

BARBORA VYSLOUŽILOVÁ, ZDENĚK KLIMENT

MODELOVÁNÍ EROZNÍCH A SEDIMENTAČNÍCH PROCESŮ V MALÉM POVODÍ

VYSLOUŽILOVÁ, B., KLIMENT, Z. (2012): Soil Erosion and Sediment Deposition Modelling at the Small Catchment Scale. *Geografie*, 117, No. 2, pp. 170–191. – Water erosion is considered to be the most important factor behind the degradation of agricultural land. Many methods of measuring soil erosion processes, using mathematical models, have been developed in recent years. The most widespread of these, USLE, and its modifications have been used as the basis for new erosion models. Two such models, USPED (Mitášová et al. 1996) and WaTEM/SEDEM (Van Rompaey et al. 2001; Van Oost et al. 2000; Verstraeten et al. 2002), have been utilized to study erosion and deposition processes in the experimental rural catchment of Černíčí. River sediment transport is also calculated using the WaTEM/SEDEM model. The results are discussed with results from USLE and a field survey. The article also presents brief instructions for implementing the models in a GIS environment. **KEY WORDS:** water soil erosion – modelling of erosion and sediment deposition processes – Černíčí catchment – USLE – USPED – WaTEM/SEDEM.

Príspevek byl vypracován s finanční podporou výzkumného záměru MŠM 0021620831 „Geografické systémy a rizikové procesy v kontextu globálních změn a evropské integrace“.

1. Úvod

Půda je součástí přírodního bohatství, které zaručuje zachování ekologických a socio-ekonomických systémů na Zemi. Přirozená odolnost půdy vůči přírodním a antropogenním vlivům však vykazuje změny, které by nás měly přimět více se zabývat její ochranou. K degradaci půdy významně přispívá zrychlená vodní eroze, kterou je v Česku postiženo přibližně 50 % orné půdy (Janeček a kol. 2007).

K hodnocení rozšíření a intenzity erozně-akumulačních procesů se využívá mnoho metod. Přesné měření představuje přímé terénní pozorování doplněné o laboratorní analýzy, které lze spolehlivě provádět pouze na malých územích. Vedle toho byly vyvinuty metody matematického modelování, které se zaměřují na odhad erozního ohrožení na základě syntézy parametrů zásadně ovlivňujících erozně-akumulační procesy. Modely jsou tak schopny nahradit nedostatek dat na větších územních celcích. Modelování erozních resp. erozně-akumulačních procesů umožňuje identifikovat místa náchylná ke vzniku erozně-akumulačních forem a odhadnout intenzitu procesů v různém měřítku. Erozní modely se dají podle koncepce rozdělit na tři skupiny: empirické, které jsou založeny na statistické analýze jednotlivých faktorů působících na erozi, a simulační, které vycházejí z fyzikálního popisu erozního procesu a semi-empirické kombinující oba přístupy (De Vente, Poesen 2005; Kliment, Langhammer 2005; Kliment, Kadlec, Langhammer 2008).

Cílem této studie je zhodnotit a kvantifikovat erozně-akumulační procesy empirickými modely nekomerční povahy USPED a WaTEM/SEDEM, provést srovnání výsledků jak vzájemně, tak s běžně užívaným modelovým přístupem – rovnicí USLE a s terénním šetřením. Modely byly vybrány na základě literární rešerše a charakteru dostupných zdrojových dat. Vzhledem k poměrně malým zkušenostem s těmito modely bylo cílem studie i získání zkušeností s jejich aplikací v českých podmínkách. Pro testování obou modelů bylo vybráno experimentální povodí Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy (VUMOP) Černíči u obce Čechtice na jihovýchodě Středočeského kraje, které slouží od roku 1990 ke sledování erozních smyčů a jakosti vody.

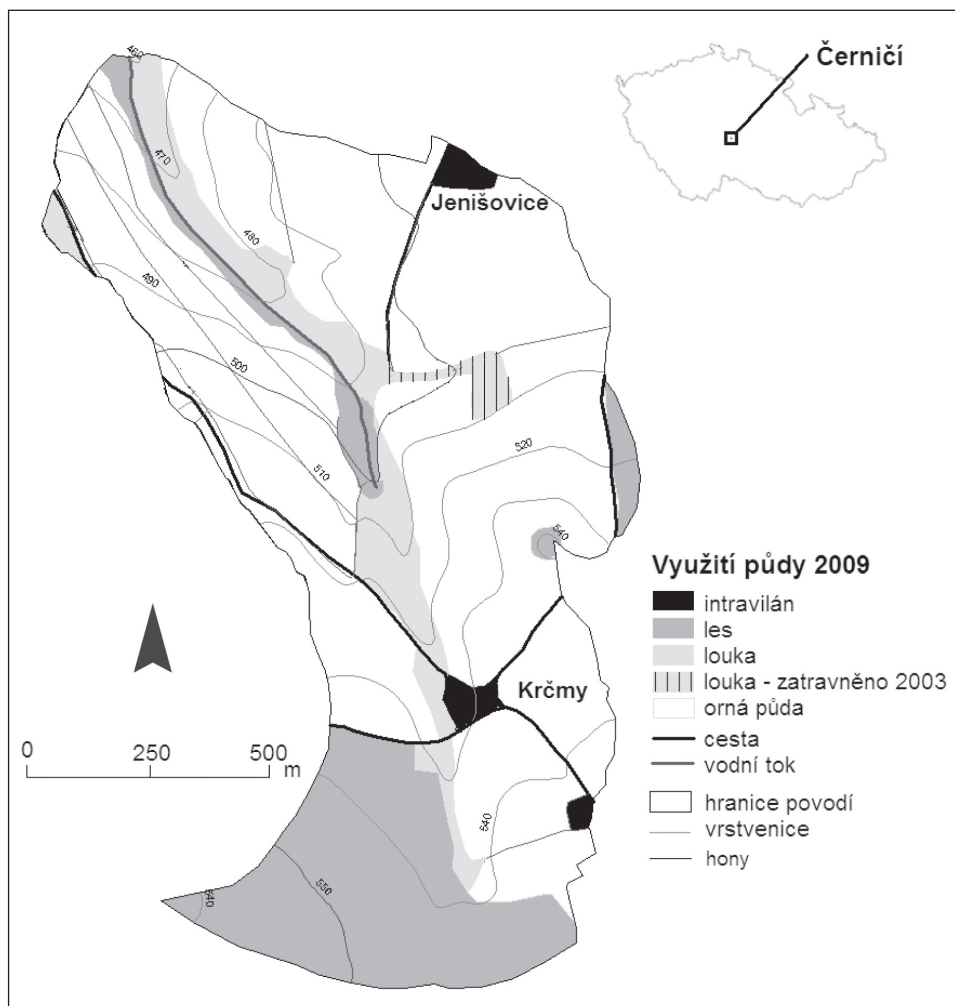
2. Materiál a metody

2.1. Modelové území a zdrojová data

Povodí bezejmenného toku u obce Černíči, pramenná oblast Čechtického potoka, odvodňuje území o rozloze 1,34 km². Geologické podloží je tvořeno převážně formací pararul předprvohorního až prvohorního stáří a je součástí moldanubické oblasti Českého masivu. V hlavním údolí jsou pararuly překryty kvartérními nezpevněnými sedimenty deluvio-fluviálního původu. Povodí má pahorkatinný reliéf, nadmořská výška se zde pohybuje mezi 462 m n. m. v závěrovém profilu a 562 m n. m. v jihozápadním cípu povodí. Průměrný sklon svahů v povodí je 3°20', místně však sklony dosahují 12° (Johanovský 2004). Povodí je asymetrické. Pravobřežní část zaujímá 59 % celkové plochy povodí a je členitější. Z pravé strany ústí do hlavního údolí čtyři svahové úpady, ve kterých se v době dešťů či tání sněhu soustředí povrchový odtok. Nejčastěji jsou zastoupeny svahy se severozápadní až jihozápadní orientací. Z levé strany povodí neústí do hlavního údolí žádný úpad, orientace svahů je severní až severovýchodní. Půdní pokryv je tvořen na většině území modální kambizemí, která je hluboká až středně hluboká. Na dně hlavního údolí se vyskytuje glej vzniklý na nivních uloženinách. V oblasti bočních svahových úpadů se nacházejí oglejené kambizemě. Trvalé zamokření je způsobeno podpovrchovou vodou. V povodí je jeden stálý vodní tok. Během melioračních úprav v roce 1981 bylo koryto toku na horním úseku v délce 650 m zatrubněno a v dolním úseku částečně vydlážděno a přesunuto nalevo ode dna údolí. Průměrný denní průtok v závěrové části povodí je 6,48 l.s⁻¹. Průměrná roční výška srážek dosahuje v povodí 665 mm.

Povodí Černíči je zemědělsky využíváno od 10. století. Poměr bezlesí a lesních kultur se po staletí téměř nezměnil. Na třetině zemědělské půdy v povodí byl v roce 1981 realizován projekt odvodnění půd, v jehož rámci byl rozorán původně zatravněný pravostranný svahový úpad. Toto místo se stalo v následujících letech erozně náchylné, proto zde bylo v roce 2003 provedeno v menším rozsahu opětovné zatravnění. V roce 2009 zemědělská půda tvořila 78 %, lesy 20 % a zastavěná plocha 2 % rozlohy území (obr. 1).

K hodnocení erozně-akumulačních procesů pomocí matematických modelů byly vybrány roky 1994, 2001, 2007 a 2009. Výsledky v jednotlivých letech se liší podle rozdílné vstupní vrstvy faktoru ochranného vlivu vegetace. Rok 1994 reprezentuje stav, kdy jsou v povodí pěstovány erozně nenáchylné plodiny,



Obr. 1 – Využití půdy v povodí Černíčí v roce 2009. Zdroj dat: VÚMOP, terénní šetření.

pšenice a jetel. V letech 2001 a 2007 je na velké části povodí pěstována kukuřice (80 % plochy povodí v roce 2001, 60 % plochy povodí v roce 2007). Tyto dva roky byly vybrány, aby bylo možné srovnat vliv zatravnění údolnice v roce 2003 při pěstování stejné plodiny. V roce 2009 byla v povodí převážně pěstována pšenice a byl vyhodnocen proto, že v tomto období bylo prováděno i terénní šetření v povodí. Pro vyčíslení parametrů vstupujících do obou modelů byla použita totožná data, jejichž přehled je uveden v tabulce 1.

