

Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta životního prostředí
Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

**Metody výpočtu LS faktoru pro stanovení
erozního ohrožení**

Bakalářská práce

Autor: Lenka Bláhová

Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Barták

2014

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma:

.....
vypracoval/a samostatně a použil/a jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom/a, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom/a, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom/a že, na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

.....
(podpis autora)

V dne

Poděkování: Tímto bych chtěla poděkovat mému školiteli Ing. Bartákovy za vstřícný přístup a pochopení, které se mi z jeho strany dostalo. Moc děkuji také svému příteli a mé rodině za podporu v době psaní bakalářské práce.

Abstrakt

Tato práce si dává za úkol seznámit nás s výpočtem erozní ohroženosti pomocí Universální rovnice ztráty půdy (Universal Soil Loss Equation) zkráceně Usle. Se zaměřením především na výpočet LS faktoru neboli tzv.: topografického faktoru a jeho stanovení klasickou ruční metodou a také výpočtem s pomocí programu Usle2D. Dále je tato práce zaměřena na porovnání jednotlivých odtokových a sklonových algoritmu používaných v programu Usle2D a také na analýzu samotného programu.

Klíčová slova: Eroze, Usle, Usle2D, odtokové algoritmy, sklonové algoritmy, LS „topografický“ faktor

Abstract

The aim of presented Bc. thesis is to inform about calculation of erosion vulnerability by Universal Soil Loss Equation (USLE). It is focused especially on calculation of topographic factor (LS-factor), its estimation by classical manual method and by USLE2D software. This thesis also focuses on the comparison of individual routing algorithms and slope steepness algorithms used in USLE2D software and on analysis of the program itself.

Keywords: Erosion, Usle, Usle2D, routing algorithms, slope algorithms, LS "topographic" factor

Obsah

1. Úvod.....	6
2. Metodika práce.....	7
3. Eroze.....	8
3.1. Vodní eroze	8
3.2. Větrná eroze.....	8
3.3. Ledovcová eroze.....	9
4. Výpočet erozní ohroženosti	10
4.1. Usle, Rusle, Musle.....	10
4.2. Usle (Universal Soil Loss Equation).....	10
4.2.1. Faktor erozní účinnosti dešťů (R).....	11
4.2.2. Faktor erodovatelnosti půdy (K).....	11
4.2.3. Faktor délky (L) a faktor sklonu (S).....	12
4.2.4. Faktor ochranného vlivu vegetace (C).....	12
4.2.5. Faktor vlivu technických opatření (P).....	13
5. Metody výpočtu ztráty půdy.....	14
5.1. Ruční metoda.....	14
5.2. Metoda pomocí technologie GIS.....	15
6. Usle2D.....	17
6.1. Seznámení s programem	17
6.2. Ukázka nastavení	18
6.3. Výpočet LS v programu Usle2D.....	18
6.4. Pit correction - Opravy prohlubní.....	18
7. Odtokové algoritmy.....	20
7.1. Definice odtoku.....	20
7.2. Dělení odtokových algoritmů.....	20
7.2.1. Steepest descent.....	21
7.2.2. Multiple flow.....	22
7.2.3. Flux decomposition.....	24
7.2.4. Ostatní algoritmy – výběr.....	27
7.2.4.1. Jednosměrné odtokové algoritmy.....	27
7.2.4.2. Vícesměrné odtokové algoritmy.....	28
8. Sklonové algoritmy v programu USLE2D	30
8.1. Wischmeier a Smith (1978).....	30
8.2. McCool (1987,1989).....	30
8.3. Govers (1991).....	31
8.4. Nearing (1997).....	31
9. Výpočet faktoru délky L v programu Usle2D.....	33
10. Diskuze.....	37
11. Závěr.....	41
12. Seznam použitých zdrojů.....	42

1. Úvod

Existuje mnoho modelů a metod na výpočet erozní ohroženosti. V rámci Metodického návodu k provádění pozemkových úprav vydaného Ministerstvem zemědělství (Doležal et. al., 2010) je jedna z doporučených metod i metoda zvaná Usle – The Universal Soil Loss Equation neboli Rovnice ztráty půdy - a její aplikace v prostředí technologie GIS. Dále tento návod doporučuje pro výpočet jednoho, respektive dvou faktorů rovnice - LS faktoru neboli takzvaného topografického faktoru - použití programu Usle2D.

Zde v této bakalářské práci rozebírám tuto metodu se zaměřením především na program Usle2D a jeho možná nastavení. Nebudu zde rozebírat detailně faktory rovnice Usle, pouze odkážu dále na vhodnější literaturu. Zde v této práci by to bylo, až na topografický faktor, zbytečné. Samotnou rovnici výpočtu faktoru délky L v programu Usle2D však uvedu spolu s její historií a vznikem. Jen stručně uvedu problematiku samotné eroze.

Cílem práce je popsat fungování programu Usle2D, popsat odtokové a sklonové algoritmy, které se v daném programu používají a popsat i vznik rovnice pro výpočet faktoru délky L. Dále je cílem posoudit vhodnost doporučeného konkrétního nastavení: odtokový algoritmus flux decomposition a sklonový algoritmus McCool (1987, 1989) a jestli by nebylo vhodné používat jiný typ odtokového popřípadě sklonového algoritmu.

Dalším důležitým cílem, je poradit stávajícím uživatelům, kteří používají operační systém Microsoft XP, který ke dni 8.4.2014 přestal mít podporu od Microsoftu (nebude se pro tento OS vydávat další aktualizace) jak dále program Usle2D používat i na vyšších operačních systémech.

Práce je rozdělena na tyto čtyři části: První část je zaměřena na stručnou charakteristiku eroze a teorii k výpočtu Usle. Druhá část je zaměřena na zpracování v GIS prostředí a seznámení s programem Usle2D. Třetí, stěžejní část se zabývá samotným fungování programu Usle2D. Čtvrtá a poslední část je pak věnována diskuzi a závěru práce.

2. Metodika práce

V rámci přípravy na bakalářskou práci jsem prvotně vyhledávala relevantní internetové zdroje. Poté jsem navštívila Národní knihovnu a vyhledala odbornou literaturu, vzhledem k nedostatku potřebné literatury jsem čerpala část znalostí – odtokové algoritmy – z diplomové práce mého školitele Ing. Bartáka. Poté následovalo shánění odborných článků jak na internetu tak i přes službu vyhledání odborných článků v rámci SIC ČZU. Pak následoval překlad, pořízení výtahu z článku a následné zpracování do podoby bakalářské práce.

3. Eroze

První známé písemné použití termínu eroze pochází z překladu lékařského textu od Roberta Coplanda. Copland tento termín použil pro popis ohnisek rozvinutých v hrdle. Od roku 1774 se termín eroze užívá i mimo lékařskou vědu, kdy jej poprvé ve smyslu vodní eroze použil ve své knize Oliver Goldsmith (zdroj: wikipedia.org). Pod pojmem eroze, jenž budeme používat v této práci, rozumíme rozrušování půdního povrchu, transport a sedimentaci uvolněných částecek půdy působením z převážné části vodou. Známé druhy eroze jsou vodní, větrná, či ledovcového původu. Dále se zaměřím především na erozi vodní.

3.1. Vodní eroze

Vodní eroze je definovaná jako komplexní proces, jenž zahrnuje rozrušování půdního povrchu, transport a sedimentaci uvolněných půdních částic působením vody. Samotný proces eroze půdy je procesem přírodním, jenž nelze zcela zastavit. Druhy vodní eroze lze rozdělit podle účinku na následující stupně:

Eroze plošná: Půda je erodována po celém svahu či jeho části rovnoměrně. Plošná eroze má dvě fáze. První fází je kapková eroze, ta je charakteristická tím, že v půdě vznikají malé jamky. Na tuto fázi navazuje selektivní eroze, při které jsou vyplavovány drobné půdní částice. Plošnou erozi lze pokládat za nejnebezpečnější.

Eroze rýžková: Povrchový odtok se soustředí v půdních depresích tak, že vytvoří malé, ale dobře definované kanálky hluboké většinou 5-20 cm, které se nazývají rýhy. Vzhledem k tomu, že tyto kanálky většinou nezasahují do normálního provozu obdělávání půdy a lze je odstranit orbou, dopad této eroze se často přehlídá, dokud nezačne docházet k vážnějšímu poškození.

Eroze výmolná: Pokud povrchové kanálky jsou už natolik rozrušené erozí, že nemohou být odstraněny běžnou orbou, nastává eroze výmolná, neboli stržová (Nerad, 2011).

3.2. Větrná eroze

Je proces rozrušování půdního pokryvu transportovaného materiálu a nezpevněných jemnozrnných sedimentů a jeho transport do míst sedimentace. Podstata větrné eroze je v mechanické síle větru. Větrnou erozi lze rozdělit na:

Erozi saltací, při které přenáší vítr půdní částice jen po půdním povrchu a transportuje je jen na malé vzdálenosti.

Prašné bouře, při kterých se půdní částice volně vznáší ve vzduchu a vítr je transportuje na velké vzdálenosti.

3.3. Ledovcová eroze

Projevy ledovcové eroze, tj. působení ledovců na zemský povrch není problémem zemědělských půd. S projevy ledovcové eroze (čelní a boční morény, horská plesa apod.) se dnes setkáváme zejména ve vysokohorské krajině (např. Vysoké Tatry).

4. Výpočet erozní ohroženosti

4.1. Usle, Rusle, Musle

Univerzální rovnice ztráty půdy neboli Usle (The Universal Soil Loss Equation) byla vyvinuta v USA v roce 1965 (Wischmeier a Smith) na základě údajů shromážděných od roku 1930 podle amerického ministerstva zemědělství (USDA). Tato rovnice byla používána po celá desetiletí pro účely plánování ochrany půdy proti vodní erozi, a to jak ve Spojených státech, kde vznikla, tak po celém světě. Co který faktor konkrétně vyjadřuje, bude vysvětleno v kapitole 4.2. a dále.

Modifikací rovnice Usle jsou Revidovaná rovnice ztráty půdy (Rusle) a Modifikovaná rovnice ztráty půdy (Musle), které se používají v současnosti.

