

Výpočet smyvu půdy pomocí vybraných empirických modelů vodní eroze

Calculation of soil washing using chosen empirical models of water erosion

Jana Kozlovsky Dufková, František Toman

Ústav aplikované a krajinné ekologie, Mendelova univerzita v Brně

Abstrakt

Práce si klade za cíl objasnit problematiku moderních způsobů výpočtu vodní eroze. Porovnává mezi sebou výsledky klasického výpočtu smyvu půdy pomocí metody USLE a modelů USLE2D a RUSLE3D. K tomuto účelu bylo vybráno povodí Kurdějovského potoka. Výsledné hodnoty smyvu půdy dokazují, že metody USLE a USLE2D lze považovat za vzájemně nahraditelné. Výpočet ztráty půdy pomocí modelu RUSLE3D se však od předchozích dvou metod liší natolik, že tento model není možné ke zjišťování ztráty půdy, tedy především jako náhradní metoda k metodě USLE, využívat. Bez dalších měření a validace však nelze jednoznačně prohlásit, která z uvedených metod lépe popisuje skutečný stav.

Klíčová slova: USLE, USLE2D, RUSLE3D

Abstract

The paper clarifies modern methods of water erosion determination. It compares results of classic determination of water erosion by USLE with results of models USLE2D and RUSLE3D. For this purpose the basin of Kurdějov stream was chosen. Final output of soil loss proves that methods USLE and USLE2D can be considered mutually substitutable. However, soil loss by RUSLE3D differs from soil loss by USLE enough to state that RUSLE3D is not possible to use for soil erosion calculation, above all as alternative method for USLE. It is impossible to definitely say, which method describes the real state better without additional measurements and validation.

Keywords: USLE, USLE2D, RUSLE3D

Úvod

S rozvojem výpočetní techniky a GIS dochází také k vývoji modelů eroze. Pro odhad erozního zatížení území a transportu splavenin z povodí existuje v současnosti velké množství postupů. Výpočetní metody a modely lze rozdělit podle různých kritérií.

V současnosti využívané modely se liší dle toho, zda (Janeček a kol., 2012):

- a) vyčíslují pouze plošný smyv půdy (metoda USLE),
- b) vyčíslují mezirýhovou i rýhovou erozi (zohledněním velikosti odtokové plochy v každém bodě) (USLE2D),
- c) vyčíslují rýhovou a mezirýhovou erozi, ale i depozici na základě komplexního vyhodnocení morfologie a stanovení transportní kapacity povrchu (bilanční modely) (RUSLE3D, USPED, WATEM/SEDEM).

Práce mezi sebou porovnává výsledky simulovaného smyvu půdy stanoveného pomocí klasické metody USLE a modelů USLE2D a RUSLE3D. K tomuto účelu bylo vybráno povodí Kurdějovského potoka.

Materiál a metody

USLE

Univerzální rovnice pro výpočet dlouhodobé ztráty půdy erozí (Universal Soil Loss Equation – USLE) je nejznámější a v praxi nejčastěji používaným (empirickým) erozním modelem. Byl definován v roce 1978 americkým statistikem Waltem Wischmeierem za spolupráce s jeho školitelem Dwightem Smithem. Wischmeier byl jako zaměstnanec Soil Conservation Service pověřen analyzovat zhruba 10 000 záznamů z erozí postižených pozemků a malých povodí. Tyto výzkumné plochy měly přesně definované parametry – délka 22,13 m, sklon 9 %, trvalý úhor obdělávaný po směru sklonu. Díky analýze dat (počátky měření již ve 30. letech minulého století) bylo možné stanovit empirický model předpovědi eroze (Wischmeier a Smith, 1978). Rovnice USLE je vyjádřena součinem faktorů ovlivňujících vodní erozi (1) (Janeček a kol., 2012):

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

kde

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

R = faktor erozní účinnosti dešťů, jenž je definován v závislosti na četnosti jejich výskytu, úhrnu, intenzitě a kinetické energii,

K = faktor erodovatelnosti půdy, který je vyjádřený v závislosti na textuře a struktuře ornice, obsahu organické hmoty a propustnosti,

L = faktor délky svahu vyjadřující vliv nepřerušené délky svahu na velikost ztráty půdy erozí,

S = faktor sklonu svahu vyjadřující vliv sklonu svahu na velikost ztráty půdy erozí,

C = faktor ochranného vlivu vegetace, který je vyjádřený v závislosti na vývoji vegetace a použité agrotechnice,

P = faktor účinnosti protierozních opatření.

Rovnice USLE prodělala během posledních 30ti let další úpravy a zlepšení. Tak např. MUSLE (Williams, 1975), RUSLE (Renard a kol., 1991, 1997), ANSWERS (Beasley a kol., 1989) a RUSLE3D (Mitášová a kol., 1996; Mitášová a Mitáš, 1999) jsou všechno modely založené na principech rovnice USLE a představují její zdokonalení.