Ke zpracování byly využity databáze VÚMOP zahrnující srážková a průtoková data pro stanici Černíčí a digitální prostorová data povodí Černíčí, včetně pěstovaných plodin v letech 1990–2009 (Digitální datové podklady pro stanici Černíčí, VÚMOP Praha a Experimentální povodí).

2.2. Model WaTEM/SEDEM

WaTEM/SEDEM (Van Rompaey a kol. 2001; Van Oost a kol. 2000; Verstraeten a kol., 2002) je empirický model eroze a transportu sedimentů. Tento volně dostupný model byl vyvinut na katedře fyzické a regionální geografie Katolické univerzity v Lovani v Belgii (Geography the K. U. Leuven). Je spojením dvou modelů: WaTEM (*Water and Tillage Erosion Model*) a SEDEM (*Sediment Delivery Model*), které byly vyvinuty na stejném výzkumném pracovišti. Výsledkem revize, která proběhla v roce 2005, je verze WaTEM/SEDEM 2.1.0. Model byl zkonstruován za účelem hodnocení vlivu zemědělského hospodaření na krajinu a posuzování účinnosti protierozních opatření. Používá se při odhadu ztráty půdy vodní erozí, označení míst potenciálně ohrožených vodní erozí, simulování vlivů různých krajinných scénářů na erozi či k rekonstrukci krajiny v minulosti. Pomocí modelu lze předpovídat i sedimentaci erodovaných půdních částic.

Tab. 1 – Zdrojová data pro zpracování modelů WaTEM/SEDEM a USPED

Faktor	Vstupní digitální data	Zdroj	Metoda odvození	Hodnota
<i>R</i> faktor erozní účinnost srážek	Ombrografické záznamy	ČHMÚ	Převzato podle Dostál a kol. (2006)	56 MJ.ha ⁻¹ .cm.h ⁻¹
<i>K</i> faktor erodovatelnost půd	Půdní mapa BPEJ	VÚMOP	Převzato podle Janeček a kol. (2007)	HPJ 29 (kambizem modální) 0,32 HPJ 47 (kambizem oglejená na polygenetických hlínách) 0,43 HPJ 50 (kambizem oglejená na pevných horninách) 0,33 HPJ 68 (gleje) 0,49 lesní půda 0 kg.m ⁻² .h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹
<i>LS</i> faktor délka a sklon svahů	DEM, vodní toky, silnice, hranice pozemků	VÚMOP	McCool (1987, 1989) pro WaTEM/SEDEM, Mitášová, Mitáš (1998) pro USPED	0–65
<i>C</i> faktor ochranný vliv vegetace	Využití půdy, pěstované plodiny	Terénní šetření (2009), VÚMOP	Krása (2004); Kliment, Langhammer (2005)	pšenice ozimá 0,12 žito 0,17 ječmen jarní 0,15 ječmen ozimý 0,17 oves 0,1 kukuřice na siláž 0,72 brambory rané 0,6 brambory pozdní 0,44 řepka 0,22 len 0,25 pícniny jednoleté 0,02 pícniny víceleté 0,01 lesy, TTP 0,005
<i>P</i> faktor protierozní opatření	Žádná opatření	—	—	1

Pozn.: TTP – trvalé travní porosty

Výsledky by měly napomoci při plánování efektivních protierozních opatření a při určování vhodných osevních postupů na jednotlivých pozemcích.

Na rozdíl od jiných empirických modelů neomezují autoři jeho aplikaci na velikost území. Jeho použití na malých povodích v Belgii (Van Oost a kol. 2005) sloužilo k parametrizaci modelů. Model WaTEM/SEDEM byl úspěšně použit v několika studiích např. v Belgii (Roysschaert a kol. 2008, Ward a kol. 2009), Itálii (Van Rompaey a kol. 2005), ve Slovinsku Keestra a kol. (2009), v Nizozemsku (Moor, Verstraeten 2008), v jihovýchodní Austrálii (Verstraeten, Prosser, Fogarty 2007) nebo Číně (Feng a kol. 2010). Porovnáním modelu WaTEM/SEDEM a jiných erozně-sedimentačních modelů se zabýval De Vente a kol. (2008). V Česku se modelem zabývala katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství ČVUT. WaTEM/SEDEM byl použit při modelování vlivu změn krajinného pokryvu na erozní procesy (Van Rompaey, Krása, Dostál 2007; Krása 2004). Model byl také použit pro odhad sedimentů, které se dostávají do vodních nádrží prostřednictvím vodních toků (Jordan a kol. 2005; Krása a kol. 2005).

Na rozdíl od složitějších dynamických modelů se WaTEM/SEDEM zaměřuje na prostorovou a méně na časovou variabilitu erozních faktorů. K vypočtení průměrné roční ztráty půdy používá model WaTEM/SEDEM aplikovanou rovnici RUSLE. Vlastnosti povrchového odtoku jsou počítány na základě algoritmu, který uvažuje velikost pozemků, směr orby a přítomnost cest. WaTEM/SEDEM nepředpovídá sedimentaci ve vodním toku, v říční nivě nebo břehovou erozi.

V modelu WaTEM/SEDEM je povodí rozděleno na čtvercovou síť. Vstupy do modelu tvoří průměrné roční hodnoty jednotlivých faktorů. Nejprve model spočítá dlouhodobou průměrnou roční ztrátu vodní erozí na základě rovnice USLE:

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P,$$

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

Transportní kapacita jednotlivých elementů DEM je vztažena k potenciálu rýhové eroze v daném bodě podle vztahu:

$$TC = kTc \cdot EPR,$$

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

Celková potenciální eroze je teoretická hodnota ztráty půdy z holé půdy a je dána součtem eroze rýhové a plošné. Potenciál rýhové eroze je určen jako:

$$EPR = EPT - EPIR,$$

kde EPT je potenciální rýhová eroze ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$) a $EPIR$ je potenciální plošná eroze ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$). EPT a $EPIR$ jsou dány vztahy:

$$EPT = R \cdot K \cdot L \cdot S,$$

$$EPIR = a \cdot R \cdot KIR \cdot SIR,$$

kde R, K, L, S jsou faktory USLE, a je koeficient, kterému je přiřazena hodnota 0,6 odpovídající měřením (Govers, Poesen 1988), kdy mezirýhová eroze

se vyrovná rýhové po 65 metrech od rozvodnice při sklonu 6 %, *KIR* je *K* faktor pro plošnou erozi (shodný s *K* faktorem pro celkovou erozi) a *SIR* faktor sklonu svahu pro plošnou erozi.

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

$$TC = kTc \cdot R \cdot K \cdot (L \cdot S - a \cdot SIR).$$

Koeficient transportní kapacity *kTc* udává množství sedimentu, které může být transportováno dále po svahu. Toto množství je rovno množství sedimentu, které by vzniklo na obnaženém půdním povrchu. Čím vyšší je koeficient transportní kapacity, tím více sedimentů je dopraveno na úpatí svahů. Pro každé využití půdy je hodnota koeficientu transportní kapacity odlišná. Pokud součet produkované eroze a vstupujícího sedimentu ze sousedních buněk převyšuje transportní kapacitu, dochází v buňce k sedimentaci (Verstraeten 2006).

2.3. Zpracování modelu WaTEM/SEDEM

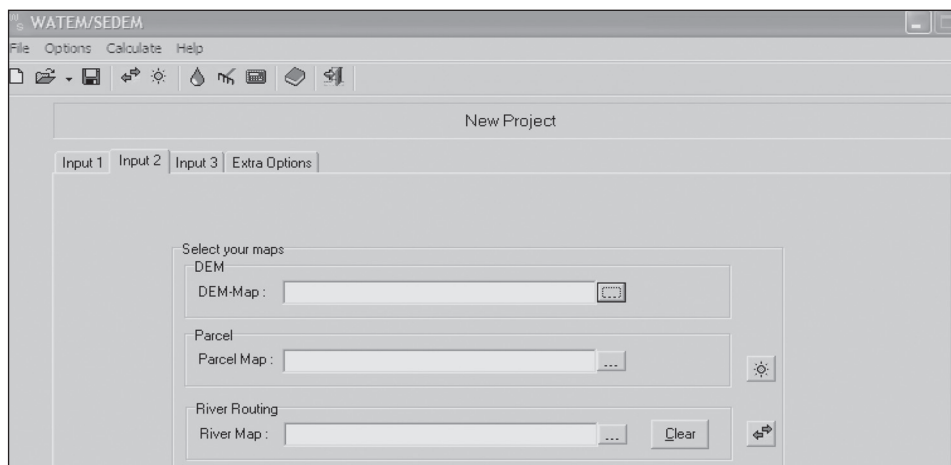
Zpracování modelu WaTEM/SEDEM vyžaduje instalaci softwaru WaTEM/SEDEM 2.1.0., který je volně dostupný ke stažení na stránkách vývojového týmu. Model WaTEM/SEDEM vyžaduje několik vstupních vrstev vytvořených v prostředí GIS a převedených do formátu Idrisi32 *.rst¹. Všechny vrstvy musí pokrývat území o stejné velikosti, musí být vyhotoveny ve stejném geografickém systému a ve stejném rozlišení rastru. Jednotlivé buňky rastrových vrstev musí nést určité identifikátory. Program WaTEM/SEDEM provádí pouze výpočty mezi vrstvami. Výstupy programu jsou číselné (celková eroze půdy z povodí, celková akumulace půdy v povodí, množství půdních částic vstupujících do vodního toku) a grafické. Pro vizualizaci výsledků je nutné opět použít prostředí GIS.