4.2. Usle (Universal Soil Loss Equation)

K určování ohrožení pozemků vodní erozí a vyhodnocení účinnosti navrhovaných protierozních opatření byla vytvořena Univerzální rovnice. Tato rovnice se používá pro výpočet dlouhodobé ztráty půdy. Rovnice vychází ze standardního pozemku o délce $l = 22,13$ m a sklonu $I = 9\%$. Hodnota přípustné ztráty půdy slouží ke stanovení míry ohroženosti erozí a je definována jako maximální velikost eroze půdy, která dovoluje dlouhodobě a ekonomicky udržovat dostatečnou úrodnost půdy.

Základní tvar rovnice je:

$$G = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1.)$$

kde G = je průměrná dlouhodobá ztráta půdy v tunách na hektar a rok,

R = faktor erozní účinnosti dešťů

K = faktor erodovatelnosti půdy

L = faktor délky svahu

S = faktor sklonu

C = faktor ochranného vlivu vegetačního pokryvu

P = faktor účinnosti protierozních opatření.

Vypočtená hodnota je dlouhodobou průměrnou roční ztrátou půdy a udává množství půdy, které se uvolňuje vodní erozí. Toto však nezahrnuje ukládání na níže ležících plochách a rovnici nelze použít pro dobu kratší, než jeden kalendářní rok.

Jednotlivé faktory dobře popisuje ve své Metodice (Janeček et. al., 2012) profesor Janeček. Já zde pouze shrnu to nejdůležitější. Případné rozšiřující informace o jednotlivých faktorech viz doporučená Metodika.

4.2.1. Faktor erozní účinnosti dešťů (R)

Vyjadřuje erozní účinnost deště a dříve byl odvozen z dlouhodobých pozorování na meteorologických stanicích (u nás byla jeho průměrná hodnota vypočtena z dlouhodobého sledování na těchto meteorologických stanicích: Klementinum, Tábor a Bílá Třemešná).

Pro Českou republiku byla dříve průměrná hodnota faktoru R stanovena na $R = 20 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ (tuto hodnotu doporučuje také Metodický návod (Doležal et. al., 2010)). Určena byla viz výše ze tří meteorologických stanic s tím, že k výpočtu byly použity deště s úhrny vyššími než 12,5 mm. Dle dalšího pozorování z ostatních meteorologických stanic a zpracování dlouhodobých řad ombrografických záznamů bylo možno stanovit R faktor pro naše území. Pokud vynecháme horské oblasti s R faktorem okolo 60 až 120, tak průměrná hodnota pro zemědělsky využívanou část České republiky se pohybuje okolo hodnot 30 až 40. Pro účely výpočtu Usle se dá používat hodnota $R = 40 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$.

4.2.2. Faktor erodovatelnosti půdy (K)

Faktor erodovatelnosti půdy K je v Usle definován jako ztráta půdy ze standardního pozemku vyjádřená v t/hod na jednotku faktoru erozní účinnosti deště R ($\text{MJ/ha} \cdot \text{cm/h}$). Lze jej stanovit:

- podle vztahu odvozeného pro faktor K,
- podle nomogramu sestrojeného na základě uvedeného vztahu,
- přibližně podle hlavních půdních jednotek (HPJ) bonitační soustavy půd nebo podle půdních typů, subtypů a variet Taxonomického klasifikačního systému půd ČR.

U prvních dvou postupů je třeba mít k dispozici základní charakteristiky dané půdy respektive výsledky rozborů přímo v terénu odebraných směsných půdních vzorků. První způsob výpočtu je uveden v Janeček et. al., (2012), další způsoby jen krátce:

Druhý způsob lze získat z nomogramu. Tento výpočet má skoro stejné parametry jako předchozí řešení, rozdíl je pouze v hranici procenta písku (0,1 - 2,0 mm). Levá část nomogramu jde použít pro půdy se zrnitou a drobtovitou strukturou ornice a střední propustností půdního profilu.

Poslední způsob určení K faktoru, ale pouze přibližný, je využití bonitační soustavy půd takzvaný BPEJ. K tomu slouží hodnoty v tabulce půdních typů, dále je nutno znát HPJ (hodnota druhého a třetího kódu BPEJ). Pokud pro některou HPJ není uvedena hodnota K faktoru, je nutno k jeho stanovení použít rovnici Ad. 1) nebo nomogram.

4.2.3. Faktor délky (L) a faktor sklonu (S)

Topografický faktor LS vyjadřuje vliv sklonu a délky svahu na intenzitu eroze. Faktor S vyjadřuje sklon daného svahu a faktor L délku daného svahu. LS faktor se určuje jako poměr mezi skutečným pozemkem a pozemkem modelovým, neboli standardním, o délce 22,13 metru a sklonem 9%. Nepřerušena délka svahu je od rozvodnice nebo od horní hrany pozemku, vždy však od prvku přerušujícího povrchový odtok (cesta, příkop, průlez atd.).

Odlišné metody jsou používány pro stanovení délkového faktoru na krátkých svazcích – kratších než 4 metry a na tajících a zamokřených půdách. Takto stanovené hodnoty LS nejsou však schopny popsat vliv heterogenity sklonu po délce svahu, ani změny délek a sklonu na nepravidelném pozemku. Pro řešení heterogenity svahu je vhodnější řešení v ploše s využitím GIS a DMT (digitální model terénu).

Rozebrání výpočtu tohoto faktoru provedu v další části bakalářské práce.

4.2.4. Faktor ochranného vlivu vegetace (C)

Hodnoty faktoru ochranného vlivu vegetace C představují poměr smyvu na skutečném pozemku s pěstovanými plodinami ke ztrátě půdy na pozemku s kypřeným černým úhorem při zachování stejných ostatních podmínek (Janeček M. 2012). Porosty chrání povrch půdy před srážkami, zpomalují povrchový odtok a zlepšují půdní vlastnosti - čím hustší a vyšší porost se na pozemku nachází, tím účinnější je ochrana půdy proti vodní erozi. Mezi plodiny nejméně chránící patří širokořádkové plodiny jako je kukuřice a okopaniny, v pořadí další je řepka, obilniny jarní a ozimé.

Faktor C lze určit přesněji v závislosti na vývojovém stádiu plodiny – 5 fenologických fází: období podmítky, hrubý úhor a orba, období od zasetí až po cca konec prvního měsíce po setí, období od jednoho měsíce do dvou měsíců po jarním nebo letním zasetí, u ozimů po třicátý duben, růst a zrání osevu až do sklizně a poslední zbytky plodin nebo strniště. Je vhodné zdůraznit, že nižší C faktor znamená lepší odolnost proti erozi.

4.2.5. Faktor vlivu technických opatření (P)

Faktor P vyjadřuje poměr odnosu ze skutečného pozemku s aplikací určitého způsobu ochranných opatření technického proti stejnému pozemku, udržovaném běžnou agrotechnikou bez využití jakýchkoliv ochranných opatření. Hodnota faktoru P se často stanoví: 1 - nejsou zde žádná ochranná opatření a nebo se může blížit k 0 za cenu extrémních finančních nákladů na technické opatření.

Příklad: Orba po spádnici	1,00	Orba po vrstevnici	0,50
Pásové obdělávání	0,25	Terasy bez záchytného prostoru	0,20
Terasy se záchytným prostorem	0,10		

5. Metody výpočtu ztráty půdy

5.1. Ruční metoda

Ruční metoda funguje na principu prostého dosazení do rovnice:

$$G = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2.)$$

z tabulek, které jsou pro jednotlivé faktory uvedeny (viz třeba zde doporučená Metodika (Janeček 2012)). Hodnoty pro faktor sklonu svahu S a hodnoty pro faktor délky svahu L se vypočítají následovně:

$$\text{faktor délky L: } L = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m \quad (3.)$$

kde: 22,13 = délka standardního pozemku (m)

λ = délka svahu (uvažuje se nepřerušena délka svahu – není to vzdálenost rovnoběžná s povrchem půdy (m)

m = exponent sklonu svahu: 0,5 pokud je sklon nad 5% 0,4 je pro sklon od 3,5 do 4,5%
0,3 je pro sklon od 1 do 3% 0,2 je pro sklon menší než 1%

$$\text{faktor sklonu S: } S = 10,8 \sin \Theta + 0,03 \text{ pro sklon } < 9\% \quad (4.)$$

$$S = 16,8 \sin \Theta - 0,50 \text{ pro sklon } \geq 9\% \quad (5.)$$

kde: Θ = je úhel sklonu svahu (rad nebo m/m)

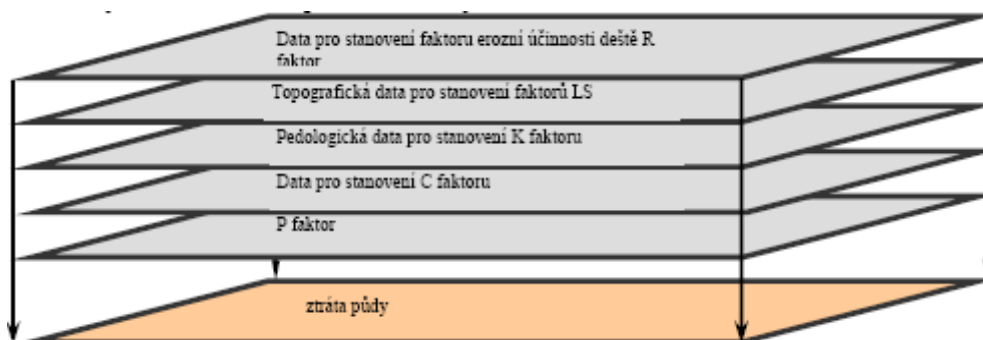
Pro vyjádření proměnného sklonu svahu lze rozdělit svah na 10 stejně dlouhých úseků a faktor sklonu svahu S stanovit jako vážený průměr faktoru S dílčích úseků. Výsledná hodnota faktoru sklonu svahu S pro svahy nepravidelného tvaru se stanoví od nejvyšší polohy S_1 po nejnižší S_{10} ze vztahu:

$$s = 0,03 S_1 + 0,06 S_2 + 0,07 S_3 + 0,09 S_4 + 0,10 S_5 + 0,11 S_6 + 0,12 S_6 + 0,13 S_7 + 0,14 S_8 + 0,15 S_{10} \quad (6.)$$

Tato metoda je oproti metodě popsané níže určena jen pro celý jeden konkrétní svah. Tudíž nezahrnuje niance daného svahu ani samotný směr odtoku a tedy je méně přesný v konečné hodnotě LS faktoru.

