

**Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta
Ústav aplikací matematiky a výpočetní techniky**

Doktorský studijní program: Aplikovaná matematika

Autoreferát disertační práce



Prostorová interpolace a modelování eroze půd

Stanislav Bek

Školitel: Doc. RNDr. Josef Ježek, CSc.

Praha 2015

Abstrakt

Disertační práce se zabývá vybranými metodami prostorové interpolace a jejich využitím při numerickém modelování tvaru povrchu Země, zejména eroze půd.

První část práce obsahuje popis studovaných metod. Nejprve je uveden výklad metody regularizovaný spline s tenzí (RST), která je osvědčeným nástrojem interpolace prostorových dat. Výklad obsahuje odvození v literatuře chybějících či nejasných pasáží a vysvětlení vztahu metody ke krigingu. Dále je popsán matematický aparát pro digitální popis terénu a pro analýzu jeho geometrických vlastností. Další kapitola se zabývá popisem erozního procesu a vybraných erozních modelů.

Druhá část práce uvádí souhrn 5 odborných článků s aplikacemi popsaných metod. Články 1 a 2 jsou zaměřeny na problémy interpolace výškopisných dat a tvorby digitálního modelu terénu. Zabývají se optimalizací metody RST pro konkrétní typy vstupních dat pro modelování půdní eroze. Článek 3 analyzuje prostorovou strukturu půdních dat a pedogenezi Žofínského pralesa. Články 4 a 5 se zabývají prostorovými vlastnostmi výskytu silných dešťů a mapováním erozního faktoru deště.

Úvod a cíle práce

Disertační práce se zabývá vybranými metodami prostorové interpolace a jejich aplikací na numerické modelování tvaru povrchu Země a procesů, zejména eroze půd. První část práce, kapitola 1 – 3, obsahuje popis studovaných metod. Druhá část, kapitola 4, uvádí souhrn odborných článků s aplikacemi metod.

Prostorová interpolace je základní úlohou při zpracování geografických dat. Cílem interpolace je nejčastěji vypočítat (odhadnout) hodnoty prostorové veličiny v pravidelné, dostatečně husté pravoúhlé síti, tzv. gridu. Výsledek interpolace se pak používá v širokém spektru aplikací, od vizualizace po přípravu vstupů do numerických modelů povrchu Země a souvisejících procesů, jako je zejména srážková činnost a eroze.

Existuje mnoho interpolačních metod, přičemž vhodnost jejich použití závisí na datech, charakteru interpolované prostorové veličiny, softwarové dostupnosti, rychlosti interpolačního algoritmu apod. Z hlediska disertace je můžeme rozdělit do dvou skupin, podle dvou různých a přitom vzájemně si konkurujících hledisek: minimalizace chyby a tvar vypočtené interpolační plochy. Příkladem první skupiny je kriging a jeho různé varianty. Druhou skupinu tvoří zejména metody radiálních

bázových funkcí zahrnující různé varianty splinových ploch. Při interpolaci výškopisných dat se osvědčila zejména metoda regularizovaný spline s tenzí (RST; Mitášová & Mitáš 1993), kterou lze dosáhnout vysoké přesnosti interpolace při zachování realistického tvaru interpolační plochy. Interpolační povrch i jeho derivace (všech řádů) jsou spojité a derivace lze vypočítat v rámci interpolace. Je možno zpracovávat velké soubory dat, přičemž se interpoluje po segmentech, ve kterých lze zvlášť nastavit interpolační parametry, např. podle hustoty vstupních bodů. Tato metoda je proto v centru pozornosti disertační práce.

Obě zmíněné skupiny metod jsou popsány v odborné literatuře a existují i komparativní práce, které většinou vycházejí z případových studií. Početní uživatelé prostředků GIS a podobných programů ale často používají metody prostorové interpolace naslepo, bez znalosti metod a významu nastavení jejich parametrů. Ti, kteří se pokusí metody nastudovat, narazí na pouze částečný matematický popis metod, na nejasná místa a chybějící dostatečně jasné odvození. Prvním úkolem předložené práce je proto provést jasný a spojitý výklad metody RST v kontextu prostorové interpolace, s odvozením v literatuře chybějících či nejasných pasáží a s vysvětlením jejího vztahu ke krigingu. Tento výklad je náplní první kapitoly.

Zrychlená půdní eroze je jedním z nejzávažnějších environmentálních problémů světa. Jen v České republice je vodní erozí ohrožena asi polovina orné půdy (Janeček 2012). Dochází při ní ke ztrátě hodnotného přírodního zdroje, dlouhodobé ztrátě úrodnosti půdy, plošnému znečištění povrchových vod a přímým materiálními škodám při zanášení pozemků, vodních nádrží, toků nebo infrastruktury. Matematické modelování půdní eroze je efektivním nástrojem při řešení projektů zaměřených na ochranu půdy.

Modely eroze popisují závislosti ztráty a redistribuce půdy na geografických faktorech. Druhým úkolem disertace je studovat faktor reliéfu a faktor srážek v návaznosti na osvojené interpolační metody. Příprava vstupů do modelování eroze (např. tvorba digitálního modelu terénu, křivostí terénu nebo interpolace faktoru deště) je totiž příkladem aplikace interpolačních metod, kde se zásadním způsobem projevuje vliv volby metody a nastavení jejich parametrů na výsledky modelování a interpretaci prostorových vztahů. Matematický aparát pro digitální popis terénu uvádí druhá kapitola, která popisuje též nástroje pro analýzu geometrických vlastností reliéfu tvořících vstupní data erozních modelů. Kapitola 0 se pak zabývá popisem erozního procesu a vybraných erozních modelů.

V rámci doktorského studia řešil autor disertace řadu speciálních problémů, majících charakter aplikací různých matematických metod, které bylo zapotřebí do hloubky nastudovat, implementovat (Matlab, C++) a vhodným způsobem je použít v dané aplikaci. Některé výsledky numerického modelování a jejich interpretace byly publikovány v odborných člancích. Tyto články jsou uvedeny ve čtvrté

kapitole disertace. Publikování článků s aplikacemi matematických metod bylo třetím cílem práce.

Jedná se celkem o 5 odborných článků. První 4 články byly již publikovány v recenzovaných časopisech, a jsou proto uvedeny pouze formou shrnutí. Poslední článek, který nebyl dosud publikován, je uveden v plném znění. Je ve formě k odeslání do recenzního řízení. Články 1 a 2 jsou zaměřeny na problém interpolace výškopisných dat a tvorby digitálního modelu terénu. Zabývají se optimalizací metody RST pro konkrétní typy vstupních dat pro modelování půdní eroze. Článek 3 analyzuje prostorovou strukturu půdních dat a pedogenezi půd Žofínského pralesa. Články 4 a 5 se zabývají prostorovými vlastnostmi výskytu silných dešťů a mapováním erozního faktoru deště.

Materiál a metodika

Prostorová interpolace

Prostorová interpolace bývá typicky vyjádřena jako lineární kombinace dat nebo jako lineární kombinace zvolených funkcí. Metody založené na prvně jmenovaném přístupu, tj. metody vážených průměrů, jsou vyjádřeny vzorcem

$$z(x) = \sum_{i=1}^N w_i(x) f_i,$$

kde koeficienty w_i jsou váhy a f_i datové hodnoty.

Druhý přístup je založen na lineární kombinaci zvolených funkcí ρ_k

$$z(x) = \sum_{k=1}^M \lambda_k \rho_k(x).$$

Dobré výsledky při interpolaci prostorových dat dávají některé radiální báze funkce (RBF) v kombinaci s konstantou nebo polynomem nízkého řádu. Speciálně, zejména pro výšková data, se osvědčil regularizovaný spline s tenzí (RST). Tuto metodu jsme použili v řadě aplikací, a v disertaci je odvozen tvar její báze funkce a vztah k metodě kriging.

