hydrology*, 293, 100-114.
- BEASLEY, D. B., HUGGINS, L. F. & MONKE, E. J. 1980. ANSWERS - A MODEL FOR WATERSHED PLANNING. *Transactions of the Asae*, 23, 938-944.
- BEVEN, K. J. 2011. *Rainfall-Runoff Modelling : The Primer (2nd Edition)*, Hoboken, NJ, USA, John Wiley & Sons.
- BEVEN, K. J. & ALCOCK, R. E. 2012. Modelling everything everywhere: a new approach to decision-making for water management under uncertainty. *Freshwater Biology*, 57, 124-132.
- BOARDMAN, J. 2006. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *Catena*, 68, 73-86.
- BOUGHTON, W. 1989. A review of the USDA SCS curve number method. *Soil Research*, 27, 511-523.
- BRAZIER, R. 2004. Quantifying soil erosion by water in the UK: a review of monitoring and modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 28, 340-365.
- DE VENTE, J., POESEN, J., GOVERS, G. & BOIX-FAYOS, C. 2009. The implications of data selection for regional erosion and sediment yield modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 1994-2007.
- DE VENTE, J., POESEN, J., VERSTRAETEN, G., GOVERS, G., VANMAERCKE, M., VAN ROMPAEY, A., ARABKHEDRI, M. & BOIX-FAYOS, C. 2014. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand? (vol 127, pg 16, 2013). *Earth-Science Reviews*, 133, 94-94.
- DESMET, P. J. J. & GOVERS, G. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51, 427-433.
- DUNN, M. & HICKEY, R. 1998. The effect of slope algorithms on slope estimates within a GIS. *Cartography*, 27, 9-15.
- Ellison, W. D. 1947. Soil erosion studies - Part I: *Agric. Eng.* 28:145-146.

- FAIRFIELD J., LEYMARIE P. (1991) Drainage network from grid digital elevation models. *Water Resources Research* 27(5): 709-717.
- FLORINSKY, I. V. 1998. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science*, 12, 47-61.
- FOSTER, G. R. 1982. RELATION OF USLE FACTORS TO EROSION ON RANGELAND. Science and Education Administration Publications, ARM, 17-35.
- Foster, G.R., Yoder, D.C., Weesies, G.A., McCool, D.K., McGregor, K.C., Bingner, R.L., 2003. Draft User's Guide, Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE-2). USDA-Agricultural Research Service, Washington, DC.
- FREEMAN, T. G. 1991. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers & Geosciences*, 17, 413-422.
- GOVERS, G. 2010. Misapplications and Misconceptions of Erosion Models. *Handbook of Erosion Modelling*. John Wiley & Sons, Ltd.
- GRAYSON, R. B., MOORE, I. D. & MCMAHON, T. A. 1992. PHYSICALLY BASED HYDROLOGIC MODELING .1. A TERRAIN-BASED MODEL FOR INVESTIGATIVE PURPOSES. *Water Resources Research*, 28, 2639-2658.
- HENGL, T. & REUTER, H. I. 2008. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*, Amsterdam, Elsevier.
- HOLMGREN P. (1994) Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: an empirical evaluation. *Hydrological Processes* 8(4): 327-334.
- KARYDAS, C. G., PANAGOS, P. & GITAS, I. Z. 2014. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics. *International Journal of Digital Earth*, 7, 229-250.
- MEYER, L. D. & WISCHMEIER, W. H. 1969. MATHEMATICAL SIMULATION OF THE PROCESS OF SOIL EROSION BY WATER. *Am Soc Agric Engrs-Trans*, 12, 754-758, 762.
- MITASOVA, H., HOFIERKA, J., ZLOCHA, M. & IVERSON, L. R. 1996. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10, 629-641.