5.2. Metoda pomocí technologie GIS

Výpočet ztráty půdy v prostředí technologie GIS nejlépe vystihuje následující obrázek:



Ilustrace 1: Schéma aplikace jednotlivých faktorů s využitím GIS

(Doležal et. al., 2010)

Jak je vidět na obrázku výše je výpočet prováděn pomocí vrstev, kdy každá vrstva představuje jeden faktor (v případě LS faktoru jsou to logicky faktory dva). Všechny vrstvy pro jednotlivé faktory jsou v rastrovém formátu. Jak získat jednotlivé vrstvy pro konkrétní faktor viz Doležal et. al., (2010). Tyto vrstvy slouží pak ke konečnému výpočtu G, který se provádí tak, že se všechny vrstvy mezi sebou vynásobí (pomocí rastrového kalkulátoru) a výsledkem je právě mapa ztráty půdy G - rastrový mapový podklad udávající ztrátu půdy G ($t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$). Výhody postupu v GIS prostředí je přehledná plošná lokalizace drah soustředěného odtoku a vyznačení ploch s vyšší hodnotou G, což umožňuje přesnější lokalizaci pro PEO (protierozní opatření). Výpočet ztráty půdy v prostředí GIS (Metodický návod, který zmiňuji v úvodu, doporučuje používat program ArcGIS) závisí na kvalitě zdrojových dat. Zajištění těchto dat je jedním ze základních kroků při řešení problematiky zjišťování ztráty půdy na konkrétním pozemku.

Výpočet LS v ArcGIS

Přesný postup jak získat konečné hodnoty pro LS faktor je popsán od autora Jiřího Kadlece na adrese: <http://www.plaveniny.cz/cz/rusle/ls-faktor/> (poslední aktualizace: 2.11.2006). Zde bych se jen chtěla zaměřit na důležité části výpočtu.

- jsou potřeba jak vektorová (hranice, území, vodní plochy...) tak především rastrová data (DEM),
- potřebujeme následující tři programy: ArcGIS, Usle2D a LS - converter,

- v programu Usle2D je faktor LS počítán zvlášť pro každý rastrový element. Délka odtokové dráhy je nahrazena zdrojovou plochou (dílním povodím) rastrového elementu,
- program Usle2D umožňuje pracovat pouze s daty ve formátu Idrisi, program sice obsahuje import dat ve formátu Surfer (.grd), ten ale bohužel nefunguje. K převodu mezi ním a naším GIS použijeme právě program LS - converter,
- dle Kadlec (2006) je doporučeno používat následující nastavení pro Usle2D:
 - algoritmus pro odtok flux decomposition¹ (1996) a
 - algoritmus pro výpočet sklonu McCool (1987, 1989) bez konkrétního upřesnění.

¹: Existuje ovšem literatura z roku 2010 doporučující používání jiného odtokového algoritmu než flux decomposition a to multiple flow: Zde autoři porovnávají dvě metody výpočtu a to dle Mitášové a dále pak programu Usle2D: „Pokud je ovšem akumulace odtoku počítána s využitím algoritmu maximálního sklonu, jsou hodnoty LS faktoru v údolnicích výrazně nadhodnoceny a to může vést i přes malou plochu těchto koncentrovaných odtoků k celkovému nadhodnocení výsledného smyvu. Vhodnější je proto použití odtokového algoritmu multiple flow v programu Usle2D.“ (Krása J, Dostál T., 2010).

6. Usle2D

6.1. Seznámení s programem

Program Usle2D vypočítává LS faktor na základě odtokových a sklonových algoritmů. Výpočet LS faktoru probíhá pomocí takzvané přispívající plochy (neboli „akumulaci odtoku“). Hodnota přispívající plochy je pro každou buňku dána počtem buněk, které jsou danou buňkou odvodňovány, tj. na jejichž odtokových trasách daná buňka leží (Barták, 2008).

Princip výpočtu LS faktoru je následující: z výběru z jednoho ze tří dostupných odtokových algoritmů se vypočítá přispívající plocha buňky. Z přispívající plochy se vypočte pomocí rovnice (viz. dále) faktor délky svahu L a zároveň s ním se vypočte i faktor sklonu S a to tak, že z vybraného sklonového algoritmu se vypočte faktor sklonu S a zároveň díky exponentu m (pro každý sklonový algoritmus je jiný, mnohdy se liší i pro různý sklon daného svahu) se vypočte faktor délky L .

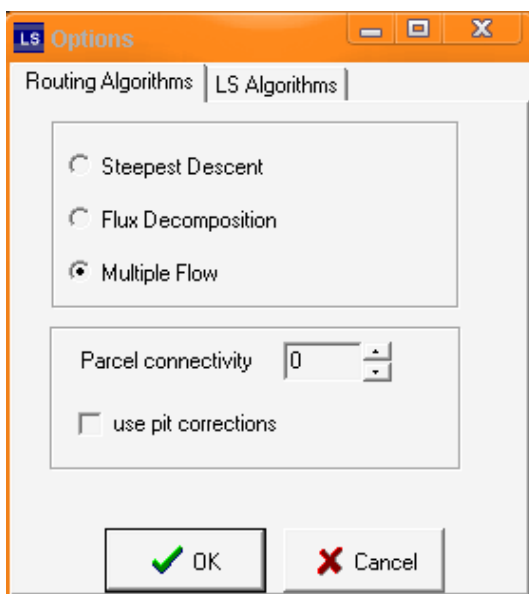
Program pracuje v grafickém prostředí Kres. V reálném dvojrozměrném případě pozemního odtoku a jím způsobené ztráty půdy ve skutečnosti nezáleží na vzdálenosti od zlomu nebo od horní hranice svahu, nýbrž na ploše připadající na jednotkovou délku vrstevnice, která přispívá k přívalu vody v daném bodě. Tento faktor se může dosti lišit od ručně změřené délky svahu, jelikož je silně ovlivněn konvergencí (sbíhavostí) nebo divergencí (rozbíhavostí) toku.

Propojení Usle2D a GIS nabízí několik výhod od jednorozměrného nebo manuálního přístupu, může představovat vliv průtoku konvergence na rýhové eroze a má výhody z hlediska rychlosti provedení a objektivitu.

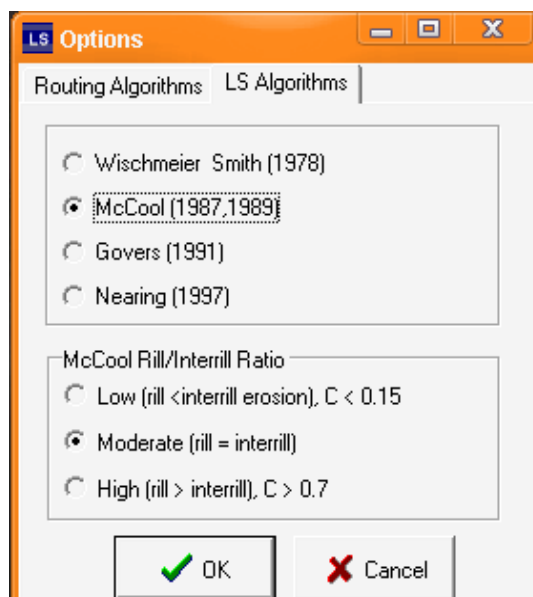
Navzdory širokému přijetí má Usle2D dvě důležité nevýhody:

- a) Neschopnost stanovit, kde se erodovaný materiál usazuje.
- b) Přestože rýžková eroze je zásadním procesem při degradaci půdy, tento efekt není brán v úvahu. Existuje i rozšířená verze Usle2D, která zahrnuje i usazování materiálu a modelování eroze způsobené orbou, jménem WaTEM (Water and Tillage Erosion Model).

6.2. Ukázka nastavení



Ilustrace 2: Nastavení odtokových algoritmů



Ilustrace 3: Nastavení sklonových algoritmů

6.3. Výpočet LS v programu Usle2D

Výpočet v programu Usle2D probíhá ve dvou fázích. První z nich je výpočet přispívající plochy a následný samostatný výpočet topografického faktoru. Přispívající plocha se spočítá na základě odtokových algoritmů uvedených dále. Poté se přispívající plocha dosadí do rovnice a díky ní se spočítá samotný topografický faktor. Samostatná rovnice má různé úpravy pro jednotlivé odtokové algoritmy. Nejprve popíší odtokové algoritmy, poté sklonové algoritmy a nakonec samotnou rovnici.

6.4. Pit correction - Opravy prohlubní

Digitální model terénu často obsahuje prohlubně nebo místní deprese. Tyto prohlubně mohou odrážet skutečné reálné podmínky, ale také jsou častěji důsledkem špatných vstupních dat nebo interpolace chyb. Kvůli tomu, že jsou přispívající plochy založeny na směrování kumulativních oblastí dolů ze svahu, budou tyto prohlubně působit jako umyvadla, a proto brání odtoku.

Procedura k jejich odstranění použitá v programu Usle2D je podobná s metodou uvedenou v Jenson a Domingue (1988): po identifikaci a vymezení deprese je určen nejnižší výlewný bod a pokleslé body jsou zvýšeny na úroveň z tohoto bodu. Tato možnost musí být použita společně s PIT-removal (odstranění prohlubní) modulu Idrisi32. Tento

modul vytvoří méně depresní v DEM zvyšováním všech buněk, jenž mohou mít deprese, na nejnižší elevační hodnotu z daného místa deprese. To znamená, že všechny prohlubně jsou převedeny na rovinné plochy. Nicméně tyto rovinné plochy stále brání průtoku směřování. Pokud je volba pit-removal zaškrtnuta, bude Usle2D hledat nejnižší vyvýšenou buňku z rovinné plochy odtoku a trasy celé oblasti, která je zaměřena na deprese. Tento postup zaručuje, že přispívající plocha je vždy směřována dolů ze svahu. Program Usle2D pouze koriguje rovinné plochy, deprese jsou vždy „umyvadla“ (zdroj: www.kuleuven.be).