Metoda RST byla představena autory Mitášová & Mitáš (1993). Je založena na variačním přístupu vycházejícím z práce Talmi & Gilat (1977). Je používána jako interpolační metoda pro tvorbu digitálních modelů terénu (DMT) a implementována v softwarech pro zpracování DMT a geografických informačních systémech (GIS), mj. v nejrozšířenějším open source GIS (GRASS GIS 2012).

Interpolační funkce RST je dána vzorcem

$$z(x) = a + \sum_{i=1}^N \lambda_i R(x_i, x),$$

kde a a λ_i jsou reálné koeficienty a N počet vstupních bodů. $R(x, y)$ je jádrová funkce

$$R(x, y) = - \left\{ \ln \left[\left(\frac{\varphi \cdot |x - y|}{2} \right)^2 \right] + E_1 \left[\left(\frac{\varphi \cdot |x - y|}{2} \right)^2 \right] + C_E \right\},$$

kde E_1 je exponenciální integrální funkce $E_1(x) = \int_x^{\infty} t^{-1} e^{-t} dt$, C_E Eulerova konstanta ($C_E = 0.577215$) a φ je reálný volitelný parametr metody ($\varphi > 0$). Jedná se tedy o lineární kombinaci $N+1$ funkcí, z toho jedné konstantní funkce (a) a N funkcí vzdálenosti mezi interpolovaným bodem a vstupními body – $R(x_i, x)$.

Řešení interpolačního problému spočívá v nalezení $N+1$ koeficientů (a a λ_k). Ty jsou získány řešením soustavy $N+1$ lineárních rovnic

$$a + \sum_{k=1}^N \lambda_k R(x_k, x_i) = f_i, \quad i = 1, \dots, N$$

$$\sum_{k=1}^N \lambda_k = 0,$$

kde f_i jsou měření interpolované veličiny v bodech x_i . V práci je odvozen výše uvedený tvar báze funkce RST, popsán případ přesné interpolace i aproximace a vztah k metodě kriging.

Digitální modely terénu

Omezíme-li se na zemský povrch bez převislých tvarů, můžeme digitální model terénu chápat jako popis zemského povrchu pomocí explicitně vyjádřené plochy $z = z(x, y)$ pokrývající nějakou množinu $D \subset R^2$. Funkce z , která přiřazuje polohovým souřadnicím výškové hodnoty, je obvykle konstruována jednoduchou interpolační metodou nad daty DMT (metoda nejbližšího souseda, lineární interpolace). Data DMT jsou tvořena body v R^3 , které jsou nejčastěji organizovány v rastru nebo nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN).

Výškopisná data mapující terén jsou pořizována různými technologiemi. Jedná se o fotogrammetrii, radarové a laserové měření, GPS nebo tradiční mapování

výškopisu. Kvantitativní analýzou tvaru zemského povrchu se zabývá celá disciplína zvaná geomorfometrie (např. Pike 1995). Předmětem jejího studia jsou prostorové veličiny popisující terénní plochu, např. sklonitost, orientace svahu, křivost. Ty jsou při modelování terénních procesů vstupem do numerických modelů. Jako příklad budiž uvedena profilová křivost terénu (křivost terénní plochy ve směru gradientu)

$$\kappa_p = \frac{z_{xx}z_x^2 + 2z_{xy}z_xz_y + z_{yy}z_y^2}{(z_x^2 + z_y^2)(z_x^2 + z_y^2 + 1)^{3/2}},$$

kde parciální derivace jsou označeny indexem příslušné proměnné a druhé parciální derivace zdvojeným indexem. Připomeňme, že derivace lze spočítat simultánně při interpolaci metodou RST.

Modelování eroze

Vodní eroze půdy je přirozeným procesem, který má vliv na fungování ekosystémů různých úrovní. Zrychlená eroze je naproti tomu důsledkem nepřirozeného antropogenního narušení vegetačního krytu, ke kterému dochází již s příchodem člověka zemědělce a pokračuje do současnosti. Dochází při ní ke ztrátě hodnotného přírodního zdroje, dlouhodobé ztrátě úrodnosti půdy, plošnému znečištění povrchových vod a také k přímým materiálními škodám při zanášení pozemků, vodních nádrží, toků nebo infrastruktury.

Popis plošné eroze je spjat s povrchovým odtokem, který způsobuje přemísťování půdního materiálu. Potom co se dešťová srážka nestačí vsakovat a jsou zaplněny deprese mikroreliefu, vzniká povrchový odtok. Povrchový odtok má schopnost transportovat půdní materiál. Maximální množství transportovaného materiálu povrchovým odtokem je označováno jako transportní kapacita. Maximální množství erodovaného materiálu povrchovým odtokem je označováno jako erozní kapacita. Podstatou modelování eroze je jejich vyčíslení a stanovení jejich vztahu. Jednoduché modely eroze předpokládají speciální případy. Např. USLE nebo RUSLE3D zohledňují pouze erozní účinek povrchového odtoku, naproti tomu např. USPED modeluje erozi/depozici půdy divergencí transportní kapacity.

Univerzální rovnice ztráty půdy (USLE) - Wischmeier & Smith (1978) je nejpoužívanější koncept pro odhad ztráty půdy ze zemědělských pozemků. Ztráta půdy je modelována pomocí vztahu

$$D = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad [t/(ha \cdot rok)],$$

kde součinitelé jsou tzv. faktory, které číselně vyjadřují erozní vliv jednotlivých geografických složek: R je faktor deště, K je faktor erodovatelnosti půdy související hlavně s texturou a strukturou půdy a obsahem humusu, LS popisuje vlastnosti

terénu projevující se ve vlastnostech povrchového odtoku, C faktor vystihuje ochranný vliv vegetace a P faktor - ochranný vliv protierozních opatření. Vztahy pro výpočet jednotlivých faktorů z běžně dostupných dat byly odvozeny empiricky na trénovacích pozemcích.

R faktor je získáván ze srážkového měření, dá se vyjádřit pro každou dešťovou událost, a podobně jako dešťové úhrny se často vyjadřuje kumulovaně za určité období. Podle Wischmeier & Smith (1978) je R faktor vypočítán jako

$$R = EI_{30} = E_d / 100 \cdot I_{30}$$

$$E_d = \int_{t_1}^{t_2} I(t) \cdot (89 \log I(t) + 210) dt ,$$

kde $I(t)$ je intenzita deště [cm/h], I_{30} je maximální 30 minutový úhrn během události.

LS faktor sdružuje dva vzájemně provázané faktory: faktor délky svahu a faktor sklonitosti. Mitášová (1998) navrhla výpočet LS faktoru pro daný bod (rastrový element)

$$LS = (m + 1) \left(\frac{A}{22.1} \right)^m \left(\frac{\sin \beta}{\sin 5.14^\circ} \right)^n ,$$

kde A je sběrná plocha, β je úhel sklonitosti a koeficienty m , n se volí v závislosti na typu povrchového odtoku.

Model USPED (Mitášová 1996, Mitáš & Mitášová 1998) je založen na předpokladu, že povrchový odtok je v každém bodě r na úrovni transportní kapacity. Odhad eroze/depozice je vyjádřen divergencí toku sedimentu

$$D(r) = \nabla \cdot [T(r) \cdot \vec{s}(r)] = \frac{\partial(T \cdot \cos \alpha)}{\partial x} + \frac{\partial(T \cdot \sin \alpha)}{\partial y} ,$$

kde \vec{s} je jednotkový vektor směru spádu, α je směr spádu (nebo orientace svahu).

Transportní kapacita se odhaduje na základě rovnice pomocí koeficientů USLE.

$$T = R \cdot K \cdot C \cdot P \cdot A^m \cdot \sin^n \beta .$$

Samotný model USPED nebyl kalibrován, a proto výsledné hodnoty eroze/depozice jsou relativní, avšak dobře použitelné např. pro mapování koluviálních půd (Mitáš & Mitášová 1998, Bek 2007).

