

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

katedra geoinformatiky



**Modelování mělkých sesuvů a eroze v prostředí GIS
GRASS**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VYPRACOVALA

Bc. Václava Pechoušková

Olomouc 2006

VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

RNDr. Michal Bíl, PhD.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením RNDr. Michala Bíla, PhD. s použitím uvedené literatury.

29. srpna 2006

Václava Pechoušková

Děkuji vedoucímu diplomové práce RNDr. Michalu Bílovi, PhD. za odborné vedení a konzultace, Mgr. Janu Tomečkovi za konzultace k modelu DYLAM.

Obsah

1	Úvod	6
2	Cíl	8
3	Metody zpracování	9
4	Vymezení zájmového území	10
5	Eroze půdy	12
5.1	Vodní eroze	12
5.1.1	Formy povrchové vodní eroze	12
5.1.2	Mechanismus erozních procesů	14
5.1.3	Důsledky ztráty půdy	16
6	Svahové pohyby	17
6.1	Podmínky, faktory a příčiny vzniku svahových pohybů	17
6.2	Charakteristika sesuvných projevů	19
7	Modelování	22
8	Přístup k modelování eroze	24
8.1	Empirické modely	24
8.2	Simulační modely erozního procesu (fyzikálně podložené modely)	25
9	Přístup k modelování sesuvů	27
10	Přehled modelů pro modelování eroze	30
10.1	USLE (Universal Soil Loss Equation)	30
10.2	RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)	31
10.3	SIMWE (SIMulation of Water Erosion)	32
10.4	USPED (Unit Stream Power Based Erosion Deposition)	33
10.5	SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins)	35
10.6	SWAT (Soil & Water Assessment Tool)	35
10.7	EUROSEM (European Soil Erosion Model)	36
10.8	LISEM (LImburg Soil Erosion Model)	36
10.9	KINEROS (KINematic Runoff and EROsion model)	38
10.10	CASC2D (CASCade 2D)	38

10.11WEPP (Water Erosion Prediction Project)	39
10.12CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems)	39
10.13EPIC (Erosion/Productivity Impact Calculator)	40
10.14GLEAMS (Groundwater Loading of Agricultural Management Systems)	40
10.15PRMS (Precipitation-Runoff Modeling System)	41
10.16AGNPS (AGricultural Non-Point Source)	41
10.17AnnAGNPS (Annualized AGricultural Non-Point Source)	42
10.18ANSWERS (Areal Non-point Source Watershed Environmental Response Simulation model)	43
10.19ANSWERS-2000 (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation - new version)	44
10.20EROSION 2D/3D	45
10.21SMODERP (Simulační Model Odtoku a ERozního Procesu)	46
11 Přehled modelů pro modelování sesuvů	47
11.1 SHALSTAB (SHALlow STABility)	47
11.2 SINMAP (Stability Index Mapping)	48
11.3 Další prostředky pro modelování sesuvů	51
11.3.1 GeoStudio 2004	51
11.3.2 GLEITREIS	52
11.3.3 GEO5	53
11.3.4 GALENA	54
12 DYLAM (DYnamic LAndslide Model)	55
12.1 Algoritmus modelu	55
12.2 Popis dat	57
12.3 Výstup modelu	57
12.4 Implementace modelu do GRASSu	57
13 Použití vybraných modelů	59
13.1 Použití vybraných modelů eroze	59
13.1.1 Použití modelu SIMWE	59
13.1.2 Použití modelu USPED	61
13.2 Použití vybraných modelů sesuvů	62

14 Srovnání použitých modelů	63
14.1 Srovnání modelů SIMWE a USPED	63
14.2 Srovnání modelů SHALSTAB a SINMAP	64
14.3 Srovnání modelu DYLAM s ostatními modely	65
15 Diskuze	66
16 Závěr	67
17 Summary	68

Seznam obrázků

1	Vymezení studovaného povodí.	10
2	Zadávání parametrů v modelu SHALSTAB.	47
3	Předpokládaná geometrie modelu SINMAP.	50
4	Dialogové okno pro vstup základních hodnot modelu SINMAP.	50
5	Dialogové okno pro vstup parametrů modelu SINMAP.	51
6	Směr odtoku v modelu DYLAM.	55
7	Schéma modelu DYLAM.	56

Seznam tabulek

1	Přehled metod rajonizace území vzhledem ke vzniku svahových deformací (převzato: J. Klimeš 2003).	28
2	Porovnání vybraných terénních jednotek (převzato: J. Klimeš 2003). . .	29
3	Interpretace hodnot modelu SINMAP	49
4	Mezní hodnoty faktoru bezpečnosti	57
5	Srovnání procesu eroze modelovaných modely SIMWE a USPED. . . .	63
6	Srovnání procesu eroze modelovaných modely SIMWE a USPED. . . .	64
7	Porovnání stabilních a nestabilních míst (modely SHALSTAB a SINMAP). .	65

1 Úvod

Eroze půdy ochuzuje zemědělské půdy o nejurodnější část - ornici, zhoršuje fyzikálně-chemické vlastnosti půd, zmenšuje mocnost půdního profilu, zvyšuje šterkovitost, snižuje obsah živin a humusu, poškozují plodiny a kultury, znesnadňuje pohyb strojů po pozemcích a způsobuje ztráty osiv, sadby, hnojiv a přípravků na ochranu rostlin. Transportované půdní částice a na nich vázané látky znečišťující vodní zdroje, zanášejí akumulární prostory nádraží, snižují průtočnou kapacitu toků, vyvolávají zakalení povrchových vod, zhoršují prostředí pro vodní organismy, zvyšují náklady na úpravu vody a těžbu usazenin a velké povodňové průtoky poškozují budovy, komunikace, koryta vodních toků apod.

V ČR v současné době na jednoho obyvatele jak uvádí Janeček (2002) připadá 0,41 ha zemědělské půdy, což je průměr zemí EU a lesní půdy 0,25 ha na obyvatele. Výměra zemědělské půdy klesla od r. 1937 v ČR ze 4 988 tis. ha na 4 284 tis. ha v r. 1999 a od r. 1948 se převedlo 200 tis. ha zemědělské půdy do lesní půdy.

S problémem eroze souvisí i snahy o modelování tohoto procesu. Předpovídání eroze je základem možnosti ochrany jednotlivých pozemků (území). Jedná se však o velmi složitý problém.

První snahy o určení ohroženosti pozemku nebo celého území erozí sahají jak uvádí Janeček (2002) již do 30. a 40. let 20. století. V této době byly stanoveny první matematické postupy pro odhad velikosti eroze. S nástupem počítačové techniky došlo k zautomatizování výpočtů. Po implementaci GISů nastala možnost řešit problém eroze komplexně pro celé území. V současné době existuje mnoho modelů eroze, které jsou použitelné v GIS.

Sesuvy patří k nejznámějším a nejrozšířenějším svahovými pohybům ve světě i u nás. Vedle povodní je řadíme mezi hlavní přírodní hazardy v České republice.

V ČR je evidováno řádově na 10 000 sesuvů. Nejvíce rizikových sesuvných území se soustřeďuje do mladých vrásných pohoří s pestrými sedimentárními obaly. V tomto směru naštěstí patří Česká republika mezi relativně bezpečné země. Přesto i u nás, jak nás přesvědčily katastrofální deště a povodně v roce 1997, jsou území, kde riziko sesouvání je výrazně vyšší díky vhodné kombinaci především terénních, geologických a vláhových poměrů. Typickými příklady rizikových sesuvných regionů jsou flyšové Karpaty, okraje mladých vulkanických těles, rozčleněné sedimentární výplně prvo-, druho- a třetihorních pánví, sprašové pokryvy, svahoviny, říční náplavy a nakonec celá řada lidských zemních výtvarů, ať již v náspech nebo zářezích.

Geoinformatika jak uvádí Kolečka (2001), resp. její vybrané technologie, zde nachází široké uplatnění. Geoinformační technologie pomáhají k jejich identifikaci, mapování, popisu, monitorování, modelování a prognózování. Prvořadým problémem je odhad budoucnosti sesuvu či sesuvného území. Je-li k dispozici kvalitní a podrobná územní, geologická a hydrogeologická dokumentace, nastupují k použití hodnotící a modelační programy, které jsou schopny posoudit jednotlivé alternativy vývoje a stanovit relativní míru rizika.

2 Cíl

Cílem diplomové práce je vytvořit přehled o dostupných modelech eroze a mělkých sesuvů v GIS, a to jak statických, tak dynamických. Tato práce má několik částí, které se jednotlivým problematikám věnují.

Prvním cílem je sestavit rešerši, která by popisovala současný přístup pro modelování mělkých sesuvů a eroze.

V další části budou jednotlivé modely popsány. Z těchto modelů budou následně některé vybrány a aplikovány na experimentální povodí. Bude se jednat o modely, které je možno použít v GIS GRASS. Výsledky modelování pomocí těchto modelů budou následně vzájemně porovnány.

Součástí práce bude seznámení s modelem DYLAM (Dynamic Landslide Model), který je vyvíjen na Přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého. Tento model bude v práci popsán (jeho algoritmus, vstupní data, výstupy,...). Výsledky jeho modelování budou porovnány s výsledky modelování pomocí již existujících modelů. Posledním cílem bude navrhnout jakým způsobem by mohl být model DYLAM implementován do GRRASu.

3 Metody zpracování

Značná část diplomové práce je postavena na studiu literatury a online zdrojů. Obecně lze říci, že literatury k tomuto tématu není mnoho (i když se jedná o problém velmi rozšířený). Literatura, která se věnuje erozi, v některých případech poskytuje i informace o jejím modelování. Z děl českých autorů se jedná např. o Holého (1978) a Janečka (2002). Co se týče literatury zabývající se problematikou sesuvů (stability svahů) je situace ještě o něco horší.

Mnohem významnějším zdrojem informací je internet, kde se problematice eroze věnuje spousta internetových stránek. Stránkami bohatými na informace o erozních modelech jsou např. <http://soilerosion.net/> nebo <http://www3.bae.ncsu.edu/Regional-Bulletins/Modeling-Bulletin/>. Dalšími významnými zdroji jsou stránky Heleny Mitášové, která se problému modelování eroze věnuje řadu let. Jednoznačně se dá říci, že v podstatě jediným zdrojem informací o modelování sesuvů je právě internet. Problémem může být, že se často jedná o firemní prezentace jednotlivých produktů a jejich vlastnosti mohou být popisovány zkresleně.

Celá práce je vytvořena v GIS GRASS (Geographical Resources Analysis Support System). Použity jsou verze GRASS 6.01 a GRASS 5.3. Starší verze GRASSu byla použita, protože zahrnuje i některé modely erozních procesů (AGNPS, ANSWERS, SIMWE). Ty se v novějších verzích již nevyskytují. Jedná se o Open Source, který je volně stažitelný na domovských stránkách GRASSu: <http://itc.grass.it>. GRASS 6.01 není již nutno instalovat ze zdrojového kódu, ale je možno použít instalačních rpm balíčků. Zatímco verze GRASS 5.3 tuto možnost ještě nemá (instalace ze zdrojového kódu).

Vizualizace výsledků je provedena pomocí ArcView 3.1 při dodržení zásad tematické kartografie. Jedná se o jedinou část diplomové práce, která není vytvořena v GIS GRASS. K tomuto kroku bylo přistoupeno, aby bylo dosaženo vyšší kvality grafického výstupu. Výsledky modelování jsou z GRASSu exportovány ve formě ASCII souborů příkazem *r.out.arc*.

V internetové prezentaci, která je součástí práce jako volná příloha na CD-ROMu, jsou shrnuty základní cíle a výsledky diplomové práce.

Textová část práce je napsána v typografickém systému TeX pro Windows - MikTeX 2.4 a editoru T_EXnicCenter 1.beta 6.20.

4 Vymezení zájmového území

Oblast, na kterou jsou aplikovány vybrané modely sesuvů a eroze, je povodí Horní Bečvy. Tato oblast se nachází ve Zlínském kraji v SV části okresu Vsetín (obr. 1). Celá studovaná oblast náleží do katastru obce Horní Bečva. Velikost studované oblasti je cca 14,1 km².

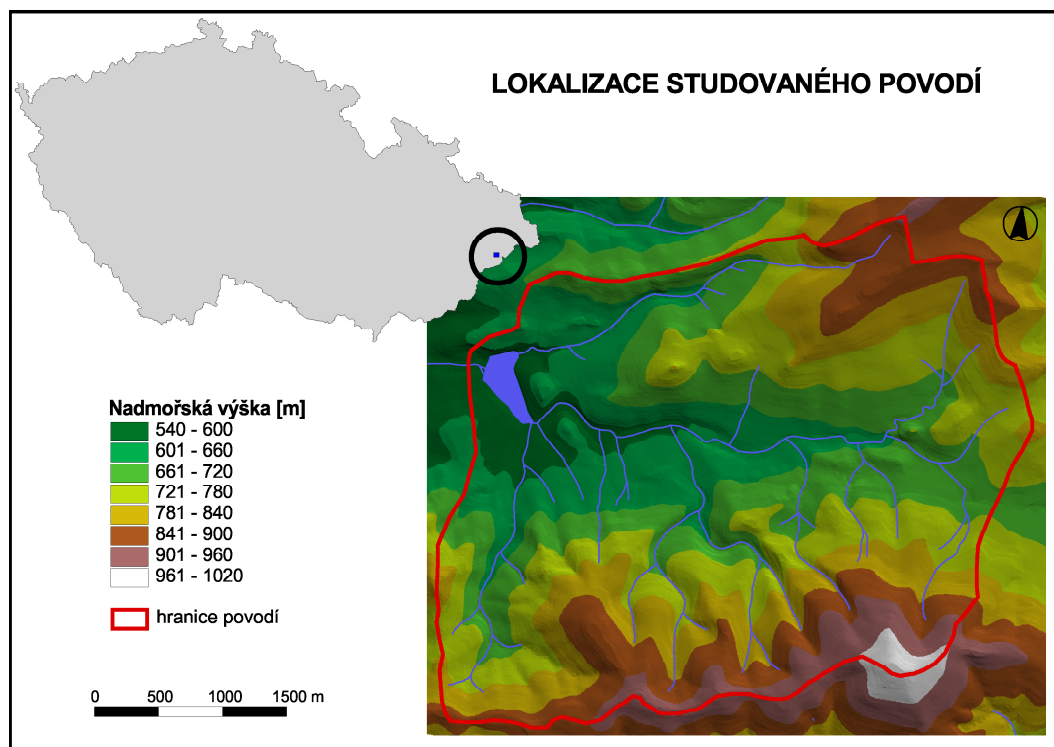
Hydrologickou osu povodí tvoří Rožnovská Bečva, která náleží do povodí řeky Moravy. V západní části se nachází vodní nádrž Horní Bečva.

Většinu studované oblasti pokrývá les (cca 70 %), a to smrkový. Dále je zde zastoupen les bukový a borový. Oba druhy se však vyskytují na plošně omezeném území.

Geomorfologie

Povodí Horní Bečvy tvoří tři okrsky: Soláňský hřbet, Mezivodská vrchovina a Vigantická pahorkatina. Všechny tři náleží do podsoustavy Západní Beskydy.

Jedná se o členitý reliéf. Nejnižší nadmořské výšky (550 m n. m.) se nacházejí v západní části území, při výtoku Rožnovské Bečvy z území. Nejvyšší nadmořské výšky (1020 m n. m.) se naopak vyskytují v jihozápadní části.



Obrázek 1: Vymezení studovaného povodí.

Geologie

Celé povodí náleží do flyšového pásma Západních Karpat. Ty byly vyvrásněny během alpinského vrásnění a poté byly na své dnešní místo přesunuty z východu. Území je tvořeno příkrovy flyšového pásma: račanskou jednotkou, slezskou jednotkou a předmagurskou jednotkou.

Flyš je mocný komplex vrstev hornin ukládaných převážně v mořském prostředí ve značných hloubkách. Většinou se skládá z rytmicky se střídajících se klastických vápni-
tých i nevápnitých sedimentů, pískovců až břidlic. Flyš se ukládal v období orogeneze, v době uzavírání (zaplňování) geosynklinál, v tektonicky i seismicky nestabilním prostředí.