7. Odtokové algoritmy

7.1. Definice odtoku

Zde v této práci bude odtokem myšlen simulovaný odtok povrchový. Reálný povrchový odtok má původ ten, že na zemský povrch dopadají srážky – buď ve formě deště či v formě sněhu. Srážky se kumulují v odtokových liniích (drainage lines), jež dále pokračují v odtokovou síť (drainage network). Simulovaný povrchový odtok není tedy na rozdíl od skutečného odtoku příliš přesný. Nezahrnuje propustný povrch, vegetační pokryv, odpar atd. Definici shrnula Tribe (1992): „simulovaný odtok je produkován prostorově homogenní srážkou na zcela nepropustném povrchu bez jakékoliv vegetace“. Odtoková síť v simulovaném odtoku je tak tvořena soustavou určité spojitě množiny buněk sítě ve které se uskutečňují následné výpočty (Barták, 2008)

7.2. Dělení odtokových algoritmů

Odtokové algoritmy se dělí na jednosměrné a vícesměrné. Jednosměrný odtokový algoritmus má konvergentní (sbíhavý) odtok. Vícesměrný algoritmus má odtok opačný tedy divergentní (rozbíhavý). U jednosměrného algoritmu se nemůže nikdy stát, že by měl jiný než konvergentní odtok. Naopak u vícesměrného algoritmu se to stát může. Když si vezmeme situaci v submatici 3x3 buněk, tak jednosměrné odtokové algoritmy vedou odtok vždy ze středu submatice do jedné ze sousední, konkrétně vypočítané buňky, čímž vytvářejí odtokovou síť ve tvaru klasického povodí (které se také sbíhá od nejmenšího potůčku do velké řeky). Naopak u vícesměrných algoritmů je odtok veden vždy ze středu submatice do všech nižších sousedních buněk v konkrétním vypočítaném poměru rozdělení a vytváří pak odtokovou síť, jež může mít odtok od jedné do až osmi odtokových linií ze středu submatice.

Program Usle2D využívá tři odtokové algoritmy. Jeden jednosměrný (steepest descent) a dva vícesměrné (multiple flow a flux decomposition). Podrobný popis viz. následující řádky.

7.2.1. Steepest descent

Steepest descent (nejstrmější spád) algoritmus je jedním z nejčastěji používaných odtokových algoritmů. Je jedním z nejjednodušších. Jeho vlastností je konvergovanost – sbíhavost. Tato vlastnost má výhodu, že hodnota přispívající plochy ve směru toku vždy narůstá, což je potřeba zejména při extrakci vodní sítě, kterou zjišťujeme pomocí prahové hodnoty přispívající plochy. Pokud nějaká buňka dosáhla této prahové hodnoty, a je prohlášena za buňku vodní sítě, pak zcela jistě tuto hodnotu dosáhly i další buňky nacházející se pod touto buňkou na stejné odtokové trase (Barták 2008)

Nejprve je vypočítán gradient mezi danou (centrální) buňkou v submatici 3x3 a všemi jejími nižšími sousedními buňkami a následně je celý odtok směřován do té konkrétní sousední buňky ze středu submatice, která odpovídá nejvyššímu kladnému gradientu.

Základní vzoreček je tento:

$$S_i = \frac{(z - z_i)}{(D(z, z_i))} \quad (7.)$$

kde S_i = sklon ve směru i-tého souseda
 z = nadmořská výška příslušné středové buňky
 z_i = elevace i-tého souseda
 $D(z, z_i)$ = horizontální vzdálenost od středu dané buňky do středu jejího i-tého souseda

Jmenovatel může být nahrazen hodnotou 1 pro kardinální, či $\sqrt{2}$ pro diagonální směr. Výsledná kladná hodnota vypočtu nám udá směr odtoku vody ze středu buňky. Pokud je hodnota záporná či rovná nule, pak do dané buňky nebude odtok směřován a tato buňka se označí za uzavřenou depresi anebo plošinu. Přispívající plocha se dá vypočítat pomocí několika možných způsobů. Více o konkrétních způsobech je uvedeno v diplomové práci Vojtěcha Bartáka (viz zdroj).

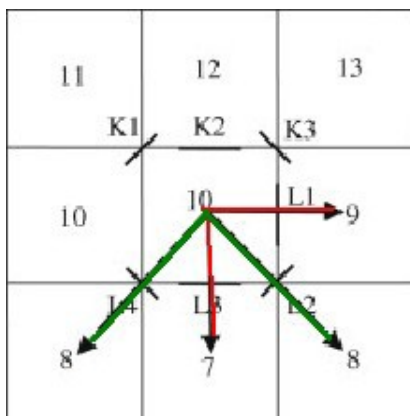
Další výrazná vlastnost jednosměrných odtokových algoritmů je, že produkují velmi ostré hranice mezi hlavními odvodňovacími liniemi a okolní oblastí. Nejen topograficky definované údolnice se můžou jevit jako odvodňovací linie: malé místní prohlubně, které můžou existovat v důsledku chyb interpolace, mohou způsobit lokální akumulaci

přispívající plochy. Jakmile se toto stane, jednosměrný odtokový algoritmus neumožňuje rozbíhavý odtok. To vede k vytvoření množství velkých odtokových linií na pseudo-náhodných místech. Opačná situace nastává pro malé hřebeny, ačkoliv v menší míře.

Dalším problémem tohoto algoritmu je jeho základní vlastnost a to, že neumožňuje sbíhavý odtok. Problém nastává u malých vydutí, které jsou příčinou významné odtokové sbíhavosti a není možné, aby se tok níže od nich opět rozdělil. To má za následek chaotické rozložení hlavních odvodňovacích linií na nepravděpodobných místech. Navíc je jednosměrný odtokový algoritmus velmi citlivý na chyby v topografii, a to zejména v oblastech, kde malá změna výšky způsobuje měnící se směr. Vícesměrné odtokové algoritmy jsou v tomto lepší: místní náhodné koncentrace odtoku jsou vykompenzovány větším rozptylem toku níže: tato negativní zpětná vazba zabraňuje vzniku hlavních odvodňovacích linií na náhodných místech. Na druhé straně šíření přispívající plochy ve skutečných vydutích jako jsou menší přítoky a údolnice, je mnohem rychlejší a přímočařejší při použití jednosměrného odtokového algoritmu, což je blíž k realitě především pro hlavní údolnice, zatímco vícesměrný odtokový algoritmus má tendenci šířit přispívající plochu tam a zpět mezi dnem údolím a přilehlými svahy. Proto Quinn et al. (1991) již v minulosti navrhl použití vícesměrného odtokového algoritmu na svazích a jednosměrného odtokového algoritmu ve výrazných vydutích nebo trvalých odvodňovacích cestách (Desmet a Govers, 1996a). Dále v některých případech (při diagonálním odtoku vody) dochází k podhodnocení či nadhodnocení hodnot PP.

7.2.2. Multiple flow

Program Usle2D využívá při výpočtu LS faktoru vícesměrný odtokový algoritmus navržený Quinnem (1991). Algoritmus pracuje tak, že z prostřední buňky submatice 3x3 se převede všechen odtok do všech nižších buněk (viz obrázek). Aby tak mohl učinit, je nejprve nutné tyto buňky určit. To je provedeno pomocí vzorce dole pod obrázkem. Poté, co byly dané buňky lokalizovány, se do nich převede všechen odtok z dané buňky v poměru tak, že čím je spád větší tak tím je i do dané sousední buňky převeden větší podíl odtoku.



Ilustrace 4: Rozdělení odtoku v submatici 3x3 podle Quinn(1991)

Vzoreček pro výpočet přispívající plochy je následující:

$$A_i = A \cdot \frac{S_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^k S_i \cdot W_i} \quad (8.)$$

kde A_i = celková část odtoku vody vypouštěného z centrální buňky do i-té buňky

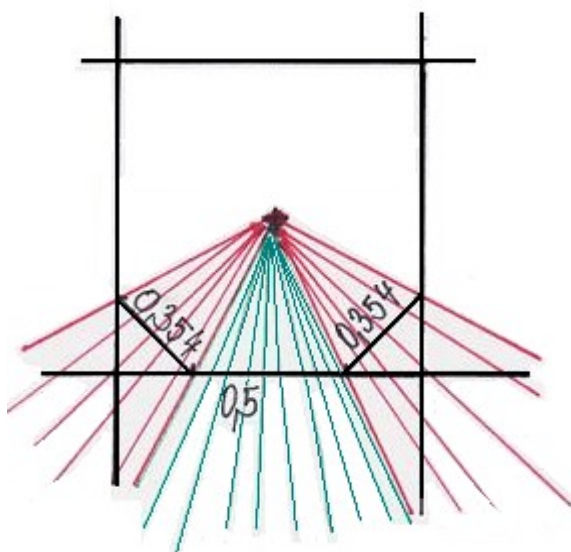
A = celková plocha dostupná pro distribuci odtoku vody

S_i = sklon stoupání k sousedním buňkám i

W_i = faktor vrstevnicové délky pro odtok, po kardinálním směru je hodnota 0,5, pro odtok po diagonálním směru je to 0,354

k = celkový počet nižších sousedních buněk ($k = 1$ až 8)

Tento algoritmus pracuje s principem takzvané vrstevnicové délky (contour length)



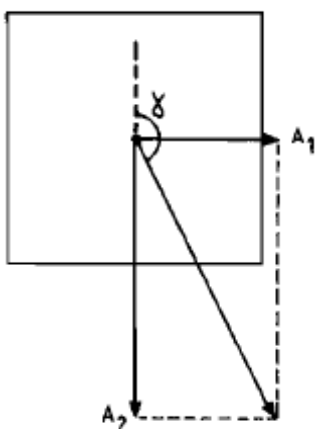
Ilustrace 5: Názorná ukázka vrstevnicové délky v pojetí Quinn.

zavedené právě Quinnem (1991). Ten určuje konečné množství odtoku, který bude směřován do dané nižší buňky. Vychází z poznatku, že voda vždy teče kolmo na vrstevnice, přičemž množství vody odtékající z dané buňky závisí na délce vrstevnicového úseku, přes který voda v daném směru teče. Vrstevnicová délka je různá pro kardinální a diagonální směry (na obr. č. 5. je diagonální směr červeně a kardinální směr zeleně).

7.2.3. Flux decomposition

Flux decomposition (rozklad toku) je algoritmus, jenž byl navrhnut v článku Desmet a Govers (1996a). V tomto článku je jeho užití obhájeno lepší použitelností v porovnání s ostatními dvěma algoritmy popsány výše.

Flux decomposition je založen na rozkladu vektoru toku: vektor má velikost rovnající se přispívající ploše, která má být rozdělena, zvýšená o plochu samotné buňky mřížky a orientována v závislosti na aspektu směru (aspect direction). Přispívající plocha je rozdělena do dvou ordinálních komponentů. Velikost každé složky je přímo úměrná sinu resp. kosinu úhlu aspect direction. Ale jelikož součet těchto dvou složek je větší než původní velikost, složky musí být normalizovány tak, že součet dvou složek rovná velikosti vektoru (Obr 6). To se provádí vydělením každé z obou složek součtem absolutních hodnot sinu a kosinu úhlu aspect direction.