WaTEM/SEDEM se vyznačuje snadno čitelným uživatelským rozhraním (obr. 2). Pro správné fungování modelu je nutné nejdříve nahrát soubor *watemsedem.ini* do složky C:\WINDOWS (v operačním systému Windows XP). V dialogových oknech programu je zapotřebí zadat tyto vstupní vrstvy:

DEM – digitální model území, ze kterého jsou odstraněna bezodtoká území. DEM slouží k výpočtu *LS* faktoru.

Parcel – reklasifikovaná mapa využití území rozlišující tyto kategorie: ornou půdu, les, trvalé travní porosty, cesty a intravilán a vodní toky. Každá z těchto kategorií musí nést vlastní identifikátor: -2 = cesty a intravilán, -1 = vodní toky, 0 = oblast mimo sledované území, 1–n = orná půda – pole, maximální číslo udává počet polí (tato hodnota by měla být menší než 10 000), 10 000 = les, 20 000 = trvalé travní porosty. Jednotlivé parcely nesou vlastní identifikátor proto, aby mohly být stanoveny jejich hranice jako překážky povrchového odtoku, odtokové linie a místa sedimentace. Vrstvu parcel lze sestavit v programu

¹ Pro převod souboru do formátu *.rst z formátu *.shp (přes formáty *.img, *.asc) lze použít program LS-converter Kadlec (2007). Při vyhotovení je třeba dbát na používání tečky jako desetinného oddělovače. Při převodu souborů *.img na *.asc může dojít vinou softwaru k zaokrouhlení čísel v intervalu (0–1) na nulové hodnoty, což zabraňuje vytvoření správné vrstvy *C* faktoru. Tomuto problému lze předejít vynásobením vrstev *C* a *K* faktoru v prostředí ArcGIS. Do modelu WaTEM/SEDEM se poté zadá výsledná vrstva *C.K* do pole *K* faktoru a do polí *C* faktoru se vepíše shodně hodnoty 1.



Obr. 2 – Uživatelské rozhraní programu WaTEM/SEDEM

ArcMap, nebo vytvořit pomocí nástroje Eromat přímo v programu WaTEM/SEDEM 2.1.0 vložení dílčích vrstev.

River Routing – určuje pozici vodních toků v území a jejich návaznost. Tato vrstva není povinná. V případě, že není zadána, model zachází se všemi vodními toky jako s jednou jednotkou. To znamená, že všechny půdní částice, které dosáhnou vodního toku, jsou sečteny. Řešené území má pouze jeden stálý vodní tok, což přípravu této vrstvy usnadňuje.

K: Soil Erodibility factor – *K* faktor rovnice RUSLE vyjádřený v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ (odpovídá stonásobku u nás běžně používaných hodnot). Do modelu lze zadat buď mapu rozmístění *K* faktoru ve formátu Idrisi32, nebo pouze jednu hodnotu *K* faktoru s tím, že je pro celé území stejná.

C: Crop factor – bezrozměrná veličina *C* faktoru ochranného vlivu vegetace, která dosahuje hodnot od 0 (žádná eroze) do 1 (maximální eroze). Do modelu lze zadat samostatnou mapu faktoru *C* pro celé území ve formátu Idrisi32 nebo zajistit průměrnou hodnotu *C* faktoru pro hlavní skupiny půd se stejným využitím, tj. pro zemědělskou půdu, lesy a pastviny.

Ptef parcel – poměr zachycení sedimentu jednotlivými typy pozemků může být vložen v podobě rastrové mapy na základě vlastního odvození terénním měřením nebo lze zadat hodnoty získané kalibrací autorů modelu. Van Rompaey (2001) doporučuje hodnoty *Ptef* orná půda = 0 a *Ptef* TTP a les = 75.

Parcel Connectivity – propustnost hranic pozemků. Van Rompaey a kol. (2001) doporučuje hodnoty pro vstup na ornou půdu = 10 a na trvalé travní porosty a les = 75. Tyto hodnoty vycházejí z testování modelu v belgických podmínkách a měly by být kalibrovány pro Česko Krása (2004). Zadanou hodnotou je redukována celková zdrojová plocha elementu při vstupu na pozemek při překročení hranice pozemku. Udává se v %.

LS – *LS* faktor rovnice RUSLE. Program nabízí čtyři možnosti výpočtu *LS* faktoru:

(a) podle Wishmeier a Smith (1978), (b) podle McCool a kol. (1987, 1989), (c) podle Govers (1991) a (d) podle Nearing (1997). Dále program nabízí dvě možnosti výpočtu charakteristiky exponentů délky svahu *m*: (a) podle Wishmeier

a Smith (1978), (b) podle Mc Cool (1987, 1989). Uvedené možnosti využívají k výpočtu faktorů LS ze zdrojových ploch stejných algoritmů jako program USLE2D. Van Rompaey a kol. (2001) doporučuje počítat LS faktor podle (b) McCool (1987, 1989) a výpočet charakteristiky délky svahu m podle McCool (1987, 1989), kde koeficient m má stejnou hodnotu pro erozi plošnou i rýhovou. Tato kombinace výpočtu byla využita i v této studii.

Water – faktor erozní účinnosti deště R rovnice USLE. Lze zadat jednu hodnotu faktoru R , která je považována na celém území za stejnou. R faktor je zde udáván v $\text{MJ.mm.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ (což odpovídá 1/1 000 jednotek používaných v Česku).

Transport Capacity Coef kTc – koeficient transportní kapacity kTc . Model vyžaduje dvě hodnoty kTc . kTc_{low} určuje hodnotu kTc pro neerodované plochy, kTc_{high} pro erodované plochy. Podle Van Rompaey a kol. (2001) byl odvozen $kTc_{low} = 100$ a $kTc_{high} = 200$. Hodnota kTc_{limit} odpovídá hodnotě C faktoru, která odlišuje erodované a neerodované plochy. Pro hodnoty nižší než kTc_{low} program počítá s hodnotou kTc_{low} , pro vyšší naopak s hodnotou kTc_{high} .

2.4. Model USPED

USPED (*Unit Stream Power-Based Erosion / Deposition model*) je model eroze a sedimentace založený na rovnici USLE (USPED model for erosion/deposition 2010). Je zaměřen na prostorové rozmístění oblastí s topografickým potenciálem pro vznik eroze a sedimentace. Model byl vyvinut v USA ve spolupráci odborníků z U. S. Army Construction Engineering Laboratories, Illinois Natural History Survey a Přírodovědecké fakulty Komenského Univerzity v Bratislavě. První výsledky byly získány aplikací modelů ve střední Illinois a Yakima Ridge, Washington v USA (Mitášová a kol. 1996; Mitáš, Mitášová 1998). Model USPED je v porovnání s modelem WaTEM/SEDEM méně využíván. Aplikace modelu USPED byla prováděna na povodích různých měřítek v USA (Warren a kol. 2005), v Itálii (Pistocchi, Cassani, Zani 2002; Pelacani, Märker, Rodolfi 2008) a na Slovensku Stankoviansky a kol. (2008). V českých podmínkách byl použit k určení lokalit výskytu koluvizemí (Bek 2007).

Model USPED může být implementován v běžných prostředích GIS (např. ArcGIS, ArcView, GRASS GIS). Podle tohoto modelu hodnotu eroze, resp. akumulace ED vyjadřuje vztah:

$$ED = K_t[(\text{grad } h) \cdot s \cdot \sin \beta - h \cdot (k_p + k_t)],$$

kde K_t je koeficient transportu půdy, h hloubka vody odvozená ze sběrných ploch (m), s je jednotkový vektor ve směru nejstrmějšího svahu, β je úhel sklonu svahu ($^\circ$), k_p je normálová křivost ve směru spádové křivky, k_t je normálová křivost ve směru tečny k vrstevnici.

V rámci vývoje modelu USPED nebyly zahrnuty faktory erozní účinnosti deště, ochranného vlivu vegetace a erodovatelnosti půd. Tyto faktory přebírá model USLE z rovnice USLE. Kapacita transportu sedimentů je vyjádřena vztahem:

$$T = R \cdot K \cdot C \cdot P \cdot A^m \cdot (\sin \beta)^n,$$

kde R , K , C , P jsou parametry rovnice USLE ($LS = A^m (\sin \beta)^n$), m a n jsou konstanty pro povrchový odtok vody způsobující erozi určené jako $m = 1,6$,

$n = 1,3$ pro převládající rýhovou erozi a $m = n = 1$ pro převládající plošnou erozi. Na základě tohoto vztahu je možné erozi resp. akumulaci vyjádřit vztahem:

$$ED = \text{div}(T.s) = d[(T.(\cos \alpha)/dx] + d[T.(\sin \alpha)/dy],$$

kde α je orientace svahu vůči světovým stranám. Poslední uvedená rovnice je rovná vztahům uvedeným dříve, ačkoli je její výpočet zjednodušen. Kladné hodnoty ED určují místa s potenciálem pro akumulaci, záporné hodnoty ED určují místa s potenciálem pro erozi půdy (Mitášová a kol. 1996; Mitáš, Mitášová 1998).

2.5. Zpracování modelu USPED

Zpracování modelu USPED nevyžaduje instalaci zvláštního software. Výsledku lze dosáhnout krokovým postupem v prostředí GIS. Pro vypracování byl použit následující postup v programu ArcMAP 9.3. (Mitášová a kol. 1996; Mitáš, Mitášová 1998). Do modelu vstupují tyto vrstvy v rastrové podobě o stejném rozlišení: vrstevnice, resp. na jejich podkladě vyhotovený digitální model terénu (*dem*), sklonitost území (*slope*) ve stupních, orientace vůči světovým stranám (*aspect*); dále K faktor (*kfac*) a C faktor (*cfac*). R faktor je uvažován pro celé území stejný.