Při studiu vlivu reliéfu na vodní erozi se zavádí topografický potenciál eroze a depozice

$$ED(r) = \frac{\partial(A^m \sin^n \beta \cdot \cos \alpha)}{\partial x} + \frac{\partial(A^m \sin^n \beta \cdot \sin \alpha)}{\partial y},$$

který má přímý vztah k profilové a tangenciální křivosti terénu, κ_p , resp. κ_t (speciálně pro $m = n = 1$):

$$ED(r) = (\nabla A) \cdot \sin \beta \cdot \vec{s} - A(\kappa_p + \kappa_t).$$

Výsledky a diskuse - Odborné články

V rámci doktorského studia autora vzniklo 5 odborných článků s aplikacemi výše uvedených metod.

1) **Bek, S., Chuman, T., Šefrna, L. (2008):** *The Usability of Contours in Erosion Modelling: A Case Study on ZABAGED, Czech Republic. Acta Universitatis Carolinae Geographica, 1-2, pp. 77-86.*

2) **Bek, S., Ježek, J. (2011):** *Optimization of interpolation parameters when deriving DEM from contour lines. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 25, pp. 1049-1055.*

3) **Šamonil, P., Valtera, M., Bek, S., Šebková, B., Vrška, T., Houška, J. (2011):** *Soil variability through spatial scales in a permanently disturbed primeval spruce-fir-beech Forest, European Journal of Forest Research, 130, pp. 1075-1091.*

4) **Bek, S., Ježek, J., Bližňák, V. (2010):** *Spatial Relationships of Heavy Rains in the Czech Republic. Advances in Geosciences, 25, pp.85-90.*

5) **Bek, S., Ježek, J.:** *Mapping Rainfall Erosivity using Gauge and Weather Radar Data.*

První čtyři články prošly řádným recenzním řízením a jsou publikovány v uvedených časopisech. Tyto články v disertaci uvádíme ve formě shrnutí. Poslední článek (č. 5) nebyl dosud publikován, proto ho uvádíme v plném znění. Tam, kde je autor disertace uveden na prvním místě, byl jeho podíl na publikaci podstatný, zahrnoval zejména rešerši, formulaci článku, sestavení numerických modelů (včetně naprogramování použitých metod), diskuzi výsledků i komunikaci s editory. U třetího článku byl podíl pouze částečný.

Autor se v první fázi doktorského studia věnoval problému interpolace výškopisných dat a tvorby digitálního modelu terénu. Přitom důkladně nastudoval interpolační metodu RST a zabýval se její optimalizací pro konkrétní typy vstupních dat s aplikačním zaměřením na modelování půdní eroze. Výsledkem byly

články 1 a 2, jeden ve spolupráci s kolegy z Katedry fyzické geografie a geokologie Přírodovědecké fakulty UK, druhý ve spolupráci se školitelem.

Na základě komunikace s kolegy z Mendelovy univerzity v Brně a Výzkumného ústavu Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví vznikl článek (č. 3) analyzující prostorovou strukturu půdních dat a pedogenezi půd Žofínského pralesa. Autor do něho přispěl vyhodnocením prostorové závislosti půdních dat a interpretací výsledků v souvislosti s půdotvornými procesy.

Problematiku prostorových vlastností výskytu silných dešťů a mapování erozního faktoru deště diskutoval autor disertace s kolegy z Ústavu fyziky atmosféry a z Katedry hydromeliorací a krajinného inženýrství ČVUT. Touto problematikou se zabývají články 4 a 5.

Využitelnost vrstevnic pro erozní modelování: případová studie na datech Zabaged v České republice

Vliv tvaru terénu na proces půdní eroze (a depozice) lze kvantifikovat topografickým potenciálem eroze (a depozice), který je odvozenou charakteristikou vypočtenou na rastrovém digitálním modelu terénu (DMT). Vrstevnice jsou v regionálním měřítku nejdostupnějším a často používaným zdrojem výškopisných dat pro tvorbu DMT. V České republice se jedná zejména o vrstevnice Základní báze geografických dat (Zabaged). Pro výpočet topografického potenciálu eroze (a depozice) je proto nejprve potřeba vytvořit rastrový DMT z vrstevnic, a přitom nepoškodit výškopisnou informaci, kterou v sobě vrstevnice obsahují. Kvalita výsledného rastrového DMT totiž podstatně ovlivňuje prostorové rozdělení topografického potenciálu eroze a depozice.

Cílem toho článku bylo ověřit, zda a do jaké míry jsou vrstevnice použitelné pro modelování půdní eroze a depozice v měřítku zemědělského pozemku. V zájmovém území byl porovnán rozdíl prostorového rozdělení topografického potenciálu eroze a depozice vypočteného na (i) DMT vytvořeném z vrstevnic, a na (ii) DMT vytvořeném detailní tachymetrií. Druhý jmenovaný DMT byl řádově přesnější a sloužil při porovnání jako referenční. Oba DMT byly přitom vytvořeny metodou RST s optimalizovanými parametry.

Na velmi sklonitých částech území (okolo 15°) a jejich úpatí oba rastry shodně popisovaly přechod od vysokého potenciálu eroze po vysoký potenciál depozice. Naopak velké rozdíly byly zaznamenány v ostatních částech území, zejména v ose zájmového území, která je tvořena terénním zářezem a v částech svahu se sklonitostí menší než 10° , tj. v oblastech s nižšími potenciály eroze a depozice.

Bylo shrnuto, že topografický potenciál eroze a depozice vypočtený na základě vrstevnicových dat Zabaged vykazuje významné nepřesnosti v mapování skutečného topografického potenciálu eroze a depozice. Vrstevnice Zabaged mohou být využity pouze pro identifikaci oblastí s extrémním potenciálem eroze a depozice. Nezachycují detailní prvky terénu, z nichž některé mají na erozi podstatný vliv. Tato skutečnost by měla být zohledněna při navrhování protierozních opatření.

Optimalizace interpolačních parametrů při tvorbě rastrového DMT z vrstevnic

Při digitálním mapování půd nebo erozním numerickém modelování se výškopisná data obvykle používají v rastrové formě. Pro dané rozlišení je tedy nutné data zpracovat do této podoby a provést morfometrickou analýzu spočívající ve vytvoření rastrů topografických vlastností. Kvalita takto připravených dat odpovídá nejen kvalitě vstupních dat ale také kvalitě jejich zpracování. Digitalizované vrstevnice z topografických map jsou v regionálním měřítku nejdostupnějším a nejlevnějším zdrojem výškopisných dat. Přestože existují metody vytvořené speciálně pro liniová data, často se postupuje tak, že se z vrstevnic vytvoří body, které se zpracují jednou z metod prostorové interpolace. Přitom je třeba zabývat se tím, jak převod vrstevnic na body (vzorkování) ovlivňuje výsledek interpolace.

Obecnou otázkou je, jak hodnotit kvalitu výsledného DMT, tedy podle jakých kritérií optimalizovat parametry interpolační metody. Pokud máme k dispozici jiný DMT, který vznikl z řádově kvalitnějších dat a který můžeme označit jako referenční, můžeme potom spočítat rozdíl mezi výsledným a referenčním modelem (např. formou směrodatné odchylky), a za optimální výsledný model prohlásit ten, pro který bude tento rozdíl minimální. Obvykle však referenční model nemáme. Jistou možností je volit různé interpolační parametry a vizualizovat výsledný DMT a na něm spočtené topografické vlastnosti. Tento postup je ale časově náročný a v mnoha v případech zavádějící. Řešení tohoto problému nabízí krosvalidace.

Tento článek se zabývá optimalizací parametrů interpolační metody regularizovaného splinu s tenzí (RST) při použití vrstevnicových dat. Volba parametrů je testována na prostorové distribuci topografického potenciálu eroze a depozice. Výsledné modely jsou mimo kvantitativního hodnocení kontrolovány vizuálně, aby byly odhaleny případné artefakty. Optimalizace je diskutována pro oba případy, kdy referenční DMT je a není k dispozici.