Ilustrace 6: Ukázka rozdělení PP podle smeru aspect direction na dva kardinalni sousedy.

Aspect direction se spočítá postupem navrženým v Zevenbergen a Thorne (1987). Úhel (číselná hodnota aspect directionu v radiánech) pro každý bod rastru je vypočten jako

$$\arctan\left(\frac{S_x}{S_y}\right) \quad (9.)$$

kde S_x = sklon ve směru osy x

S_y = sklon ve směru osy y.

Vypočtená hodnota je poté lokalizována do správného kvadrantu, na základě znamének obou gradientů. Pro struktury v mřížce se dá jednotková přispívající plocha spočítat vydělením přispívající plochy buňky efektivní vrstevnicovou délkou. To jest délka

vrstevnice v rámci buňky mřížky, přes kterou může procházet odtok. Je vypočtena jako délka linie přes střed buňky a kolmo na aspect direction.

$$D' = D x \quad (10.)$$

kde D = velikost buňky mřížky (m)

$$x = \frac{1}{(\max(|\sin \alpha|, |\cos \alpha|))} \quad (11.)$$

kde α = aspect direction pro buňku mřížky

Přispívající plocha pro mřížku buňky o souřadnicích (i,j) může být pak spočítána jako:

$$A_i = \frac{A}{D} \quad (12.)$$

kde A_i = přispívající plocha buňky

A = přispívající plocha na vstupu

D' = vrstevnicová délka

Flux decomposition sebou přináší určité specifické problémy:

(A) Jeho formulace dovoluje odtok směrem k bodu mřížky se stejnou, nebo dokonce větší výškou. Aby se tomu zabránilo a aby se zachoval nepřetržitý odtok, je proto odtok zakázán směrem k bodu mřížky, která byla již dříve zpracována. V tomto případě je celý odtok přiřazen do druhé přijímací buňky.

(B) V rámci ostrých konkáv, majících odvodňovací linii s diagonálním směrem, oba přijímací body mohou být vyšší, než je střední bod. Jestliže dojde k tomuto případu, program přepne nastavení odtokového algoritmu pro tento konkrétní bod na steepest descent. Jinak řečeno pokud se aspect direction vypočítá tak, že jsou okolní dvě kardinální buňky (do kterých by měl být rozdělen odtok z centrální buňky) vyšší než samotná centrální buňka, tak je pak celý odtok odveden ve směru aspect direction.

Hlavní odvodňovací linie pro flux decomposition se vyznačují vyššími hodnotami, zatímco pro přiléhající oblasti k těmto odvodňovacím liniím platí opak. Na svazích konkávního stoupání flux decomposition dává větší přispívající plochu, zatímco na většině svazích konvexního stoupání jsou tyto rozdíly velmi malé. Tyto rozdíly jsou způsobeny tím, že flux decomposition algoritmus distribuuje odtok do maximálně dvou sousedních buněk. Proto odtok má tendenci zůstat více koncentrovaný v hlavních odvodňovacích liniích. Navíc pro tyto buňky, kde flux decomposition nebylo možné použít, byl použit steepest descent, což zvýšilo tendenci k silnější koncentrací odtoku. Tato tendence naznačuje výhodu flux decomposition, jelikož silnější soustředění odtoku v hlavních odvodňovacích liniích je realističtější (Desmet a Govers, 1996a).

7.2.4. Ostatní algoritmy – výběr

7.2.4.1. Jednosměrné odtokové algoritmy

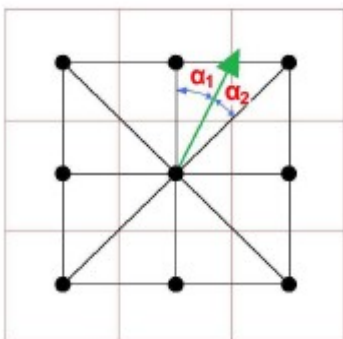
Steepest descent popsán viz. výše (Mark, 1984). **Fairfield a Leymarie** (1991) upravili tento algoritmus zahrnutím stochastické, kvazi-náhodné složky.

Aspect direction - výpočet pomocí procedury fitování povrchu (Fitování je procedura, která nám umožní určit nepřímě měřené veličiny. Z teorie známe vztah, který svazuje dvě měřené veličiny, ale obsahuje nějaké neznámé konstanty. Experimentálně proměříme tuto závislost a právě fitování nám umožní zjistit hodnoty těchto konstant) a sousední buňka, odpovídající tomuto směru nejvíce, je vybrána jako přijímací buňka (Drayton et al., 1992).

Aspect-driven směrovací algoritmus - navržený tak, že se odtok pohybuje kinematicky podél aspect direction od středu zdrojové buňky, dokud nedosáhne bodu na hranici buňky. Jakmile přesáhne hranici zdrojové buňky, je odtok převeden do sousedící přijímací buňky s touto hraniční a odtud je veden k jedné z dalších stran přijímací buňky. To znamená, že odtok z konkrétní buňky se obecně řídí svoji jedinečnou cestou až k výpusti. PP pro danou buňku mřížky lze pak vypočítat jako počet odtokových linií procházejících buňkou vynásobený plochou buňky (Lea, 1992).

Scoring (1992) použil gradienty ze čtyř hranic buňky pro výpočet výsledného směru odtoku. Kardinální sousední buňka nejvíce odpovídající tomuto směru je zde vybrána jako přijímací buňka.

Jednosměrný odtok – SFD_{∞}



Ilustrace 7: Tabrotonův algoritmus (Barták, 2008)

Tento algoritmus navrhl Tarboton (1997), ve snaze zachovat převažující konvergenci toku, přitom však zlepšit reprezentaci skutečných směrů cest odtoku oproti steepest descent algoritmu. Tento algoritmus si zde rozvedeme podrobněji než předcházející. Znaménko nekonečno symbolizuje výběr z teoreticky nekonečně mnoha hodnot, v rozsahu $0 - 360^{\circ}$.

Princip je znázorněn na obrázku č. 6 : prostor kolem

středové buňky, vymezený středy osmi sousedních buněk, je rozdělen dané trojúhelníkové plošky. Každou ploškou je proložena rovina a na ní je vypočten směr největšího spádu. Pokud tento směr vybočuje z dané plošky, je nahrazen bližší hranou plošky. Následně jsou mezi sebou porovnány směry najité na jednotlivých ploškách a z nich je vybrán ten, jenž odpovídá největšímu spádu. Jestliže se nalezený směr shoduje s hranou některé plošky (jinými slovy: největší spád směřuje přímo do středu některé sousední buňky) celý odtok je nasměrován do této buňky. Ve většině případů však nalezený směr největšího spádu směřuje někam mezi středy dvou sousedních buněk. Potom je hodnota přispívající plochy rozdělena mezi tyto dvě sousední buňky, a to v poměru daném velikostmi úhlů, které nalezený směr svírá s příkými směry do těchto sousedních buněk (Barták, 2008). Vzorce pro výpočet viz diplomová práce Ing Bartáka.

7.2.4.2. Vícesměrné odtokové algoritmy

Směrovací algoritmy použité v erozním modelu **ANSWER** (Beasley et al. 1980) a **MODANSW** (Park a Mitchell 1983) rozdělují buňky mřížky na dvě části čarou přes střed buňky a ve směru aspect direction buňky. Odtok z každé části se pak převede na odpovídající spád kardinální sousední buňky.

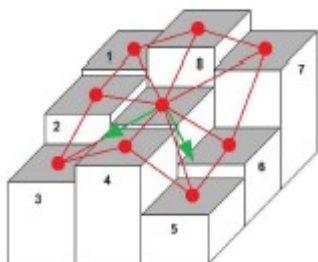
Freeman (1991) předložil vícesměrný odtokový algoritmus podobný algoritmu Quinn (1991) jen s tím rozdílem, že pro výpočet odtoku do každé nižší buňky dává koeficient vrstevnicové délky 1,1 místo 0,5 a 0,354.

Bauer et al. (1985) představil poněkud komplexnější způsob, ve kterém se odtok rozdělí mezi až tři nižší sousední buňky. Gradienty a aspect direction pro centrální a přijímací body se používají k rozdělení dostupné plochy.

Vícesměrný odtok – MFD_{∞} (rozšířený jednosměrného Tarbotona)

Rozšířením zde popsaného Tarbotonova algoritmu je povolení odtoku do více než dvou směrů. Princip výpočtu směru sklonu zůstává zcela stejný jako v případě algoritmu SFD_{∞} , ale zde není vybrán směr odpovídající největšímu spádu, nýbrž jsou schváleny všechny nalezené směry s kladným sklonem. Hodnota přispívající plochy je rozdělena mezi jednotlivé směry podle velikosti příslušných sklonů. Rozdělování odtoku je trochu složitější. Nejdříve je jednotlivým směrům přiřazena určitá část odtoku, poté jsou tyto hodnoty rozděleny mezi příslušné dvě sousední buňky, mezi jejichž středy odtok směřuje.

Dělení probíhá podle poměru úhlů, o něž je tento směr odkloněn od přímé spojnice s příslušnou sousední buňkou.



*Ilustrace 8: Rozšířený
Tabrotonův algoritmus
(Barták, 2008).*

Oproti algoritmu Quinn (1991) vicesměrný Tabrotonův algoritmus poněkud více reprezentuje sbíhavost toku, přičemž rozbíhavost připouští pouze tam, kde existuje skutečně silná rozbíhavost v topografii, v podobě několika lokálních minim, kudy může voda odtékat (hřebeny či sedlech, obecně na buňkách procházející rozvodnice). V rámci takto nalezených směrů se však algoritmus snaží zachovat sbíhavost toku, při současné snaze co nejlépe daný směr reprezentovat. Algoritmus tak lze z tohoto hlediska považovat za vyvážený kompromis mezi rozbíhavostí a sbíhavostí toku (Barták, 2008)

8. Sklonové algoritmy v programu USLE2D

8.1. Wischmeier a Smith (1978)

Pro tento algoritmus platí následující rovnice sklonu:

$$S = 65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065 \quad (13.)$$

Hodnoty pro exponent m pro konečný výpočet LS faktou jsou následující:

- $m = 0.5$** pokud je sklon větší nebo rovno 5%
- 0.4** pro sklon od 3.5 do 4.5 %
- 0.3** pro sklon od 1 do 3%
- 0.2** sklon menší než 1%

Tyto vztahy vyjádřené touto rovnicí byly odvozeny z údajů získaných na svazích v rozmezí 3,0- 18% sklonu a délce 30-300 stop. Tato rovnice byla použita pro graf, ze kterého lze snadno určit LS faktor. Předpokládá se, že vztah procenta sklonu ke ztrátě půdy je ovlivněn interakcí s půdními vlastnostmi a stavem povrchu, ale interakční účinky nebyly kvantifikovány pomocí údajů z výzkumu. Rovnice je řešena pro svahy jenž mají sklon menší než 20%. Rovnice vychází z rovnice v článku od Fostera a Wischmeiera (1974):

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

kde s je sklon svahu v % a hodnota pro exponent m se uvádí $m = 0,5$. V článku Wischmeier a Smith (1978) není jednoznačně specifikován postup jak se z druhé rovnice získala rovnice první.