1. Nejprve vypočteme sběrné plochy soustředěného odtoku (*flowacc*) pomocí funkce *Flowaccumulation*. Hodnota pixelu výsledné vrstvy odpovídá počtu pixelů, ze kterých se do daného pixelu soustředí odtok. Nástroj *Map Algebra* vypočte požadovanou funkci na základě pokynu: *FlowAccumulation(FlowDirection([dem_5]))*.
2. Poté vypočteme LS faktor (*sflowtopo*) v nástroji Map Algebra:
 $[Pow([flowacc] * resolution, 1.6)] * [Pow(Sin([slope] * 0.01745), 1.3)]$
3. Pro výpočet transportní kapacity v povodí použijeme opět nástroj Map Algebra. Nejprve *qsx*:
 $[sflowtopo] * [kfac] * [cfac] * 56 * \cos((([aspect] * (-1)) + 450) * 0.01745)$
 Pak *qsy*:
 $[sflowtopo] * [kfac] * [cfac] * 56 * \sin((([aspect] * (-1)) + 450) * 0.01745)$
4. Vypočteme sklonitost a orientaci vůči světovým stranám vrstev *qsx* a *qsy* (ty pojmenujeme analogicky *qsx_slope*, *qsy_slope*, *qsx_aspect* a *qsy_aspect*).
5. Provedeme derivaci vrstev *qsx* (*qsx_dx*) a *qsy* (*dsy_dy*):
 $\cos((([qsx_aspect] * (-1)) + 450) * 0.01745) * \tan([qsx_slope] * 0.01745)$
 $\sin((([qsy_aspect] * (-1)) + 450) * 0.01745) * \tan([qsy_slope] * 0.01745)$
6. Pomocí nástroje *Map Algebra* provedeme výsledný výpočet. Pro převládající rýhovou erozi vložíme do dialogového okna vzorec: $[qsx_dx] + [qsy_dy]$.

Vrstva *erdep* je výsledkem modelu USPED. Kladné hodnoty ukazují lokality, kde dochází k akumulaci erodovaného materiálu, záporné hodnoty naznačují lokality s erozí půdy.

3. Výsledky

3.1. Výsledky modelu WaTEM/SEDEM

Obrázek 3 ukazuje výsledky modelu v letech 1994, 2001, 2007 a 2009. Za nejvíce erozí postižená místa označil model svahy a svahové úpady v pravé části povodí, tedy v místech, kde je vysoký LS faktor. Intenzita eroze se však v jednotlivých letech značně liší. Nejvyšších hodnot dosahuje v roce 2001 a 2007 na pozemcích, kde byla pěstována kukuřice. V levé části povodí se intenzita eroze odvíjí od pěstované plodiny, tedy od C faktoru. Z map je zřejmé, že intenzita eroze je ovlivněna sítí cest a hranicemi honů, které přerušují délku svahů. Na hranici honů dochází ke zpomalení povrchového odtoku a částečné akumulaci materiálu. K akumulaci uvolněných půdních částic dochází nejvíce v hlavním údolí a částečně i na dnech pravostranných svahových úpadů. Z hlediska erozně-akumulačních procesů se jeví neutrálně plochy lesů, trvalých travních porostů mimo hlavní údolnici a orná půda na severovýchodě povodí.

Z číselných výsledků modelu WaTEM/SEDEM (tab. 2) je patrné, že model je citlivý na změnu C faktoru. Výsledky se mění v závislosti na pěstované plodině a patrný je i vliv zatravnění svahového úpadu v roce 2003.

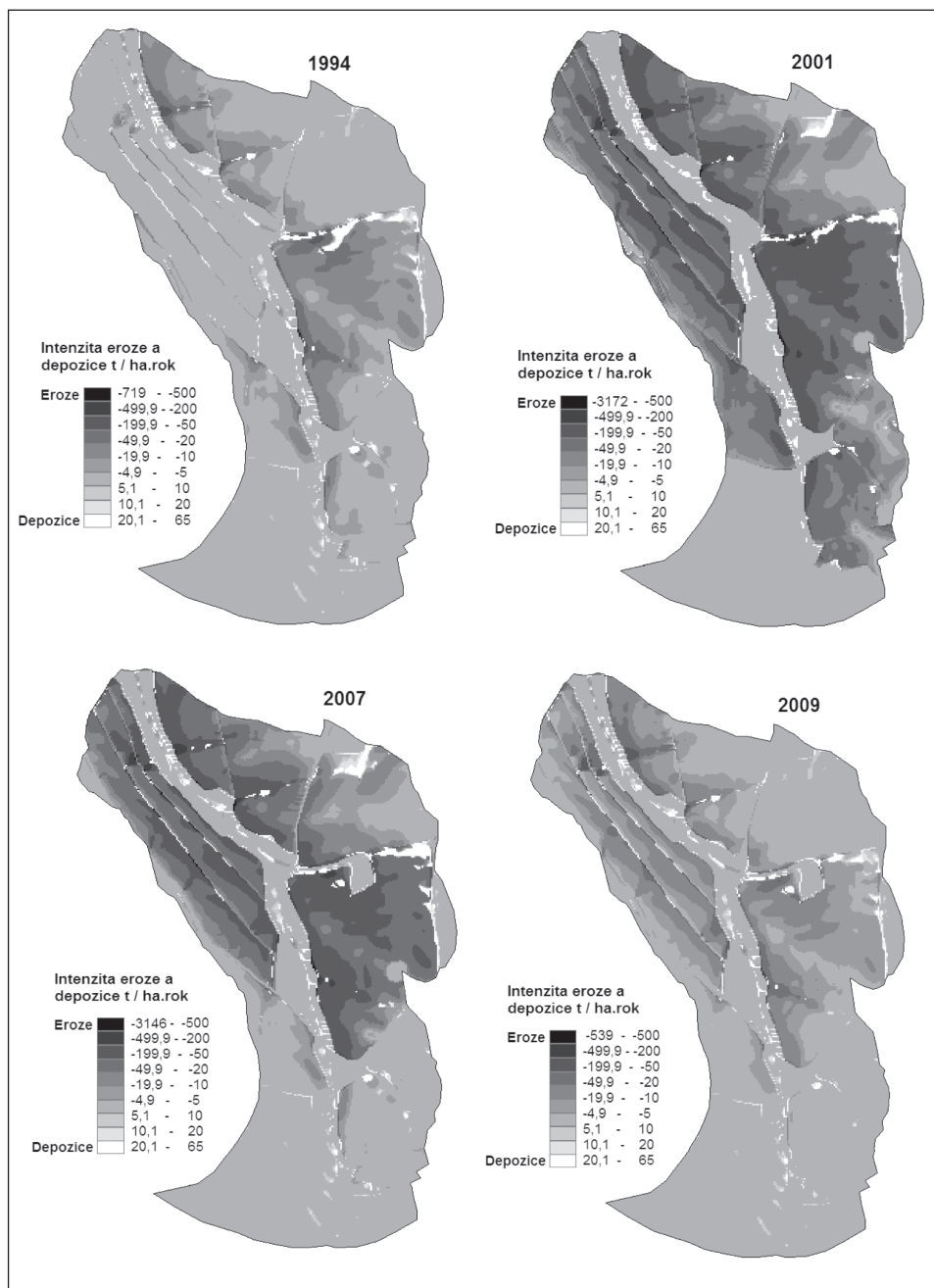
3.2. Výsledky modelu USPED

Mapové výstupy modelu USPED z let 1994, 2001, 2007 a 2009 jsou znázorněny na obrázku 4. Absolutní výsledky ztráty půdy podle modelu USPED uvádí tabulka 3. Na první pohled je z výsledných map patrné, že k erozi dochází na svazích v celém povodí. Jako nejohroženější označil model místa, která se vyznačují nejvyšší hodnotou sklonů svahů. Na těchto místech dosahuje hodnota intenzity ztráty půdy až $20 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Intenzita eroze se dále liší podle pěstované plodiny, avšak rozdíly ve faktoru C se projevují málo. Erozně nejnáchylněji se projevuje kukuřice a brambory, nejlépe naopak porosty jetele.

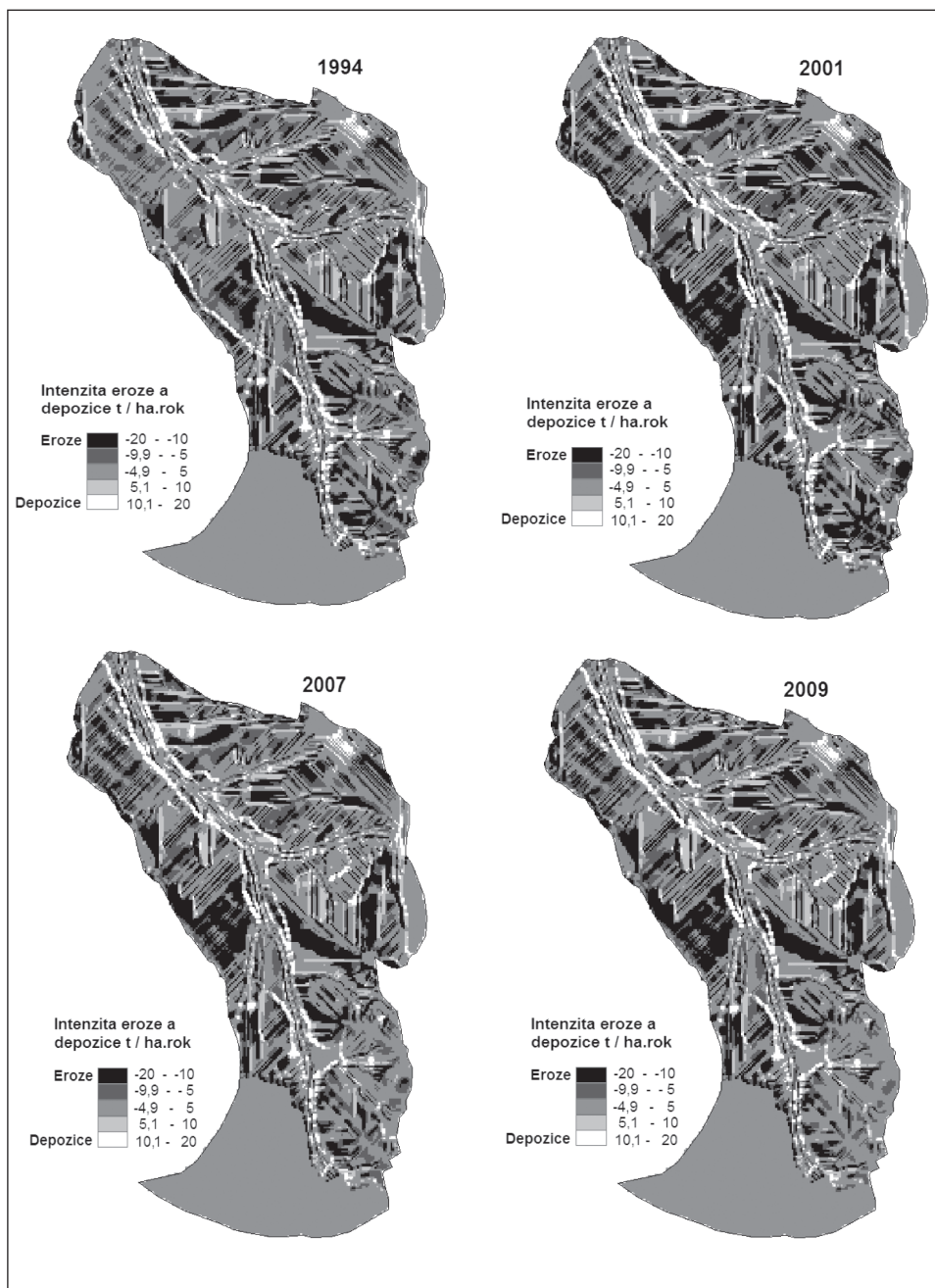
K akumulaci erodovaných částic dochází podle modelu ve svahových úpadech a v hlavním údolí. Nejvíce je patrná akumulace materiálu na okrajích hlavní údolnice. Zde dochází jednak ke zmenšení sklonů a také k přechodu z orné půdy na trvalé travní porosty, což vede ke snížení transportní kapacity, zpomalení rychlosti povrchového odtoku a akumulaci materiálu. Na hranici