USLE2D

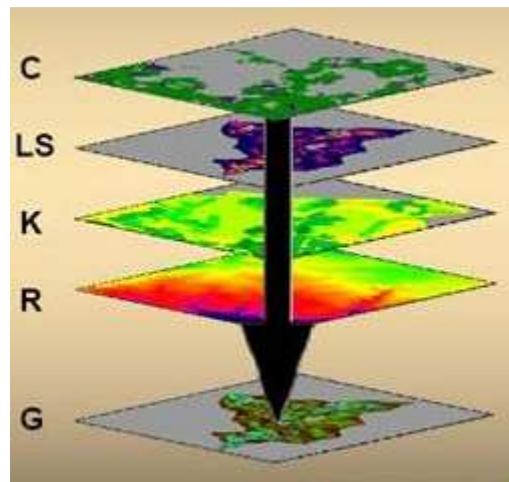
Volně dostupný software USLE2D byl vyvinut Van Oostem a Goversem na Katolické univerzitě v belgickém Leuvenu v roce 2000 primárně pro výpočet LS faktoru v kombinaci s GIS Idrisi. Díky přídatnému programu LS Converter je možné využívat data i z jiných GIS softwarů (např. ArcGIS). Vstupními daty jsou rastry – vždy o stejném rozlišení (Van Oost a Govers, 2000).

U většiny faktorů v modelu USLE2D probíhá jejich zjišťování standardním způsobem dle metodiky USLE (faktory R, K, C, P), odlišný je však způsob zadávání do softwaru a následná práce s nimi. Největší rozdíl ale spočívá ve stanovení LS faktoru.

Využití výpočetní techniky přináší další zřejmou výhodu a to snadné propojení s GIS. Pokud jsou dostupná data o land-use a půdě (hodnoty K, C, P), lze pak pomocí rastrových operací a operací mapové algebry předpovídat ztrátu půdy. Samotný LS faktor je pak vytvořen z digitálního modelu terénu (DMT) a tzv. vrstvy parcel (pozemků), které rozčleňují 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 snižuje délka odtokové dráhy a také hodnota faktoru L. Podle výpočetního algoritmu je faktor LS počítán zvlášť pro každý rastrový element (Efe a kol., 2000).

Při samotném zpracování je nejprve nutné vytvořit vrstvu parcel tak, že je ke každému rastrovému elementu přiřazena číselná hodnota (celé číslo). Vznikne tak klasifikace elementů, kdy hodnota 0 určuje území, kde nedochází k žádnému povrchového odtoku (LS faktor se zde nepočítá) a hodnoty větší než 0 určují pozemky, kde povrchový odtok vzniká (LS faktor je tu počítán). Tímto dochází na rozhraní mezi různými hodnotami k přerušení povrchového odtoku (efekt hranice). Takto připravená vrstva parcel s vytvořeným DMT se musí převést, pro požadavky USLE2D, do formátu Idrisi, a to prostřednictvím programu LS Converter. Po převedení dat a vložení do programu se provede trasování odtoku na základě vektorového

rozkladu (Flux Decomposition) (Desmet a Govers, 1996). Uživatel může dále definovat, dle jakého algoritmu bude probíhat samotný výpočet LS faktoru. Jde o algoritmy dle Wischmeira a Smithe, McCoola, Goverse a Nearinga (Van Oost a Govers, 2000). Vytvořený LS faktor je po zpětném převedení zpracován s vrstvami ostatních faktorů dle USLE pomocí Raster Calculator v prostředí GIS (Obr. 1).



Obr. 1 Příklad vytvoření vrstev jednotlivých faktorů USLE a následně mapy ohroženosti půdy vodní erozí (www.casa.arizona.edu)