Flyšové příkrovy v této oblasti tvoří pískovce, jílovce a slepence račanské, slezské a předmagurské jednotky. Na velké části území se vyskytuje kvartérní pokryv, který je tvořen převážně sedimenty štěrkovitými, písčitohlinitými a písčitými štěrky.

5 Eroze půdy

Slovo „eroze“ je latinského původu a je odvozené od slova „erodere“ - rozhlodávat. V nejširším smyslu slova pojmem „eroze“ rozumíme rozrušování litosféry, resp. pedosféry pohybující se hmotou erogenního původu. V současné době se eroze definuje jako komplexní proces, zahrnující rozrušování půdního povrchu, transport a sedimentaci uvolněných půdních částic působením vody, větru, ledu a jiných tzv. erozních činitelů (Janeček, 2002, s. 16).

Jak uvádí Zachar (1970) podle činitele, který způsobuje vznik a působí na průběh erozních procesů, rozeznáváme erozi: vodní, ledovcovou, sněhovou, větrnou, zemní a antropogenní (a erozi organogenní).

Uvedené druhy se mohou vyskytovat jednotlivě nebo v kombinaci, což způsobuje různou intenzitu erozních procesů. V celosvětovém měřítku působí největší škody vodní a větrná eroze; zvětšují se nepříznivé důsledky antropogenní eroze.

5.1 Vodní eroze

Vodní eroze je vyvolána kinetickou energií dešťových kapek dopadajících na půdní povrch, mechanickou silou povrchově stékající vody, působením evorze a sufoze a působením vody pod půdním povrchem.

V oblastech s malým množstvím jak uvádí Holý (1978) srážek dochází obvykle k malému povrchovému odtoku, neboť srážková voda se infiltruje do půdy a je zachycena vegetací. Větší množství srážek, obvykle více než 1000 mm za rok, vede k vytvoření husté vegetace, jež brání rozvinutí erozních procesů. K největšímu rozšíření vodní eroze tedy dochází v oblastech se středními hodnotami ročních srážek, v nichž je porušen přirozený kryt půdního povrchu, a v oblastech s velkým množstvím srážek, v nichž došlo k odstranění přirozeného lesního porostu.

Jak uvádí Holý (1978) formy vodní eroze jsou odvozeny z působení exogenních činitelů na půdním povrchu - eroze povrchová a pod půdním povrchem - eroze podpovrchová.

5.1.1 Formy povrchové vodní eroze

Jak uvádí Holý (1978) pod pojmem povrchová eroze rozumíme rozrušování půdy dešťovými kapkami a ronem, který tvoří povrchově tekoucí dešťová a tavná voda po svahu. Povrchová vodní eroze může být podle účinků vody na povrch: plošná, výmolná a nebo proudová.

Plošná vodní eroze

Hlavním znakem plošné eroze je, že půda je při ní erodovaná víceméně rovnoměrně po celé ploše území. Erozi způsobují kapky a povrchový odtok. Čím má plocha svahu menší sklon, tím jsou podmínky na soustředění vody horší a tím rovnoměrnější ráz má plošná eroze.

Její prvním stupněm je jak uvádí Holý (1978) eroze selektivní, při níž povrchový odtok odnáší jemné půdní částice a na ně vázané chemické látky. Dochází ke změně textury a obsahu živin v půdě. Půdy podléhající selektivní erozi se stávají hrubozrnější a mají výrazně snížený obsah živin, půdy obohacené smyvem jsou jemnozrnější a bohaté na živiny.

Při větší kinetické energii povrchově stékající vody a nepříznivém utváření půdního profilu (střídání málo odolných a odolných vrstev) dochází ke smyvu půdní hmoty ve vrstvách. Tato forma eroze se nazývá eroze vrstevná. Projevuje se na celé ploše svahu nebo probíhá v širokých pruzích v závislosti na reliéfu povrchu. Dochází při ní obvykle ke ztrátě orniční vrstvy.

Výmolná vodní eroze

Výmolná vodní eroze vzniká postupným soustředováním povrchově stékající vody, která vyrývá v půdním povrchu mělké zářezy, postupně se prohlubující.

Prvním stadiem výmolné vodní eroze je jak uvádí Holý (1978) eroze rýžková a brázdová. Při rýžkové erozi vznikají v půdním povrchu drobné úzké zářezy, které vytvářejí na postiženém svahu hustou síť. Brázdová eroze se vyznačuje mělkými širšími zářezy, jejichž hustota na svahu je menší než u eroze rýžkové.

Z rýžek a brázd vznikají pokračujícím soustředováním povrchově stékající vody hlubší rýhy, jež se směrem po svahu postupně spojují a prohlubují; jsou výsledkem rýhové eroze, která přechází ve vyšší stupeň - erozi výmolovou a tato v erozi stržovou.

Proudová vodní eroze

Proudová vodní eroze probíhá ve vodních tocích působením vodního proudu. Je-li rozrušováno pouze dno, mluvíme o erozi dnové, jsou-li rozrušováni břehy, o erozi břehové.

5.1.2 Mechanismus erozních procesů

Mechanismus erozních procesů se řídí působením a vzájemnou interakcí faktorů, které je vyvolávají a ovlivňují. Nejvýznačnější faktory jsou: klimatický a hydrologický, morfologický, geologický a půdní, vegetační, hospodářsko-technický, sociálně ekonomický.

Klimatický a hydrologický faktor

Klimatické a hydrologické poměry jsou charakterizovány zeměpisnou polohou nadmořskou výškou, teplotou ovzduší, srážkami, výparem, vlhkostí vzduchu, směrem a silou větru a povrchovým odtokem. Pro účely protierozní ochrany je nutno vyšetřovat zejména výskyt, rozdělení a intenzitu srážek, utváření a průběh povrchového odtoku.

Povrchový odtok

Odtok vody po povrchu území transportuje půdní částice uvolněné dešťovými kapkami a působením svého tangenciálního napětí rozrušuje půdní povrch a uvolňuje pro transport další částice půdy spolu s různými chemickými látkami (např. hnojiva).

K povrchovému odtoku na svahu dochází v okamžiku, v němž intenzita deště překročí vsakovací schopnost půdy, která je závislá na mnoha činitelích, z nichž nejvýznamnější jsou činitelé klimatictí, fyzicko-geografictí (z nich zejména morfologie území, geografické a půdní poměry a druh a složení vegetačního krytu) a činitelé antropogenní, působící svými nepříznivými vlivy na vodní režim území. Vsakovací schopnost půdy klesá s časem tak, jak infiltrující voda zaplňuje půdní póry, až nabude přibližně konstantní hodnoty.

Povrchový odtok, který je přímo závislý na vsakovací schopnosti půdy, vzrůstá v průběhu deště v soulase s jejím poklesem, až nabude rovněž konstantní hodnoty.

Morfologický faktor

Vodní eroze je podmíněna povrchovým odtokem vody po skloněném území. Stékající voda nabývá se zvětšováním sklonu a délky svahu (za předpokladu trvání deště) větší rychlosti a tangenciálního napětí, a tím i většího destruktivního účinku na půdní povrch. Intenzita erozních procesů se obvykle snižuje se zmenšováním sklonu, až dojde k poklesu rychlosti a tangenciálního napětí do té míry, že nastane usazování půdních částic transportovaných po povrchu.

Geologický a půdní faktor

Geologické poměry území a vlastnosti půdy mají vliv na odolnost půdy vůči erozi a tím na intenzitu erozních procesů.

Geologické poměry

Působení geologických poměrů na vznik a průběh eroze se uplatňuje přímo, a to odolností obnaženého geologického podkladu vystaveného styku s tekoucí vodou a ovzduším, a nepřímo působením na povahu půdního substrátu, jehož vlastnosti jsou dány druhem geologického podkladu.

Přímý vliv geologického podkladu se projevuje zejména v místech, v nichž snadno dochází ke zvětrávání podloží. Potom obvykle dochází k rychlému rozrušování této zvětraliny a ke vzniku rýh, výmolů a strží, jež se postupně rozšiřují a prohlubují.

Nepřímý vliv geologického podkladu se projevuje ve vlastnostech půdotvorného substrátu, který podmiňuje význačné vlastnosti půd, zejména strukturu a obsah minerálních a chemických látek. Vzniklé půdy se vyznačují různou odolností vůči působení povrchově tekoucí vody a větru.

Půdní poměry

Půdní poměry, jež jsou souhrnem jednotlivých vlastností půdy ovlivňují velikost a časový průběh infiltrace srážkové vody do půdy, na odolnost půdy vůči destruktivnímu účinku dešťových kapek, povrchově stékající vody a působení větru.

Pro velikost a časový průběh infiltrace srážkové vody do půdy je rozhodující textura a struktura půdy a její vlhkost a zvrstvení.

Pod pojmem struktura označujeme jak uvádí Stanek (1991) vzájemné uspořádání pevných částic v zemině. Toto uspořádání a jeho stálost jsou závislé na silách působících jak během probíhající sedimentace, tak i po jejím ukončení. Rozlišujeme strukturu: zrnitou, voštinovou, houbovitou nebo disperzní.

Textura zeminy udává jak uvádí Stanek (1991) makrostrukturní popis stavby určité zeminy jako celku. U usazených zemin je textura podmíněna průběhem sedimentace. Rozlišujeme texturu páskovanou nebo síťovitou.

K erozi jsou méně náchylné písčité půdy, jež se vyznačují velkou propustností. Dále jílovité půdy, jež jsou sice málo propustné, vyznačují se však vzhledem ke značnému obsahu koloidních částic v mírně vlhkém stavu vysokým stupněm soudržnosti. Následují hlinité půdy se střední propustností a značnou nesoudržností, způsobenou velkým

podílem prachových částic. Nejméně příznivé vlastnosti mají spraše a sprašové hlíny s nedostatkem tmelících koloidních částic.

Půdní struktura, jež je dána vzájemným uspořádáním a vazbou půdních částic, určuje obsah nekapilárních pórů v půdě a stabilitu půdních agregátů. Půdy s příznivě vyvinutou strukturou přijímají lépe srážkovou vodu a lépe vzdorují destrukční činnosti povrchově stékající vody než půdy, u nichž není struktura vyvinuta v dostatečné míře.

Vegetační faktor

Působení vegetačního faktoru na průběh a intenzitu erozních procesů se projevuje ochranou půdního povrchu před přímým dopadem dešťových kapek (dochází k útlumu energie vodních kapek), podporou vsaku srážkové vody do půdy a zpevněním půdy kořenovým systémem vegetace.

5.1.3 Důsledky ztráty půdy

Jak uvádí Holý (1978) při erozních procesech s nižší intenzitou dochází ke ztrátě jemných půdních částic. Tím se mění půdní textura i struktura a snižuje se vodní kapacita půdy. Při procesech vodní eroze s větší intenzitou, při nichž dochází ke smyvu značné části vrchního půdního horizontu, nepřijímá nižší horizont, obvykle s menším obsahem organické hmoty a s menší propustností, v dostatečné míře srážkovou vodu; půdní profil je ochuzen o zásobu vláhy, což má v suchých obdobích výrazný vliv na vývoj vegetace.

6 Svahové pohyby

Svahovými pohyby se označuje pohyb pevných hmot po svahu, a to bez ohledu na rychlost pohybu nebo zda k pohybu dochází za sucha či působením vody.

6.1 Podmínky, faktory a příčiny vzniku svahových pohybů

Ke svahovým pohybům dochází následkem porušení rovnováhy hmot na svahu, a to v okamžiku, kdy převažují účinky aktivních sil (gravitace, hydrodynamický tlak) nad silami pasivními, které se snaží pohybu zabránit (pevnost hornin, tření). Výsledkem převahy aktivních sil jsou svahové deformace.

Jedním ze základních předpokladů svahových pohybů jsou kromě umělých zásahů do přirozeného vývoje svahu přírodní podmínky, dané geologickými, klimatickými, hydrogeologickými a geomorfologickými poměry.

Vznik nebo reaktivaci svahových pohybů podmiňují morfologické poměry (změna sklonu a výšky svahu), geologická stavba (litologická a strukturní anizotropie), fyzikální faktory (klimatické poměry), rychlé tání sněhu, vliv podzemní vody, zvětrávání, promrzání a antropogenní faktory.

Morfologické poměry

Ke vzniku svahových pohybů může dojít vlivem změny výšky a sklonu svahu. Příčinou může být např. fluviální eroze, díky níž je horninový materiál odnášen z paty svahu, nebo erozní prohlubování údolí, které vede ke zvětšení výšky svahu a k uvolnění bočního napětí ve svahu, vzniklými tahovými puklinami proniká do svahu voda a napomáhá jej rozrušovat, zejména ve formě ledu.

Geologická stavba

Svah se vyvíjí v určitých přírodních podmínkách, které jsou představovány souborem geologických, geomorfologických, hydrogeologických a klimatických poměrů. Tyto poměry jsou dále ovlivňovány tektonickou stavbou, která se může stát určující podmínkou pro vznik sesuvu.

Příznivou geologicko-tektonickou strukturou v povrchové zóně pro podmínky Západních Karpat může být taková struktura, která se vytvořila zvětrávacími, erozními a akumuláčními procesy během kvartéru. Např. ukloněný nezvětralý podklad pokrytý suťovou akumulací předurčuje smykovou plochu.

V podpovrchových zónách jsou např., pro vznik svahové deformace příznivé, struktury tvořené rigidním komplexem (vápence, pískovce, . . .) spočívajícím na plastickém nepropustném podkladu (jílovce, slínovce), mnohonásobným střídáním vrstev pevnějších s méně odolnými horninami s rozdílnou propustností, struktury tektonicky porušené nebo oslabené systémy puklin a foliačních ploch. Predispozici k sesouvání mají také křídla vrás nebo násunové plochy příkrovů.

Klimatické poměry

Krajinotvorné pochody (eroze půdy, sesuvy aj.) jsou urychlovány především extrémními srážkami během přívalových dešťů. Tíha zvodněné vrstvy vlivem infiltrující vody narůstá, dočasně je zvýšen také pórový tlak, který způsobuje snížení pevnosti ve smyku.

Množství vody ze srážek, které se do horninového prostředí dostane, je dáno především propustností, dále teplotou vzduchu, táním sněhu a výparem. Nové hydrogeologické podmínky svahu se mohou vytvořit např. na jaře po výrazném oteplení a rychlém tání sněhové pokrývky.

Působení podzemní vody

Sesuv může být aktivován např. u přehrad, přečerpávacích vodních elektráren, kanálů, na březích jezer, řek, podél mořského pobřeží při náhlé změně hladiny vody, která režim podzemních vod ovlivní.

Při změnách rychlosti a tlaku proudící vody může v příhodných podmínkách (jemné písčité a prachovité frakce) docházet při překročení kritické rychlosti proudění k vyplavování částic zeminy - sufozi.

Zvětrávání

Proces zvětrávání má povahu fyzikálního rozrušování i chemického rozkladu. Intenzita, hloubka a rychlost je ovlivněna srážkovými a teplotními poměry, vegetačním pokryvem aj. Textura i struktura horniny je narušována.

Vliv promrzání

Voda zamrzlá v trhlinách zvětšuje svůj objem a po opětovném rozmrznutí snižuje soudržnost zemin. V jílovitých a jílovito-písčitých zeminách se vytvářejí ledové vrstvičky. Během tání se objem vody zmenšuje a povrchová vrstva rozbřídá.

Vulkanické erupce

Při vulkanických erupcích je vyvrhováno velké množství popela, který se ukládá na okolních svazích. Na nich se během následných intenzivních dešťů zrychluje eroze a mohou vznikat rozsáhlé bahenní (označované také jako lahary) a suťové proudy.

Příčinou vzniku bahenních proudů se stávají i rozžhavená pyroklastika postupně roztápějící led a sníh na vrcholcích vulkánu.

Zemětřesení

Při zemětřesení se v horninovém prostředí dočasně mění napětí, porušující stabilitní poměry svahu v širokém okolí epicentra. Při zemětřesení se nejčastěji rozvíjejí skalní řícení, sesouvání, zemní a kamenité proudy.