Výsledky ukázaly, že vzorkovací krok je klíčový interpolační parametr při tvorbě DMT z vrstevnic, jehož špatné nastavení může vést k znehodnocení výsledného DMT a výsledků následného erozního modelování. Byly hodnoceny dva kontrastní případy: s a bez referenčního modelu. Pokud byl k dispozici referenční model,

vzorkovací krok λ nehrál tak důležitou roli. Byl identifikován široký interval hodnot λ od 10 m po 60 m, pro které se daly optimalizovat zbývající dva parametry tak, že byly získány velice podobné výsledné modely. Je tedy dobré volit vyšší hodnotu a redukovat tak výpočetní náročnost.

Pokud referenční model nebyl k dispozici a k optimalizaci byla použita krosvalidace, bylo nejen neefektivní, ale i nevhodné, volit nízké hodnoty λ . V uvedeném případě bylo nutné volit λ vyšší než 35 m, aby výsledný model neobsahoval artefakty způsobené buď interpolační metodou nebo nepřesností vrstevnic.

Půdní variabilita permanentně disturbované jedlo-smrkové bučiny

Žofínský prales je jeden z nejdéle chráněných lesů v Evropě s přirozeným vývojem bez zásahů člověka. Tradiční teorie vývoje půd předpokládaly, že vývraty stromů nemají zásadní vliv na vývoj půd a jejich variabilitu a že pouze zpomalují dosažení klimaxového stádia. V poslední době ale mnohé studie ukázaly, že vývraty přispívají spíše k dlouhodobému zvyšování variability půd a že jsou klíčovým půdotvorným procesem.

Cílem této studie bylo charakterizovat rozmanitost a prostorovou variabilitu půd v Žofínském pralese, kde přirozeně dochází k vývratovým disturbancím, a porovnat výsledky s podobnými lokalitami, kde dochází k zásahům člověka, a diskutovat výsledky v kontextu obecných teorií vývoje půd. Úkolem autora disertační práce bylo v rámci této studie vyhodnotit prostorovou závislost půdních dat a interpretovat výsledky v souvislosti s půdotvornými procesy.

Variogramy mocností horizontů ukázaly, že níže položené horizonty mají kratší dosah než výše položené horizonty. Zatímco pro horizont O byl dosah variogramu okolo 100 m, pro nejnižše položený horizont B méně než 50 m. Chemické vlastnosti autokorelovaly lépe a na mírně vyšší vzdálenost. Společným rysem všech půdních vlastností byla vysoká prostorová variabilita, která měřítkově odpovídá půdotvorným procesům souvisejícím s mikrotopografií nebo vývraty stromů. Nižší prostorová variabilita mocnosti výše položených horizontů souvisí pravděpodobně se skutečností, že tyto půdní horizonty regenerují po vývratových disturbancích rychleji než níže položené horizonty. Jiné studie, sledující variabilitu půdních vlastností v hospodářských lesích, naopak shledaly vyšší prostorovou variabilitu mocnosti výše položených půdních horizontů, související pravděpodobně s intenzivní antropogenní aktivitou. Výsledky půdního průzkumu také ukázaly vysokou prostorovou variabilitu půdních jednotek, což přispívá k názoru, že vývratové disturbance dlouhodobě postihují už v minulosti disturbovaná místa, a naopak na jiných místech k disturbancím nedochází.

Prostorové vztahy silných dešťů v České republice

Silné dešťové události během teplého půlroku jsou obvykle způsobeny masivní konvekcí vlhkého vzduchu. Tyto deště mají vysoký potenciál působit lokální povodně, erozi půdy nebo poškozovat majetek, přitom jsou špatně předpověditelné a znalost jejich prostorového rozdělení je nedostatečná. Obecně je velice dobře známo, že srážky mají vztah k orografii. Tyto vztahy byly v mnoha studiích zkoumány podle různých aspektů: na jedné straně různé dlouhé úhrny srážek, od roční úhrnů po úhrny za jednotlivé události, maximální srážkové intenzity nebo frekvence výskytů, na druhé straně nadmořská výška, drsnost reliéfu nebo jiné topografické vlastnosti. Sokol a Bližňák (2009) zkoumali vztah úhrnů silných dešťových událostí a nadmořské výšky. Zjistili, že globální korelace s nadmořskou výškou klesá s rostoucí extremitou srážky, a korelace extrémních srážek s nadmořskou výškou nebyla prokázána.

Tento článek rozšiřuje výzkum Sokola a Bližňáka (2009). S jejich daty, ale prostorově definovanými srážkovými událostmi, prezentuje nové výsledky korelace silných dešťů s orografií.

Roční úhrny silných dešťů korelují s nadmořskou výškou globálně pro celé území ČR, přičemž tato závislost slábne se zvyšujícím se prahem jejich definice. Vztah intenzity deště na orografii nebyl prokázán. Nejvyšší intenzity byly dosahovány na jihovýchodě ČR v oblastech s nízkou nadmořskou výškou. Četnost výskytu silných dešťů korelovala s nadmořskou výškou ještě lépe než jejich úhrny. Nejvyšší podíl silných dešťů na celkovém úhrnu byl identifikován na severozápadě ČR.

Mapování erozivity deště z dat srážkoměrných stanic a meteorologického radaru

R-faktor bývá obvykle odvozován z dlouhých řad měření srážek srážkoměrnými stanicemi. Taková data jsou však k dispozici pouze v řídké prostorové síti a interpolace R-faktoru je potom dosti nepřesná. Radarová data nejsou tak přesná jako staniční a mají nižší časové rozlišení, zato jsou dostupná v husté síti pokrývající celé území.

V tomto článku byla použita srážková data z radarového měření jako pomocná data při interpolaci dat R-faktoru ze srážkoměrných stanic. Kombinace těchto dat byla provedena univerzálním krigingem s externím driftem. Výsledná interpolace R-faktoru pro ČR má prostorové rysy radarového R-faktoru, přitom je však kalibrována na hodnoty staničního R-faktoru. Druhá varianta interpolace byla provedena se shlazenými radarovými daty, čímž byla zohledněna chyba radarového určení R-faktoru a krátká doba měření.

Hlavním přínosem článku je zejména jeho metodologická část, která nabízí prostředky při detailním hodnocení prostorových vlastností erozního účinku deště. Článek přispívá do série pokusů o regionalizaci R-faktoru na našem území, která je shrnuta např. Krásou a kol. (2014). Přes omezený časový rozsah dat, který byl dostupný pro zpracování článku, je výsledek ve shodě s datově obsažnějšími pracemi, např. Hanel (2013). Článek rovněž potvrdil korelaci R-faktoru s nadmořskou výškou.

Článek nebyl dosud publikován, a je v práci uveden v plném znění.

Závěr

Disertační práce se zabývá vybranými metodami prostorové interpolace a jejich využitím při numerickém modelování tvaru povrchu Země, zejména eroze půd.

Práce sestává z části teoretické (kapitola 1.-3.), ve které byly odvozeny nebo alespoň popsány matematické metody a modely použité v odborných člancích uvedených v části aplikační (kapitola 4.). V poslední době je uznávanou formou disertační práce svazek publikovaných článků doprovázený komentářem. V případě předložené disertace však bylo nutné vložit také podrobnější pojednání o teoretickém aparátu. Jednak proto, že samotné odborné články byly publikovány v časopisech zaměřených na oblast aplikace (studium tvaru povrchu Země a erozních procesů) a matematický popis v nich uvedený je tudíž minimální, a jednak proto, aby byl proveden ucelený výklad důležitých aspektů a odvozeny, popř. předvedeny, výsledky, jejichž prezentace v původních člancích byly nejasné. To se týká zejména první kapitoly, kde byl podán detailní popis metody RST a odvozena forma její báze funkce.

Aplikace metod popsaných v disertaci byly použity v celkem 5 odborných člancích, které přinesly řadu nových poznatků v oblasti tvorby digitálních modelů terénu, modelování vodní eroze půd, vývoje půdních horizontů nebo geografii extrémních dešťů.