RUSLE3D

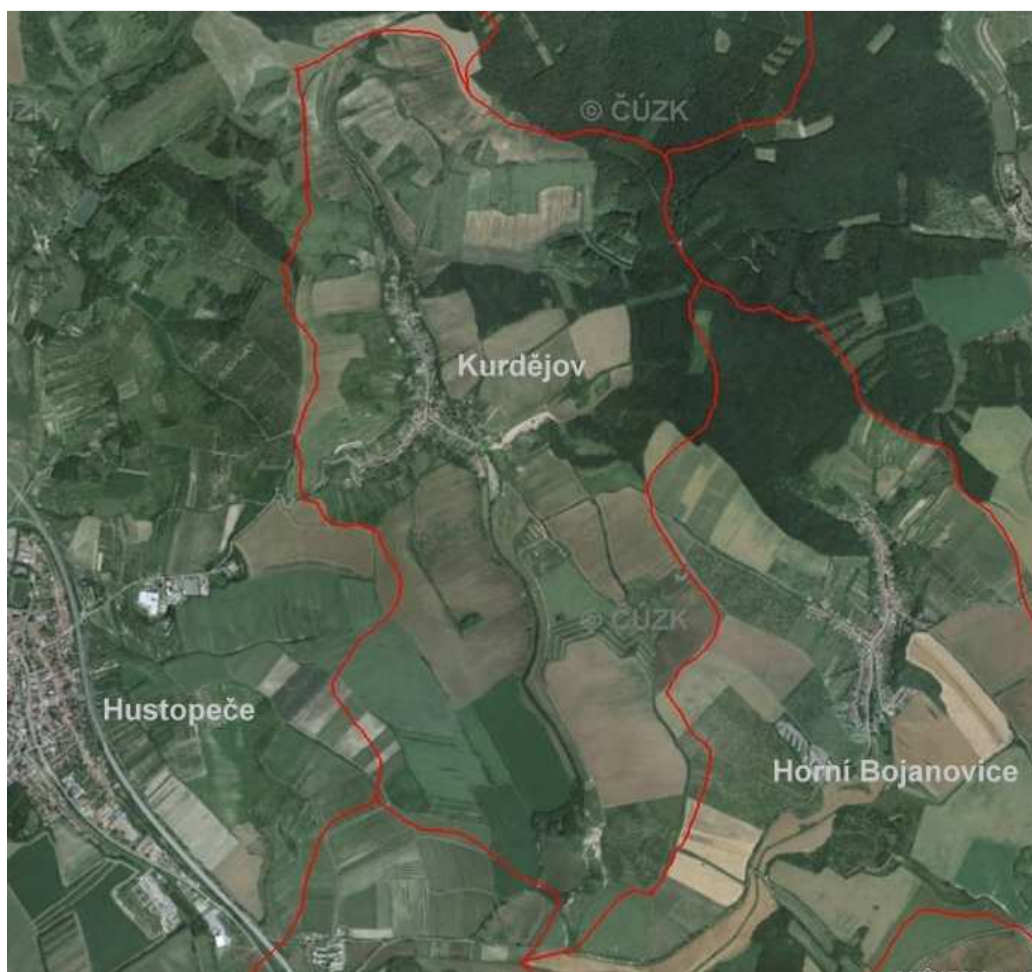
Tato metoda vychází rovněž z rovnice USLE a byla vyvinuta Geographic modelling systems laboratory (Univerzita Illinois, Urbana – Champaign). LS faktor je zde modifikován pro členitý terén. Pro začlenění vlivu soustředěného povrchového odtoku byla délka odtokové dráhy (L faktor) nahrazena tzv. přispívající plochou nad počítanou buňkou rastru zahrnující odtok vtékající do dané buňky (Mitášová a kol., 1996). Tímto lze vyjádřit vliv koncentrovaného odtoku na proces vodní eroze. Modifikovanou rovnici pro výpočet LS faktoru v GIS v konečné podobě rastrové buňky reprezentující segment svahu vytvořili Desmet a Govers (1996). Jednodušší, navazující podobu rovnice pro výpočet LS faktoru vytvořili Mitášová a kol. (1996). Dle autorů takto vypočítaný LS faktor bere lépe v úvahu vliv soustředěného odtoku na vzrůstající erozi.

Tuto metodu lze celou zpracovat v prostředí GIS (Mitášová a Mitáš, 1999). Prvním z kroků je za použití hydrologických nástrojů vytvoření vrstvy směru odtoku (Flow direction) z vyhlazeného DMT, která udává kvalitativní (směr) a kvantitativní (množství) charakteristiky odtoku. K vytvoření rastru byla dále zpracována akumulace odtoku (Flow Accumulation), jenž je založena na postupném načítání akumulace odtoku z obklopujících buněk do buňky

počítané (sama se nezahrnuje). Vysoké hodnoty akumulace v buňkách představují plochy koncentrace odtoku. Následně je nutno z DMT vytvořit vrstvu sklonitosti svahu (Slope). Z těchto dvou vrstev se vytváří LS faktor pomocí funkce Raster Calculator. Z takto připravených hodnot LS faktoru a zbylých dat je následně možno vytvořit (opět za pomoci Raster Calculator) výslednou mapu erozní ohroženosti zájmového území.