Antropogenní faktory

Nejčastější antropogenní příčinou vzniku gravitačních pohybů je změna geometrie svahu způsobená stavebním zářezem nebo výkopem jámy v patě svahu, a také přitížením horní části svahu násypem nebo stavební konstrukcí. Nepříznivě působí také umělé vibrace (technická seizmicita) např. při zabudovávání pilot, otřesech v lomech, průjezdech těžké mechanizace.

Stabilitu svahu udržují mechanickým působením kořeny rostlin, které také spotřebovávají část vody. Odstranění vegetace může vést ke změně režimu vody v povrchových vrstvách a urychlení eroze, čímž se negativně ovlivní poměry svahu.

K sesuvům dochází i na okrajích poklesových kotlin v území s hlubinnou těžbou užitkových nerostů nebo na akumulacích vytěžených hmot.

6.2 Charakteristika sesuvných projevů

Základem třídění jsou jak uvádí Stanek (1991) dvě kritéria - mechanismus pohybu a rychlost pohybu. Svahové pohyby dělíme na čtyři velké skupiny: ploužení, sesouvání, stékání a řícení.

Ploužení

Ploužení je dlouhodobý, pomalý pohyb charakteru vazko-plastického tečení hmot. Není vyvinuta smyková plocha, obvykle se vytváří evidentní zhmožděná zóna. Velikost pohybu je vzhledem k jeho prostorovým rozměrům zpravidla zanedbatelná. Ploužení je často přípravnou fází pro další typy svahových pohybů.

Termínu ploužení používáme pro označení pomalého tečení hmoty. Z geologického hlediska jde o dlouhodobý, zpravidla nezrychlující se pohyb horninových hmot, přičemž hranice vůči pevnému podloží je ve většině případů nezřetelná. Velikost posunů hmot je vzhledem k prostorovým rozměrům postiženého horninového masivu zanedbatelná. Jestliže se tento proces výrazně zrychlí, přechází ploužení do sesouvání, stékání nebo řícení.

Sesouvání

Sesouvání je relativně rychlý, krátkodobý klouzavý pohyb horninových hmot po svahu podél jedné nebo více smykových plochách. Výslednou formou sesuvného pohybu je „sesuv“. Charakteristické je, že část hmot se nasune na původní terén v předpolí.

Stékání

Stékání je rychlý krátkodobý pohyb horninových hmot ve viskózním stavu. Podstatná část hmot vyteče z odlučné jámy a přemístí se po povrchu terénu na velkou vzdálenost. Stékající hmoty jsou ostře odděleny od neporušeného podloží. Ve srovnání s „pomalým tečením“ při ploužení jde v tomto případě o „rychlé“ tečení. Výslednou formou pohybu je „proud“.

Řícení

Řícení je náhlý krátkodobý pohyb horninových hmot na strmých svazích, přičemž se postižené hmoty rozvolní a ztrácejí krátkodobě kontakt s podložím. Při pohybu se uplatňuje volný pád, ale současně i ostatní druhy pohybu. Dříve než hmoty ztratí kontakt s podložím, může docházet k plouživým i sesuvným pohybům. Také po dopadu k patě svahu se zřícené hmoty dále pohybují formou stékání a sesouvání. Vzdálenost přemístění hmot je vzhledem k prostorovým rozměrům zříceného masívu mnohonásobně větší.

Jak uvádí Stanek (1991) podle tvaru sesuvu je možno rozlišit tři typy:

- Plošné sesuvy - které vznikají na plochých svazích a jejich délka a šířka jsou přibližně stejné. Mocnost sesouvající se hmoty zpravidla nepřesahuje 10 m
- Proudové sesuvy - které vznikají v erozivních rýhách na svazích nebo v úzkých a hlubokých údolích, jsou protáhlé a poměrně úzké. Lze v nich rozlišit odlučnou tahovou zónu, střední část sesuvu (zónu transportu) a akumulární (tlakovou)

zónu v dolní části sesuvu. Rychlost sesuvu je nepoměrně vyšší než rychlost sesuvu plošného

- Frontální sesuvy, které vznikají jako výsledek erozivní činnosti řek na jejich nárazových březích. Jejich šířka převažuje nad délkou.

Z hlediska potřeb praxe je důležité rozlišit tzv. aktivitu sesuvu. Podle toho rozlišujeme sesuvy aktivní, které jsou charakteristické periodickým opakováním pohybu v současné době, uklidněné sesuvy, které jsou v současné době v klidu, ale mohou se aktivovat působením přírodních nebo umělých faktorů a stabilizované sesuvy, které jsou uklidněné a nelze je aktivovat přírodními faktory, ale pouze antropogenní činností.

Aby mohlo k sesuvnému pohybu dojít, musí být splněny morfologické, geologické, hydrogeologické a klimatické předpoklady. Ne každé geologické podloží představuje vhodný podklad pro sesuv - oblasti s vhodnými geologickými předpoklady nazýváme „sesuvné struktury“ (Stanek, 1991, s. 110). Významným zdrojem ohrožení jsou i nevhodné lidské zásahy.

Oblast karpatského flyše

Zkušenosti se sesuvy v oblasti karpatského flyše (tedy ve studované oblasti) jsou dlouhodobé, mimořádný počet se jich ovšem objevil po katastrofálních srážkách v červenci 1997. Sesuvy v této oblasti se v zásadě dají rozdělit do dvou skupin.

1. Sesuvy mělké, t.j. sesuvy, které se vyvinuly ve zvětralinovém plášti. Jílovce a písčince flyšového komplexu zvětrávají na písčitou hlínu, která má menší soudržnost a potom postačuje zvýšený srážkový úhrn na to, aby došlo ke ztrátě stability a vzniku sesuvu.
2. Sesuvy hluboce založené, t.j. sesuvy zasahující do nevětralého podloží. Těchto sesuvů je podstatně méně, než sesuvů prvního typu, ale jsou nebezpečnější, protože se do pohybu dostávají velké masy horniny.

Oba výše zmíněné typy sesuvů se nevyklučují, poměrně běžně dochází k situaci, kdy mělké sesuvy zvětralinového pláště pokrývají sesuv po hlubokých smykových zónách.

7 Modelování

Modelování je experimentální informační proces, při němž se zkoumanému systému (originálu, objektu, dílu) jednoznačně přiřazuje podle určitých kritérií jiný systém, fyzický nebo abstraktní, nazývaný model. Zobrazovaná skutečnost se nazývá předmět modelování.

Modelování dynamických systémů s přímým nebo nepřímým zpětným působením na zkoumaný objekt se nazývá simulací.

Modely

J. Tuček (1998) definuje s odvoláním na J. Neumanna (1996) model jako sadu pravidel a procedur realizace prostorové analýzy, jejímž účelem je odvození nové informace, která může být analyzována a může tak pomoci při řešení problému nebo plánování.

Je nezbytné zdůraznit jak uvádí Machala (1982), že žádný model nemůže detailně popsat zkoumaný jev v jeho celé šíři. Z tohoto důvodu pro zkoumání se vybírají jen jevy podstatné jevy podružné se vynechávají.

Podle charakteru modelového systému se modely jak uvádí Kuneš (1989) rozdělují na abstraktní (formální, ideové) a fyzické (předmětové, materiální, realizační). Fyzický model je model tvořený přirozeným nebo umělým hmotným systémem. Fyzický model dynamického systému použitý k simulaci se nazývá simulační model. Abstraktní model je tvořen nehmotným systémem (představou, znakovým nebo grafickým vyjádřením apod.) popisujícím zkoumaný systém.

Systémy

Důležitý teoretický základ v modelování tvoří teorie systémů. Ta se zabývá obecnými otázkami matematického modelování, jako analýzou a syntézou složitých systémů technických, biologických, ekonomických, společenských a dalších. Základním nástrojem v teorii systémů je abstrakce, modelování a analogie. Pro modelování vyplývá z teorie systémů kromě jiného vymezení pojmu systém.

Systémem se rozumí v matematickém slova smyslu množina prvků, spojených navzájem i s okolím interakcemi, jež vytvářejí vlastnosti umožňující splnění účelových i cílových funkcí. Strukturou se rozumí vnitřní uspořádání systému vyjádřené vzájemnými vazbami a působením ji tvořících složek vnitřní organizace celku nebo jeho dílčích částí.

Formální popis systému lze provést jak uvádí Kuneš (1989) ve tvaru $S(X, R)$, kde

$$X = x_1, x_2, \dots, x_n \quad (1)$$

je množina prvků a

$$R = r_1, r_2, \dots, r_m \quad (2)$$

je množina relací či vztahů mezi prvky. V nejjednodušším případě může být relace binární $r_k(x_i, x_j)$. Nejjednodušší systém sestává z dvojice prvků, množina R obsahuje pak jediný vztah.

Dynamickým systémem se rozumí systém $S(t)$, v němž stavové veličiny probíhají v prostoru a čase t . Limitním stavem dynamického systému je jeho počáteční nebo ustálený stav. Dynamické systémy se mohou rozdělovat na deterministické a stochastické, což je hledisko uplatňující se významně i v modelování. Podle způsobu vyjádření v prostoru a čase se rozdělují dynamické systémy na spojité nebo diskrétní v prostoru nebo čase. Další důležité dělení dynamických systémů je na lineární a nelineární a dále na stacionární a nestacionární (Kuneš, 1989, s. 19).

8 Přístup k modelování eroze

Modelování eroze v GIS se zaměřuje na popis prostorového rozložení toku sedimentů, odtržení půdy a sítě eroze a ukládání nánosů. Schopnost předpovědi eroze a ukládání nánosů a určení polohy vysoce ohroženého místa pro různé druhy využití půdy je rozhodující pro účinné obhospodařování pozemku. Prostorové analýzy a simulace mohou také poskytnout podpůrné informace pro rozvržení zdrojů v těchto územích a typy postupů, které zajistí účinnější ochranu.

Důraz na integraci lokálních vlivů s přístupy v měřítku povodí („watershed-scale“) má významný dopad na rozvoj podpůrných GIS nástrojů a nástrojů pro modelaci. Komplexní, fyzikálně podložené modely jsou potřebné pro lepší pochopení a předpovědi sesuvů v prostoru a čase. Pro dynamické modelování eroze, transportu sedimentů a sedimentace je třeba uvažovat tyto procesy: srážky, růst vegetace, povrch, podpovrch a tok podzemní vody, vlastnosti půdy. Příklady simulačních systémů jsou: WEPP, LISEM nebo SWAT. Prostorové složky těchto systémů jsou obvykle založeny na 1D směrování vody a sedimentů přes homogenní hydrologické jednotky (např.: části svahu), limitující rozsah prostorových účinků, které mohou být simulovány. Pro přesnější vyjádření dopadů prostorově proměnlivých podmínek lze použít skupinu hydrologických a sedimentárních transportních modelů představujících 2D směrování toku - CASC2d nebo SIMWE.

8.1 Empirické modely

Empirické modely jsou založeny na poznání zákonitosti vzniku a průběhu procesu vodní eroze. Ty jsou výsledkem dlouhodobého terénního pozorování a laboratorních experimentů. Vztahy kvantifikující vlivy jednotlivých erozních faktorů i intenzitu erozních jevů mají základ v analýze a zpracování časových řad a vedly v počátečním období výpočetních metod k odvození a používání těchto modelů.

Základy pro matematické vyjádření erozního procesu byly jak uvádí Janeček (2002) položeny pravděpodobně pracemi L. H. Cooka z roku 1936, který definoval hlavní faktory podílející se na vzniku a průběhu erozního procesu: náchylnost půdy k erozi (erodovatelnost), potenciální erozní účinnost deště a povrchového odtoku, vliv ochranného účinku vegetačního krytu, vliv sklonu a délky svahu.

Jak uvádí Janeček (2002) za první empirický model erozního procesu se považuje vztah odvozený na základě rozsáhlého výzkumu vlivu sklonu a délky svahu Zinggem

z roku 1940 pro odhad průměrné roční ztráty půdy vodní erozí:

$$G = C \cdot S^{1,4} \cdot L^{0,6}, \quad (3)$$

kde G je průměrná roční ztráta půdy, S je sklon svahu, L je délka svahu a C je konstanta, která zahrnuje ostatní faktory ovlivňující erozi.

Obecný vztah jak uvádí Holý (1978) lze napsat ve tvaru:

$$S_P = f(X_K, X_H, X_M, X_P, X_G, X_V, X_{TE}), \quad (4)$$

kde S_P je intenzita erozního procesu (smyv půdy), X_K je klimatický součinitel, X_H je hydrologický součinitel, X_M je morfologický součinitel, X_P je půdní součinitel, X_G je geologický součinitel, X_V je vegetační součinitel a X_{TE} je hospodářskotechnický a ekonomický součinitel.

Z podrobného rozboru uvedených činitelů vyplývá, že jejich vzájemné působení je velmi složité a řešení uvedeného modelu erozního procesu mimořádně obtížné, neboť účinnost jednotlivých činitelů a jejich vzájemné působení probíhá v různých podmínkách ve značném rozmezí.

Empirické modely erozních procesů mají nevýhodu ve složitých vzájemných vazbách velkého množství působících činitelů, jejichž zjednodušení může vést ke snížení únosné meze přesnosti výpočtů. Jejich nevýhodou je omezená platnost na lokality se stejnými podmínkami. Použití empirických vztahů v jiných podmínkách vyžaduje úpravu zahrnující vliv místních činitelů.

8.2 Simulační modely erozního procesu (fyzikálně podložené modely)

Simulační modely vodní eroze vycházejí z definice eroze jako přírodního procesu uvolňování, transportu a ukládání půdních částic působením erozních činitelů. U vodní eroze jsou těmito činiteli ve většině případů dešťové srážky a z nich vzniklý povrchový odtok. Pro prognózu intenzity eroze a transportu látek a účinnosti protierozních opatření se podrobně vyhodnocují všechny přírodní a člověkem ovlivněné faktory, které se podílejí na vzniku a průběhu těchto jevů a kvantifikuje se jejich podíl na výsledné intenzitě erozního procesu a jeho vliv na prostředí. Za hlavní přednosti simulačních modelů erozního procesu se ve srovnání s empirickými modely podle Janečka (2002) považují:

- fyzikální základ (fyzikální zákonitosti vzniku a vytváření povrchového odtoku, vzniku a průběhu procesů uvolňování, transportu a ukládání půdních částic),

který umožňuje jejich univerzálnější použití a spolehlivější extrapolaci výsledků v různých podmínkách;

- teoreticky správnější reprezentaci erozního procesu, např. jeho rozdělením na procesy mezirýžkové a rýžkové eroze na odtokových plochách a jejich definování a zahrnutí do modelů jako dvou samostatných procesů;
- přímé zahrnutí procesu eroze způsobeného soustředěným odtokem (výmolové a proudové eroze) a určení její intenzity;
- přímé zahrnutí procesu ukládání transportovaných částic a určení jeho intenzity;
- fyzikální základ modelů umožňuje do simulace zahrnout i transport znečišťujících látek vázaných na povrch půdních částic nebo rozpuštěných v povrchovém odtoku;

Na druhé straně simulační modely zvyšují nároky na rozsah a dostupnost vstupních dat a vyžadují alespoň předběžnou kalibraci modelu pro podmínky vyšetřovaného území. Současně kladou vyšší nároky na teoretické znalosti uživatelů a jejich schopnost pracovat s moderní výpočetní technikou a informačními technologiemi.

9 Přístup k modelování sesuvů

V závislosti na velikosti studované oblasti existují jak uvádí Klimeš (2003) dva přístupy k tvorbě modelů náchylnosti nebo stability území. Pro plošně omezená území je s úspěchem využíváno inženýrsko-geologických metod pro posouzení stabilitních poměrů a navržení eventuelních stabilizačních opatření. Tyto metody vycházejí z podrobného poznání podmínek a mechanismu vzniku konkrétní svahové deformace což velmi často vyžaduje kromě detailních informací o litologii, zvodnění geologického prostředí a sklonitostních poměrech, také laboratorní testy a uskutečnění vrtných prací. Pro plošně rozsáhlá území (např. větší povodí, regiony) je tento přístup z finančních i kapacitních důvodů neproveditelný. Přesto existuje potřeba rajonizace rozsáhlých územních celků vzhledem ke vzniku svahových deformací.