8.2. McCool (1987,1989)

Zde jsou tři možná nastavení podle poměru rýžkové a mezirýžkové eroze (viz. obr. č.3.).

Faktor sklonu (S) je počítán následujícími rovnicemi (McCool et al .1987)

$$S = 10,8 \sin \theta + 0.03 \quad \text{při } \sin \theta < 0,0896 \quad \text{a} \quad S = 16,8 \sin \theta - 0,5 \quad \text{při } \sin \theta \geq 0,0896 \quad (15.)$$

Exponent m je pro tyto rovnice stanoven jako:

$$m = \frac{\beta}{(\beta + 1)} \quad \text{kde} \quad \beta = \sin \frac{\theta}{((0,0896 x (3 \sin^{0,8} \theta_{(i,j)} + 0,56)))} \quad (16.)$$

Druhá rovnice je založena na údajích pro sklony větší než cca 9 %, získaných experimentálně. Rozsah vlivu svahu na odtok je velmi variabilní v kultivovaných půdách. Pro svahy kretší než 4 metry by měla být použita následující rovnice výpočtu faktoru sklonu (McCool et al 1987):

$$S = 3,0(\sin \theta)^{0,8} + 0,56 \quad (17.)$$

Tato rovnice platí pro podmínky, kde voda odtéká volně od konce svahu. Pro faktor sklonu dané rovnicí nad tímto odstavcem se předpokládá, že rýžková eroze je zanedbatelná na svazích kratších než 15 stop a že meziřádková eroze je nezávislá na délce svahu. Proto tato rovnice by neměla být aplikována na svazích, kde se očekává, že může dojít právě k rýžkové erozi. U rýžkové eroze se předpokládá, že začíná s délkou svahu 15 stop, i když k ní může dojít i na kratších svazích, které jsou k ní zvláště citlivé. Naopak, rýžková eroze nezačne, dokud není dosaženo větší délky svahu na půdách, které jsou ošetřeny a jsou odolné proti oddělení odtokem.

8.3. Govers (1991)

Na základě naměřených dat navrhuje Govers (1991) hodnotu 0,755 pro exponent m.

$$S(i, j) = \left(\frac{\tan q_{(i, j)}}{0,09} \right)^{1,45} \quad (18.)$$

LS-faktor pak vypovídá o riziku rýžhové eroze. Tento článek se mi nepodařilo získat, proto je tento sklonový algoritmus zde uveden jen jako vzorec.

8.4. Nearing (1997)

Tento algoritmus vznikl na základě sklonových algoritmu McCool (1987):

$$S = 10,8 \sin \theta + 0,03 \quad \text{při } \sin \theta < 0,0896 \quad \text{a} \quad S = 16,8 \sin \theta - 0,5 \quad \text{při } \sin \theta \geq 0,0896 \quad (19.)$$

První rovnice je založena na studiích eroze pozemku na svazích až do 18% z LaCross, WI, rovnice druhá je založena na údajích ze studie provedené Murphee a Mutchler (1981) na svazích 0,1-3% Rovnice byly porovnávány s 50 řadami přírodních dat odtoku z pozemku se sklonem až do 22%.

Druhým algoritmem, na kterém je založen Nearingův algoritmus je algoritmus Liu et al. (1994), který použil údaje ze tří lokalit nacházejících se v Yollow River náhorní plošině Číny na svazích až do 55%.

$$S = 21.91 \sin\theta - 0,96 \quad (20.)$$

Všechny výše zmíněné rovnice představují lineární formy strmosti sklonu pro ztráty půdy, zatímco sklon se postupně zvyšuje. To znamená, že první rovnice byla odvozena od nízkých svahů a rovnice číslo tři byla odvozena z dat pro svahy až 55%. Na první pohled by se dalo pokoušet odvodit obecnou rovnici:

$$S = m \cdot \sin\theta + b \quad (21.)$$

kde m a b se mění v závislosti na $\sin\theta$. Problém ovšem s tímto přístupem je to, že výsledná kvadratická forma rovnice vytváří predikce S, které jsou příliš velké na strmých svazích.

Účelem této studie bylo vyvinout algoritmus sklonu svahu, tak, že je v souladu se vztahy v rovnicích McCool, které jsou založeny na rozsáhlých datech pro svahy až do 22%, je v souladu s údaji ze Žluté řeky na velmi strmých svazích a je jedinou, spojitou funkcí $\sin\theta$.

Výsledná logická rovnice pro vliv strmosti svahu na ztráty půdy na svazích při deštích a odtoku je dána vztahem:

$$S = -1.5 + \frac{17}{[1 + e^{(2,3-6,1\sin\theta)}]} \quad (22.)$$

Navrhovaná rovnice má následující výhody:

- jedná se o jedinou spojitou funkci sklonového faktoru v USLE nebo RUSLE, jejíž přesnost při vystižení existujících dat pro ztrátu půdy odpovídá lineárním funkcím v současné době používaným pro RUSLE na svazích <25%

- hodí se na stávající údaje pro svahy >25% a je lepší než současné RUSLE funkce sklonu strmosti a stejně jako v rovnici navrhuje Liu.

9. Výpočet faktoru délky L v programu Usle2D

Rovnice, jež je součástí programu Usle2D (vznikl v roce 2000), vznikla podle článku Desmet a Govers (1996b), který navazuje na článek Fostera a Wischmeiera (1978). Zde je vidět, že je výpočet v programu založený na hodně starých základech. Tento článek (Foster a Wischmaier, 1974) vychází z poznatku, že dříve (Wischmeier a Smith, 1965) se LS faktor a i ztráta půdy počítaly jen na jednodolných svazích. Mnoho svahů jsou však buď konkávní, konvexní a nebo série obojích - jak konvexních tak konkávních pravidelných segmentu. Z tohoto důvodu rozdělili Desmet a Govers svah do několika segmentů, u kterých se předpokládá, že jsou jednotné ve sklonu a půdních vlastnostech. LS topograficky faktor pro takový jeden segment se pak počítá jako (Desmet a Govers 1996b):

$$LS_i = \frac{(S_i(\lambda_i^{(m+1)} - \lambda_{(i-1)}^{(m+1)}))}{(22,13^m(\lambda_i - \lambda_{(i-1)}))} \quad (23.)$$

kde L = délka svahu pro i-tý segment

S_i = sklon pro i-tý segment

λ_i = vzdálenost od spodní hranice i-tého segmentu po horní hranici výškového pole (m)

m = exponent, který je dosazován na základě konkrétního S faktoru

Foster a Meyer (1974) zjistili, že přepravní kapacita odtoku z jednotných svahů za středně intenzivních přívalových dešťů je obvykle dostačující k přepravě veškeré dostupné půdy, pokud je sklon větší než 2 nebo 3 % a v případě, že půda není tak propustná, aby se výrazně snížil odtok vody. Základní vztah řídicí proces eroze je rovnice kontinuity pro transport sedimentů, která může být vyjádřena jako :

$$D = \frac{dG}{dx} \quad (24.)$$

kde D = rychlost odnášení (hmotnost/plocha/čas) v daném bodě

G = nános sedimentů na jednotku šířky (hm/šířka/čas)

x = vzdálenost

Rovnice platí bez ohledu na to, zda ukládání sedimentu probíhá či nikoliv. V případě ukládání je G nezávislá proměnná a D se určí přímo z rovnice. Je-li nános sedimentů určen dostupností částic oddělených erozí ve vyšších částech svahu, pak D je nezávislá

proměnná a G se určí z rovnice výše napsané v integrálním tvaru jako:

$$G = \int D dx \quad (25.)$$

Univerzální rovnice ztráty se vyjadřuje jako:

$$Y = RKLSCP \quad (26.)$$

Zde byl faktor pro délku L definován jako $L = (\lambda_e/72,6)m^2$ (m se zde obvykle předpokládá 0,5) a pro faktor sklonu $S = (0,043s^2 + 0,30s + 0,43) / 6,613$. Za předpokladu, že svah má všude stejnou šířku, tato rovnice může být vyjádřena jako rovnice ukládání sedimentu vynásobením obou stran délkou celého svahu λ_e , čímž se získá :

$$G = Y \lambda_e = R K L S C P \lambda_e \quad \text{vyjádřeno také jako} \quad G = \frac{(R K \lambda_e^{(m+1)} S C P)}{(72,6)^m} \quad (27.)$$

Když je λ_e nahrazeno x, pak rovnice vyjadřuje nános sedimentů kdekoli podél jednolitého svahu. Z rovnice kontinuity, rychlost oddělení sedimentu D podél svahu je dána vztahem :

$$D = \frac{dG}{dx} = \frac{((m+1)R K S C P x^m)}{(72,6)^m} \quad (28.)$$

Pro nepravidelné svahy byl nepravidelný sklon definován jako ten, na kterém se K nebo S a nebo obojí mění s polohou na konkrétním svahu. Jsou-li R, C a P v podstatě konstantní tak lze tuto rovnici vyjádřit jako:

$$G = \frac{(m+1)}{72,6^m} R C P \int K S x^m dx = \int D dx \quad (29.)$$

K dokončení integrace je třeba napsat proměnné K a S jako funkce x. Vyjádření těchto proměnných jako funkce x a následná integrace není jednoduchá a praktická. Místo toho je nepravidelný profil země rozdělen do segmentů ve kterých mohou být považovány za K a S konstantní, pak lze tuto rovnici vyjádřit jako:

$$E_i = R C P K_i S_i \frac{(\lambda_i^{(m+1)} - \lambda_{(i-1)}^{(m+1)})}{72,6^m} \quad \rightarrow \quad E_i = \int_{\lambda_{(i-1)}}^{\lambda_i} D dx \quad (30.)$$

kde E_i = celkový sediment pro i-tý segment

2 Wischmeier a Smith pracují s délkovou jednotkou stopy, kdežto Desmet a Govers pracují s délkovou jednotkou metry. Jedna stopa je 30,48cm což při délce 72,6 stop = 22,13m.