Popis území

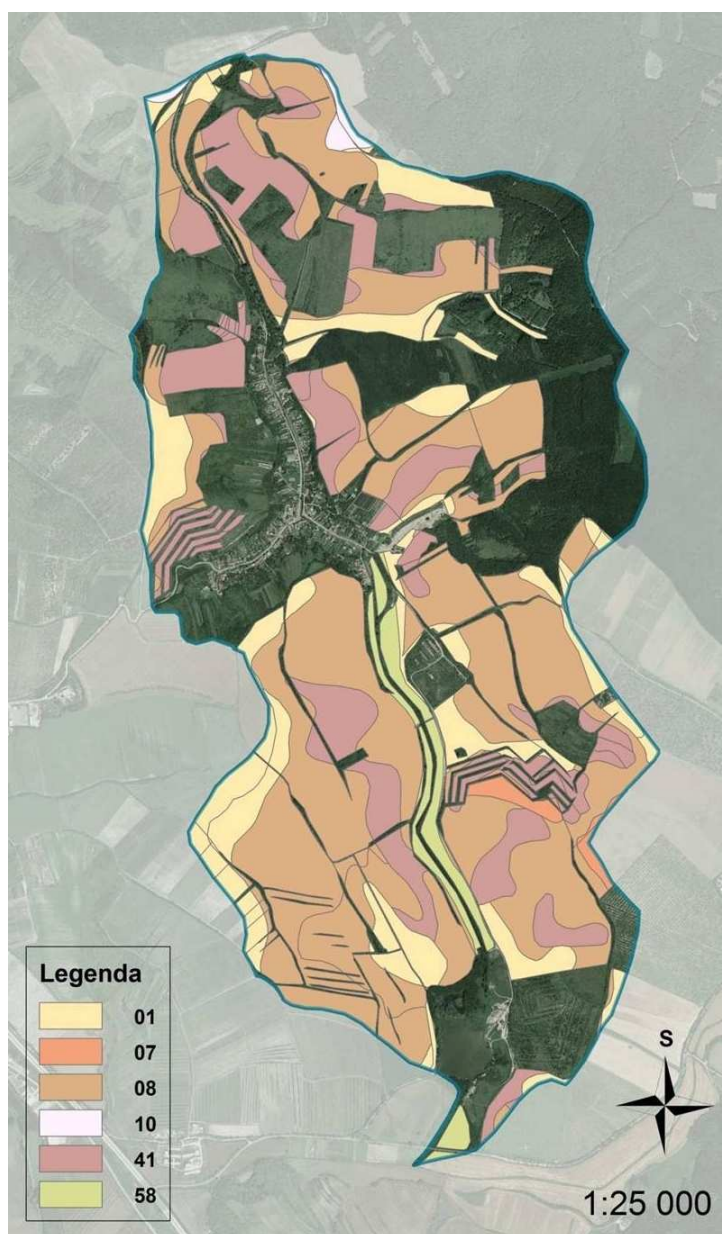
Celková rozloha povodí Kurdějovského potoka, který se nachází v Jihomoravském kraji na okrese Břeclav, je 868 ha. Délka jeho toku je 4,4 km, převýšení toku 65 m a průměrný sklon toku 1,5 %. Reliéf území je charakteristický svojí členitostí, množstvím široce zaoblených rozvodových hřbetů a hlubokými údolími. Významným krajinným prvkem jsou zemní terasy, které se v povodí nacházejí na několika místech. Celkové převýšení povodí činí 223 m, průměrná nadmořská výška je 274 m. n. m. a průměrný sklon území 17,5 %.



Obr. 2 Lokalizace území s hranicemi povodí (ČÚZK, 2014)

Značná část území (především jižně od Kurdějova) se nachází na spraši a sprašové hlíně s příměsí CaCO_3 – nepropustných nebo málo propustných pelitech, slínovcích a jílovcích. V severní části je o něco více zastoupeno drcené propustné pískovcové podloží marinního původu z období paleogénu. V údolích se pak vyskytují nivní sedimenty a místně sedimenty smíšené (Levý a Oppelt, 2009).

V povodí jsou nejvíce zastoupeny černozemě s různým vodním režimem. V dalších částech povodí jsou půdy více skeletovité a spadají do kategorie tzv. svažitých půd. Podél Kurdějovského potoka jsou půdy nivní a nivní glejové bez skeletu (Levý a Oppelt, 2009). Prostorová lokalizace hlavních půdních jednotek (HPJ) je zobrazena na Obr. 3.



Obr. 3 Zastoupení hlavních půdních jednotek v povodí (VÚMOP, 2014)

Podle klimatické rajonizace (Quitt, 1971) leží zájmové území v teplé oblasti T4, která je v ČR vůbec nejteplejší. Průměrná roční teplota dle stanice Hustopeče je 9,2°C, nejchladnější měsícem je leden, nejteplejším červenec.

Vstupní údaje empirických modelů

Faktor R: průměrná hodnota pro území ČR $R = 40 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ (Janeček a kol., 2012)

Faktor K: základem pro zjištění faktoru K je vrstva bonitovaných půdně-ekologických jednotek (BPEJ), kterou poskytl v digitální podobě VÚMOP; z této vrstvy je extrahována vrstva nesoucí atributy 2. a 3. místa BPEJ (tedy HPJ); následně jsou každé HPJ přiřazeny hodnoty faktoru K (Janeček a kol., 2012) a vrstva je vyexportována na základě atributu K faktoru do rastrové vrstvy

Faktor L, S: hodnoty a způsob určení faktoru LS se liší na základě zvoleného způsobu výpočtu; v rámci metody USLE se hodnoty LS určují manuálně (Janeček a kol., 2012); u modelů USLE2D a RUSLE3D jsou údaje zjištěny na základě DMT; obecně však platí že vstupem je vrstva vrstevnic (zdroj ZABAGED, ČÚZK)