Tab. 2 – Výsledky modelu WaTEM/SEDEM v povodí Černíči

Ukazatele	1994	2001	2007	2009
Celková eroze půdy v povodí ($\text{t} \cdot \text{rok}^{-1}$)	607	3 771	3 170	712
Intenzita eroze v povodí ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$)	4,5	28,1	23,7	5,3
Celková depozice půdy v povodí ($\text{t} \cdot \text{rok}^{-1}$)	583	3 459	3 112	682
Celková ztráta půdy z povodí ($\text{t} \cdot \text{rok}^{-1}$)	24	312	58	30
Celkové množství plavenin transportované závěrovým profilem ($\text{t} \cdot \text{rok}^{-1}$)	19	278	53	28
Ztráta půdy z povodí ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$)	0,179	2,328	0,433	0,224



Obr. 3 – Eroze a depozice půdy v povodí Černíči podle modelu WaTEM/SEDEM v letech 1994, 2001, 2007 a 2009. Zdroj: vlastní analýza.



Obr. 4 – Eroze a depozice půdy v povodí Černíči podle modelu USPED v letech 1994, 2001, 2007 a 2009. Zdroj: vlastní analýza.

Tab. 3 – Výsledky modelu USPED v povodí Černíči

Ukazatele	1994	2001	2007	2009
Celková eroze půdy v povodí (t.rok ⁻¹)	522	577	547	528
Intenzita eroze v povodí (t.ha ⁻¹ .rok ⁻¹)	3,9	4,3	4,1	3,9
Celková depozice půdy v povodí (t.rok ⁻¹)	174	128	181	179
Celková ztráta půdy z povodí (t.rok ⁻¹)	347	449	365	349
Ztráta půdy z povodí (t.ha ⁻¹ .rok ⁻¹)	2,59	3,85	2,72	2,61

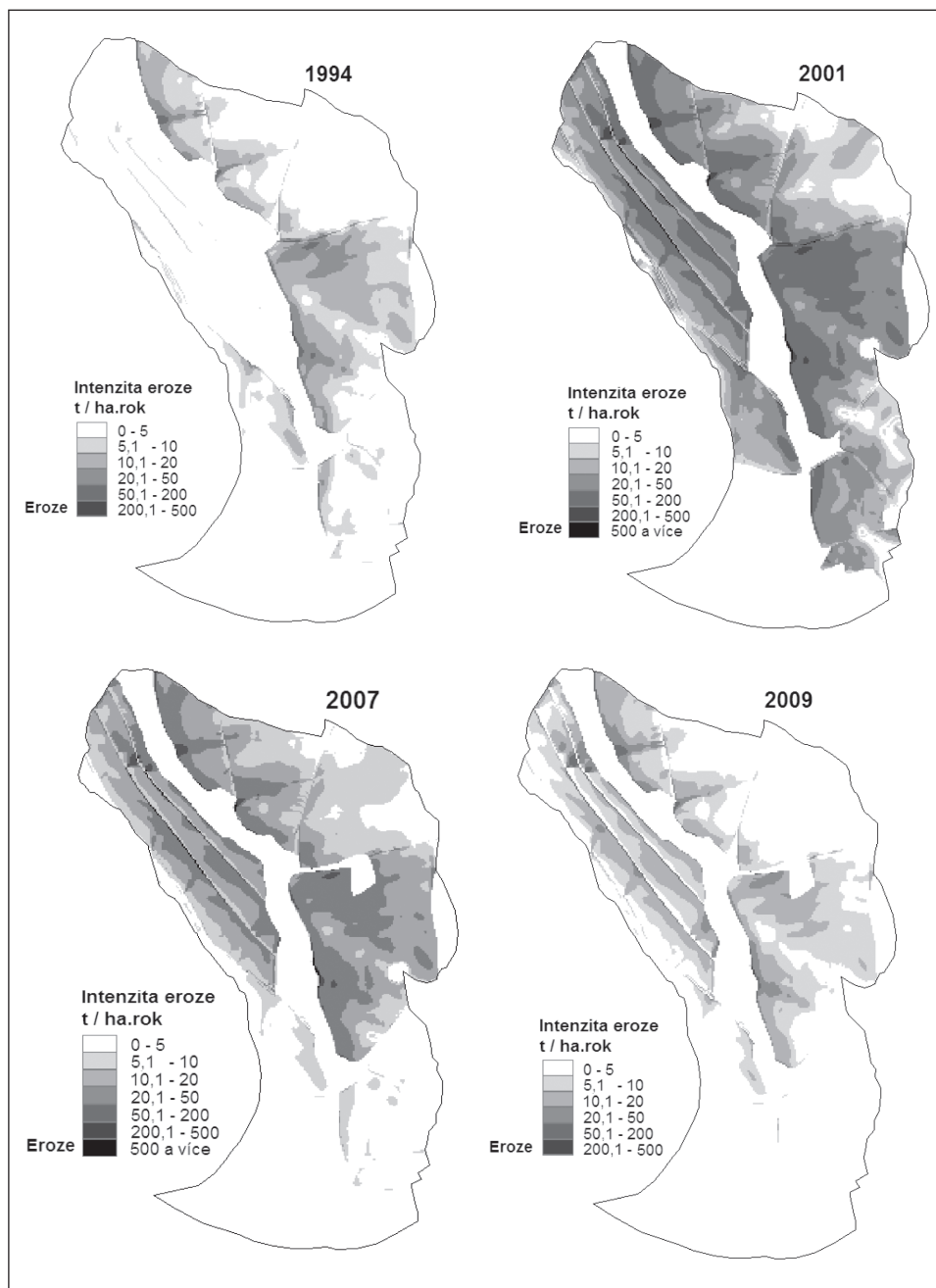
dvou pozemků, kde pozemek s nižším C faktorem se nachází níže po svahu, dochází k akumulaci materiálu. Tento jev můžeme pozorovat i v jiných částech povodí. Nejpatrnější je akumulární pruh na mapě z roku 1994 na levé straně povodí, který vznikl na rozhraní pšenice a jetele. Zatravnění svahového úpadu v roce 2003 se na výsledcích výrazně neprojevilo. V letech 2007 a 2009 je patrná nevelká akumulace materiálu na hranici nově zatravněné plochy. Na linii hlavní údolnice lze pozorovat četné střídání míst s výskytem akumulace a eroze, protože zde dochází k častým změnám transportní kapacity. Výskyt rovnoběžných pruhů eroze a akumulace na ostatní ploše povodí je způsoben nedokonalostí zpracování v prostředí GIS. Z pohledu erozně-akumulačních procesů zůstávají nedotčeny plochy lesů a intravilánu.

Z číselných (tab. 3) a mapových výsledků (obr. 4) modelu USPED je patrné, že model ani v časovém ani v prostorovém měřítku nereaguje na změnu C faktoru. Model USPED pracuje především na základě digitálního modelu terénu. Nejnižší absolutní hodnoty míry eroze (tab. 3) nastaly v roce 1994 a 2009, nejvyšší v roce 2001. V roce 2007 je ztráta půdy z povodí na hektar nižší než v roce 2001. Na tomto výsledku se pravděpodobně promítl vyšší podíl obilnin v povodí než v roce 2001 a v menší míře i zatravnění svahového úpadu v roce 2003.

4. Diskuse

Výsledky modelů USPED a WaTEM/SEDEM jsou odlišné jak v mapových výstupech, tak v absolutních hodnotách ztráty půdy vodní erozí, ačkoli oba modely pracují na bázi rovnice USLE. Do obou modelů shodně vstupují parametry R , K , L , S , které jsou v této studii považovány jako neměnné, a C , které se v čase mění. Do modelu WaTEM/SEDEM vstupuje oproti modelu USPED navíc vrstva silnic, hranic pozemků (měnné faktory) a vodního toku (neměnný faktor). Výsledky modelu USPED dokládají, že model vznikl jako modifikace rovnice USLE zdůrazňující vlastnosti reliéfu (Warren a kol. 2005). Změny faktoru C v čase se ve výsledku projevují jen nepatrně. Podle práce Pelacani, Märker, Rodolfi (2008) se změna C faktoru výrazněji projeví ve výsledku až při změně kategorie využití půdy na relativně větší ploše povodí a dále je ovlivňována faktorem protierozních opatření. Změny faktoru C se ve výsledku modelu WaTEM/SEDEM projevují, což svědčí o tom, že model WaTEM/SEDEM pružněji reaguje na jeho změnu. Tato vlastnost se osvědčila i v jiných studiích při modelování změn krajinné pokrývky (Keestra a kol. 2009, Ward a kol. 2009).