Při optimalizaci tvorby digitálních modelů terénu byly navrženy intervaly vzorkovacích kroků při převodu izolinií na body a bylo ukázáno, že hodnoty kroků, které by se mohly intuitivně zdát vhodné, jsou zcela nevyhovující a jejich volba může vést k znehodnocení výsledného DMT a výsledků následného modelování. Na příkladu topografického potenciálu eroze a depozice bylo ukázáno, že data výškopisu Zabaged lze použít při modelování eroze pouze k identifikaci oblastí extrémně ohrožených erozí, protože výškopis Zabaged nezachycuje z hlediska

mapování eroze podstatné prvky terénu. Velice zajímavé závěry přineslo studium prostorových vlastností půd Žofínského pralesa. Výsledky daly za pravdu novému pohledu na pedogenezi lesních půd, který předpokládá, že vývraty stromů jsou klíčovým půdotvorným procesem, který přispívá k dlouhodobému zvyšování variability půd. Tradiční teorie naproti tomu předpokládaly, že vývraty nemají zásadní vliv na vývoj půd.

Bylo dosaženo nových výsledků v oblasti geografie silných dešťů při zpracování a vyhodnocení radarových měření srážek. Byla potvrzena závislost četností silných dešťů na nadmořské výšce a slábnutí této závislosti s rostoucí extremitou deště. V dalším článku byly silné deště studovány v souvislosti s prostorovým rozdělením erozivity deště (R-faktoru). Byl sestaven interpolační postup integrující svou povahou značně odlišná data: R-faktor ze staničních měření a R-faktor odvozený z radaru. U výsledného R-faktoru byla prokázána silná závislost na nadmořské výšce.

Kromě publikovaných článků a předložené disertace mělo doktorské studium nezanedbatelný dopad na autorovo CV. Osvojený matematický aparát a zkušenosti při získávání vědeckých výsledků se staly základem pro autorovu další profesionální práci. Autor disertace je současně programátorem v oblasti geografických informačních systémů, vyvíjí komerční software Atlas DMT určený pro zpracování výškopisných dat. Díky funkční spolupráci autora s předními akademickými pracovišti se společnosti Atlas daří převádět nové vědecké poznatky do praxe. Příkladem takové spolupráce s ČVUT a Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půdy bylo vytvoření modulu "Atlas Eroze - moderní nástroj pro hodnocení erozního procesu", jehož je autor disertace hlavním programátorem. Tento modul byl pozitivně přijat jak ze strany projektantů pozemkových úprav, tak ze strany Státního pozemkového úřadu. Autor disertace je dále autorem speciálních nástrojů pro zpracování bodových mračen, nástrojů pro analýzu hodnocení kvality vozovek nebo implementací webových mapových služeb.

**Charles University in Prague, Faculty of Science
Institute of Applied Mathematics and Information
Technologies**

Ph.D. study program: Applied Mathematics

Summary of the Ph.D. Thesis



Spatial interpolation and soil erosion modeling

Stanislav Bek

Supervisor: Doc. RNDr. Josef Ježek, CSc.

Praha 2015

Abstract

The doctoral thesis deals with selected methods of spatial interpolation and their applications to numerical modeling of the earth's surface, in particular soil erosion.

The first part contains the description of the studied methods. Firstly and foremost, the method called regularized spline with tension (RST) is introduced. It has proven to be useful in interpolating elevation data. In the thesis, RST is presented in depth with the derivation of its radial basis function and its links to kriging. Further on the mathematics of digital terrain models and the tools for terrain geometric analysis are covered. The following chapter deals with the description of the soil erosion process and of the selected erosion models.

The second part of the thesis summarizes five of the author's research articles which include applications of the described mathematical methods. The first two articles are devoted to the problem of elevation data interpolation and the building of digital elevation models. They deal with the optimization of the RST method for particular input data and target erosion models. The third article analysis the spatial structure of the soil data and the pedogenesis of the Žofínský prales natural forest. The last two articles deal with the spatial properties of heavy rainfalls and the mapping of rainfall erosivity.

Introduction and aims of the thesis

The doctoral thesis deals with the selected methods of spatial interpolation and their applications for numerical modeling of the earth's surface, in particular soil erosion.

The first part of the thesis, chapter 1-3, contains the description of the studied methods. The second part, chapter 4, summarizes the author's research articles with the application of the methods.

Spatial interpolation is the basic task of geographic data processing. The aim of the interpolation is mostly to compute (estimate) values of a spatial variable in a regular grid. The interpolation result is subsequently used in a broad spectrum of applications, such as visualization or preparation of inputs to numerical models of terrain and related processes, such as rainfall activity and soil erosion.

There are many interpolation methods. Their suitability depends on the data, character of a spatial variable under study, software affordability, speed of interpolation algorithm etc. In view of the thesis, those can be divided into two groups regarding two competitive aspects: the minimization of error, and the shape

of the resulting surface. The method called regularized spline with tension (RST; Mitášová & Mitáš 1993) has proven to be useful for the interpolation of elevation data. It achieves a high level of accuracy while preserving the realistic shape of the interpolated surface. The interpolated surface is continuous, as well as the derivatives (of all orders), and the derivatives are computed simultaneously with interpolation. Local behavior enables application of segmented processing for large datasets. In the thesis, this method is therefore in the center of our interest.

The both groups of methods are described in literature and there are also comparative studies which are mostly based on case studies. Numerous users of geographic information systems (or similar systems) use the implemented methods without their proper knowledge and the importance of their parameter settings. Those who try to study the methods run into the problem of incomplete or unclear explanation of the mathematical description. Therefore, the first aim of the thesis is to present a clear and continuous description of the RST method in the context of spatial interpolation, while precisely explaining the missing parts in the literature and showing its links to kriging. This all is included in the first chapter.

Accelerated soil erosion is one of the most serious environmental problems. For example, in the Czech Republic about half of the arable land is threatened by the water erosion (Janeček 2012). The accelerated soil erosion causes the loss of a valuable natural resource, long-term loss of soil fertility, increased pollution of surface waters, and direct material damage. The mathematic modeling is an efficient tool in order to diminish soil erosion.

Soil erosion models describe the dependence of soil loss or its redistribution, on geographic factors. The second aim of the thesis is to study the topographical and rainfall factors in relationship to the interpolation methods. The preparation of inputs to soil erosion models (e.g., building digital elevation model, derivation of surface curvatures or interpolation of rainfall erosivity) is in fact an example of interpolation application where the choice of the method and their parameters is of crucial importance in respect to the interpolation results and the interpretation of the spatial relationships.

The mathematics regarding the digital description of the terrain is presented in the second chapter of the thesis. This chapter also describes the tools for terrain geometric analysis which is used subsequently as an input to erosion models. The third chapter deals with the description of the soil erosion process and of the selected erosion models.

In the course of his doctoral studies the author addressed numerous special problems in the form of application of various mathematical methods which needed to be studied in depth, implemented (Matlab, C++) and used in a proper way in the given application. Some of the results of the numerical modeling and their

interpretations were published in several research articles. These articles are presented in the fourth chapter of the thesis. The publishing of the articles with the applications of the mathematical methods was the third aim of the thesis.

There are five research articles. The first four of them were already published in scientific journals, and presented in a summarized form in the thesis. The last one, which has not yet been published, is given in full. The first two articles are devoted to the problem of elevation data interpolation and the building of digital elevation model. They deal with the optimization of the RST method for particular input data and target erosion models. The third article analysis the spatial structure of the soil data and the pedogenesis of the Žofínský prales natural forest. The last two articles deal with the spatial properties of heavy rainfalls and the mapping of rainfall erosivity.

Material and methods

Spatial interpolation

Spatial interpolation is commonly expressed as a linear combination of data or as a linear combination of chosen functions. The methods based on the former approach, i.e., weighted average methods, are expressed by

$$z(x) = \sum_{i=1}^N w_i(x) f_i ,$$

where the coefficients w_i are the weights and f_i the data values.