Faktor C: hodnota stanovena na základě osevního postupu (Janeček a kol., 2012), pro celé povodí stejná (dle sledu pěstovaných plodin majoritního hospodařícího subjektu Moravská Agra a.s.); v základním osevním postupu převažuje kukuřice a řepka ozimá, dále hořčice bílá, pšenice ozimá a ječmen jarní; výsledná hodnota faktoru $C = 0,2357$

Faktor P: $P = 1$, tzn. na území se nenachází žádná protierozní opatření

Výsledky a diskuze

Průměrná dlouhodobá ztráta půdy erozí byla pro povodí Kurdějovského potoka stanovena třemi způsoby – pomocí rovnice USLE, pomocí modelu USLE2D a modelu RUSLE3D. Výsledné hodnoty smyvu půdy jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1 Průměrná dlouhodobá ztráta půdy stanovená pomocí tří různých metod

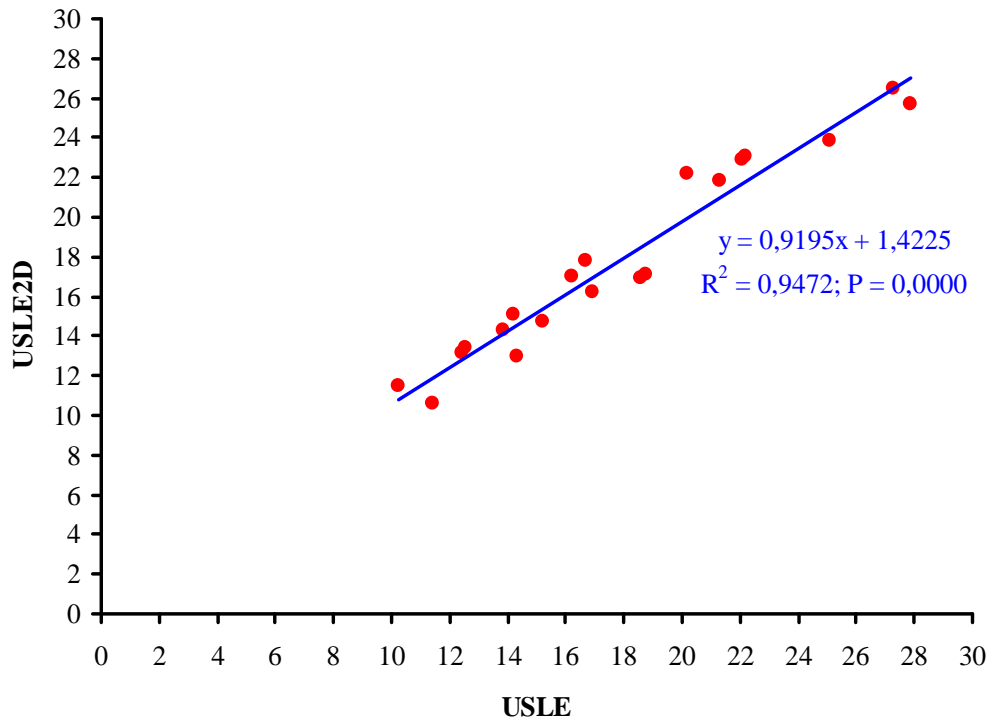
Lokalita	G ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$)		
	USLE	USLE2D	RUSLE3D
Kamenný vrch	27,3	26,5	18,7
Riciny	16,2	17,0	9,2
U majáku	16,7	17,8	12,1
Hády	14,2	15,1	8,3

Lipiny	18,7	17,1	10,5
Černá hora	16,9	16,2	9,9
Vinohrádky	20,2	22,2	13,6
Ebeny	12,5	13,4	7,6
Stará hora	27,9	25,7	17,1
Spodní najperk	25,1	23,9	16,4
Horní najperk	13,8	14,3	8,5
Zrcátko	22,2	23,1	12,8
Dílce	14,3	13,0	7,7
Kolíbky	10,2	11,5	5,8
Odměry	11,4	10,6	6,0
Horní díly	18,6	16,9	9,1
Prostřední díly	21,3	21,8	11,3
Spodní díly	12,4	13,2	6,9
Štěpnice	15,2	14,7	8,2
Sumperky	22,1	22,9	14,8