K tomuto účelu byla vyvinuta celá škála metod. Jejich stručný přehled je v tabulce 1.

Dále lze jednotlivé modely rozlišit podle toho zda jsou založeny na využití statistiky - tzv. black box, nebo fyzikálních modelů - tzv. white box a nebo zda kombinují metody statistických a fyzikálních modelů - tzv. grey box.

Výběr a využití jednotlivých metod tvorby modelů náchylnosti závisí, kromě měřítka, především na účelu. Účel rajonizace ovlivňuje požadovanou podrobnost, časový rozsah a přesnost vstupních dat. Důležité je také pro jaký typ svahové deformace bude připravovaný model vytvořen.

Při výběru konkrétního modelu náchylnosti hraje důležitou roli také výběr určitého typu tzv. terénní jednotky („terrain-unit“), její konkrétní podoba určuje, zda model bude vytvořen v rastrovém nebo vektorovém prostředí GISu. Jednotlivé faktory vedoucí ke vzniku svahových deformací (např. geologické a půdní poměry, sklon svahu, využití půdy), jsou navzájem funkčně spjaty, proto oddělené zpracování a použití map jednotlivých faktorů jako vstupních dat, může vést k nepřesnostem modelu.

Podstatu reálného světa lépe vystihuje homogenní část reliéfu (terénní jednotka), která je charakterizována souborem faktorů vedoucích ke vzniku svahových deformací. Podmínkou pro použití terénních jednotek je jednoznačné určení jejich hranic, které musí být snadno mapovatelné na celém studovaném území na základě co možná nejvíce objektivních kritérií. Ukazatele náchylnosti území k sesouvání jsou pak vztaženy ke každé terénní jednotce jako celku. Rozměry terénních jednotek tedy udávají prostorové rozlišení výsledné mapy náchylnosti území. Příkladem nejpoužívanějších terénních jednotek jsou tzv. svahové jednotky („slope units“) a pixely (přesněji „grid-cells“). Pixel je základní prostorovou jednotkou všech rastrových GIS. Svahovou jednotku je charakterizována jako levá nebo pravá část dílčího povodí libovolného řádu. Hranici svahové

Tabulka 1: Přehled metod rajonizace území vzhledem ke vzniku svahových deformací (převzato: J. Klimeš 2003).

Teoretické modely	Deterministické/fyzikální modely		mapa náchylnosti je odvozena na základě znalosti fyzikálních a chemických pochodů vedoucích ke vzniku deformací, často se jedná o aplikaci inženýrsko-geologického přístupu v regionálním měřítku - např. modely SINMAP, SHALSTAB, DELISA, SHETRAN
Empirické metody	„data-driven“ / statistické metody	dvourozměrné analýzy	každý faktor je hodnocen odděleně (hodnocení jedné závisle a jedné nezávisle proměnné), jednotlivé faktory jsou hodnoceny na základě hustoty výskytu svahových deformací v jednotlivých třídách faktorů
		vícerozměrné analýzy	metoda se snaží předpovědět vznik svahových deformací (závisle proměnná) na základě souboru známých faktorů (nezávislých proměnných) - diskriminační analýza, logistická regrese
	„knowledge-driven“ / heuristické metody	přímé	mapa náchylnosti je odvozena přímo z geomorfologické mapy a inventarizační mapy sesuvů na základě expertní znalosti hodnotícího pracovníka
		nepřímé	mapa náchylnosti je odvozena z kombinace několika typů map, které jsou seřazené a klasifikovány na základě expertní znalosti hodnotícího pracovníka

jednotky tvoří rozvodnice, vodní tok a jejich spojnice probíhající po svahu. Předpokladem pro použití svahových jednotek v praxi je možnost automatizovaného rozdělení území na dílčí jednotky. Jedině tak je zajištěna homogenita tvorby svahových jednotek. Porovnání obou typů terénních jednotek je uvedeno v tabulce 2.

Tabulka 2: Porovnání vybraných terénních jednotek (převzato: J. Klimeš 2003).

pixel	svahová jednotka
jednoduše definovatelné hranice	definice hranic bez specializovaného programu je obtížná a zatížená subjektivní chybou
výrazně podrobnější prostorové rozlišení výsledné mapy náchylnosti	málo podrobné rozlišení výsledné mapy náchylnosti
jednotlivé jednotky jsou obtížně identifikovatelné v terénu	snadná identifikace jednotlivých jednotek v terénu
velmi citlivé na přesnost vstupních dat - zejména inventarizačních map svahových deformací, čím je snížen efekt podrobnějšího prostorového rozlišení	citlivost na nepřesnosti v inventarizačních mapách svahových deformací je výrazně potlačena
umělé rozdělení reálného světa	přirozené rozdělení reálného světa odpovídající charakteristice svahových pohybů
velké objemy dat (vysoký počet pixelů) způsobují problémy při jejich zpracování statistickými programy	počet jednotek závisí na průměrné ploše studovaných svahových deformací

10 Přehled modelů pro modelování eroze

Pro modelování eroze bylo vytvořeno mnoho modelů. Zdroje, které se jim věnují, nejsou úplné. Příkladem může být internetová stránka <http://soilerosion.net>. Na této adrese se nachází výčet několika erozních modelů. Ani tento výčet však není úplný. Další internetovou stránkou, kde se nachází výčet, je <http://www3.bae.ncsu.edu>. Podobným zdrojem může být i <http://web.aces.uiuc.edu/sriit/watershed/model/modelsindex.htm>. V této práci jsou z podobného důvodu zmíněny jen některé modely. Jejich přehledný soupis s nejzákladnějšími vlastnostmi je uveden v příloze 1.

10.1 USLE (Universal Soil Loss Equation)

Univerzální rovnice ztráty půdy (USLE) je model pro výpočet dlouhodobého průměrného odnosu půdy z pozemku. USLE je používána k ochraně půdy po celém světě pro předpovídání průměrné roční ztráty půdy způsobené plošnou a rýhovou erozí. Autory této rovnice jsou Wischmeier a Smith. Účinek jednotlivých členů rovnice byly posouzeny jak uvádí Holý (1978) na jednotkovém pozemku s přesně definovanými parametry. Jeho délka byla 22,13 m, sklon 9 %, pozemek byl trvale obdělávaný ve směru sklonu.

$$A = R'K'L'S'C'P', \quad (5)$$

kde A' je roční ztráta půdy [$t \cdot ha^{-1}$]. Používá-li se rovnice pro návrh protierozních opatření, je A tzv. tolerance ztráty půdy, kterou lze při realizaci zvolených protierozních opatření připustit, aniž dojde ke ztrátě produktivity na vyšetřovaném pozemku.

R' je dešťový součinitel definovaný jako součin kinetické energie deště a jeho nejvyšší 30 minutové intenzity. Hodnoty dešťového součinitele pro jednotlivé deště mohou být ve zvolené časové periodě sčítány, čímž se získá časový součinitel R pro zvolenou periodu. Trvá-li jeden rok, získá se roční hodnota součinitele R' .

K' je součinitel erodovatelnosti půdy. Vyjadřuje náchylnost půdy k erozi a udává ztrátu půdních částic z jednotkového pozemku na jednotku dešťového faktoru R .

L' je součinitel délky svahu; vyjadřuje poměr ztráty půdy z vyšetřovaného pozemku a ztráty půdy z jednotkového pozemku o délce 22,13 m; lze jej získat ze vztahu:

$$L' = \left(\frac{L}{22,13} \right)^p, \quad (6)$$

kde L je délka svahu měřená od rozvodnice [m], p je exponent o hodnotě 0,3 až 0,6; pro svahy o sklonu $I \leq 10\%$ je $p = 0,6$;

S' je součinitel sklonu svahu; vyjadřuje poměr ztráty půdy z vyšetřovaného pozemku a ztráty půdy z jednotkového pozemku o sklonu 9 %; lze jej získat ze vztahu

$$S' = \frac{0,43 + 0,30I + 0,043I^2}{6,613}, \quad (7)$$

kde I je sklon svahu [%].

Autoři vztahu doporučují kombinovaný součinitel délky a sklonu svahu $L'S'$. Pro tento součinitel odvodili vztah

$$L'S' = \frac{Lp}{100} (1,36 + 0,97I + 0,1385I^2), \quad (8)$$

kde L je délka pozemku měřená od rozvodnice [m] a I je sklon pozemku [%].

C' je součinitel vyjadřující vliv osevního postupu a agrotechniky. Udává poměr ztráty půdy z vyšetřovaného pozemku a ztráty půdy z jednotkového pozemku (trvalý úhor). Předpokládá se konstantní působení ostatních činitelů.

P' je součinitel vyjadřující vliv protierozních opatření. Udává poměr ztráty půdy z vyšetřovaného pozemku a ztráty půdy z jednotkového pozemku obdělávaného ve směru sklonu svahu.

Univerzální rovnice ztráty půdy umožňuje prognózu průměrné ztráty půdy pro alternativní kombinace osevních postupů, zemědělských technologií a protierozních opatření. Při volbě určité tolerance ztráty půdy lze při určení, resp. volbě součinitelů rovnice zjistit zbývající součinitel (např. povolenou délku obdělávaného pozemku ve směru sklonu, vhodný osevní postup, druh protierozních opatření apod.).

Při použití empirického modelu W. H. Wischmeiera a N. H. Smithe, ačkoliv je uváděn jako univerzální, je nutno mít na paměti, že jeho datový soubor je odvozen na území USA. Poněvadž USLE byla vyvinuta k určení dlouhodobé průměrné roční ztráty půdy, nelze ji použít ke zjišťování smyvu z jedné srážky.

10.2 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)

Revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy (RUSLE) je vylepšená metoda modelování eroze. Přesněji předpovídá erozi a ukládání sedimentů v oblasti komplexní topografie. Přináší tedy zlepšení výpočtu unášecí schopnosti a usnadnění aktivnějšího obhospodařování pozemku.

Rozdíly mezi RUSLE a USLE

Hlavní rozdíly mezi rovnicemi RUSLE a USLE vyplývají z významných změn ve způsobu stanovení jednotlivých erozních faktorů:

R faktor - zavedení nových a revize již existujících izo-erodentních map pro území USA, zpřesnění časového průběhu hodnot R faktoru v 15-ti denním intervalu, stanovení R faktoru v oblastech s malými sklony.

K faktor - určení časového průběhu hodnoty faktoru erodovatelnosti půdy v důsledku zhutňování povrchu půdy a rozpadu půdních agregátů srážkami a obhospodařováním, dále vzhledem k objemovým změnám vyvolaným mrznutím a táním; zahrnutí vlivu skeletu na povrchu půdy a v půdním profilu na propustnost půdy.

LS faktor - zavedení nového vztahu pro vliv délky a sklonu svahu, který také uvažuje poměr rýhové eroze k mezirýhové, upřesnění hodnoty sklonu svahu pro stanovení ztráty půdy.

C faktor - zpřesnění faktoru pro hodnocení vlivu jednotlivých druhů plodin a způsobů obdělávání pro nevyužívané půdy, pastviny, poškozené lesy, území s povrchovou těžbou surovin, staveniště a rekultivované plochy; zahrnutí vlivu předchozího využití půdy, druhu vegetace, pokryvu půdy a drsnosti půdního povrchu.

P faktor - zpřesnění hodnot P faktoru pro území zemědělsky využívané i nevyužívané, přehodnocení vlivu vrstevnicového obdělávání a terasování na snížení ztráty půdy, umožnění návrhu ochrany půdy a kontroly množství splavenin.

Modely USLE a RUSLE byly kritizovány, protože: předpovídají erozi všude, dokonce tam, kde to není ani možné, neumí předpovídat ukládání sedimentů a neumí výpočet pro komplexní topografii, ani když jsou integrovány v prostředí GIS. Citlivostní analýzy ukazují, že LS faktor má největší úhrnný dopad na odhad eroze, je však těžko odhadnutelný.

10.3 SIMWE (SIMulation of Water Erosion)

Model používá některé teoretické principy vyvinuté pro model WEPP a dovoluje simulovat realističtější režimy transportních procesů eroze a sedimentů, které se vyskytují mezi erozí a transportem (toto dovoluje studovat dopady rozsáhlých i malých událostí, které mohou vést k velmi rozdílným stavům eroze/sedimentace). Můžeme také studovat některé důležité účinky BMPs (travnaté pásy, filtrační pásy, živé ploty, atd.) a simulovat rozdělení hloubky vody v územích s terénními depresiemi. Model je upraven jako vyhledávací nástroj a neustále je vylepšován přidáváním dalších procesů

a schopností jako je infiltrace, dynamičnost, účinky mělkých kanálů a změny v terénu způsobené erozí a sedimentací.

Model se skládá ze dvou samostatných submodelů: *r.sim.water* a *r.sim.sediment*.

Modul *r.sim.sediment* je simulační model půdní eroze, vyvolané proudící vodou navržený pro prostorově proměnlivý terén, půdu, pokrývku a podmínky srážek. Model eroze půdy je založen na WEPP pojetí půdní eroze. Mělký, 2D tok vody je popisován bivariantní formou Saint Venantovy rovnice a je modelován modulem *r.sim.water*. Model simulace je založený na dualitě pojetí mezi poli a částmi (fields and particles) a základní rovnice kontinuity jsou řešeny metodou Greenovy funkce Monte Carlo. Ta poskytuje přímo nezbytné pro prostorově proměnlivé podmínky a vysoké rozlišení.

10.4 USPED (Unit Stream Power Based Erosion Deposition)

Model USPED simuluje transportní objem limitující proces povrchové eroze. V tomto modelu, je povrchový tok sedimentů odhadnut z rovnice podobné USLE/RUSLE, síť eroze a sedimentace je tedy počítána jako změna v toku sedimentů. Model může být použit pro zhodnocení vzorů eroze/sedimentů i pro srovnání relativních kvantitativních dopadů různých možností využití půdy. Prostorové rozložení a velikost eroze a sedimentace je modelováno pro stálý povrchový odtok s uniformními srážkovými podmínkami.

V tomto modelu je rychlost toku sedimentů $q_s(r)$ stejná s kapacitou (objemem) transportu sedimentů $T(r)$, $r = (x, y)$. Tento model byl vytvořen na základě výpočtů Moora a Burche, které byly několikrát vylepšeny. Má následující tvar:

$$|q_s(r)| = T(r) = K_t |q(r)|^m [\sin \beta(r)]^n, \quad (9)$$

kde $q(r)$ je rychlost vodního toku, $K_t(r)$ je koeficient transportu půdy závisící na jejích vlastnostech a pokryvu, $\beta(r)$ [°] je sklon svahu, m a n jsou konstanty závislé na druhu toku a vlastnostech půdy. Pro povrchový odtok nabývají obvykle uvedené konstanty hodnot $m = 1,6$ a $n = 1,3$. Stálý (stabilní) stav vodního toku může být vyjádřen jako funkce odvozené plochy na jednotku délky vrstevnice $A(r)$ [m]

$$|q(r)| = A(r)i, \quad (10)$$

kde i [m] je uniformní intenzita deště. Pro uniformní vlastnosti půdy a pokryvu je $K_t = konstanta$. V rámci 2D vyjádření je tok vody a sedimentů vyjádřen jako pole bivariantních vektorů $q(r) = q(x, y)$, $q_s(r) = q_s(x, y)$ a čistá míra eroze a sedimentace

je odhadována jako divergence (rozdíl) toku sedimentů:

$$D(r) = \nabla \cdot q_s(r) = \nabla \cdot [T(r) \cdot s(r)] = K_t i \{ [\nabla A(r) \cdot s(r)] \sin \beta(r) - A(r) [k_p(r) + k_t(r)] \}, \quad (11)$$

kde $s(r)$ je jednotkový vektor strmosti svahu (ve směru největšího sklonu), $k_p(r)$ je profilové zakřivení (zakřivení ve směru největšího sklonu) a $k_t(r)$ je tangenciální zakřivení (zakřivení ve směru kolmém na gradient). Topografické parametry $s(r)$, $k_p(r)$, $k_t(r)$ jsou počítány z prvních a druhých derivací povrchu terénu. K přesnějším odhadům vodní eroze a sedimentace je vhodné zahrnout do výpočtu půdní vlastnosti, pokrytí povrchu a vliv deště. Z tohoto důvodu byla rovnice pro výpočet kapacity transportu sedimentů T upravena na tvar:

$$T = RKCPA^m (\sin b)^n, \quad (12)$$

kde $R \sim i^m$, $KCP \sim K_t$ a $LS = A^m \sin b^n$, konstanty m a n nabývají pro převažující rýhovou erozi hodnot $m = 1,6$ a $n = 1,3$ a pro převažující plošnou erozi $m = n = 1$.