$\lambda_i =$ délka ve stopách z horní části svahu ke spodnímu konci i-tého segmentu

Výsledná ztráta půdy na jednotku plochy A_i pro jeden segment se rovná celkové sedimentaci pro daný segment dělená délkou segmentu:

$$A_i = \frac{E_i}{(\lambda_i - \lambda_{(i-1)})} = \frac{(R C P K_i S_i (\lambda_i^{(m+1)} - \lambda_{(i-1)}^{(m+1)}))}{(72,6^m (\lambda_i (\lambda_i - \lambda_{(i-1)})))} \quad (31.)$$

Tuto rovnici lze pak přepsat do tvaru pro výpočet LS faktoru jako:

$$LS = \frac{(S_i (\lambda_i^{(m+1)} - \lambda_{(i-1)}^{(m+1)}))}{(22,13^m (\lambda_i - \lambda_{(i-1)}))} \quad (32.)$$

Na Foster a Wischmeiera (1974) navazuje Desmet a Govers (1996b). Cílem jejich článku bylo navrhnout rovnici, která rozšiřuje Fosterův a Wischmeierů (1974) přístup pro výpočet LS- faktoru na dvojrozměrném terénu s využitím konceptu přispívající plochy. Výsledky získané na základě této rovnice jsou porovnávány s manuální bodovou metodou popsanou v Griffinovi (1988). Pro tuto studii (Desmet a Govers 1996b) byl použit odtokový algoritmus Quinn (1991) ve tvaru:

$$A_i = A \frac{S_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^k S_i \cdot W_i} \quad (33.)$$

Aby bylo možné vypočítat jednotkovou přispívající plochu, plocha buňky musí být rozdělena do efektivní vrstevnicové délky. To je délka vrstevnice v rámci buňky mřížky, přes kterou může procházet odtok. Vrstevnicová délka se vypočítá jako:

$$D_{(i,j)} = D \cdot (\sin \alpha_{(i,j)} + \cos \alpha_{(i,j)}) = D \cdot x_{(i,j)} \quad (34.)$$

kde $D_{i,j}$ = efektivní vrstevnicová délka (m)

D = velikost buňky mřížky (m)

$X_{i,j}$ = $(\sin \alpha_{i,j} + \cos \alpha_{i,j})^*$

$\alpha_{i,j}$ = aspekt směru buňky mřížky se souřadnicemi (i,j)

* Tento koeficient bude v kapitole diskuze podroben přesnějšímu rozboru.

Přispívající plocha na vstupu do buňky mřížky pak může být vypočtena jako :

$$A_{(S(i, j-\hat{i}))} = \frac{A_{(i, j-\hat{i})}}{D_{(i, j)}} \quad (35.)$$

kde $A_{S_{i,j-in}}$ = přispívající plocha při vstupu do buňky mřížky se souřadnicemi (i,j) (m²)

$A_{i,j-in}$ = přispívající plocha na přítoku v buňce mřížky se souřadnicemi (i,j) (m²/m)

Na výstupu z buňky hodnota na vstupu musí být zvýšena o plochu dané buňky D²:

$$A_{(S_{i,j-out})} = A_{(i, j-\hat{i})} + D^2 \quad (36.)$$

kde $A_{S_{i,j-out}}$ = přispívající plocha na výstupu z buňky mřížky se souřadnicemi (i,j) (m²)

Rovnice je nyní možné nastavit pro dvou-dimenzionální topografii nahrazením přispívající plochy pro délku svahu:

$$L_{i,j} = \frac{A_{S_{i,j-out}}^{m+1} - A_{S_{i,j-in}}^{m+1}}{\left(A_{S_{i,j-out}} - A_{S_{i,j-in}} \right) \cdot (22.13)^m} \quad (37.)$$

kde $L_{i,j}$ = délka svahu faktor pro buňky mřížky se souřadnicemi (i, j)

Rovnice viz výše se dá přepsat také do tvaru:

$$L_{i,j} = \frac{(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - A_{i,j-in}^{m+1}}{(D \cdot x_{i,j})^{m+1} \cdot \left(\frac{D^2}{D \cdot x_{i,j}} \right) \cdot (22.13)^m} \quad (38.)$$

Která se dá upravit do finální podobu výpočtu faktoru délky svahu jako:

$$L_{i,j} = \frac{(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - A_{i,j-in}^{m+1}}{D^{m+2} \cdot x_{i,j}^m \cdot (22.13)^m} \quad (39.)$$

kde: $L_{i,j}$ = faktor délky svahu pro buňky mřížky se souřadnicemi (i,j)

$A_{i,j-in}$ = přispívající plocha na přítoku v buňce mřížky se souřadnicemi (i,j) (m²/m)

D = velikost buňky mřížky (m)

$x_{i,j}$ = (sin $\alpha_{i,j}$ + cos $\alpha_{i,j}$)

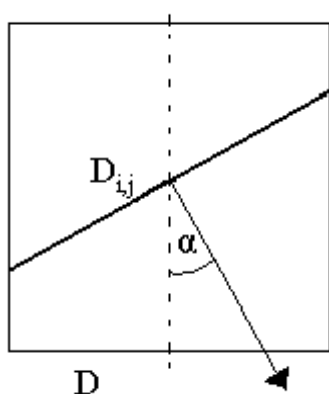
m = exponent dosazení z konkrétního faktoru sklonu

10. Diskuze

V diskuzi bych chtěla nejprve začít hodnocením programu Usle2D jako celku. Teprve pak bych se chtěla věnovat jednotlivým algoritmům. Program využívá pro výpočet faktoru délky svahu L rovnici ve tvaru:

$$L_{i,j} = \frac{(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - A_{i,j-in}^{m+1}}{D^{m+2} \cdot x_{i,j}^m \cdot (22.13)^m} \quad (40.)$$

A zde je jádro problému. V rovnici je použita tzv. vrstevnicová délka. Ovšem zde se nemyslí vrstevnicová délka jako je například u odtokového algoritmu Quinn (1991), ale myslí se vrstevnicová délka středem dané buňky. Situace je zobrazena na následujícím obrázku č.8:



Ilustrace 9: Situace v buňce

dle Desmet a Govers(1996)

Zde přidávám přesnou citaci z Desmet a Govers (1996b): „Aby bylo možné vypočítat jednotkovou přispívající plochu, přispívající plocha buňky musí být rozdělena do efektivní vrstevnicové délky. To je délka vrstevnice v buňce mřížky, přes kterou může procházet odtok. Ta se rovná délce čáry procházející středem mřížky buňky, která je kolmá na aspect direction.“

Pokud předpokládáme, že platí následující rovnice (uvedena Desmet a Govers 1996a) pro výpočet dané vrstevnicové délky $D_{i,j}$, kde D je délka strany buňky:

$$D_{(i,j)} = D \cdot (\sin \alpha_{(i,j)} + \cos \alpha_{(i,j)}) = D \cdot x_{(i,j)} \quad (41.)$$

a zároveň, že úhel α leží viz obr. č.8 tak se dostáváme k tomu, že koeficient $x_{i,j} = (\sin \alpha_{i,j} + \cos \alpha_{i,j})$ je z goniometrického pohledu špatně. Dle základní geometrie a pravidel pro výpočet trojúhelníku by měl být vzoreček pro výpočet $D_{i,j}$ následující:

$$D_{(i,j)} = \frac{D}{(\cos \alpha)} \quad (42.)$$

To nás přivádí k otázkám: je to skutečně špatně? Nemysleli autoři jiný úhel α ? Jestli ano tak který?

Co se první otázky týče tak dle geometrie by se dalo říct ano, ale pokud je skutečně odpověď ano, neuvědomili by si to autoři článku a nesnažili by se o nápravu? Zkusila jsem vyhledat pozdější články, kde by mohla být rovnice přepsána do správného tvaru a narazila jsem na článek Van Oost et. al. (2000), kde jsou autory i Desmet a Govers, a rovnice pro výpočet faktoru délky L je tam popsána ve stejném tvaru i s vysvětlivkami, že $x_{i,j} = (\sin\alpha_{i,j} + \cos\alpha_{i,j})$.

Což nás přivádí k otázce číslo dvě, a to: Co když autoři myslí jiný úhel α a případně kde tento úhel leží? Takový úhel jsem nebyla schopná nalézt.

Třetí otázku, kterou jsem si musela položit je, jestli a pokud je daná rovnice z matematického hlediska špatně, tak jestli na tom skutečně záleží tak moc, aby se tento program pro výpočet LS faktoru přestal z tohoto důvodu používat. Do studia samotné problematiky PEO jsem se nepouštěla, ale pokud se tady u nás v ČR program už pár let používá a podle jeho (a následně pak například v programu ArcGIS dopočítané celkové ztráty půdy) výpočtu se navrhuje PEO, které fungují a odvádí svoji práci dobře, tak jestli je skutečně potřeba tento program zavrhnout jako nefungující správně. Pokud opatření fungují správně, tak podle mého názoru není potřeba zavrhnout program jako celek. I když vzhledem k ukončení podpory OS Windows XP by bylo možná celkově lepší hledat jiný vhodnější program na výpočet LS faktoru.

Za předpokladu, že by se program Usle2D dál používal, vyvstává zde další problém, a to je ukončení podpory OS Windows XP. Jelikož instalační soubor Usle2D je 16bitový a na Windows 7 (64bitový systém) a vyšší se tyto verze programu nedají úspěšně nainstalovat, je jednou z možností instalace to, že se nejdříve do stávajícího OS nainstaluje virtuální OS WXPP/32 (zdroj: forum.zive.cz). Další možnosti řešení viz zdroj forum.zive.cz.