Modely shodně označily, že k erozi dochází na svazích v celém povodí. Model USPED poukazuje na významnou míru eroze v pravé i levé části povodí bez



Obr. 5 – Eroze půdy v povodí Černíči podle rovnice USLE v letech 1994, 2001, 2007 a 2009.
Zdroj: vlastní analýza.

ohledu na pěstovanou plodinu, zatímco model WaTEM/SEDEM označuje erozi v pravé části povodí za intenzivnější. Intenzita eroze je podle modelu WaTEM/SEDEM dána v levé části povodí pěstovanou plodinou, v pravé části povodí zejména vlastnostmi reliéfu. K akumulaci materiálu dochází podle obou modelů v hlavním údolí.

Intenzita eroze v levé části povodí je podle modelu WaTEM/SEDEM částečně snížena hranicemi honů. Jejich význam je však diskutabilní. Terénním šetřením bylo zjištěno, že na hranicích honů se nacházejí často vyjeté koleje od zemědělské techniky, které mohou povrchový odtok zpomalit. Ke snížení intenzity eroze dochází v případě, když jsou na honech pěstovány odlišné plodiny. Jestliže se však žádná překážka nevyskytuje, nemá hranice honů žádný význam.

Modely se liší ve svém přístupu k postranním svahovým úpadům. Zatímco model USPED je označuje jako místa akumulace materiálu, čehož využívá Bek (2007) při modelování výskytu koluvizemí model WaTEM/SEDEM je naopak označuje jako místa eroze půdy. Verstraeten, Prosser, Fogarty (2007) ve své studii, kde aplikovali model WaTEM/SEDEM, rovněž svahové úpady zaznamenali jako místa eroze. Svahový úpad je místo, ve kterém dochází ke změně transportní kapacity (Verstraeten, Prosser, Fogarty 2007). Nesrovnalost výsledků obou modelů pramení z odlišného algoritmu jejího výpočtu. Zatravnění pravostranného svahového úpadu se projevilo ve výsledcích modelu WaTEM/SEDEM pozitivně. Model USPED však zatravnění ve svém výsledku téměř nezaznamenal.

Pro diskusi dosažených výsledků modelů USPED a WaTEM/SEDEM byla vyčíslena a graficky zpracována i rovnice USLE za použití totožných vstupních parametrů (tab. 4 a obr. 5). Rovnice USLE však na rozdíl od modelů USPED a WaTEM/SEDEM nepočítá s akumulací materiálu. Zároveň bylo během roku 2009 provedeno terénní šetření projevů eroze půdy v povodí. Číselné výsledky byly porovnány s kvantifikací ztráty půdy erozí podle Janečka (2004).

Za nejvíce erozí postižená místa byly rovnicí USLE označeny svahy a svahové úpady v pravé části povodí, tedy v místech, kde je vysoký *LS* faktor. Intenzita eroze se v jednotlivých letech liší. Nejvyšších hodnot dosahuje v roce 2001 a 2007 na pozemcích, kde byla pěstována kukuřice. V levé části povodí se intenzita eroze odvíjí od pěstované plodiny, tedy od *C* faktoru. Intenzita eroze je ovlivněna sítí cest a hranicemi honů, které přerušují délku svahů. Z hlediska erozních procesů jsou neutrální plochy lesů, trvalých travních porostů mimo hlavní údolnici a orná půda na severovýchodě povodí. Číselné výsledky rovnice USLE uvádí tabulka 4.

Problematická zůstává kalibrace modelu nezbytná pro správné fungování modelu WaTEM/SEDEM pro podmínky daného povodí. Modely USPED a USLE další kalibraci nevyžadují. Při aplikaci modelu WaTEM/SEDEM byly použity vstupní hodnoty koeficientů podle Van Rompaey a kol. (2001), pro vlastní kalibraci aplikovaného modelu neexistují prozatím dostatečná data. Tabulka 5 uvádí porovnání výsledků ztráty půdy (celková ztráta půdy z povodí/plocha povodí) obou modelů s měřením množství plavenin v letech 1991–2001. Hodnota odnosu plavenin v roce 2001 (Janeček 2004) je ovlivněna výskytem významných srážko-odtokových epizod, zatímco modely počítají průměrné dlouhodobé ztráty ve vztahu k použitému *R*-faktoru. Při porovnání s průměrným ročním odnosem plavenin za období 1992–2000, jehož hodnota je $0,23 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ (1991–2001, $1,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$), výsledky odpovídají zhruba hodnotě udávané modelem WaTEM/SEDEM.

Tab. 4 – Výsledky rovnice USLE v povodí Černíči

Ukazatele	1994	2001	2007	2009
Celková eroze půdy v povodí (t.rok ⁻¹)	577,54	3 733,24	3 202,61	660,62
Intenzita eroze v povodí (t.ha ⁻¹ .rok ⁻¹)	4,32	27,86	23,90	4,93

Tab. 5 – Porovnání hodnot ztráty půdy z povodí Černíči na základě různých metod (t.ha⁻¹.rok⁻¹)

Rok	USPED	WaTEM/SEDEM	Odnos plavenin ^{*)}
1994	2,59	0,18	0,01
2001	3,85	2,33	13
2007	2,72	0,43	—
2009	2,61	0,22	—

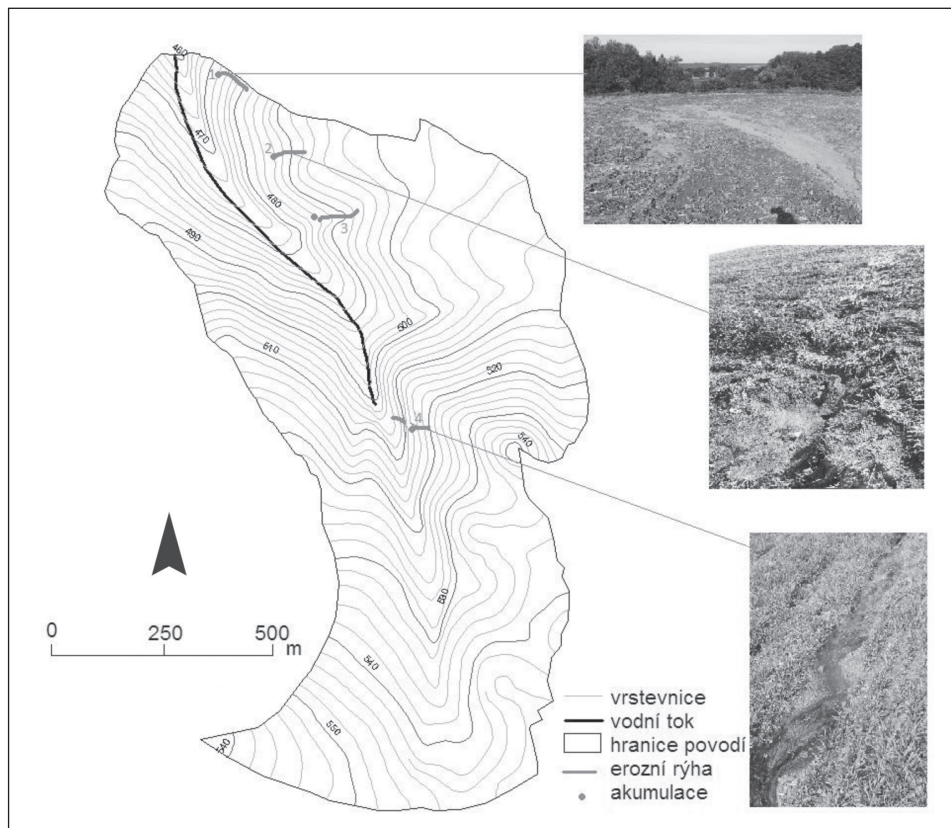
Pozn.: ^{*)} zdroj Janeček (2004)

Tab. 6 – Porovnání intenzity eroze v povodí Černíči na základě různých metod (t.ha⁻¹.rok⁻¹)

Rok	USPED	WaTEM/SEDEM	USLE
1994	3,9	4,5	4,32
2001	4,3	28,1	27,86
2007	4,1	23,7	23,90
2009	3,9	5,3	4,93

Výsledky modelu USPED jsou o řád vyšší než výsledky modelu WaTEM/SEDEM a hodnota naměřeného odnosu plavenin. Příčinu menší hodnoty výsledku ztráty půdy modelem WaTEM/SEDEM lze hledat i v tom, že model na rozdíl od USPED počítá také s vrstvou vodních toků. Vodní tok se nenalézá na dně údolí, ale byl přesunut během melioračních úprav v roce 1981 na jeho levou stranu. V místech, kde by mělo docházet k odnosu materiálu, dochází v modelu WaTEM/SEDEM vlivem nízkého *C* faktoru k akumulaci materiálu, který tak vodního toku nedosáhne. Výslednou hodnotu eroze dále u modelu WaTEM/SEDEM snižují hranice pozemků a silnice, se kterými model USPED nepočítá. Výsledek aplikace modelu USPED v povodí Černíči protirečí výsledku Warren a kol. (2005), kde byl tento model předčil v přesnosti odhadu míry eroze rovnici USLE.