Výsledná rovnice čisté eroze a sedimentace má tedy tvar:

$$ED = \nabla(T \cdot s) = \frac{d(T \cos a)}{dx} + \frac{d(T \sin a)}{dy}, \quad (13)$$

kde ED je velikost eroze a sedimentace a a [°] je orientace reliéfu ke světovým stranám. Tato rovnice je ekvivalentní ke vztahu prezentovaného výše, ale postup výpočtu je jednodušší.

Prostorového rozložení eroze a sedimentů je tedy závislé především na množství spadlých srážek, geometrii terénu zahrnující jak profilové tak tangenciální zakřivení.

Podle 2D vyjádření, prostorové rozdělení eroze a sedimentace je kontrolováno změnou v hloubce toku a lokální geometrií terénu. Bivariantní vyjádření tedy demonstruje, že lokální (místní) zrychlení toku v obou podmínkách, v gradientu a tangenciálním směru, hraje stejně důležitou roli v prostorovém rozložení eroze a sedimentace. Souhra mezi velikostí změny vodního toku a oběma zakřivení terénu odrážející se v bivariantním vyjádření určuje, zda se eroze nebo sedimentace vyskytne.

Podle rovnice (11) je model eroze a sedimentace ovlivňován změnou v hloubce povrchového toku, který zahrnuje oba profily a tangenciální zakřivení. Lokální zvýšení rychlosti toku v obou gradientech a tangenciálních směrech hrají proto stejně důležité role v prostorovém rozložení eroze/sedimentace.

Pro model USPED nebyly vyvinuty parametry půdy a půdního pokryvu podobné těm používaných v USLE nebo WEPP. Proto se používají faktory USLE pro zahrnutí

relativního dopadu půdy a pokrývky na kapacitu transportu sedimentů a $m = 1, 0-1, 6$, $n = 1, 3$ pro získání výsledků porovnatelných s rychlostí eroze odhadované pomocí USLE. Nižší hodnoty m se používají pro převládající plošnou erozi, vyšší hodnoty jsou používány pro převažující rýhovou erozi.

10.5 SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins)

Jedná se o model, který byl vyvinut z dřívějších modelů Agricultural Research Service of USDA¹, zejména z modelu CREAMS.

Ve své původní podobě byl SWRRB vytvořen pro použití na malá povodí, kde převládají zemědělské procesy, s důrazem na hydrologii a sedimentární nánosy. Po zahrnutí chemických složek, zejména živin a pesticidů, byl přestavěn na SWRRBWQ (Simulation of Water Resources in Rural Basins: Water Quality). Základní prostorová jednotka modelu je „subbasin“ („subpovodí“), která je považována za homogenní ve všech parametrech povodí. Povodí může být rozděleno do více „subpovodí“. Půda v každém „subpovodí“ je rozdělena do několika vrstev. První (nejsvrchnější) půdní vrstva určuje rozložení vody a ovlivňuje sedimentární a chemickou kvalitu odtékající vody. SWRRB je dynamický simulační model vytvořený pro dlouhodobé simulace k určení statistik odtoku a ukládání. Zahrnuje také bouřkové události, stejně jako období mezi bouřkami, růst rostlin, evapotranspiraci a vysoušení. Časový krok je 1 den.

Model SWRRB již není podporován USDA Blacklands Research Center, kde ho v podstatě nahradil model SWAT a zřejmě ho již nelze z internetových stránek BRC stáhnout. Model však může být získán z USDA Natural Resources Conservation Service Anonymous FTP serveru na: <ftp://ftp.nrcs.usda.gov/centers/itc/applications/wqmodels/swrrb/>.

10.6 SWAT (Soil & Water Assessment Tool)

SWAT je nejnovějším produktem z „rodiny“ modelů vyvinutých Agricultural Research Service of USDA rozšířením modelů CREAMS a ROTO (Routing Outputs to the Outlet). Bezprostředním předchůdcem modelu SWAT je SWRRB. Hlavním záměrem modelu SWAT je výpočet odtoku a ukládání hlavně z povodí, kde převládá zemědělství. Model SWAT rozšiřuje model SWRRB, protože dovoluje větší počet subpovodí (více než 10 000) a lze jej tedy použít pro větší povodí než SWRRB. Velikost povodí může být až několik tisíc km². Dalším vylepšením v modelu je začlenění lepšího algoritmu pro směřování koryt než používá SWRRB, který dovoluje přesnější propojení

¹United States Department of Agriculture

subpovodí. Mezi současné vylepšení patří začlenění několika hydrologických jednotek, zařazení auto-zavlažování jako možnost obhospodařování, přidání zadržování vody povrchem, přidání složky CO_2 (pro studování klimatických změn), evaporaci, přepracování boční eroze vody. Dále umožňuje přidat stavby a území, ze kterých není možná žádná eroze. SWAT je napsán ve FORTRAN 90 a je přenesitelný do různých platforem. SWAT může být stažen z internetových stránek USDA Blacklands Research Center: <http://www.brc.tamus.edu/swat/>.

10.7 EUROSEM (European Soil Erosion Model)

EUROSEM je simulační model pro předpovídání vodní eroze půdy pro pole a malá povodí. Je založen na fyzikálním popisu erozních procesů a pracuje pro krátké časové periody již od jedné minuty. EUROSEM je polygonově a událostně založený odtokový a erozní model vyvinutý pro stanovení rizika eroze půdy a pro zhodnocení úrovně ochrany půdy. EUROSEM má modulární strukturu, která simuluje erozi pomocí proudění vody a sedimentů (z modelu KINEROS), nad zemským povrchem (jako sled vzájemně propojených uniformních ukloněných ploch a koryt).

Děšť je v tomto modelu nejprve zadržen rostlinnou pokrývkou, která je rozdělena do přímého propadu a zachycením (odvodněním) listy a rychlost stékání po kmenech. Poté je modelována infiltrace a po odečtení míry povrchových depresí, je odtok směřován po povrchu půdy použitím rovnice kinematické vlny doprovázené kontinuálním modelováním eroze. Rýhový a mezirýhový tok je jednoznačně simulován a ztráta půdy je počítána jako odtok sedimentů, který je definovaný jako produkt míry odtoku a koncentrace sedimentu v toku. Toto je založeno na numerickém řešení dynamické rovnice rovnováhy hmoty.

Když se pracuje v měřítku povodí, je toto povodí rozděleno do jednotek kanálů s přispívajícími bočními svahy. Tyto svahy jsou pak rozděleny do ploch nebo jednotek, které jsou uniformní s ohledem na půdu, využití půdy a charakteristiky sklonu.

10.8 LISEM (LImburg Soil Erosion Model)

LISEM simuluje hydrologii a transport sedimentů pro malá povodí. LISEM byl vytvořen pro simulování dopadů na současné využití půdy a dopadů na míru ztráty půdy.

Základní procesy zahrnuté v modelu jsou: srážky, intercepce, povrchové zadržení v mikroděpsích, infiltrace, vertikální pohyb vody v půdě, povrchový tok, kanálový tok (v člověkem vytvořených strouhách), eroze způsobená deštěm, kapacita transportu

a eroze způsobená povrchovým tokem. Do výpočtu je také zahrnut vliv stlačování půdy (např.: koly traktoru) nebo malé dlážděné cesty (menší než velikost pixelu).

Model je jeden z příkladů dynamických modelů, který je kompletně zahrnut v rastrovém geografickém informačním systému PCRaster. Zdrojový kód je směsice kódu C++, operací GIS, matematických operací a hydrologických funkcí (kinetická vlna, Richardsova rovnice). Mezi modelem a PCRasterem není nutná žádná konverze. Všechny vstupní i výstupní mapy jsou rastrové a je možné je zobrazit a upravovat se softwarem PCRaster.

LISEM začal jako erozní model, který simuluje povrchový tok a rýhovou erozi s některými extra funkcemi. Později bylo do tohoto modelu přidáno více procesů a více proměnných a voleb. Z tohoto důvodu byl původní model rozdělen do několika verzí modelu LISEM, které se v podstatě skládají ze základní verze (Basic) a obsahují navíc další sadu procesů:

- LISEM Basic: původní LISEM zahrnující paralelní infiltraci přes různé typy povrchu uvnitř buňky gridu, stejně tak travní pásy a kanály.
- LISEM Wheeltracks: základní (Basic) verze rozšířená o schopnost upravovat občasné stezky jako síť malých koryt.
- LISEM Multiclass: základní verze modelu s rozdělením eroze a sedimentace do systému několika tříd.
- LISEM Nutrients: základní verze rozšířená o ztráty živin (N a P) v roztoku a v suspenzi vstřebaných jílovitých součástí.
- LISEM Gullies (EUROWISE): základní verze rozšířená o řezy v několika vrstvách půdy, které jsou náchylné k vytváření stružek podle empirické povrchové analýzy.

Pro každou buňku je počítána bilance mezi: srážkami a intercepčí a pro zjištění energie odtoku je odečítána infiltrace a nasycení povrchu. Následně je počítána eroze a sedimentace použitím principu síly toku a vody a sedimenty jsou směřovány tak, aby odtékaly s postupem kinetické vlny. Speciální případy mohou být definovány pro cesty, kompaktní plochy a pro umělá koryta.

Infiltrace může být počítána různými sub-modely, a to v závislosti na dostupných datech. Možné je použití Holtanovy a Green-Amptovy rovnice pro jednu nebo dvě vrstvy, nebo model SWATRE - řešení Richardsovi rovnice pomocí metody konečných rozdílů. Druhá možnost zahrnuje vertikální transport vody v půdě a její změnu v půdě během deště, která může být kontrolována uživatelem. Vstupem jsou mapy s půdními

a hydrologickými podmínkami, jako je původní obsah vlhkosti, pórovitost a nasycená (saturovaná) vodivost.

Model je dostupný na: <http://www.geog.uu.nl/lisem/>.

10.9 KINEROS (KINematic Runoff and EROSION model)

Jedná se o událostně podložený model, který předpovídá míru odtoku a vrchol odtokové rychlosti, stejně jako ztrátu půdy, z jednotlivých srážkových událostí. Model byl vyvinut ve spolupráci USDA. Je dynamický a počítá s procesy infiltrace a intercepce. Povodí je rozčleněno do buněk, které reprezentují plochy a kanály, ve kterých je modelován transport vody a sedimentu. Pro každou simulaci může být použito maximálně 60 buněk. To limituje velikost povodí, které může být zkoumáno bez významné aproximace charakteristik povodí. Aby povodí mohlo být fyzikálně vyjádřeno, je vyžadováno pět vstupních kategorií: simulované srážky, topografie povodí, charakteristika koryt, povrchový pokryv a vlastnosti půdy.

Model se skládá z osmi částí (komponent), jedná se o: srážky, intercepce, infiltrace, povrchový tok, otevřený kanálový tok, eroze, transport sedimentů, přehrada a sedimentace.

KINEROS počítá dva typy půdní eroze: eroze způsobená dopadem dešťových kapek a eroze, která je výsledkem povrchového toku vody (může být povrchová nebo kanálová). Depozice vznikající snížením rychlosti toku, který teče přes větší vodní plochy (rybníky).

10.10 CASC2D (CASCade 2D)

CASC2D je rastrový, dvourozměrný, hydrologický model pro simulaci hydrologické odezvy povodí na vstupní srážkové pole. Mezi hlavní komponenty tohoto modelu patří: kontinuální popis vlhkosti půdy, intercepce srážek, infiltrace, povrchové a kanálové směřování odtoku, půdní eroze a transport sedimentů. Vývoj CASC2D byl započat v roce 1989 na U.S. Army Research Office (ARO).

CASC2D umožňuje uživateli specifikovat prostorové rozlišení. Prostorové modelování nabízí možnost určení hodnoty každé hydrologické proměnné v kterémkoli bodě gridu.

CASC2D má velký počet vstupních a výstupních parametrů. Pro model bylo vytvořeno prostředí WMS, které odděluje uživatele od problematiky související s úpravou vstupního souboru a provází uživatele modelem a možnými výběry. WMS není zamýšlen k nahrazení plné funkce geografického informačního systému (GIS). Velmi užiteč-

ným nástrojem pro přípravu datových sad pro CASC2D je GIS GRASS vyvinutý U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories. CASC2D pracuje s formátem GRASS ASCII. V prostředí WMS mohou data vstupovat přímo ze systémů ARC/INFO a GIS GRASS a export data do CASC2D.

10.11 WEPP (Water Erosion Prediction Project)

Jedná se o deterministický model. WEPP je model vytvořený pro lepší znázornění erozních procesů vztahy blízkými k fyzice. Ve své podstatě je model úzce spojen s modely CREAMS, SWRRB a EPIC a využívá programové prvky nebo funkční vztahy každého z nich v různých místech modelu. Rozdíly se projevují v tom, že WEPP usiluje o více „procesně podložené“ vyjádření spíše než o statistické vztahy a je programován speciálně pro PC prostředí. Základní součásti modelu WEPP jsou svahy, koryta a zadržování povrchem.

WEPP je postaven pro použití na „field-scale“ nebo malých povodí. Geometricky může být modelováno jen jedno povodí, které může být sestaveno ze sítě svahů a kanálů. Svahové a kanálové složky jsou dále rozděleny do složek hydrologie a eroze. Vodní rovnováha zahrnuje evapotranspiraci, prosakování půdní vody, intercepci a zadržování vody povrchem.

Původní kódování modelu bylo popsáno jako tři verze, tzn. tři uspořádání, pro která byl model použit: „profile“ (profil), „watershed“ (povodí) a „grid“. Verze „profile“ (nyní verze „hillslope“) používá rovnici RUSLE. V ostatních verzích modelu je RUSLE nahrazena deterministickými rovnicemi, které jsou založené na infiltrační teorii, fyzice půdy a erozních mechanismech.

Současná verze modelu je dostupná na internetových stránkách modelu WEPP: <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/wepp.html>

10.12 CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems)

CREAMS je určen k prognóze pohybu chemických látek, odtoku vody a eroze v různých zemědělských systémech. Hodí se pro kvantitativní hodnocení vlivu zemědělských technologií na přírodní prostředí v území, které se vyznačuje jednotným způsobem využívání, relativně homogenními půdními poměry a rovnoměrným rozdělením srážek na celé ploše území.

Model se skládá ze tří složek: hydrologické, erozní a chemické. Hydrologická složka určuje objem povrchového odtoku a maximální odtok, infiltraci, evapotranspiraci, ob-

sah body v půdě a infiltraci se simulačním krokem 1 den. Erozní složka hodnotí erozní proces a množství splavenin včetně rozdělení transportovaných půdních zrn podle zrnitostního složení na úpatí svahu. Chemická složka zahrnuje transport rostlinných živin (N, P) a pesticidů a určuje jejich koncentraci v povrchovém odtoku, v sedimentech a v infiltrující vodě.

Hydrologie modelu je založená na metodě SCS křivky, ale je zde možnost použít i Green-Amptovu infiltrační rovnici. Eroze a transport sedimentů jsou založeny na USLE (jež byla jen nepatrně modifikována). Největší předností modelu je explicitní reprezentace pohybu živin a jejich interakce s plodinami. Pohyb živin zahrnuje vyjádření mineralizačních, nitrifikačních a denitrifikačních procesů.

Erozní složka zahrnuje účinek dešťových srážek a povrchového odtoku, který se uvažuje odděleně na plochách mezi erozními rýhami a v erozních rýhách a výmolech; zahrnuje i sedimentaci splavenin. Model provádí porovnání množství částic uvolněných srážkami a povrchovým odtokem a transportní schopnosti tekoucí vody.