Dále se zaměřím na vlastní nastavení programu Usle2D. Nejprve uvádím v diskuzi odtokový algoritmus steepnes descent, který by se mohl jevit jako nejlepší volbou pro svoji podobnost se skutečnou odtokovou (říční) sítí. Akumulace a šíření přispívající plochy ve

skutečném terénu (menší přítoky a údolnice) je mnohem rychlejší a přímočařejší právě při použití steepest descent, a to zejména pro hlavní údolnice, zatímco vícesměrné odtokové algoritmy mají v takovém případě tendence šířit přispívající plochu tam a zpět mezi dnem údolí a přilehlými svahy. Jeho nevýhodou ovšem je, že jednosměrné odtokové algoritmy jsou citlivé na chyby v topografii, a to zejména v oblastech, kde jsou menší změny výšky, případně chyby v datech způsobující měnící se směr proudění. Proto Quinn et al. (1991) a Freeman (1991) navrhli použití vícesměrných odtokových algoritmů na svazích a jednosměrného odtokového algoritmu ve výrazných vydutích nebo trvalých odvodňovacích cestách.

Flux decomposition algoritmus (dále jen FD), přepínající na steepest descent nabízí vhodné řešení přepínání mezi vícesměrným (FD) a jednosměrným algoritmem (steepest descent). Tato kombinace předpokládá, že steepest descent bude použit pouze v situacích, kdy ostré vydutě znemožňují distribuci odtoku do kardinálních sousedů. Doporučovaným nastavením pro program Usle2D je použití právě tohoto algoritmu.

Zde si pokládám další otázku, a to, jestli by nebylo lepší použít k nastavení výpočtu přispívající plochy poslední možný algoritmus z nastavení programu Usle2D - multiple flow, který je doporučovaný v literatuře Krása a Dostál (2010). Tento algoritmus je spolu s FD řazen k vícesměrným odtokovým algoritmům, ale oproti FD, který rozděluje odtok pouze do dvou kardinálních sousedů, tak multiple flow může rozdělit odtok až do osmi směrů a tedy se může jevit ještě více vhodnějším oproti FD.

Jeho vhodnost vidím především díky tomu, že lépe vystihuje situaci na svazích. To z toho důvodu, že v této práci se zaměřuje na výpočet LS faktoru pro erozní ohroženost a výpočet rovnice ztráty půdy, jenž se používá při návrhu protierozních opatření, u kterých je předpoklad, že se budou navrhovat právě pro svahy a ne pro údolnice (koryta řek). Dalším důvodem je, že tento algoritmus, stejně jako FD, může v určité situaci „přepnout“ na steepest descent, jelikož může všechny odtok odvést do té jediné buňky, která má v tu chvíli největší spád. Zde můžu konstatovat, že doporučení Krása J., Dostál T. (2010) se jeví v souvislosti s výpočtem ztráty půdy jako správné.

Jeden z nejstarších sklonových algoritmů udávající faktor sklonu pochází od Wischmeiera a Smithe, kde základy ke konečnému vzorci se dají dohledat až k 50. létům 20. století. Rovnice je řešena pro svahy jenž mají sklon menší než 20%. Algoritmus, který je druhý nejstarší, je McCoolův. Zde jsou tři možná nastavení podle poměru rýžkové a

mezirýžkové eroze a zároveň je program Usle2D naprogramován i k rozeznání délky a případně i sklonu daného svahu, a podle toho mění rovnici pro výpočet faktoru sklonu. Posledním algoritmem je Nearingův, který byl speciálně vytvořen pro svahy mající vyšší sklon než 25%.

Pro Usle2D je doporučovaným nastavením algoritmus McCoolův. Který se zdá být vhodným pro použití v metodách erozní ohroženosti, jediný problém vyvstává u svahů majících vyšší sklon než 22%. Proto pro tyto strmější svahy bych doporučovala používat algoritmus Nearingův, který byl právě pro tyto svahy speciálně vyvinut.

11. Závěr

Cílem této práce bylo především popsat program Usle2D, jeho fungování, popsat jak jeho odtokové tak i sklonové algoritmy a rozhodnout jestli doporučené nastavení je odpovídající. Dále byl popsán i postup pro výpočet LS faktoru jak ruční metodou, tak především v prostředí technologie GIS. Také byla jen stručně popsána samotná rovnice ztráty půdy a proces eroze.

Hlavní cíle byly splněny, a to především popis programu Usle2D, jeho fungování a popis jednotlivých odtokových a sklonových algoritmů. Tyto algoritmy byly pak zhodnoceny v kapitole číslo 10. Diskuzi. Zde v této kapitole je taky zmíněn problém s ukončením podpory OS Windows XP a také se samotnou rovnicí pro výpočet faktoru délky svahu L, konkrétně s výpočtem efektivní vrstevnicové délky. Tento problém se nabízí dále k samostatnému řešení.

12. Seznam použitých zdrojů

- (1.) Barták V., 2008: Algoritmy pro zpracování digitálních modelů terénu s aplikacemi v hydrologickém modelování; Diplomová práce, FŽP, CZU Praha
- (2.) Bauer .J et. al., 1985: Ein digitales Reliefmodell als Voraussetzung fur ein deterministisches Modell der Wasser- und Stoff-Flusse. Landschaftgenese und -ökologie, 10, 1-1 5.
- (3.) Beasley D. G., 1980: ANSWERS a model for watershed planning. Transactions of the ASAE, 23, 938-946
- (4.) DESMET a GOVERS, 1996a: Comparison of routing algorithms for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullies, International Journal of Geographical Information Systems, 10:3, 311-331
- (5.) Desmet a Govers, 1996b: A GIS procedure for automatically calculating the Usle LS faktor on topografically complex landscape units, J. Soil and Water Cons. 51(5) 427-433
- (6.) Doležal et. al., 2010: METODICKÝ NÁVOD K PROVÁDĚNÍ POZEMKO-VÝCH ÚPRAV, vydalo Ministerstvo zemědělství – Ústřední pozemkový úřad
<http://www.nivnice.cz/wp-content/uploads/2012/03/Methodick%C3%BD-n%C3%A1vod-k-prov%C3%A1d%C4%9Bn%C3%AD-P%C3%9A.pdf>
- (7.) Drayton R. S.et. al.,1992: Geographical information system approach to distributed modelling. Hydrological Processes, 6, 361-368
- (8.) Drzewiecki W, a Mularz S., 2008: SIMULATION OF WATER SOIL EROSION EFFECTS ON SEDIMENT DELIVERY TO DOBCZYCE RESERVOIR, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1682-1750
- (9.) Fairfield J. and Lleymarie P., 1991. Drainage networks from grid digital elevation models. Water Resources Research, 27, 709-717.
- (10.) Foster G.R., Wischmeier W.H.. 1974. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. Transactions of ASAE 17(1):305-309
- (11.) Griffin, M. L., Beasley, D. B., Fletcher, J. J. & Foster, G. R. (1988) Estimating soil loss on topographically nonuniform field and farm units. J. Soil Water Conserv. 43(4), 326–331
- (12.) Janeček M et. al.2012: Ochrana zemědělské půdy před erozí, Metodika, Powerprint, ISBN 978-80-87415-42-9
- (13.) Jenson S. K. and J. O. Domingue. 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54 (11): 1593-1600.

- (14.) Krása J., Dostál T., 2010: Sborník vědeckého semináře: Revitalizace vodního systému krajiny a ... antropogenními změnami, ČVUT Praha
- (15.) Kadlec J., 2006: Výpočet LS-faktoru (RUSLE) s využitím GIS a USLE2D (návod pro výpočet v programu ArcGIS) http://data.plaveniny.cz/download/rusle/ls_faktor_arcgis.pdf
- (16.) Lea, N. J., 1992, An aspect driven kinematic routing algorithm, in Parsons, A., and Abrahams, A., eds., Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics: Chapman and Hall, New York. p. 393-407
- (17.) Liu, B. Y., Nearing, M.A. And Risse, L. M. 1940. Slope Gradient Effects on Soil Loss for Steep Slopes. Trans ASAE 37, 1835-1840.
- (18.) Mark D. M., 1984: AUTOMATED DETECTION OF DRAINAGE NETWORKS FROM DIGITAL ELEVATION MODELS; Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization; 0317-7173
- (19.) McCool, D.K., Foster, G.R., Mutchler, C.K., Meyer, L.D., 1989. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. Transactions of ASAE, 32, pp. 1571-1576.
- (20.) Murphree, C.E. & Mutchler, C.K. (1981): Verification of the slope factor in the universal soil loss equation for low slopes. J. Soil Water Cons. 36, 300-302
- (21.) Nearing, M. A., 1997. A Single, Continuous Function for Slope Steepness Influence on Soil Loss. Soil Sci Soc Am J, 61, pp. 917-919.
- (22.) Nerad J, 2011: Diplomová práce: Vyhodnocení povodí struhařovského potoka z hlediska ohroženosti vodní erozi v prostředí geografických informačních systémů, ČZU, FŽP, KAGUP
- (23.) Park, S.W. and Mitchell, J.K. 1983. MODANSW (a modified ANSWERS model) users guide. Agr. Engr. Res. Rept., Dept. of Agr. Engr., University of Illinois at Urbana-Champaign.
- (24.) Quinn et. al., 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. Hydrological Processes, 5, pp. 59-79.
- (25.) Scoging, H. 1992. Modeling Overland Flow Hydrology for Dynamic Hydraulics. In A.J. Parsons and A.D. Abrahams, eds., Overland Flow Hydraulics and Erosion Mechanics, pp. 105-145. UCL Press, London
- (26.) Tarboton D.G. (1997) A new method for determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. Water Resources Research 33(2): 309-317.
- (27.) Tarboton D. (2003) Terrain analysis using digital elevation models in hydrology. Paper presented at 23rd ESRI International Users Conference, San Diego, California
- (28.) TRIBE A. (1992) Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid

digital elevation models: a review and a new method. *Journal of Hydrology* 139(1-4): 263-293.

(29.) Van Oost et. al., 2000: Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage; *Landscape Ecology* 15: 577–589

(30.) Wischmeier, W. H. & Smith, D. D. 1965. Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland East Of The Rocky Mountains: A Guide For Selection Of Practices For Soil And Water Conservation. Agriculture Handbook 282. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC. USA

(31.) Wischmeier W. H., Smith D.D., 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses – A Guide to Conservation Planning. USDA Handbook 537, Washington, D. C.

(32.) Zevenbergen L. W. and Throne C. R., 1987, Quantitative analysis of land surface topography, *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 47-56.

Internetové zdroje

(1) <http://www.kuleuven.be/geography/frg/modelling/erosion/usle2dhome/input/index.htm>

(2) <http://forum.zive.cz/viewtopic.php?f=1864&t=1112678>

(3) <http://cs.wikipedia.org/wiki/Eroze>