- MOORE, I. D. & BURCH, G. J. 1986. Physical Basis of the Length-Slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal*, 50, 1294-1298.
- MOORE, I. D., GRAYSON, R. B. & LADSON, A. R. 1991. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5, 3-30.
- MORGAN, R. 2005. *Soil erosion and conservation*, Blackwell.
- MORGAN, R. P. C. 2010. *Model Development: A User's Perspective*. *Handbook of Erosion Modelling*. John Wiley & Sons, Ltd.
- MORGAN, R. P. C. & NEARING, M. A. 2011. *Handbook of erosion modelling*, Chichester, West Sussex, UK ; Hoboken, NJ, Wiley-Blackwell.
- MOUSSA, R. 2003. On morphometric properties of basins, scale effects and hydrological response. *Hydrological Processes*, 17, 33-58.
- NEARING, M. A. & HAIRSINE, P. B. 2010. *The Future of Soil Erosion Modelling*. *Handbook of Erosion Modelling*. John Wiley & Sons, Ltd.
- NEARING, M. A. & NICKS, A. D. 1998. Evaluation of the water erosion prediction project (WEPP) model for hillslopes. In: BOARDMAN, J. & FAVISMORTLOCK, D. (eds.) *Modelling Soil Erosion by Water*. Berlin: Springer-Verlag Berlin.
- O'CALLAGHAN J.F., MARK D.M., (1984) The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 28(3): 323-344.
- OLIVEIRA, A. H., SILVA, M. A. D., SILVA, M. L. N., CURI, N., NETO, G. K. & FREITAS, D. A. F. D. 2013. Development of Topographic Factor Modeling for Application in Soil Erosion Models.
- QUINN, P., BEVEN, K., CHEVALLIER, P. & PLANCHON, O. 1991. THE PREDICTION OF HILLSLOPE FLOW PATHS FOR DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODELING USING DIGITAL TERRAIN MODELS. *Hydrological Processes*, 5, 59-79.
- QUINN, P. F., BEVEN, K. J. & LAMB, R. 1995. THE LN(A/TAN-BETA) INDEX - HOW TO CALCULATE IT AND HOW TO USE IT WITHIN THE TOPMODEL FRAMEWORK. *Hydrological Processes*, 9, 161-182.

- RENARD, K. G. 1997. Predicting soil erosion by water : a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). Agriculture handbook no 703. Washington, D.C.: USDA, Agricultural Research Service,.
- SPEIGHT, J. G. 1974. A parametric approach to landform regions. Progress in Geomorphology, Special Publication No.7. Oxford: Institute of British Geographers, Alden & Mowbray Ltd at the Alden Press.
- TARBOTON, D. G. 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. Water Resources Research, 33, 309-319.
- TIWARI, A. K., RISSE, L. M. & NEARING, M. A. 2000. Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE. Transactions of the Asae, 43, 1129-1135.
- Verstraeten, G., Poesen, J., Demarée, G., Salles, C., 2006. Long-term (105 years) variability in rain erosivity as derived from 10-min rainfall depth data for Ukkel (Brussels, Belgium), implications for assessing soil erosion rates. J. Geophys. Res. 111, D22109 (11 pp.).
- VRIELING, A. 2006. Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. Catena, 65, 2-18.
- WAINWRIGHT, J., PARSONS, A. J., MULLER, E. N., BRAZIER, R. E. & POWELL, D. M. 2010. Standing proud: a response to 'Soil-erosion models: where do we really stand?' by Smith et al. Earth Surface Processes and Landforms, 35, 1349-1356.
- WALLING, D. E. 2005. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. Science of The Total Environment, 344, 159-184.
- WILSON, J. P. & GALLANT, J. C. 2000. Terrain analysis : principles and applications, New York, Wiley.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains : guide for selection of practices for soil and water conservation, Washington, D.C., Agricultural Research Service, U. S. Dept of Agriculture in cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station.

- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses : a guide to conservation planning, Washington, Purdue University. Agricultural Experiment Station, Science and Education Administration.
- YOUNG, R. A. & ONSTAD, C. A. 1990. AGNPS - A TOOL FOR WATERSHED PLANNING, New York, Amer Soc Civil Engineers.
- YOUNG, R. A., ONSTAD, C. A., BOSCH, D. D. & ANDERSON, W. P. 1989. AGNPS - A NONPOINT-SOURCE POLLUTION MODEL FOR EVALUATING AGRICULTURAL WATERSHEDS. Journal of Soil and Water Conservation, 44, 168-173.
- ZHANG, H., YANG, Q., LI, R., LIU, Q., MOORE, D., HE, P., RITSEMA, C. J. & GEISSEN, V. 2013. Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor. Computers & Geosciences, 52, 177-188.
- ZHANG, L., ONEILL, A. L. & LACEY, S. 1996. Modelling approaches to the prediction of soil erosion in catchments. Environmental Software, 11, 123-133.

8 ODBORNÝ ŽIVOTOPIS

Osobní informace:

Jméno a příjmení: Michaela Hrabalíková

Datum narození: 8. Květen 1984

E-mail: hrabalikova@gmail.com

Vzdělání, odborná příprava, školení

2009 – současnost: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí, Úpravy vodního režimu krajiny

2007 – 2009 Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí, Krajinné a pozemkové úpravy

Zahraníční stáže a výměnné pobyty:

2012 – 2013: Katholieke Universiteit Leuven, Belgie, Výměnný studijní pobyt, program Master of Earth Observation

Pracovní zkušenosti:

2014 – současnost: VÚMOP, v.v.i.; Oddělení pedologie a ochrany půd, odborný pracovník výzkumu a vývoje

2013 – současnost: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí, lektor předmětu Erosion Control

2013 – 2015: Mott MacDonald ČR, GIS specialista v projektu NATURA 2000

2011 – 2012: Alinex s.r.o. & Ing. Libuše Pražáková, Projektant pozemkových úprav

2009 – 2011: Jiran & Partner Architekti, GIS specialista v projektu: Development Strategy of Iraq Cities. Účast na zpracování územně plánovací dokumentace pro města: Al-Smmawah, Al-Rumaita, Kheder, Abbaichi

Podíl na řešení projektů:

Metodika návrhu a realizace infiltračních a záchytných opatření v rámci obnovy hydrologických poměrů a způsobů hospodaření v krajině, MZE QH92086 (2009-2011, MZE/QH), Česká zemědělská univerzita v Praze, spoluúčast na řešení vybraných aktivit

Optimalizace zemědělské a říční krajiny v ČR s důrazem na rozvoj biodiverzity, MSM 2B06101 (2006-2011, MSM/2B), Česká zemědělská univerzita v Praze, spoluúčast na řešení vybraných aktivit

Optimalizace vodního režimu na modelovém území pomoravské nivy, MZE QJ1220033 (2012-2015, MZE/QJ), Česká zemědělská univerzita v Praze, člen řešitelského týmu

Optimalizace vodního režimu krajiny ke snižování dopadů hydrologických extrémů, TA02020402 (2012-2015, TA0/TA), Česká zemědělská univerzita v Praze, spoluúčast na řešení vybraných aktivit

Kvantifikace a modelování posunu půdních částic zpracováním půdy a výmolnou erozí v rámci hodnocení celkové ztráty půdy na intenzivně zemědělsky využívaných pozemcích, QJ1520028 (2015-2018, MZE/QJ), Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd, v.v.i., člen řešitelského týmu

9 PUBLIKAČNÍ ČINNOST

Články v časopisech s IF

Houfková, P., Bumerl, J., Pospíšil, L., Karlík, P., Beneš, J., Bernardová, A., Hrabalíková, M., Molnárová, K. J., & Hejcman, M. (2015). Origin and development of long-strip field patterns: A case study of an abandoned medieval village in the Czech Republic. *CATENA*, 135, 83-91.