10.13 EPIC (Erosion/Productivity Impact Calculator)

EPIC je označován jako "field-scale" model a byl navržen k ohodnocení zemědělských strategií. Jeho hlavní výhodou je detailní zaměření na povrchový tok a procesy rostlinného růstu, které zahrnují teplotní a energetickou bilanci na povrchu, evapotranspiraci, různé alternativy osevu a orby. Model dokonce obsahuje stochastický generátor počasí ("weather generator"). Tyto podrobnosti dovolují výpočet řady procesů na poli včetně větrné eroze, vyluhování živin a pesticidů a infiltrace. EPIC a jeho dokumentace je možné stáhnout z domovské stránky BRC na: <http://www.brc.tamus.edu/epic/>.

10.14 GLEAMS (Groundwater Loading of Agricultural Management Systems)

Jedná se o deterministický model, který byl upraven Agricultural Research Service of USDA z modelu CREAMS. Vznikl jeho rozšířením při zahrnutí vertikálního toku rozpustných indikátorů do podpovrchu s mnohem větším důrazem na proces vsakování do půdy. Půdní profil blízky povrchu je znázorněn řadou vrstev vázaných na půdní horizonty. To dovoluje propracovanější modelování procesů v kořenové vrstvě, dopadů zavlažování a orby a toku složek, zvláště pesticidů. GLEAMS je dostupný na internetových stránkách USDA: <http://arsserv0.brc.tamus.edu/nrsu/glmsfact.htm>.

10.15 PRMS (Precipitation-Runoff Modeling System)

Jedná se o model pro výpočet dopadů různých kombinací srážek, klimatu, využití půdy, nánosu sedimentů a všeobecné hydrologie povodí. Reakce povodí na normální a extrémní úhrn srážek může být simulována k analýze změn vodní rovnováhy, režimů toku, vrcholů a objemů povodní. Podstata modelování spočívá v rozdělení povodí do řady homogenních vzájemně si odpovídajících jednotek, založených na charakteristikách povodí jako je sklon, orientace svahů, nadmořská výška, druh vegetace, druh půdy, využití půdy a rozložení srážek. Model PRMS dovoluje prostorovou proměnlivost půdních druhů. Parametry nebo vztahy, které závisí na půdním druhu jsou zahrnuty v modelování infiltrace, evapotranspirace, podpovrchovém toku a dalších procesech v povodí. Vztahy pro evapotranspiraci jsou definované pro tři půdní druhy: písek, jíl a slín.

Eroze sedimentu a jeho transport je modelován použitím přístupu rýhového a mezirýhového modelování. Model PRMS může být stažen z internetových stránek USGS na: <http://water.usgs.gov/software/prms.html>. Další informace, které zahrnují vzorové aplikace, mohou být získány na: <http://smig.usgs.gov/SMIC/>.

10.16 AGNPS (AGricultural Non-Point Source)

Model AGNPS byl vytvořen pro zhodnocení nebodového zdroje znečištění a jeho pohybu v povodí. Uživatelé s příslušnými mapovými vrstvami mohou simulovat nánosy živin, sedimentů a pesticidů spojených s různým využitím území. Současné využití půdy v povodí může být vyhodnoceno k určení zdrojových oblastí, které přispívají k znečištění v různých bodech povodí. Další využití půdy a způsob obhospodařování jako jsou měnící se nebo pohyblivé systémy orby na různých plochách v krajině mohou být ohodnoceny upravením mapových vrstev v GRASSu a spuštěním nástroje. Simulované výše znečištění mohou být poté porovnány, aby se zjistily odhady zmírnění znečištění se změnami ve využití území a způsobu obhospodařování.

Nástroj pro modelování byl vytvořen pro minimalizaci interakce uživatele a času v přípravě vstupních datových sad pro model AGNPS, zatímco ulehčení vstupu nutných, uživatelem dodaných dat a vizualizaci výstupu. Průvodce vstupním souborem byl vytvořen pro zadávání parametrů potřebných pro verzi AGNPS 5.0 a dovoluje uživateli výběr vstupní charakterizace dat pro bodové zdroje, kanály a aplikace hnojiv a pesticidů.

Průvodce vstupem dat připravuje 22 vstupních parametrů vyžadovaných pro každou buňku od 8 do 11 základních uživatelem zadaných mapových vrstev a několik para-

metrů potřebných pro model AGNPS. Některé mapové vrstvy jsou nepovinné (např. rozmístění pesticidů). Volitelně mohou být do jednotlivých buněk dodatečně vloženy další parametry. Uživatelem vybraný vstup buněk může obsahovat data pro popis bodových zdrojů, přirozené i uměle vybudované odtokové kanály, míru a metodu aplikace hnojiv a herbicidů. Průvodce vstupem kombinuje všechna data do vstupního souboru pro jejich použití modelem AGNPS.

Několik verzí tohoto modelu je dostupných na: <http://geog.uni-hannover.de/phygeo/grass/agnps.html>, dalším zdrojem může být také stránka: <http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=5199>.

10.17 AnnAGNPS (Annualized Agricultural Non-Point Source)

Model AnnAGNPS je nástupcem modelu AGNPS, který modeluje erozi pro jednotlivou událost. Model AnnAGNPS je dynamická verze, která byla zveřejněna v roce 2002 na webových stránkách <http://www.sedlab.olemiss.edu/AGNPS>.

AnnAGNPS poskytuje odhad zatížení povrchového odtoku znečištěním v závislosti na využití území pro kontinuální srážky. Model simuluje povrchový odtok, transport splavenin a živin v zemědělsky využívaném povodí. Vstupem jsou hodnoty plošného znečištění, je ale možné zhodnotit také příspěvek bodových zdrojů znečištění (eroze - strže a výmoly; bodové zdroje chemického znečištění - zemědělská výroba, odpadní jímky apod.). Model pracuje s čtvercovými prostorovými jednotkami - pixely. To umožňuje analýzu v jakémkoli bodě uvnitř povodí. Verze AGNPS 5.0 umožňuje sestavit událostní modely vázané na jednu srážkovou událost. AnnAGNPS dovoluje simulovat jak jednotlivé epizody, tak dlouhodobé procesy. Volba typu simulace závisí na kvalitě a dostupnosti vstupních dat.

K dispozici je také rozšíření modelu o rozhraní spolupracující s ArcView 3.x (podmínkou jsou extenze Spatial Analyst a 3D Analyst), které umožňuje automatizovat některé kroky a pracovat s vektorovými objekty.

Model je sestaven z jednotlivých částí vykonávajících dílčí procedury. Příprava dat je zjednodušena integrací některých částí v ArcView. To umožňuje modifikaci dat obsažených v databázi GIS přímo v prostředí ArcView a dále odtud vyvolávat jednotlivé dílčí programy.

- Flownet Generator na základě digitálního modelu terénu (DEM) generuje rastr buněk a síť kanálů spolu s jejich charakteristikami.
- Input Editor umožňuje zapisovat, importovat a editovat vstupní data pro povodí

i jednotlivé buňky. Input Editor spolupracuje s předchozími dvěma skupinami programů.

- GEM na základě klimatických dat z hydrometeorologických stanic generuje stav počasí pro povodí ve zvoleném období.
- AnnAGNPS Pollutant Loading model generuje množství vody, půdy, živin a znečištění (pesticidy), které opouští jednotlivé části povodí (buňky) a vtékají do vodních toků v povodí. Model tak umožňuje identifikovat příspěvek každé buňky ke znečištění povrchové vody ve zvolené části toku.

Je počítána výška přímého odtoku a kulminační průtok. Kulminační průtok je funkcí odtokové plochy, sklonu koryta, odtokové výšky, reliéfovým poměrem povodí a délkou toku v povodí. K výpočtu eroze pro jeden přívalový déšť je použita upravená USLE. Ztráta půdy je počítána pro každý element povodí a dále se sleduje pohyb materiálu v rámci toku.

10.18 ANSWERS (Areal Non-point Source Watershed Environmental Response Simulation model)

Model ANSWERS je určený pro simulaci hydrologických a erozních procesů v zemědělsky využívaných malých povodích, s možností rozšíření pro sledování transportu chemických látek. Jedná se o událostní model určený pro použití na procesy odtoku během a bezprostředně po srážkové události. Nastavení modelu začíná diskretizací povodí do čtvercového gridu. Každá z buněk je považována ve fyzikálním smyslu za homogenní. Pro každou buňku specifikuje uživatel sklon a orientaci svahu. To model používá pro výpočet rychlosti odtoku z modelovaného elementu použitím Manningovy rovnice. Zásobování je zahrnuto pro podpovrchovým odvodněním, znovu uživatelem specifikovaným.

Existuje zde superpozice nezávislého popsání sítě toku/přítoku jako kanálových prvků, každý uzel, z kterého je složeno v prvku povodí. Prvek povodí může obsahovat pouze jeden kanálový element. Pro popsání komplexních nebo detailních sítí kanálu vyžaduje další zlepšení v prvcích povodí. Uživatel musí specifikovat hydraulické vlastnosti prvků koryta.

Model je samozřejmě řízen srážkami a je konfigurován pro příjem čtyř srážkových měření. Parametry reprezentují intercepci, infiltraci a povrchové snížení.

Pro každou z nich je nasycený (přebytek srážkové vody se realizuje odtokem) povrchový odtok počítán pomocí hydraulických vztahů. Infiltrační model počítá s limitní

hodnotou povrchové vazby, který musí být zcela vyplněn, než začne odtok. Toto je vypočítáno z parametru drsnosti zadaného uživatelem.

Klíčovým hydrologickým procesem v modelu ANSWERS je infiltrace, která ovlivňuje akumulaci povrchové vody a odtok. Infiltrace je založená na teoretickém Holtanově modelu, který je založen na pojetí hloubky „kontrolní zóny“ půdy, která upravuje dolů směřující tok vody a vyžaduje šest infiltračních parametrů (určených půdním druhem): celková porozita, polní vodní kapacita, hloubka kontrolní zóny, steady-state infiltration rate a dva pojmy v quasi-empirické rovnici proměnlivé v čase. Komponenta ztráty půdy modelu ANSWERS je velmi blízká čistě statistickému modelu, ale je správně považována za logický (racionální) model s empirickými koeficienty. Mezirýhová eroze je uvažována jako úměrná ploše, intenzitě deště (koeficienty zahrnují parametr erodovatelnosti z USLE) a povrchové eroze je výsledkem vzorce, který je velmi blízký rovnici USLE. Rýhový a korytový transport sedimentu je dán také čistě empirickým vzorcem.

ANSWERS ve své nynější podobě klade velký důraz na přípravnou práci pro vstup dat. Implementace BMP's je prováděna podprogramem, který přepíše příslušné řádky ve vstupním souboru, aby se znázornily nádrže, travnaté pruhy. Nejbližší obdobou modelu ANSWERS se jeví být model AGNPS, který se odlišuje hlavně v některých z hydrologických pojmů, zejména infiltraci a odtoku.

10.19 ANSWERS-2000 (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation - new version)

ANSWERS-2000 je nová verze modelu ANSWERS, která byla vyvinuta na Virginia Polytechnic Institute. ANSWERS-2000 se od modelu ANSWERS odlišuje ve dvou podstatných postupech:

1. lepší vyjádření infiltrace, která je založena na Green-Amptově rovnici;
2. procesy zahrnuté do výpočtu evapotranspirace a vsaku, což dovoluje modelu simulovat podmínky mezi jednotlivými srážkovými událostmi.

ANSWERS-2000 je kontinuální simulační model na rozdíl od „událostní“ podstaty modelu ANSWERS. Zdrojový kód modelu je psán ve FORTRANu. Jedná se o deterministický model.

10.20 EROSION 2D/3D

Simulační model Erosion 3D byl vyvinut z verze modelu Erosion 2D, který řešil ztrátu půdy na svahu. Model Erosion 3D je schopen pracovat s plochou celého povodí a do svých výpočtů zahrnuje ztrátu půdy způsobenou plošným i soustředěným odtokem. Tato verze byla vytvořena v rámci vzdělávacího programu německého ministerstva pro technologie. Jako geometrický základ pro model Erosion 3D slouží pravidelná čtvercová síť. Tato struktura je nejběžněji používána u digitálních modelů terénu a umožňuje dostatečné popsání povrchu území.

Skupinu modelů EROSION (2D, 3D) lze využít pro:

- simulaci vlivu různých způsobů zemědělského obhospodařování pozemků (různé druhy orby, střídání plodin) a jimi způsobených změn ve vlastnostech půdy na povrchový odtok a ztrátu půdy;
- simulaci vlivu konsolidace půdy a změny ochranných opatření na ztrátu půdy a následný návrh opatření na ochranu půdy vzhledem k specifickým půdním a užitelským vlastnostem;
- odhad množství kontaminantů vázaných na půdní částice (např. těžkých kovů), které jsou transportovány ze zemědělských pozemků do vodních toků nebo ukládány na okrajích pozemků.

Vstupní data pro modely EROSION 2D/3D tvoří: charakteristiky povrchů vyšetřovaného území, charakteristiky půdy a charakteristiky návrhového deště (časový průběh deště). Charakteristiky povrchů jsou zastoupeny digitálním modelem terénu (čtvercový rastr). Charakteristiky půdy tvoří objemová hmotnost, počáteční půdní vlhkost, obsah organického uhlíku, erodovatelnost, drsnostní součinitel (Manningův součinitel drsnosti), stav pokryvu (vegetace, ornice, atd.) a zrnitost rozdělená do 9 tříd. Charakteristiky návrhového deště jsou zastoupeny dobou trvání srážky a intenzitou srážky.

Pro každý element čtvercové sítě výstupní údaje simulace tvoří: odtok, transportovatelné množství splavenin, ztráta půdy/ukládání, koncentrace splavenin a zrnitost splavenin.

Výstupní parametry vztahující se k celkové ploše vyšetřovaného povodí jsou: ztráta půdy, množství usazeného materiálu a intenzita eroze.

Výpočetní program modelu je rozdělen na dvě části, tzv. Preprocesor a hlavní program. Program Preprocesor slouží k přípravě vstupních dat, která umožní uživateli zrychlit a časově minimalizovat vlastní fázi výpočtu eroze. Hlavní program provádí

simulaci eroze a připravuje grafické výstupy výsledků simulace v plošném a prostorovém zobrazení. Zahrnuje prvky GIS pro práci s daty a jejich vizualizaci; program spolupracuje s nejrozšířenějšími GIS.

Dvojrozměrný pohled zobrazí mapu se čtvercovou sítí, ve které lze pro každý element dále zobrazit podrobné výsledky simulace. Trojrozměrné zobrazení nabízí pohled na řešené území s barevným rozlišením intenzity eroze a ukládání erodovaného materiálu.

10.21 SMODERP (Simulační Model Odtoku a ERozního Procesu)

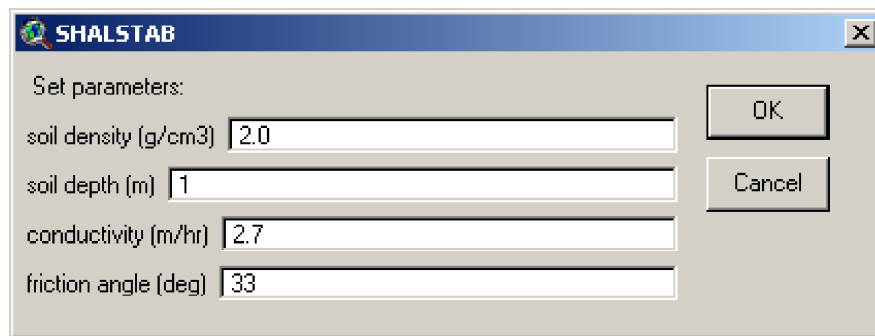
Model je výsledkem vývoje simulačního modelu s využitím fyzikálních principů pro podmínky České republiky. SMODERP byl sestaven na katedře hydromeliací a krajinného inženýrství FSV ČVUT v Praze (Holý M., Váška J., Vrána K. - 1988) pro řešení návrhových úloh v protierozní ochraně zemědělských pozemků i pro nestandardní aplikace při stabilizaci svahů výsypek, silničních svahů, apod. V roce 1999 byla vytvořena modernizovaná verze v prostředí WIN95/98/NT. Model simuluje srážkoodtokové vztahy a erozi na jednotlivém svahu (pozemku) a jeho výstupy tvoří podklady pro posouzení erozní ohroženosti svahu (pozemku) a pro návrh prvků protierozní ochrany. SMODERP je tvořen dvěma základními moduly - modulem hydrologickým (model plošného povrchového odtoku) a modulem erozním (model plošného rýžkové a mezi-rýžkové eroze).