The second approach is based on the linear combination of chosen functions ρ_k

$$z(x) = \sum_{k=1}^M \lambda_k \rho_k(x) .$$

Good results of the spatial data interpolation are obtained by some radial basis functions (RBF) in combination with a constant or a low order polynomial. Especially for elevation data the regularized spline with tension (RST) has proven to be the right choice. We used this method in numerous applications and its radial basis function and links to kriging are derived throughout the thesis.

The RST method was published by Mitášová & Mitáš (1993). It is based on the variational approach presented by Talmi & Gilat (1977). It is used as an interpolation method for the building of digital elevation models (DEM) and was implemented in several softwares for DEM processing and geographic information systems, including open source GRASS GIS (2012).

The interpolation function is given by

$$z(x) = a + \sum_{i=1}^N \lambda_i R(x_i, x),$$

where a and λ_i are real coefficients and N is the number of input points. $R(x, y)$ is the radial basis function

$$R(x, y) = - \left\{ \ln \left[\left(\frac{\varphi \cdot |x - y|}{2} \right)^2 \right] + E_1 \left[\left(\frac{\varphi \cdot |x - y|}{2} \right)^2 \right] + C_E \right\},$$

where E_1 is exponential integral function $E_1(x) = \int_x^{\infty} t^{-1} e^{-t} dt$, C_E is Euler constant ($C_E = 0.577215$) and φ is a real arbitrary parameter of the method ($\varphi > 0$). The interpolation function is a linear combination of $N+1$ functions including one constant function (a) a N functions of the distance between the point of interpolation and the input points $R(x_i, x)$.

The coefficients a and λ_i of the interpolation function z are found by solving the following system of $N+1$ linear equations by which are computed

$$a + \sum_{k=1}^N \lambda_k R(x_k, x_i) = f_i, \quad i = 1, \dots, N$$

$$\sum_{k=1}^N \lambda_k = 0,$$

where f_i are the measurements of the interpolated variable at points x_i . In the thesis, the radial basis function of the RST method and the links to the kriging method are given.

Digital elevation models

Except for rock overhangs, the digital elevation model (DEM) can be perceived as a function of spatial coordinates $z = z(x, y)$ describing the elevation above or below a fixed reference level (Earth's sea). The function z is usually constructed by a simple interpolation method using the DEM data (e.g., nearest neighbor or linear interpolation). The DEM data consists of points in R^3 which are organized mostly in regular grid or triangulated irregular network (TIN).

Elevation data are collected using various technologies, e. g. photogrammetry, radar or laser scanning, GPS, or field measurement. Geomorphometry deals with

quantitative land surface analysis and studies terrain spatial variables (slope, slope orientation, curvatures, upslope contributing area) which serve as an input to numerical modeling (e.g., Pike 1995). As an example, let us show the profile curvature of terrain (the curvature in the gradient direction)

$$\kappa_p = \frac{z_{xx}z_x^2 + 2z_{xy}z_xz_y + z_{yy}z_y^2}{(z_x^2 + z_y^2)(z_x^2 + z_y^2 + 1)^{3/2}},$$

where the partial derivatives are denoted by small indices x or y , and the second partial derivatives by double indices. Let us remember that derivatives are computed simultaneously with the RST interpolation.

Soil erosion modeling

Soil erosion is a natural process which influences ecosystems at various scales. Due to human activity soil erosion is accelerated and causes the loss of a valuable natural resource, long-term loss of soil fertility, increased pollution of surface waters, and direct material damage.

The description of soil erosion is related to the overland water flow originating from the difference between rainfall and infiltration (rainfall excess). Water flow has the potential to sediment transport quantified by sediment flow. The sediment transport capacity and the detachment capacity represent the maximum potential sediment flow rate and the maximum potential detachment rate respectively. Their quantification and the form of their relationship serve as a basis in erosion modeling concepts. Simple erosion models use special cases of sediment transport regimes.

Universal soil loss equation (USLE) - Wischmeier & Smith (1978) is the most popular concept for soil loss estimation. The soil loss is estimated by

$$D = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad [\text{tons}/(\text{hectare} \cdot \text{year})],$$

where the factors express the influence of geographic components: R is the rainfall erosivity factor, K is the soil erodibility factor, LS quantifies the topographic factors, C and P are the cropping management factors. The expressions for the factors were determined empirically on experimental plots.

The rainfall erosivity (R) is obtained from rainfall measurements. It can be computed for every rainfall event and its values are summarized for a certain period of time. As per Wischmeier & Smith (1978), the R factor is expressed by

$$R = EI_{30} = E_d / 100 \cdot I_{30}$$

$$E_d = \int_{t_1}^{t_2} I(t) \cdot (89 \log I(t) + 210) dt ,$$

where $I(t)$ is the rainfall intensity [cm/h], and I_{30} is the maximum rainfall amount recorded in 30 minutes during the event (prolonged peak intensity).

LS factor brings together two mutually related factors: length and gradient of slope. Mitášová (1998) proposed the LS factor to be computed at an arbitrary point (raster element) using

$$LS = (m + 1) \left(\frac{A}{22.1} \right)^m \left(\frac{\sin \beta}{\sin 5.14^\circ} \right)^n ,$$

where A is the upslope contributing area, β is the slope and the coefficients m , n are chosen depending on the prevailing type of flow.

USPED (Mitášová 1996, Mitáš & Mitášová 1998) is another simple model that predicts the spatial distribution of erosion and deposition. It assumes that the sediment flow rate is at the sediment transport capacity. The estimation of soil erosion/deposition is expressed by the divergence of the sediment flow

$$D(r) = \nabla \cdot [T(r) \cdot \vec{s}(r)] = \frac{\partial(T \cdot \cos \alpha)}{\partial x} + \frac{\partial(T \cdot \sin \alpha)}{\partial y} ,$$

where \vec{s} is the unit vector of terrain gradient and α is the angle of gradient direction (i.e., slope orientation).

The transport capacity is estimated by using the USLE coefficients.

$$T = R \cdot K \cdot C \cdot P \cdot A^m \cdot \sin^n \beta .$$

In order to obtain accurate quantitative predictions for complex terrain and land cover conditions, those need to be re-calibrated. However, the model could be used for example for mapping of colluvial deposits (Mitáš & Mitášová 1998, Bek 2007).

The topographic potential for erosion and deposition is introduced in order to study the influence of terrain on soil erosion

$$ED(r) = \frac{\partial(A^m \sin^n \beta \cdot \cos \alpha)}{\partial x} + \frac{\partial(A^m \sin^n \beta \cdot \sin \alpha)}{\partial y} .$$

It relates directly to profile and tangential curvature κ_p , κ_t respectively. In the special case of $m = n = 1$ the potential can be expressed by

$$ED(r) = (\nabla A) \cdot \sin \beta \cdot \vec{s} - A(\kappa_p + \kappa_t) .$$

Results and discussion - Research articles

In the course of his doctoral studies the author wrote five research articles.

1) **Bek, S.**, Chuman, T., Šefrna, L. (2008): *The Usability of Contours in Erosion Modelling: A Case Study on ZABAGED, Czech Republic. Acta Universitatis Carolinae Geographica*, 1-2, pp. 77-86.

2) **Bek, S.**, Ježek, J. (2011): *Optimization of interpolation parameters when deriving DEM from contour lines. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25, pp. 1049-1055.

3) Šamonil, P., Valtera, M., **Bek, S.**, Šebková, B., Vrška, T., Houška, J. (2011): *Soil variability through spatial scales in a permanently disturbed primeval spruce-fir-beech Forest, European Journal of Forest Research*, 130, pp. 1075-1091.

4) **Bek, S.**, Ježek, J., Bližňák, V. (2010): *Spatial Relationships of Heavy Rains in the Czech Republic. Advances in Geosciences*, 25, pp.85-90.

5) **Bek, S.**, Ježek, J.: *Mapping Rainfall Erosivity using Weather Radar Data.*

The first four of them were already published in scientific journals, and presented in a summarized form in the thesis. The last one, which has not yet been published, is given in full. In the articles where the author's name is featured in the first position his contribution was substantial and included in particular, bibliography research, forming the structure of the article, building numeric models, discussion of the results and also communication with the editors. The contribution to the third article was mainly partial.