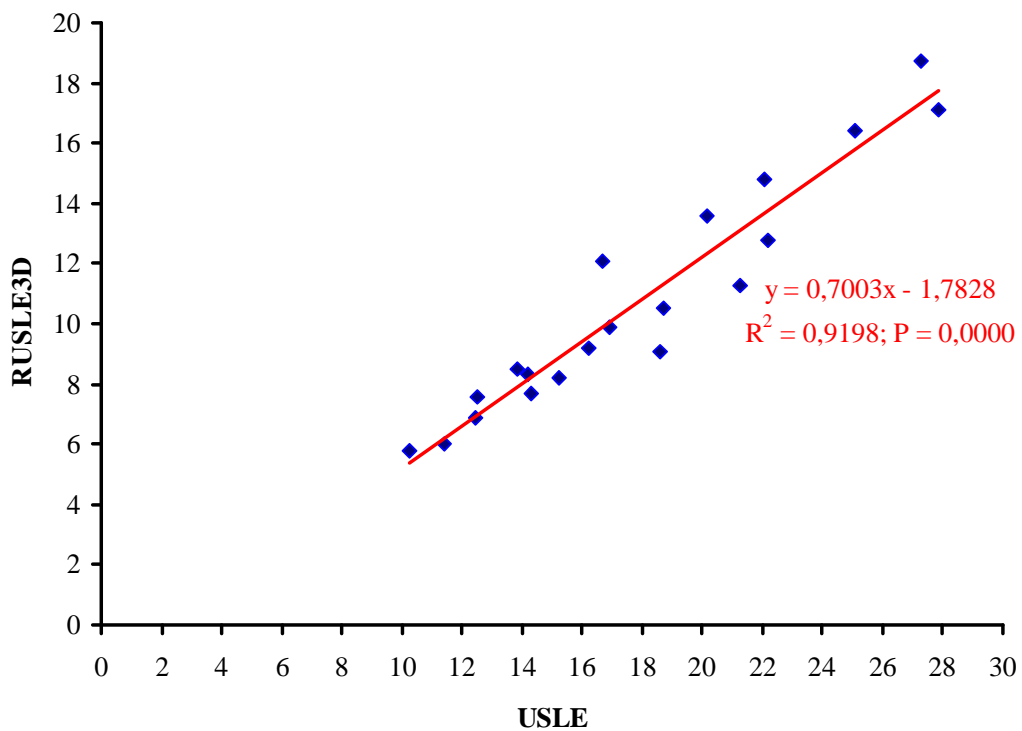
Výsledné hodnoty smyvu půdy ukazují, že metody USLE a USLE2D lze považovat za vzájemně nahraditelné. Procentuální rozdíl hodnot smyvu půdy stanoveného pomocí USLE a USLE2D činí v průměru 0,5 %.

Statistické porovnání výsledků stanovení smyvu půdy pomocí USLE a USLE2D se uskutečnilo pomocí testu nezávislosti (testu nulovosti korelačního koeficientu), při kterém byl pomocí programu Minitab stanoven Pearsonův korelační koeficient vyjadřující míru statistické závislosti mezi dvěma soubory dat. Korelační koeficient nabývá hodnoty $R = 0,9732$ při dosažené hodnotě $P = 0,0000$ (Obr. 4). Jedná se tedy o velmi těsnou závislost, která je na hladině $\alpha = 0,05$ statisticky významná.

Desmet a Govers (1996) upozorňují na to, že při srovnání hodnot faktoru LS stanoveného metodou USLE a USLE2D mají obě metody výsledky celkem podobné (v případě relativního mapování erozního rizika). Nicméně zdůrazňují značný rozdíl v absolutních hodnotách. Přestože obě metody mají podobné svahové hodnoty, použití metody USLE vede k podhodnocení erozního rizika, protože nezahrnuje vliv konvergence/divergence toku. USLE2D řeší tento problém nahrazením délky odtokové dráhy (L) tzv. zdrojovou plochou (dílčím povodím) rastrového elementu.



Obr. 4 Smyv půdy v $t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ stanovený metodou USLE a USLE2D, jeho regresní rovnice a determinační koeficient