11 Přehled modelů pro modelování sesuvů

11.1 SHALSTAB (SHALlow STABility)

Model Shalstab je nástroj určený pro modelování mělkých sesuvů na základě znalosti fyzikálních charakteristik zvětralinového pláště a parametrů DTM. Tento model je distribuován zdarma jako extenze ArcView GIS (verze 3.x). Pro chod tohoto modelu je nutné mít nainstalovanou také extenzi Spatial Analyst (verze 1.0). Výsledkem modelování pomocí modelu Shalstab je stanovení množství srážek, které je potřebné ke vzniku mělkých sesuvů.

Tato extenze však předpokládá uniformní litologii, fyzikální a hydrologické parametry ve zkoumaném území viz obr. 2. Využití této extenze, pro určení vzniku mělkých sesuvů, je tedy omezené. Hlavním problémem tedy je, že není zohledněna rozdílná geologická stavba studovaného území, a tím je zanedbána i prostorová proměnlivost jednotlivých charakteristik. Určitou nevýhodou tohoto modelu je také to, že pro některé oblasti (např. oblasti typické výskytem hlubokých sesuvů) je jeho užití nevhodné (v důsledku nesprávné aproximace mechanismů ovlivňujících stabilitu svahů).



Obrázek 2: Zadávání parametrů v modelu SHALSTAB.

Základním vztahem modelu ShalStab je rovnice hydrologické stability (14), která je odvozena ze základních početních vztahů, a to z upravené Mohr-Coulombovy rovnice (15) a indexu relativní vlhkosti (16).

$$R = \frac{T \sin \theta \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right)}{a} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right), \quad (14)$$

kde R jsou efektivní srážky (intenzita srážek) [m/h], T je transmisivita (průtočnost) [m²/h], a je specifická plocha povodí [m], ρ_s je hustota materiálu [kg/m³], ρ_w hustota vody [kg/m³], θ je sklon svahu [°] a ϕ je úhel vnitřního tření zvětraliny [°].

Dalším důležitým vztahem je upravená Mohr-Coulombova rovnice:

$$\frac{D_w}{D} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right), \quad (15)$$

kde D je mocnost vrstvy [m] a D_w je výška hladiny podzemní vody [m].

Tato rovnice ukazuje mocnost vrstvy, která musí být nasycena, aby došlo k sesuvu (bez uvažování koheze). Nabývá hodnot v intervalu (0, 1). Oblasti, pro něž platí vztah $\tan \theta > \tan \phi$ považujeme za chronicky nestabilní, tzn., že zde nemůže vzniknout vrstva deluvia, protože sklon svahu je větší než úhel vnitřního tření pro dané deluvium. Naopak oblasti splňující podmínku $\tan \theta \leq \tan \phi(1 - (\rho_s - \rho_w))$ považujeme za chronicky stabilní, tzn., že ani vysoké úhrny srážek nemohou vyvolat sesuv, protože tyto oblasti mají zpravidla velmi nízký sklon svahů, někdy i velkou schopnost zvětralin odvádět vodu.

Další rovnicí, ze které vychází rovnice hydrologické stability (14) je rovnice indexu relativní vlhkosti:

$$\omega = \frac{D_w}{D} = \frac{Ra}{T \sin \theta}. \quad (16)$$

Jedná se o poměr výšky hladiny podzemní vody a mocnosti deluvia. To odpovídá poměru součinnů efektivních srážek a specifické plochy povodí ku součinu transmisivity a sklonu svahu. S rostoucí intenzitou srážek nebo plochou povodí nad danou buňkou, dochází k saturaci deluvií. Pokud $D_w \geq D$, vzniká pramen. Ke snižování výšky hladiny podzemní vody přispívá zvýšená transmisivita deluvií spolu s vyšším sklonem svahů.

11.2 SINMAP (Stability Index Mapping)

Model SINMAP byl vyvinut s podporou Forest Renewal British Columbia, ve spolupráci s Canadian Forest Products Ltd., Vancouver, British Columbia. Je distribuován jako extenze ArcView GIS (verze 3.0a nebo vyšší). Pro chod tohoto modelu je nutné mít nainstalovanou také extenzi Spatial Analyst (verze 1.0 nebo vyšší). SINMAP je volně stažitelný na www.engineering.usu.edu/dtarb/.

Model vyžaduje tři skupiny vstupních dat: DEM v rastrovém formátu; mechanické a hydraulické vlastnosti půdy v rastrovém nebo polygonovém vektorovém formátu a seznam zdrojových oblastí sesuvů v bodovém vektorovém formátu. Topografická data ve formátu DEM jsou následně přepracovány modulem pro vyplnění sinků. Dalším krokem je výpočet požadovaných topografických parametrů, jako je sklon a specifická plocha povodí.

Model vyžaduje následující data vlastností půdy: rozsah hodnot koheze, hodnota hustoty půdy, rozsah hodnot úhlu vnitřního tření, rozsah poměru R/T (poměr efektivních srážek a transmisivity).

Tabulka 3: Interpretace hodnot modelu SINMAP

Podmínka	Předpokládaný stav	Možný vliv faktorů (nemodelováno)
$SI > 1,5$	stabilní svahová zóna	pro nestabilitu jsou potřeba významné destabilizační faktory
$1,5 > SI > 1,25$	mírně stabilní zóna	pro nestabilitu jsou potřeba mírné destabilizační faktory
$1,25 > SI > 1,0$	kvazistabilní svahová zóna	pro nestabilitu jsou potřeba nepatrné destabilizační faktory
$1,0 > SI > 0,5$	nižší práh svahové zóny	pro nestabilitu nejsou potřeba žádné destabilizační faktory
$0,5 > SI > 0,0$	vyšší práh svahové zóny	stabilizační faktory mohou vést ke stabilitě
$0,0 > SI$	chráněná svahová zóna	stabilizační faktory jsou potřeba ke stabilitě

SINMAP má svůj teoretický základ v neurčitém modelu stability svahu, který je dán vztahem:

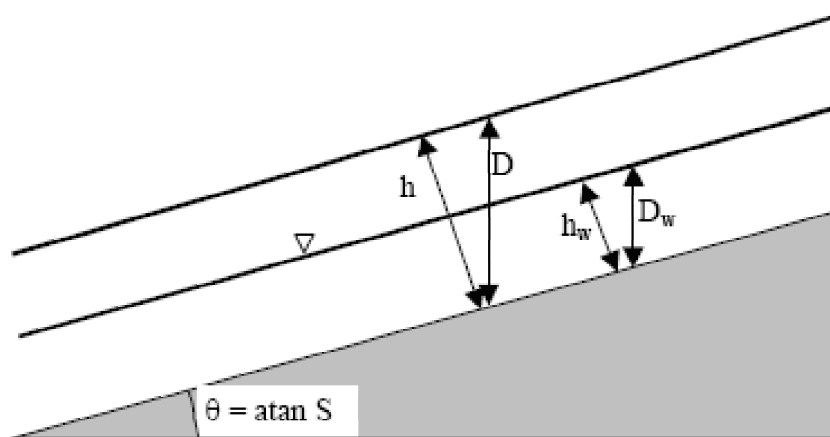
$$FS = \frac{C_r \pm C_s \pm \cos^2 \theta [\rho_s g (D - D_w) \pm (\rho_s g - \rho_w g) D_w] \tan \phi}{D \rho_s g \sin \theta \cos \theta}, \quad (17)$$

kde C_r [N/m²] je původní koheze, C_s [N/m²] je půdní koheze, θ [°] je úhel sklonu, ρ_s [kg/m³] je hustota půdy za vlhka, ρ_w [kg/m³] je hustota vody, g je gravitační zrychlení (9,81 m/s²), D [m] vertikální hloubka půdy, D_w [m] vertikální výška vodního sloupce v půdní vrstvě, a ϕ [°] úhel vnitřního tření půdy. Obr. 3 ukazuje geometrii předpokládanou v rovnici (17).

Výsledná rovnice indexu stability, která simuluje podmínky, které jsou pro vznik sesuvů nejpříznivější, je:

$$SI = FS_{min} = \frac{C_1 + \cos \theta \left[1 - \min \left(x_2 \frac{a}{\sin \theta}, 1 \right) r \right] t_1}{\sin \theta}, \quad (18)$$

kde C_1 je nejmenší hodnota koheze, x_2 je největší hodnota R/T (poměr efektivních srážek a transmisivity) a t_1 je nejmenší hodnota $\tan \phi$. Právě tyto podmínky jsou pro vznik mělkých sesuvů nejpříznivější.



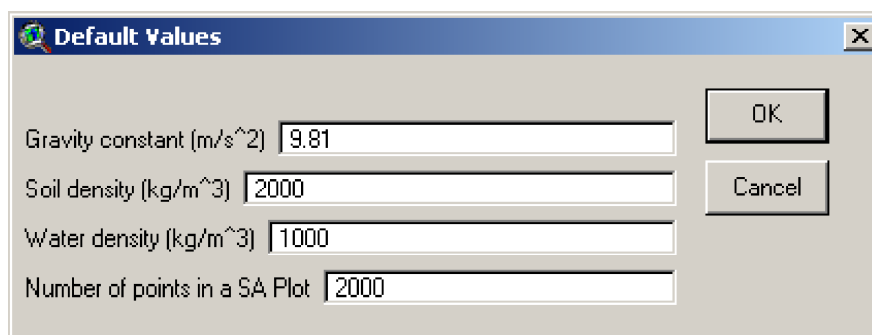
Obrázek 3: Předpokládaná geometrie modelu SINMAP.

Rovnice indexu stability vychází z rovnice faktoru bezpečnosti, který je:

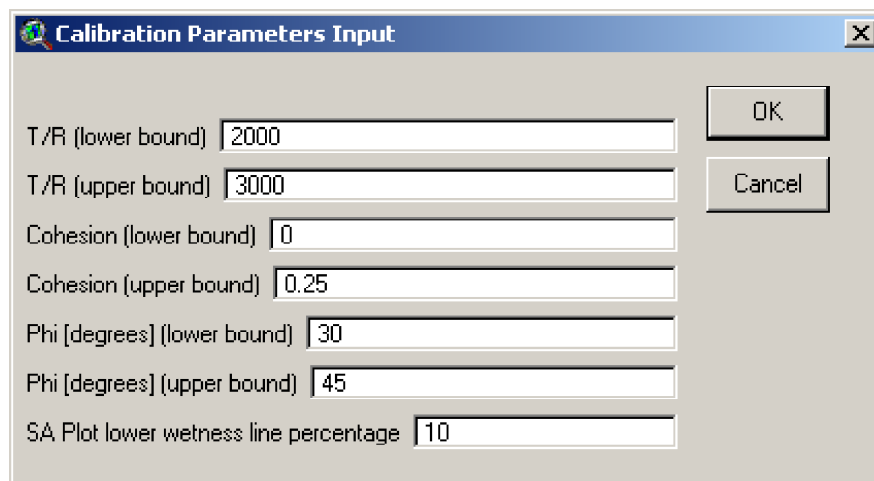
$$FS = \frac{C + \cos \theta \left[1 - \min \left(\frac{R}{T} \frac{a}{\sin \theta}, 1 \right) r \right] \tan \theta}{\sin \theta}. \quad (19)$$

Výsledky modelování jsou prezentovány ve formě následujících map: pravděpodobná stabilita vyjádřená jako index stability rozdělený do šesti tříd viz tab. 3, topografický wetness index rozdělený do čtyř tříd, graf výskytu sesuvů v závislosti na sklonu a specifické plochy povodí, souhrnná tabulka.

Využití této extenze je stejně jako u předchozího modelu omezené. Předpokládá také uniformní litologii, fyzikální a hydrologické parametry ve zkoumaném území. Jediným vylepšením je, že se nezadává jen jedna hodnota ale jejich rozsah viz obr. 5, což se netýká hodnot hustoty vody a půdy viz obr. 4.



Obrázek 4: Dialogové okno pro vstup základních hodnot modelu SINMAP.



Obrázek 5: Dialogové okno pro vstup parametrů modelu SINMAP.

11.3 Další prostředky pro modelování sesuvů

K dispozici jsou i další prostředky pro modelování sesuvů (stability svahů). Nejedná se však o GISy. Ve většině slouží k analýze stability na jednotlivých svazích, ne pro celá povodí. Jedná se o softwarové komerční produkty různých firem (např. GeoStudio 2004, GLEITREIS, GALENA nebo GEO4/5).

11.3.1 GeoStudio 2004

GeoStudio 2004 je sada aplikací pro geotechnické a geoenvironmentální modelování. Tyto aplikace jsou však komerční a nelze je volně stáhnout. Jedná se o produkt firmy GEO-SLOPE International, která ho nabízí na svých domovských stránkách <http://www.geo-slope.com/products/>. Lze si stáhnout studentskou verzi tohoto produktu, která je zdarma. GeoStudio 2004 zahrnuje následující softwarové produkty:

- SLOPE/W pro analýzy stability svahů
- SEEP/W pro analýzy prosakování podzemní vody
- SIGMA/W pro analýzy tlaku a deformací
- QUAKE/W pro dynamické zemětřesné analýzy
- TEMP/W pro termální analýzy
- CTRAN/W pro analýzy transportu znečišťujících látek
- VADOSE/W pro analýzy půdního pokryvu a vadózní zóny

SLOPE/W

SLOPE/W je softwarový produkt pro výpočet faktoru bezpečnosti zemních a skalních svahů. Lze s ním analyzovat jednoduché i složité problémy pro různé sesuvné plochy, pro různé podmínky tlaku vody v pórech, různé vlastnosti půdy.

Použitím rovnováhy SLOPE/W umí modelovat heterogenní půdní typy, komplexní stratigrafii a geometrii sesuvných ploch a rozmanité podmínky tlaku vody v pórech použitím širokého výběru půdních modelů. Analýzy stability svahu mohou být provedeny pomocí deterministických a pravděpodobnostních vstupních parametrů.

S tímto širokým rozsahem prvků, může být SLOPE/W použit k analyzování téměř každého problému stability svahu.

11.3.2 GLEITREIS

GLEITREIS je produktem německé firmy RIB Bausoftware GmbH. Na našem trhu ho distribuuje firma RIB Stavební software s.r.o. Jedná se o aplikaci Windows na výpočty a vyhodnocení stability svahů a hrází s libovolným, polygonálním průběhem geologických vrstev. Zadání výpočetního modelu probíhá v grafickém prostředí a podporuje následující funkce:

- proužková metoda, kruhová smyková plocha, metodika výpočtu podle Bishopa
- parametrické modely průběhu povrchu terénu a databanka materiálů vrstev zeminy
- rychlé úpravy tvaru terénu a průběhů geologických vrstev s okamžitou grafickou kontrolou, funkce undo/redo
- polygonální průběh vrstev zeminy s různými vlastnostmi (vnitřní tření, koheze, specifická tíha, popř. vodní vztlak)
- možnost zadání stavebních objektů (opěrných stěn a hrází) formou polygonu
- uzavřené oblasti zeminy (čočky)
- pásová, bloková, trojúhelníková a lichoběžníková zatížení, způsobující/nezpůsobující tření v kluzné spáře
- různé varianty výpočtu libovolného počtu smykových kružnic
- horizontální a polygonální hranice vodních hladin v geologických vrstvách, otevřené vodní hladiny

- zohlednění laminárního proudění a kapilárního vodního vztlaku
- zohlednění seismických účinků

11.3.3 GEO5

GEO5 je souborem programů určených k řešení základních geotechnických úloh. Celý systém sestává z několika samostatných programů, které mají stejné uživatelské rozhraní a vzájemně spolu komunikují. GEO5 vychází z osvědčeného a rozšířeného systému GEO4.