Přípustná ztráta půdy vodní erozí je podle Janečka (2007) povodí vzhledem k půdním podmínkám studovaného povodí 4 t.ha⁻¹.rok⁻¹. Tabulka 6 uvádí porovnání výsledků intenzity eroze v povodí obou modelů a výsledků rovnice USLE. Z výsledků je patrné, že hodnoty vypočtené modelem WaTEM/SEDEM a USLE jsou téměř totožné, protože jsou vypočítány na stejném základě. WaTEM/SEDEM a USLE velmi pružně reagují na změnu *C* faktoru. Výsledky modelu USPED se v letech 2001 a 2007 jen nepatrně liší od let 1994 a 2009, model příliš nereaguje na změnu pěstované plodiny a zatrávnění údolnice. Hodnota intenzity eroze podle modelu USPED se spíše drží na úrovni hodnot simulovaných modely USLE a WaTEM/SEDEM při nízkém *C* faktoru. Podle výsledků modelů WaTEM/SEDEM a USLE je přípustná ztráta půdy vodní erozí



Obr. 6 – Výskyt erozně-akumulačních forem v povodí Černíči na základě opakovaného terénního průzkumu v roce 2009. Zdroj: terénní šetření.

vždy překročena. K podobnému výsledku došel Krása (2004) při aplikaci modelu WaTEM/SEDEM v povodí vodní nádrže Vrchlice. V obdobných geografických podmínkách při užití nekalibrovaných hodnot a faktoru $C = 0,2$ pro veškerou ornou půdu v povodí vyčíslil intenzitu eroze na $4,23 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Pro ověření číselných výsledků modelů by bylo nutné provádět soustavný monitoring projevů eroze v povodí a množství plavenin ve vodním toku.

Z porovnání výsledků modelů a terénního průzkumu, který probíhal v roce 2009, vyplývá, že model WaTEM/SEDEM lépe odhadl prostorové rozložení projevů eroze (obr. 6). V povodí docházelo v roce 2009 k erozi především ve svahových úpadech v pravé části povodí, kde se soustředil povrchový odtok. Materiál byl však částečně zachycen na hranicích pozemků orné půdy s trvalých travních porostů, což zachycuje lépe model USPED.

Výskyt opětovně se vytvářejících erozně-akumulačních forem ve sledovaném povodí znázorňuje obrázek 6 (lokality č. 1–4). Příkladem je akumulace (č. 1), která se vytvořila během přívalových srážek 2. 8. 2009 nad mezí oddělující pole a trvalý travní porost. Nad touto akumulací byly patrné známky výrazné plošné eroze po celé délce svahu. Ve svahovém úpadu (č. 2) se vytvořila rýha po celé jeho délce, v jejíž spodní části se vytvářela vějířovitá štěrkopísková akumulace.

V korytě nad měrným přepadem v dolní části povodí docházelo k akumulaci erodovaných půdních částic.

Z terénního pozorování je patrné, že místa, ve kterých nejčastěji dochází k rozvoji erozních forem, se nacházejí na drahách soustředěného odtoku. K akumulacím dochází na dolních částech honů nad rozhraními mezi ornou půdou a trvalým travním porostem. Všechna se nacházejí v pravé části povodí, která se vyznačuje většími sklony a kratší průměrnou délkou svahů. Nemalou mírou přispívá ke vzniku eroze i používání zemědělské techniky, erozní formy vzniklé ve stopách traktorů nejsou výrazné, ale velmi četné. Ačkoli terénní průzkum probíhal pouze v roce 2009, lze předpokládat, že projevy eroze jsou dlouhodobě patrné ve stejných lokalitách.

5. Závěr

V rámci studie bylo provedeno porovnání dvou modelových přístupů a hodnoceno jejich využití pro kvantifikaci erozně-akumulačních procesů v plošně malém povodí. Oba aplikované modely jsou náročné na zpracování v prostředí GIS. Návodů uvedené na internetových stránkách vývojových týmů modelů nejsou vyčerpávající, což stěžuje zpracování zvláště pro nezkušeného uživatele. Model USPED lze vypočítat v prostředí GIS, avšak přesný krokový postup neumožňuje snadnou obměnu vstupních faktorů. Model WaTEM/SEDEM vyžaduje přesné vyhotovení vstupních vrstev a zvláštní nastavení počítače, avšak poté pracuje rychle a jednotlivé parametry lze snadno obměňovat. Výhodou modelu WaTEM/SEDEM je na rozdíl od modelu USPED schopnost vyčíslit rovnou celkové množství erodovaných a sedimentovaných půdních částic. Problematické je provedení kalibrace modelu vzhledem k nedostatku potřebných měřených dat.

Výsledky obou modelů byly porovnány s výsledky běžně používané rovnice USLE a také s terénním šetřením a mapováním vývoje erozně-akumulačních forem reliéfu v povodí prováděným během roku 2009. Prostorovému rozmístění projevů eroze v povodí odpovídal lépe model WaTEM/SEDEM, který shodně s terénním šetřením označil místa eroze jako dna svahových úpadů a svahy s vyššími sklony. Modelem vypočtené hodnoty ztráty půdy z povodí byly blízké dlouhodobému průměru hodnot množství transportovaných plavenin. Model WaTEM/SEDEM se ukázal v souladu s poznatky dalších autorů (Krása a kol. 2005, Van Romey, Krása, Dostál 2007) jako dobře aplikovatelný pro hodnocení vývoje erozních procesů a celkové ztráty půdy erozí na našem území. Model USPED vykázal odlišné výsledky, které jsou dány rozdílnými vstupními daty i koncepcí modelu. Je využitelný zejména pro hodnocení vlivu topografických podmínek na dynamiku erozně-sedimentačních procesů na menších plochách.

Literatura:

- BEK, S. (2007): Digitální mapování koluvizemí. Magisterská práce. KFGG PřF UK. Praha. 96 s.
- Digitální datové podklady pro stanici Černíčí. VÚMOP, Praha.
- DE VENTE, J., POESEN, J. (2005): Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: scale issues and semi-quantitative models. *Earth Science Review*, 71, s. 95–125.
- DE VENTE, J., POESEN, J., VERSTRAETEN, G., VAN ROMPAY, A., GOVERS, G. (2008): Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. *Global and Planetary Change*, 60, s. 393–415.
- DOSTÁL, T. a kol. (2006): Dlouhodobé průměrné hodnoty R faktoru (1962–2001). In: Dostál, T. (ed.): *Metody a způsoby predikce povrchového odtoku, erozních a transportních procesů v krajině. Výzkumná zpráva projektu COST 634. FSV KHKI, ČVUT, Praha.*
- Experimentální povodí (2009). <<http://www.hydromeliorace.cz>> (12. 12. 2009).
- FENG, X., WANG, Y., CHEN, L., FU, B., BAI, G. (2010): Modelling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology*, 118, č. 3–4, s. 239–248.
- Geography the K. U. Leuven (2010). <http://geo.kuleuven.be/geography/modelling/erosion/watemsedem2006> (1.1.2010).
- GOVERS, G. (1991): Rill erosion on arable land in Central Belgium – Rates, Controls and Predictability. *Catena*, 18, č. 2, s. 133–155.
- GOVERS, G., POESEN, J. (1988): Assessment for interrill and rill contributions to total soil loss from an upland field plot. *Geomorphology*, č. 1, <http://skagit.meas.ncsu.edu/~helena/gmslab/denix/usped.html>, s. 343–354.
- JANEČEK, M. (2004): Sledování vlivu zemědělského hospodaření na kvalitu vody a množství erozních smyvů. Výroční zpráva za rok 2003. Komplexní řešení problémů hospodaření s půdou, vodou a krajinou. In: *Diagnostika erozních procesů a jejich účinků na půdu. Etapa výzkumného záměru MZEM07-99-01-08. VÚMOP, Praha*, s. 55–68.
- JANEČEK, M. a kol. (2007): Ochrana zemědělské půdy před erozí. *Metodika. VÚMOP, Praha*, 76 s.
- JOHANOVSKÝ, Z. (2004): Černíčí. Metadata výzkumného povodí. VÚMOP, Praha, 43 s.
- JORDAN, G., VAN ROMPAEY, A., SZILASSI, P., CSILLAG, G., MANNAERTS, CH., WOLDAI, T. (2005): Historical land-use changes and their impact on sediment fluxes in the Balaton Basin (Hungary). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 108, s. 119–133.
- KADLEC (2007): LS-converter. <http://www.plaveniny.cz/cz/rusle/ls-converter> (1. 3. 2010).
- KEESTRA, S. D., VAN DAM, O., VERSTRAETEN, G., VAN HUISSTEDEN, J. (2009): Changing sediment dynamics due to natural reforestation in the Dragona catchment SW Slovenia. *Catena*, 78, s. 60–71.
- KLIMENT, Z., KADLEC, J., LANGHAMMER, J. (2008): Evaluation of suspended load changes using AnnAGNPS and SWAT semi-empirical erosion models. *Catena*, 73, s. 286–299.
- KLIMENT, Z., LANGHAMMER, J. (2005): Modelování erozního ohrožení ve velkých územních celcích. In: Rypl, J. (ed.): *Geomorfologický sborník*, 4, PFJU, České Budějovice, s. 75–81.
- KRÁSA, J. (2004): Hodnocení erozních procesů ve velkých povodích za podpory GIS. Disertační práce. KHKI FSV ČVUT, Praha, 186 s.
- KRÁSA, J., DOSTÁL, T., VAN ROMPAY, A., VÁŠKA, J., VRÁNA, K. (2005): Reservoirs siltation measurements and sediment transport assessment in the Czech Republic, the Vrchlice catchment study. *Catena*, 64, s. 348–362.
- MC COOL, D. K. a kol. (1987): Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 30, č. 5, s. 1387–1396.
- MC COOL, D. K. a kol. (1989): Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 32, č. 5, s. 1571–1576.
- MITÁŠ, L., MITÁŠOVÁ, H. (1998): Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water Resources Research*, 34, č. 3, s. 505–516.
- MITÁŠOVÁ, H., HOFIERKA, J., ZLOCHA, M., IVERSON, L. R. (1996): Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of GIS* 10, č. 5, s. 629–641.