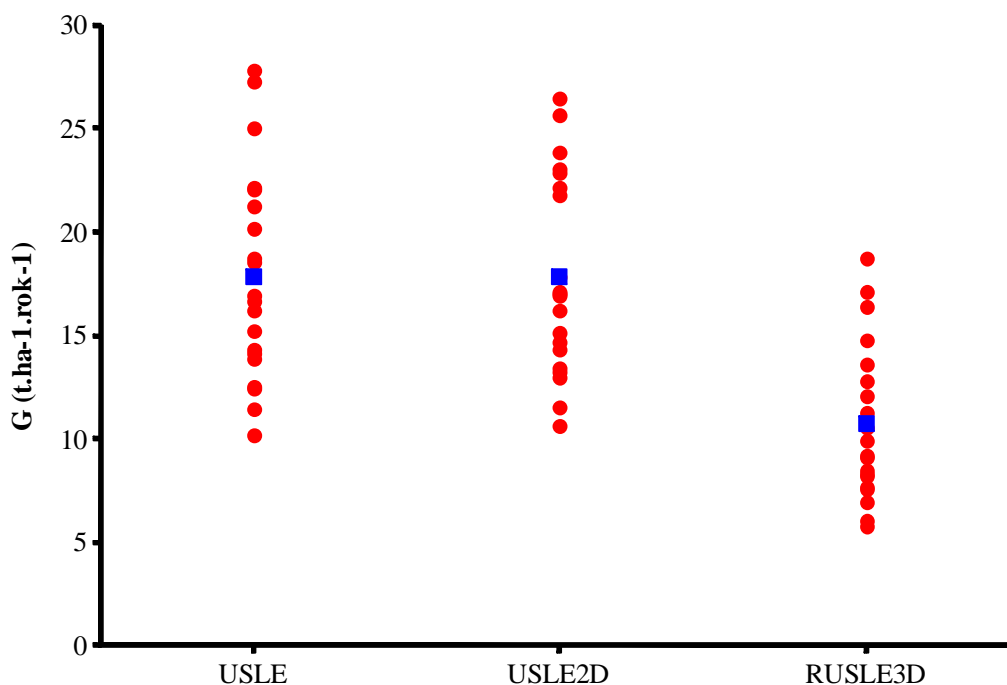


Obr. 5 Smyv půdy v $t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ stanovený metodou USLE a RUSLE3D, jeho regresní rovnice a determinační koeficient

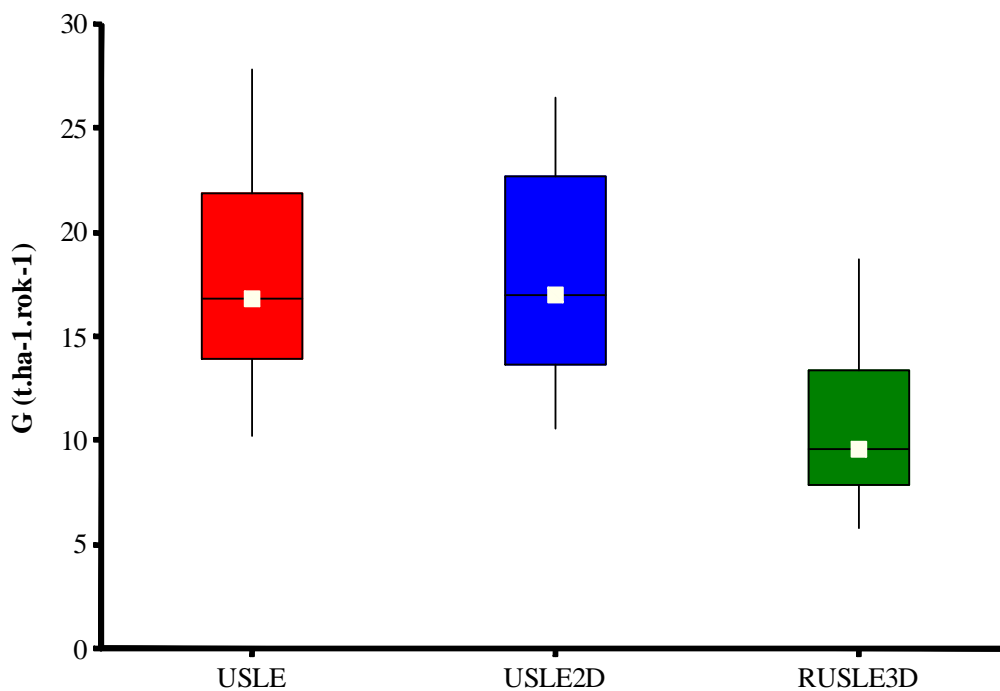
Smyv půdy stanovený modelem RUSLE3D má v průměru o 40,7 % nižší hodnoty v porovnání s klasickou metodou USLE. Korelační koeficient sice nabývá hodnoty $R = 0,9591$ při dosažené hodnotě $P = 0,0000$ (Obr. 5), ale při porovnání dat pomocí bodového a krabicového grafu vytvořeného v rámci dvouvýběrového t-testu a konfidenčního intervalu v programu Minitab, si lze povšimnout velkého rozdílu v rozmístění hodnot smyvu půdy.

Bodový graf zachycuje hodnoty smyvu půdy stanovené třemi metodami (Obr. 6). Krabicový graf je schéma, které v jednom obrázku poskytuje informaci o maximální a minimální hodnotě smyvu půdy stanoveného třemi způsoby, o průměru, mediánu či horním a dolním kvartilu tohoto souboru (Obr. 7). Dolní a horní strana základního obdélníku (krabice) odpovídá dolnímu a hornímu kvartilu daného souboru, vodorovná čára uvnitř této krabice odpovídá mediánu souboru. Čtverečkem uvnitř krabice je znázorněn aritmetický průměr ze všech hodnot smyvu půdy, zvláště pro každou metodu jeho stanovení. Krabicové grafy jsou užitečné pro grafické vyjádření tvaru rozdělení, jeho střední hodnoty a variability (Pavlík, 2005).

Ze statistického porovnání smyvu půdy stanoveného metodou USLE a RUSLE3D tedy jasně vyplývá, že výsledky se liší natolik, že model RUSLE3D není možné použít jako náhradní metodu k metodě USLE. Bez dalších měření a validace však nelze jednoznačně prohlásit, která z uvedených metod lépe popisuje skutečný stav.