Kovar, P., Hrabalíkova, M., Neruda, M., Neruda, R., Srejber, J., Jelinkova, A., & Bacinova, H. (2015). Choosing an Appropriate Hydrological Model for Rainfall-Runoff Extremes in Small Catchments. *Soil and Water Research*, 10(3), 137-146.

Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Klik, A., Rouseva, S., Tadic, M. P., Michaelides, S., Hrabalíkova, M., Olsen, P., Aalto, J., Lakatos, M., Rymaszewicz, A., Dumitrescu, A., Begueria, S., & Alewell, C. (2015). Rainfall erosivity in Europe. *Science of the Total Environment*, 511, 801-814.

Vopravil, J., Podrázský, V., Batysta, M., Novák, P., Havelková, L., & Hrabalíková, M. (2015). Identification of agricultural soils suitable for afforestation in the Czech Republic using a soil database. *Journal of Forest Science*, 61(4), 141-147.

Kovar, P., Krovak, F., Rous, V., Bily, M., Salek, M., Vassova, D., Hrabalíkova, M., Tejnecky, V., Drabek, O., Bazatova, T., & Peskova, J. (2014). An appraisal of the effectiveness of nature-close torrent control methods - Jindrichovický Brook case study. *Ecohydrology*, 7(5), 1281-1296.

Kovar, P., Vassova, D., & Hrabalíkova, M. (2011). Mitigation of Surface Runoff and Erosion Impacts on Catchment by Stone Hedgerows. *Soil and Water Research*, 6(4), 153-164.

Metodiky

Kovář P., Štibinger J., Janeček M., Vaššová D., Hrabalíková M. (2012): Metodika zmírnění negativních důsledků hydrologických extrémů a erozních účinků povrchového odtoku agrárními valy, uplatněná certifikovaná metodika, Osvědčení 18030/2012-MZE, analýza protierozní a protipovodňové funkce agrárních valů a uplatnění zásad hospodaření dle GAIC, výsledek je využíván orgány státní nebo veřejné správy, Ústřední pozemkový úřad MZe ČR, 27.01.2012, Smlouva č. SM15/2012, č.j. 3447/2012-MZE-17011, dle ustanovení §269 zákona 513/1991 Sb.

Sborníky příspěvků

Kovář P., Vaššová D., Hrabalíková M., Vrana, I. (2013): Stakeholders' consensus on technical and non-structural flood control measures. In: Comprehensive Flood Risk Management: Research for Policy and Practice 19.11.2012; Místo konání: Rotterdam, the Netherlands; CRC Press: Taylor & Francis Group, London, UK; ISBN: 978-0-415-62144-1

Kovář P., Vaššová D., Hrabalíková M. (2012): Hydrologické a protierozní funkce agrárních valů in Vláhové poměry krajiny - sborník příspěvků z mezinárodní konference: Rožnovský, J., Litschmann, T., Středa, T., Středová, H. (eds.): s. 83-86. ISBN 978-80-86690-78-0

Hrabalíková M., Kobzová D., Kudrnáčová M., Procházková E. (2011): Determination of erosion areas using aerial photographs and GIS, a case study Žarošice. Bulletin of Szent István University. 210 – 210.

Kovář P., Vaššová D., Hrabalíková, M. (2011): Mitigation of Surface Runoff and Erosion Impacts on Catchment by Stone Hedgerows. Soil and Water Research, 2011, No. 6/4, p. 153 - 164. ISSN: 1801-5395.

Soubor specializovaných map

Kovář P., Hrabalíková M., Vaššová D., Dvořáková Š., Zeman J. (2012): Analýza povodí Starosuchdolského potoka pro simulaci odtokového procesu v suchém období, soubor specializovaných map s odborným obsahem

Kovář P., Hrabalíková M., Křovák F., Rous V., Bažatová T. (2011): Přírodě blízké úpravy Jindřichovického potoka, soubor specializovaných map s odborným obsahem, osvědčení ÚPÚ č. 24/2011-13300, Pro nekomerční využití státní správou - zefektivnění návrhu opevnění koryta malých vodních toků,