In the first part of his doctoral studies the author dealt with the problem of spatial interpolation of elevation data and the building of digital elevation models. It included the study of the RST method in depth and optimizing it for the particular input data and erosion modeling. As a result, the articles 1 and 2 were published, the first one in cooperation with colleagues from the Department of physical geography and geocology, Faculty of science, Charles University, the second one with the supervisor.

Based on the communication with the colleagues from Mendel University Brno and The Silva Tarouca Research Institute for Landscape and Ornamental Gardening the article 3 was published analyzing the spatial structure of soil data and pedogenesis of the Žofínský prales natural forest.

The spatial properties of heavy rainfalls and the mapping of rainfall erosivity were discussed with the colleagues from the Institute of Atmospheric Physics, ASCR

and from the Department of irrigation and landscape engineering, CTU Prague. The articles 4 and 5 are devoted to this subject.

The Usability of Contours in Erosion Modelling: A Case Study on ZABAGED, Czech Republic

The soil erosion process is substantially influenced by the terrain morphometry. The influence can be quantified via the topographic index computed from digital elevation model (DEM). The quality of the DEM is crucial for the spatial distribution of the topographic index and its correspondence to reality. Contour lines are the easiest most accessible source of altitude data on the regional scale and are thus frequently being used in environmental projects. In the Czech Republic, the contour lines from the Czech Fundamental Base of Geographic Data (ZABAGED) are the ones being used. Conversion of elevation from contours to the regular grid is necessary for the instances when the DEM is to be used as an input for modeling. The quality of the DEM corresponds then to the precision of the contour lines while the quality of the conversion process from the contours corresponds to the regular grid.

The objective of this paper was to verify whether or to which extent the contours are utilizable for the modeling of soil erosion and deposition on field scale. In the study area spatial distribution of the topographic potential for erosion and deposition was computed and compared on (i) the DEM created from the contour lines and (ii) the DEM created by field measurements. The second one was supposed to be more accurate and was used as a reference for the comparison. Both DEMs were created using the RST method with optimized parameters.

In the steepest part of the study area only (around 15°) both models described erosion and deposition equally. Elsewhere, the differences were high, in particular at the bottom of the narrow valley and in the parts with the slope under 10° .

To be concluded, the topographic potential for erosion and deposition computed from contour based DEM shows large inaccuracies in its spatial distribution. The ZABAGED contours could correctly capture only areas of the highest topographic potential for erosion and deposition, and fail to describe fine terrain elements while some of which have substantial impact on erosion.

Optimization of interpolation parameters when deriving DEM from contour lines

In digital soil mapping and erosion numerical modeling the grid form of DEMs is the one generally used. The elevation data should therefore be interpolated to the grid on which the topographic properties are being analyzed. The quality of the

interpolation is the key factor influencing the quality of the subsequent analysis. Contours are the most accessible and affordable source of elevation data on regional scale. Although some special interpolation procedures for linear data have been developed, the common practice is to convert lines to elevation points and use one of the interpolation methods while the sampling step becomes an additional parameter.

The general question is how to evaluate the quality of the resulting DEM or how to optimize the interpolation parameters. In case we do not have another DEM which would be more precise and therefore potentially be used as a reference (usual case) cross-validation proves to be a feasible option.

This article deals with the optimization of the RST method parameters when contour lines are used as an input. The choice of parameters is tested together with the spatial distribution of the topographic potential for erosion and deposition. The optimization is discussed for both cases, when reference DEM is available or not.

The results showed that the sampling step plays an important role when interpolating DEM from contours. An improper choice can seriously distort the resulting DEM and the subsequent modeling results. Two contrasting cases, with and without a reference DEM, were investigated. If a reference DEM is at disposal the sampling step is less important. In this case, it is possible to optimize the interpolation parameters for a large interval of sampling steps (in our study 10-60 m). A higher sampling step (e.g., 50 m) is recommended to reduce the computational cost. If a reference model is not at our disposal and the cross-validation is used, a small sampling step is not only less effective but it should not be used. In our case it was found that there is an interval of acceptable sampling steps around the optimal value (35-60 m) for which the interpolation can be sufficiently well tuned by the other parameters of the RST method.

Soil variability through spatial scales in a permanently disturbed primeval spruce-fir-beech Forest

The Žofínský prales natural forest reserve has one of the longest continuous protections in Europe, without a human impact on the soil-forming processes. Traditional pedogenetic theories supposed that the uprooting of individual trees does not have a significant impact on soil variability and that the phenomenon only slows down the achievement of the climax stage in soils. Recently, other studies have shown that the local disturbances caused by trees may become a key factor in soil formation.

The aim of this study was to characterize pedodiversity and soil spatial variability through spatial scales in the natural forest and to compare our findings with studies from localities affected by humans and with general theories of soil genesis.

The variograms of soil horizons showed that the lower-situated horizons have shorter range compared to the upper-situated horizons. For organic horizons, the range was about 100 meters, while for A and B-horizons it was less than 50 m. Chemical soil properties showed high spatial continuity. For all the soil variables, relatively high values of semivariance at short distance were found corresponding to the local soil-forming factors, such as micro-topography or uprooting of individual trees. Lower spatial variability of the thickness of upper-situated horizons could be explained with their faster renewal after uprooting disturbances when compared to the lower-situated ones. On the contrary, in managed forests, studies have shown higher spatial variability of the upper-situated horizons which is explained by intensive human impact. The results also showed a high variability of soil types in the study area which supports the opinion that the uprooting happens repeatedly at the same locations whereas other locations remain undisturbed.

Spatial Relationships of Heavy Rains in the Czech Republic

Heavy rains during the warm period of the year are usually caused by strong convection of air mass. Such rain events cause local flash floods, accelerate soil erosion and cause damage on property. In addition, they are hard to predict and the knowledge about their spatial distribution (over the Czech Republic) is insufficient. It is well-known that the spatial properties of precipitation correspond to orography. The relations were studied from various aspects. Sokol and Bližňák (2009) studied the correlation relationships between precipitation totals of short-term heavy rainfalls and altitude. They concluded that the global correlation of the totals decreases with the increasing threshold. For heavy rains, they did not find dependence between the precipitation totals and altitude.

This article extends the effort of Sokol and Bližňák (2009) and presents new results regarding the correlation of heavy rains and orography under differently defined heavy rain events.

To conclude the results: Heavy rain totals correlate with altitude globally over the Czech Republic and the correlation decreases with an increasing threshold. The correlation with the terrain roughness is however significant even for the highest threshold. The correlation of heavy rain intensities with altitude was not proven. The highest intensities are located in the south-eastern parts of the Czech Republic, in relative low altitudes. The spatial distribution of heavy rain frequencies strongly corresponds to the spatial distribution of heavy rain totals. The heavy rain frequencies correlate with altitude even better than the heavy rain totals. The highest percentage of heavy rains out of the total precipitation is located in the north-western areas.

Mapping Rainfall Erosivity using Gauge and Weather Radar Data

Rain gauge minute records are usually used for the computation of rainfall erosivity R-factor. For erosion modeling, R-factor values based on long periods of gauge measurements, are needed. Such measurements are usually only sparsely spatially distributed and must be interpolated which limits the accuracy of the erosion models. Radar rainfall data is not as precise as gauge data having different time resolution, but are in return accessible in a dense raster resolution.

In this article, radar rainfall data was used as an auxiliary to gauge measurements in mapping R-factor over the Czech Republic. The combination of gauge and radar data was accomplished by kriging with external drift. The resulting map honors gauge data, mimics the spatial structure of radar data and is consistent with the regression of gauge measurements on radar data. The interpolation was also performed with smoothed radar data, attributed to different sources of uncertainty of the radar R-factor as well as the short period to which the data measurements go back to.