- MOOR, J. J. W., VERSTRAETEN, G. (2008): Alluvial and colluvial sediment storage in the Geul River catchment (The Netherlands) – Combining field and modelling data to construct a Late Holocene sediment budget. *Geomorphology*, 95, s. 487–503.
- NEARING, M. A. (1997): A single, continuous fiction for slope steepness influence on soil loss. *Soil Science Society of America Journal*, 61, s. 917–919.
- PELACANI, S., MÄRKER, M., RODOLFI, G. (2008): Simulation of soil erosion and deposition in a changing land-use: A modelling approach to implement the support practice factor. *Geomorphology*, 99, s. 329–340.
- PISTOCCHI, A., CASSANI, G., ZANI, O. (2002): Use of the USPED model for mapping and managing best land conservation practices. http://www.iemss.org/iemss2002/proceedings/pdf/volume%20tre/331_pistocchi.pdf (14. 2. 2010).
- ROYSSCHAERT, G., POESEN, J., NOTEBAERT, B., VERSTRAETEN, G., GOVERS, G. (2008): Spatial and long-term variability of soil loss due to crop harvesting and the importance relative to water erosion: A case study from Belgium. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 126, s. 217–228.
- STANKOVIANSKY, M., KOCO, Š., PECHO, J., JENČO, M., JUHÁS, J. (2008): Geomorphic response of dry valley basin to large scale land-use changes in the second half of 20th century and problems with its reconstructions. *Moravian Geographical Reports*, 16, č. 4, s. 16–26.
- USPED model for erosion/deposition (2010). <http://skagit.meas.ncsu.edu/~helenagmslab/denix/uspded.html> (14. 2. 2010).
- VAN OOST, K., GOVERS, G., CERDAN, O., THAURÉ, D., VAN ROMPAEY, A., STEEGEN, A., NACHTERGAELE, J., TAKKEN, I., POESEN, J. (2005): Spatially distributed data for erosion model calibration and validation: The Ganspoel and Kinderveld datasets. *Catena*, 61, s. 105–121.
- VAN OOST, K., GOVERS, G., DESMET, P. J. J. (2000): Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology*, 15, č. 6, s. 579–591.
- VAN ROMPAEY, A., BAZZOFFI, P., JONES, R. J. A., MONTARELLA, L. (2005): Modelling sediment yields in Italian catchments. *Geomorphology*, 65, s. 157–169.
- VAN ROMPAEY, A., KRÁSA, J., DOSTÁL, T. (2007): Modelling the impact of land cover changes in the Czech Republic on sediment delivery. *Land Use Policy*, 24, s. 576–583.
- VAN ROMPAEY, A., VERSTRAETEN, G., VAN OOST, K., GOVERS, G., POESEN, J. (2001): Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, č. 11, s. 1221–1236.
- VERSTRAETEN, G. (2006): Regional scale modelling of hillslope sediment delivery with SRTM elevation data. *Geomorphology*, 81, s. 128–140.
- VERSTRAETEN, G., PROSSER, I. P., FOGARTY, P. (2007): Predicting the spatial patterns of hillslope sediment delivery to river channels in the Murrumbidgee catchment, Australia. *Journal of Hydrology*, 334, s. 440–454.
- VERSTRAETEN, G., VAN OOST, K., VAN ROMPAEY, A., POESEN, J., GOVERS, G. (2002): Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling. *Soil Use and Management*, 18, s. 386–394.
- WARD, P. J., VAN BALEN, R. T., VERSTRAETEN, G., RENSSSEN, H., VANDENBERGHE, J. (2009): The impact of land use and climate change on late Holocene and future suspended sediment yield of the Meuse catchment. *Geomorphology*, 103, s. 389–400.
- WARREN, S. D., MITÁŠOVÁ, H., HOHMANN, M. G., LANDSBERGER, S., ISKANDER, F. Y., RUZYCKI, T. S., SENSEMAN, G. M. (2005): Validation of 3-D enhancement of the Universal Soil Loss Equation for prediction of soil erosion and deposition. *Catena*, 64, s. 281–296.
- WISHMEIER, W. H., SMITH, D. D. (1978): Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. *Agr. Handbook No. 535*, U. S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C.

SOIL EROSION AND SEDIMENT DEPOSITION MODELLING AT THE SMALL CATCHMENT SCALE

About 50% of the Czechia's agricultural land is exposed to water soil erosion. In the past, many methods have been developed for evaluating soil erosion risk. Mathematical modelling is considered a modern tool for evaluating and even predicting erosion and accumulation processes. The goal of this study is to test the USPED model (Mitašová et al. 1996) and the WaTEM/SEDEM model (Van Rompay et al. 2001; Van Oost, Govers, Desmet 2000; Verstraeten et al. 2002) in Černíčí catchment, a small case-study area. The results of both models are discussed together and compared with the results of a field survey carried out in 2009 and sediment delivery measurements from the 1992–2001 period. In addition, the most frequent USLE equation is also calculated.

The Černíčí catchment has been a research area for the Research Institute for Soil and Water Conservation, Prague-Zbraslav, since 1990. It is located in the southeast of the Central Bohemian Region (Fig. 1). The catchment area measures 1.34 km² and its altitude varies between 462 and 562 meters. The geological subsoil is composed of gneiss dating from the pre-palaeozoic and palaeozoic ages. In the main valley, gneiss is covered by quaternary deluvial and fluvial sediments. The average slope gradient is 3°20', the maximum gradient reaches 12°. There is one water course in the catchment with an average daily discharge of 6.48 l.s⁻¹. The majority of the surface is covered by modal cambisols. In the main valley, gleys and gleyic cambisols are dominant. The catchment area has been used for agriculture since the 10th century. Agricultural lands make up 78% of the area, with forest accounting for another 20% and built-up areas comprising the remaining 2% (Fig. 1). During 2003, the most erosion-exposed side of the valley was covered in grass.

The models are tested for four different real scenarios. In 1994 primarily wheat was grown in the area. In 2001 and 2007, corn was the main crop. The two years were chosen so that we could compare the impact of extensive grass planting in 2003 under the same growing conditions. Including 2009 enabled us to compare the results of the models with a field survey. Both models require a number of entries (tab. 1). The essentials elements include a digital elevation model, a parcel/land use map, a river network map, the spatial distribution of crop, soil erodibility and rainfall factors. The results of the WaTEM/SEDEM model are displayed in Fig. 3. Areas with a high *LS* factor are indicated as those most exposed to erosion: the hillsides and valley walls. The intensity of erosion varied enormously in the four years studied. The highest erosion rate was recorded in 2001 and 2007 in the areas, in which corn was grown. Erosion intensity is strongly influenced by the parcel borders where sediment transport is slowed down and partly deposited. Otherwise, sediments are deposited mainly at the bottom of the valley. The forests, built-up areas and grasslands (excluding the bottom of the main valley) remain resistant to erosion. The WaTEM/SEDEM results seem to be subject to the crop factor. Total soil loss per hectare varies between 0.18 and 2.33 t.ha⁻¹.year⁻¹. The average erosion rate per hectare varies between 4.5 and 28.1 t.ha⁻¹.year⁻¹. The absolute erosion rate in 1994 and 2001 is lower than in 2001 and 2007 (Table 2). The effects of the grass planting in 2003 demonstrate that erosion rates have decreased since then.

The results of the USPED model are displayed in Fig. 4. According to the results, hill slopes in the catchment seem to be the areas most exposed to erosion. The influence of the crop factor is not remarkable as there are no significant differences among years. Sediments are deposited on the valley floors, particularly on the accumulation line between agricultural land and grassland along the bottom of the main valley. There are often accumulations along the border of parcels for which the crop factor is lower down the hill. The effect of planting grass in 2003 is not significant. Forests and urban areas remain resistant to erosion. Along the line of the main valley, areas of erosion and accumulation vary quite frequently, due to shifts in the transport capacity coefficient. Table 3 shows the numeric results of the USPED model. The average soil erosion rate per hectare varies between 3.9 and 4.1 t.ha⁻¹.year⁻¹. Total soil loss per hectare varies between 2.59 and 3.85 t.ha⁻¹.year⁻¹.

Figure 5 presents the results of the USLE equation. The USLE calculates only the erosion rate and not deposition. The erosion rate and spatial distribution of the WaTEM/SEDEM and the USLE equation results are similar and determine differences between the USLE and the

USPED results. The field survey indicates that areas of outflow concentration are the most erosion-prone areas of the catchment (Fig. 6). On the other hand, sediments are deposited along the downhill edges of parcels at the transition from agricultural land and to grassland. All areas of erosion and sediment deposition are located on the right side of the catchment. The WaTEM/SEDEM model results seem to correspond better with the field survey findings.

- Fig. 1 – Land use in the Černíčí catchment in 2009. Land use: built-up area; forest; meadow (grassland); new meadow, converted to grass in 2003; agricultural land; pathway/roadway; watercourse; catchment border; contour lines; expansive, collectivized fields. Source: Research Institute for Soil and Water Conservation, field survey.
- Fig. 2 – User interface of the WaTEM/SEDEM model.
- Fig. 3 – Soil erosion and sediment deposition in the Černíčí catchment according to the WaTEM/SEDEM model in 1994, 2001, 2007 and 2009. Intensity of erosion and deposition (t/ha. per year). Source: own analysis.
- Fig. 4 – Soil erosion and sediment deposition in the Černíčí catchment according to the USPED model in 1994, 2001, 2007 and 2009. Intensity of erosion and deposition (t/ha. per year). Source: own analysis.
- Fig. 5 – Soil erosion in the Černíčí catchment according to the USLE equation. Intensity of erosion and deposition (t/ha. per year). Source: own analysis.
- Fig. 6 – Occurrence of erosion-deposition landforms in Černíčí catchment in 2009. In the legend: contour lines, watercourse, catchment border, erosion channel/groove, accumulation. Location No. 1–4. Source: repeated field survey.

Pracoviště autorů: Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, katedra fyzické geografie a geoekologie, Albertov 6, 128 43, Praha 2; email: v_barbora@seznam.cz, kliment@natur.cuni.cz.

Do redakce došlo 11. 2. 2011; do tisku bylo přijato 4. 1. 2012.

Citační vzor:

VYSLOUŽILOVÁ, B., KLIMENT, Z. (2012): Modelování erozních a sedimentačních procesů v malém povodí. *Geografie*, 117, č. 2, s. 170–191.