Obr. 6 Bodový graf s modře zaznačenými průměry všech hodnot smyvu půdy stanovených na základě modelů USLE, USLE2D a RUSLE3D



Obr. 7 Krabicový graf s bíle zaznačenými průměry všech hodnot smyvu půdy stanovených na základě modelů USLE, USLE2D a RUSLE3D

Závěr

Výsledky porovnání hodnot smyvu půdy stanovených pomocí modelů USLE a USLE2D dokazují, že do budoucna není nutné pro rámcový výpočet intenzity vodní eroze používat zastaralých způsobů – USLE (bez GIS). Matematicky nejsložitější simulační modely jsou sice označovány jako cesta do budoucnosti, nicméně podobné tvrzení se týká spíše oblasti teoretické. V praxi (konkrétně při projektování pozemkových úprav) je především nutná jednoduchost, menší časová náročnost a výstupy v odpovídající kvalitě. Není též naprosto nutné dosáhnout co nejpřesnějších výsledků při neúměrné náročnosti, jako spíše rámcově zjistit současnou míru smyvu půdy a efekt dopadu projektovaných protierozních opatření. Tyto předpoklady dobře plní právě USLE2D. V případě spojení problematiky eroze s analýzou hydrologickou, která je důležitá především při projektování protipovodňových opatření, není odpověď tak jednoznačná. V takovém případě by simulační modely svoje místo v praxi jistě měly např. v zastoupení simulačním modelem EROSION3D.

Literatura

Bartsch, K.P., Van Miegroet, H., Boettinger, J., Dobrowolski, J.P., 2002. Using empirical erosion models and GIS to determine erosion risk at Camp Williams, Utah. *J. Soil Water Conserv.* 57, 29–36.

Beasley, D.B., Huggins, L.F., Monke, E.J., 1989. ANSWERS: a model for watershed planning. *Transactions of ASAE* 23, 938–944.

Desmet, P., 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.

Dostál, T., Devátý, J., Zumr, D., Vrána, K., Krása, J., 2011. Experimentální povodí pro sledování srážko-odtokových, erozních a transportních procesů. In: *Revitalizace vodního systému krajina a měst zatíženého významnými antropogenními změnami 2011*. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, katedra zdravotního a ekologického inženýrství, s. 38-44. ISBN 978-80-01-04944-0.

Efe, R., Ekinci, D., Curebel, I., 2000 Erosion analysis of Sahin watershed (NW of Turkey) using GIS based on RUSLE (3d) method; *J. Appl. Sci.* 8(1) 49–58. ISSN 1812-5654.

Feng, X., Wang, Y., Chen, L., Fu, B., Bai, G., 2010. Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology* 118, 239–248.

http://www.casa.arizona.edu/MPP/Um_erosion/erosion_pap.html

Janeček a kol., 2012. *Ochrana zemědělské půdy před erozí – metodika*. Praha: ČZU Praha, 114 s. ISBN 978-80-87415-42-9.

Levý, J., Oppelt, P., 2009. *Technická zpráva plánu společných zařízení KPÚ Kurdějov*.

Mitášová, H., Brown, W.M., Johnston, D., Mitáš, L., 1996. GIS tools for erosion/deposition modeling and multidimensional visualization. Part II: unit stream power-based erosion/deposition modeling and enhanced dynamic visualization. Report for USA CERL. University of Illinois, Urbana-Champaign, IL, p. 38.

Mitášová, H., Mitáš, L., 1999. *Modeling Soil Detachment with RUSLE 3D Using GIS*. University of Illinois at Urbana-Champaign. <http://skagit.meas.ncsu.edu/~helena/gmslab/erosion/usle.html>.

Pavlík J., 2005. *Aplikovaná statistika*. 1. vyd. Praha: VŠCHT v Praze, 173 s. ISBN 80-7080-569-2.

QUITT, E., 1971. *Klimatické oblasti Československa*. Brno.

Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agriculture Handbook No. 703. 384 pp.

Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., Porter, J.P., 1991. RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation. Journal of Soil and Water Conservation 46, 30–33.
usle2dhome.php.

Van Oost, K., Govers, G., 2000. Usle2D: Online manual [online]. Katholieke Universiteit Leuven: 2000, URL: <http://www.kuleuven.be/geography/frg/modelling/erosion/usle2dhome/>

Williams, J.R., 1975. Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources, ARS-S-40. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, pp. 244–252.

Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA Agric. Handbook n° 537. 58 p.

Kontakt:

Ing. Jana Kozlovsky Dufková, Ph.D.

Ústav aplikované a krajinné ekologie, Mendelova univerzita v Brně

Zemědělská 1, 613 00 Brno

tel. 545 132 472, janadufkova@email.cz

Prof. Ing. František Toman, CSc.

Ústav aplikované a krajinné ekologie, Mendelova univerzita v Brně

Zemědělská 1, 613 00 Brno

tel. 545 132 406, tomanf@mendelu.cz