The methodological part of the study provides tools allowing a detailed evaluation of the spatial relationships of the R-factor. The article contributes to the series of R-factor regionalization attempts in the Czech Republic which was reviewed by Krása (2014). Although the data provided for this article was limited, the result is comparable with other works, e.g., Hanel (2013). The article also confirmed the correlation of the R-factor with altitude.

The article has not been published yet therefore it is given in full.

Conclusions

The doctoral thesis deals with the selected methods of spatial interpolation and their applications to numerical modeling of the earth's surface, in particular soil erosions.

The thesis consists of a theoretical part (chapter 1-3) where mathematical methods were either derived or described. The methods are used in the research articles in the second part of the thesis (chapter 4). In recent literature, the popular form of a thesis is a volume of research articles with comments. However, in the case of the author's thesis it was necessary to publish a more detailed description of the mathematics. It is due to the fact that the research articles were published in scientific journals aimed specifically at application domains and thus did not include mathematical descriptions. Based on the author's literature research, some

explanations or important aspects of the methods were insufficiently explained. For those instances, a complete explanation or a proof is given in the current thesis. This concerns in particular the first chapter of the thesis where the detailed description of the RST method is given and its radial basis function is derived.

The applications of the described methods were used in five research articles which brought new knowledge in the field of digital elevation models, soil erosion, soil-forming processes or the geography of heavy rains.

By optimizing the building of the DEMs, intervals of sampling steps were proposed when sampling isolines to points, having been shown that its improper choice can seriously distort the resulting DEM and the subsequent modeling results. On the example of the topographic potential for erosion and deposition it was shown that the contour data Zabaged is useful for the identification of the extremely vulnerable areas only. Elsewhere the contours fail to describe fine terrain elements while some of which have substantial impact on erosion. The study of spatial properties of soils in the Žofín natural forest reservation brought interesting results. The results confirmed the theory that uprooting of trees is a key soil-forming factor which contributes to the long-term increase of soil variability. New results were presented in the geography of heavy rains when processing radar rainfall measurements. The correlation of heavy rain totals with altitude was confirmed. The spatial distribution of heavy rain totals was found to be given by the spatial distribution of heavy rain frequencies. Heavy rains were also studied in the context of rainfall erosivity. The solution to the interpolation by combining radar rainfall data with gauge data was proposed.

Beside the published research articles and author's thesis, the doctoral study had an impact on the author's CV. The gained experience and knowledge became essential for his professional career. The author is employed as a programmer in the GIS domain, developing the commercial software Atlas DMT, used for elevation data processing. Thanks to the cooperation of the author with the leading academic teams, the employer manages to put science into practice. The example of such a cooperation with CTU Prague and the Czech Research Institute for Soil and Water Conservation, is the software "Atlas Erosion - a modern tool for the evaluation of erosion process" where the author acts as the main developer. This product was very well received by both landscape engineers and state authorities. The author also developed several special tools for point cloud processing, analysis of road quality, implemented web map services, etc.

Použitá literatura / References:

Bek, S. (2007): Digitální mapování koluvizemí. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta.

GRASS Development Team (2012): Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 6.4.2. Open Source Geospatial Foundation. <http://grass.osgeo.org>.

Hanel M. (2013): information of the author – not published results within the project VG 20122015092 "Erosion runoff - increased risk of the residents and the water quality exposure in the context of the expected climate change."T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague, 2013.

Janeček, M. et al. (2012): Ochrana zemědělské půdy před erozí. Metodika. Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí. 113 s.

Krása, J., Středová, H., Dostál, T., Novotný, I. (2014): Rainfall erosivity research on the territory of the Czech Republic. In: Mendel a bioklimatologie. 2014, ISBN 978-80-210-6983-1.

Mitášová, H., Mitáš, L. (1993): Interpolation by regularized spline with tension : I. Theory and implementation. *Mathematical Geology* 25, 641-655.

Mitášová H., Hofierka, J., Zlocha, M., Iverson, L.R. (1996): Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of GIS* 10, no. 5, 629-641.

Mitáš, L., Mitášová, H. (1998): Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water Resources Research* 34, no. 3, 505-516.

Mitášová H., Mitáš L., Brown W.M., Johnston D.M. (1998): Multidimensional soil erosion/deposition modeling and visualization using GIS, Geographic Modeling and Systems Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign, for U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories, Final report 1993 – 1998, Urbana, Illinois, December 1998.

Pike, R.J. (1995): Geomorphometry - progress, practice, and prospect. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband* 101, 221-238.

Sokol, Z., Bližnák, V. (2009): Areal distribution and precipitation–altitude relationship of heavy short-term precipitation in the Czech Republic in the warm part of the year. *Atmospheric Research* 94 (4), 652-662.

Talmi, A., Gilat, G. (1977): Method for smooth approximation of data. *J Comput Phys* 23, 93-123.

Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978): Predicting Rainfall Erosion Losses – A Guide to Conservation Planning. *Agr.Handbook No.537*, US Dept.of Agriculture, Washington.

Curriculum Vitae

Jméno: Stanislav Bek
Adresa: Slovinská 16, Praha 10, 101 00
Telefon: (+420)777835431
Email: bek@natur.cuni.cz
Státní příslušnost: Česká republika
Datum narození: 25.9.1982

Pracovní zkušenosti:

Programátor C++, C#

Organizace: Atlas spol. s r.o., Praha 10, Na křivce 50

Období: 10/2008 – dosud

Pracovní náplň:

vývoj produktu Atlas DMT

vývoj modulu pro modelování eroze půdy

implementace speciálních metod na zpracování DMT

implementace podpory mapových služeb

Výzkumný pracovník

Období: 01/2012 – 12/2014

Pracovní náplň:

řešitel grantu

Název grantového projektu:

Atlas EROZE - moderní nástroj pro hodnocení erozního procesu

Organizace:

ČVUT, Fakulta stavební, KHMKI

Atlas spol. s r.o.

VÚMOP

Grantová agentura: Technologická agentura České republiky

Výzkumný pracovník

Období: 01/2009 – 12/2010

Pracovní náplň:

hlavní řešitel grantu

Název grantového projektu:

Digitální mapování půd výrazně ovlivněných erozně-akumulačním procesem

Grantová agentura: Grantová agentura Univerzity Karlovy

Vzdělání:

Doktorské studium aplikované matematiky, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze

Období: 09/2007 – dosud

Disertační práce: Prostorová interpolace a modelování eroze půd

Titul Mgr. - Magisterské studium fyzické geografie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze

Období: 2002 – 2007

Diplomová práce: Digitální mapování koluvizemí

Zahraniční stáže:

Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Geographisches Institut, Německo

Období: 10/2006 – 08/2007

Universitatea Babeş-Bolyai, Cluj – Napoca, Rumunsko

Období: 04/2008 – 08/2008

Pedagogická činnost:

Matematika (cvičení)

Období: 10/2008 – 02/2009

Organizace: Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy

Ústav aplikací matematiky a výpočetní techniky

Jazykové znalosti:

Mateřský jazyk	český
Jiné jazyky	anglický německý rumunský

Seznam publikací / Selected publications

Bek, S. (2007): Digitální mapování koluvizemí. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta.

Bek, S., Chuman, T., Šefrna, L. (2008): The Usability of Contours in Erosion Modelling: A Case Study on ZABAGED, Czech Republic. *Acta Universitatis Carolinae Geographica*, 1-2, pp. 77-86.

Bek, S., Ježek, J. (2011): Optimization of interpolation parameters when deriving DEM from contour lines. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25, pp. 1049-1055.

Šamonil, P., Valtera, M., Bek, S., Šebková, B., Vrška, T., Houška, J. (2011): Soil variability through spatial scales in a permanently disturbed primeval spruce-fir-beech Forest, *European Journal of Forest Research*, 130, pp. 1075-1091.

Bek, S., Ježek, J., Bližňák, V. (2010): Spatial Relationships of Heavy Rains in the Czech Republic. *Advances in Geosciences*, 25, pp.85-90.

Bek, S., Ježek, J.: Mapping Rainfall Erosivity using Gauge and Weather Radar Data. Přípraveno k odeslání.