Programy GEO5 respektují obecné vlastnosti prostředí Windows (dialogová okna, ovládací menu, nástrojové lišty atd.) Zadávání dat se provádí v okně v dolní části obrazovky, nebo pomocí aktivních kót přímo na desktopu. Jednotlivé režimy zadávání resp. výpočtu se volí stisknutím tlačítka na pravé straně obrazovky. Samostatné programy, které jsou součástí produktu GEO5 jsou např.:

- Svahovky - Posouzení konstrukcí ze svahovek
- Stabilita svahu - Výpočet stability svahu
- Skalní svah - Stabilita skalních svahů
- Sedání - Výpočet sedání terénu
- Výrub - Sednutí terénu nad mělce uloženými podzemními díly
- Terén - Digitální model terénu

Stabilita svahu - výpočet stability svahu

Program je určen k výpočtu stability svahů obecně vrstevnatého zemního tělesa. Smyková plocha může být kruhová (Bishopova resp. Pettersonova metoda) nebo polygonální (Sarmova metoda).

Program používá obecně vrstevnaté prostředí. Je v něm zabudovaná databáze zemin podle ČSN 73101. Existuje zde možnost postupného budování svahu v rámci jedné úlohy. Program umožňuje libovolné množství výpočtů v jedné fázi budování. Vliv vody je modelován hladinou podzemní vody nebo izoliniemi pórového napětí a je zde možnost počítat s vodou nad terénem. Je zde možnost simulace účinků zemětřesení. Program umožňuje zadání foliace zemin. Jsou optimalizovány kruhové i polygonální smykové plochy.

Skalní svah - stabilita skalních svahů

Program počítá stabilitu skalních svahů s ohledem na typ sesutí. Nabízí možnost zadání rovinné i polygonální smykové plochy, resp. horninového klínu.

Program umožňuje jednoduché zadání geometrie bloků. Je zde zabudovaná databáze zemin a hornin. Je zde možné libovolné množství přitížení (pásové, lichoběžníkové, přímkové) a libovolné množství kotev. Je počítáno s přítomností vody ve spárách. Program umožňuje sesutí podle přímé nebo polygonální smykové plochy.

11.3.4 GALENA

GALENA je jednoduchý software pro určení stability svahu, který simuluje komplexní geologické, vodní (podpovrchové) a vnější silové podmínky. Byl vyvinut geotechnickými inženýry pro praktické využití na svahu. GALENA zahrnuje tři metody analyzování stability svahů, proto lze modelovat široký rozsah stabilitních problémů. Modelování a struktura analýz je postavená pro „co kdyby“ scénáře s jednoduchými možnostmi vylepšení pro přídatné analýzy. GALENA nabízí grafické obrázky pro jasné porozumění modelovaných situací. Umožňuje definovat půdní i horninové rozvržení jednotlivých problémů nezávisle na struktuře.

12 DYLAM (DYnamic LAndslide Model)

DYLAM je model, který je vyvíjen na Přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého v Olomouci. Vzniká ve spolupráci katedry Geoinformatiky a katedry Matematické analýzy.

Model DYLAM simuluje podmínky vzniku sesuvů v závislosti na srážkách proměnlivých v čase.

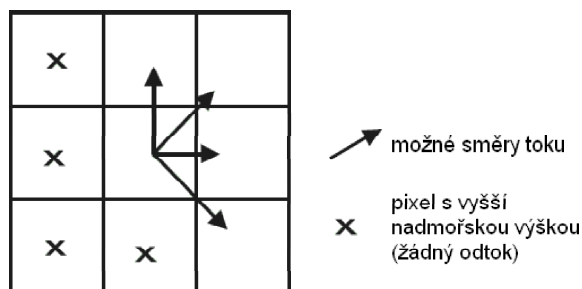
12.1 Algoritmus modelu

Zdrojový kód modelu je vytvořen v Matlabu. V současné době neexistuje samospustitelný soubor, který by vyvolal běh modelu. Ten tedy musí být spuštěn přímo z Matlabu, což jeho použití (a také rozšíření) značně omezuje. Model tedy nemá ani žádné vlastní uživatelské rozhraní.

Algoritmus modelu sestává ze dvou hlavních komponent (fází), a to z fáze přípravy dat a z fáze ohodnocení rizika sesuvu.

Fáze přípravy dat

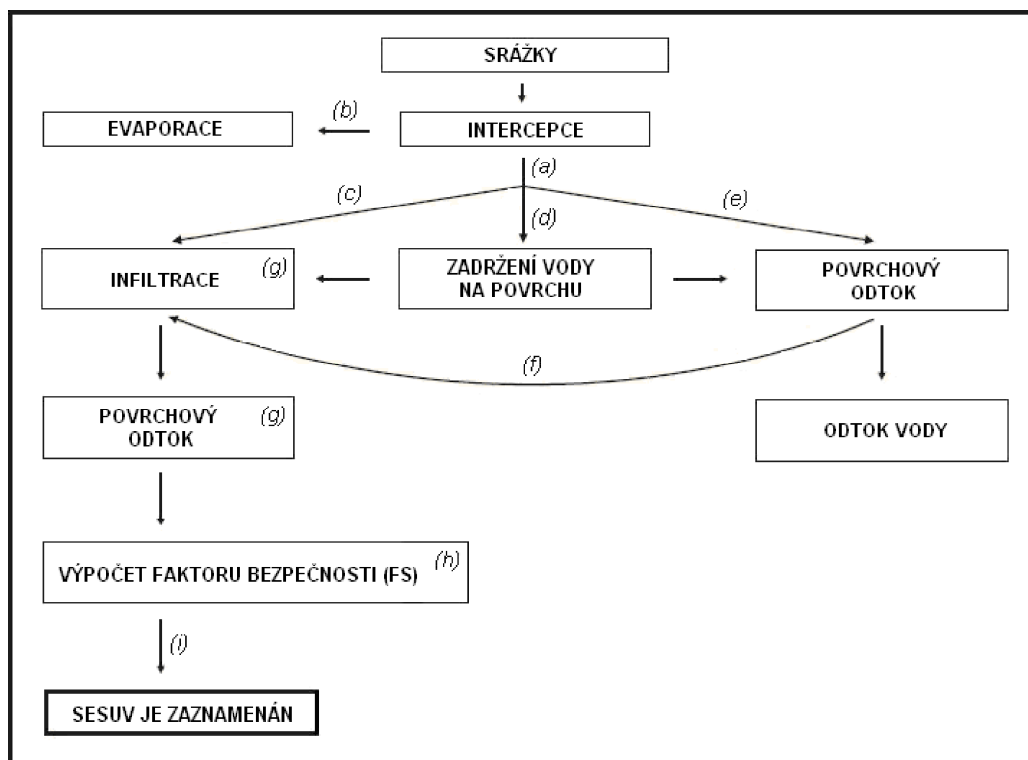
Tato fáze je rozčleněna do tří kroků: nahrání DEM a jeho úprava, výpočet sklonu a poměrné rozložení odtoku a lineární interpolace hloubky deluvia na povrchu. DEM je zpracován pomocí postupu vyplnění sinků („fill sinks“). Pro výpočet směru odtoku je použit algoritmus odtoku do více směrů. Tato metoda (oproti metodě D8, která vytváří nepřirozené toky a rozdělení vody) úměrně rozděluje množství vody z centrálním pixelu do několika směrů.



Obrázek 6: Směr odtoku v modelu DYLAM.

Fáze ohodnocení rizika sesuvu

Tato fáze sestává z několika částí (viz obr.), mezi ně patří: srážky, intercepce, evaporace, infiltrace, zadržení vody na povrchu, povrchový odtok, odtékání vody, podpovrchový odtok a výpočet faktoru bezpečnosti.



Obrázek 7: Schéma modelu DYLAM.

Srážky jsou v tomto kroku nejprve zachyceny rostlinnou pokrývkou (na listech stromů, na povrchu trávy, atd.). U části srážek poté dojde k evaporaci (b), a tím je tato voda pro model ztracena a již se s ní v modelu nepočítá. Když je intercepční kapacita naplněna (a), dochází ke vsakování vody do půdy (c), k jejímu zachycení na povrchu (d) a k jejímu povrchovému odtoku (e). Povrchovým odtokem dochází k odtékání vody vodními toky a k pozvolnému vsakování vody v průběhu jejího odtoku (pouze tehdy, není-li naplněna infiltrační kapacita). Infiltrace a podpovrchový tok jsou modelovány pomocí Darcyho zákona. Modelování sesuvů v modelu DYLAM je založen na rovnici faktoru bezpečnosti FS:

$$FS = \frac{C + (\gamma - m\gamma_w) z \cos^2 \theta \tan \phi}{\gamma z \sin \theta \cos \theta}, \quad (20)$$

kde C je koheze [Pa], γ je jednotková váha půdy [N/m^2], γ_w je jednotková váha vody [N/m^2], m je nasycení půdy [-], z je hloubka povrchu [m], θ je sklon svahu [$^\circ$] a ϕ je úhel vnitřního tření [$^\circ$].

Výsledky této rovnice stanovují zda je svah stabilní či nikoli. V tabulce jsou uvedeny hodnoty, které jsou pro výslednou stabilitu určující.

Tabulka 4: Mezní hodnoty faktoru bezpečnosti

Podmínka	Předpokládaný stav
$FS \leq 1,0$	svah je nestabilní
$1,0 > FS < 1,5$	kritické podmínky
$FS \geq 1,5$	svah je stabilní

12.2 Popis dat

Data, která jsou důležitá pro běh modelu, je možné rozdělit do několika skupin: DEM, srážky, landuse a půdy/deluvium. DEM je reprezentovaný nadmořskou výškou [m]. Srážky jsou reprezentované intenzitou deště [mm/h]. Mezi data landuse patří kapacita infiltrace [mm/h] a faktor intercepce [mm]. Data půd/deluvia zahrnují Darcyho rychlost [m/h], kohezi (soudržnost) [Pa], maximální hloubka [m], úhel vnitřního tření [°], water storage faktor [mm].

Vstup dat do modelu ještě není plně vyřešen. Data, která jsou pro běh modelu vyžadována, musejí být převáděna do formátu .mat. Názvy potřebných souborů musejí být poté vepsány přímo do zdrojového kódu modelu.

12.3 Výstup modelu

Výstupem tohoto modelu jsou obrázky ve formátu .jpg, které zobrazují jednotlivá nasycení vodou (saturace), voda na povrchu (povrchový odtok), podpovrchovou vodu a výsledný faktor bezpečnosti, jak se vyvíjí v čase. Tyto snímky se jako mezivýsledky generují podle zvoleného časového kroku. V našem případě se jedná o časový krok 10 hodin.

Další možností výstupu je grid ve formátu .txt, který lze snadno importovat do GISu. Tyto soubory se generují stejným způsobem, jak je uvedeno u formátu .jpg.

12.4 Implementace modelu do GRASSu

DYLAM by se mohl do GRASSu připojit jako jeden z modulů (podobně jako je tomu u modelů ANSWERS, SIMWE nebo AGNPS). V tom případě je ale nutné převést jeho zdrojový kód z matlabu do jazyka C nebo FORTRAN, který je využit u uvedených modelů. Spouštění by mohl být interaktivně nebo také neinteraktivně.

Při neinteraktivním spuštění by musel mít definovanou strukturu příkazu pomocí různých flagů a algoritmů. Syntaxe příkazu by pak mohla vypadat třeba takto:

```
r.dylam - elevation=name slope=name rain=name infil=name .....
```

Při interaktivním spuštění by byl uživatel postupně na potřebná data dotazován. Toto je podle mého názoru pro uživatele příjemnější. Obdobně tomu je i u modelů ANSWERS, SIMWE nebo AGNPS. Tyto modely jsou rovněž spouštěny interaktivně (platí pro GRASS 5.3).

13 Použití vybraných modelů

13.1 Použití vybraných modelů eroze

Pro aplikaci modelů na studovanou oblast byly vybrány modely: SIMWE a USPED. Tyto modely byly vybrány, protože jsou použitelné v GIS GRASS. Model SIMWE je součástí zdrojového kódu GRASS 5.3. Není však zahrnut v jeho základní instalaci. Musí být samostatně kompilován a následně instalován.

13.1.1 Použití modelu SIMWE

Jak již bylo uvedeno výše, model SIMWE se skládá ze dvou samostatných submodelů: *r.sim.sediment* a *r.sim.water*.

r.sim.sediment

Model může být spuštěn interaktivně nebo neinteraktivně. Je-li příkaz použit interaktivně, do příkazové řádky se vepíše jen *r.sim.sediment* (tedy bez argumentů). V tomto případě je uživatel dotazován na hodnoty jednotlivých parametrů použitím standardního prostředí GRASSu. Při neinteraktivním spuštění modelu musí být specifikovány argumenty (parametry) a flagy. Syntaxe tohoto příkazu je:

```
r.sim.sediment [-tm] elevin=name wdepth=name dxin=name dyin=name  
detin=name tranin=name tauin=name manin=name [tc=name] [et=name]  
[conc=name] [flux=name] [erdep=name] [nwalk=value] [niter=value] [outiter=value]  
[density=value] [diffc=value]
```

Níže jsou popsány jednotlivé parametry modelu. Zmíněny jsou jen ty povinné a pro modelování důležité.

elevin = jméno (název vstupního rastrového souboru, který obsahuje grid nadmořských výšek [m]); Tato vrstva byla vytvořena z vrstevnic 10 m (zdroj - ZABAGED) pomocí příkazu *v.surf.rst*.

wdepth = jméno (název vstupního rastrového souboru, který obsahuje hloubku vody [m]); Tato vrstva byla vytvořena pomocí modulu *r.sim.water*, který je popsán níže.

dxin = jméno (název vstupního rastrového souboru, který obsahuje x-derivace výšek [-]); Tato vrstva byla vytvořena z gridu nadmořských výšek pomocí příkazu *r.slope.aspect*.

dyin = jméno (název vstupního rastrového souboru, který obsahuje y-derivace výšek [-]); Stejně jako parametr dxin i tento je vytvořen pomocí příkazu *r.slope.aspect*.

detin = jméno (název vstupního rastrového souboru, který obsahuje koeficient erodovatelnosti); Jedná se o míru náchylnosti půdy k odtržení vodním tokem. Tento parametr byl určen na základě práce Janečka (2002).

train = jméno (název vstupního rastrového souboru, který obsahuje koeficient transportní kapacity); Tento parametr je míra schopnosti půdy být transportovaná vodním tokem. Závisí na půdních vlastnostech, ale může být také ovlivněna vegetací. Tento koeficient není přímo měřitelný a je poskytován v modelu WEPP, raději je odhadován nepřímo, což činí správné určení tohoto parametru problematické.

tauin = jméno (název rastrového souboru, který obsahuje kritické smykové napětí); Tento parametr reprezentuje půdní odpor k smykovým silám vodního toku. Závisí na vlastnostech půdy a pokryvu a hodnoty jsou dostupné např. v manuálu pro model WEPP.

manin = jméno (název vstupního rastrového souboru, který obsahuje rastr Manningova koeficientu drsnosti povrchu n [-]). Parametr drsnosti povrchu závisí na vegetačním pokryvu, stejně jako na povrchu půdy. Tato vrstva byla vytvořena na základě práce Janečka (2002).

tc = jméno (název výstupního rastrového souboru kapacity transportu)

et = jméno (název výstupního rastrového souboru transportně limitované eroze/sedimentace)

conc = jméno (název výstupního rastrového souboru koncentrace sedimentu)

flux = jméno (název výstupního rastrového souboru toku sedimentů)

erdep = jméno (název výstupního rastrového souboru eroze/sedimentace)

r.sim.water

Jak již bylo zmíněno výše, druhým modulem je *r.sim.water*. Ten je nezbytný pro stanovení parametru wdepth (hloubka vody). Stejně jako *r.sim.sediment* i tento model může být spuštěn interaktivně nebo neinteraktivně. Syntaxe tohoto příkazu je:

```
r.sim.water [-tm] elevin=name dxin=name dyin=name rain=name manin=name  
[depth=name] [disch=name] [err=value] [outwalk=name] [nwalk=value] [niter=value]  
[outiter=value] [density=value] [diffc= value] [hmax=value] [halpha=value]  
[hbeta=value]
```

Níže jsou popsány jednotlivé parametry modelu. Zmíněny jsou jen ty povinné a pro modelování důležité.

elevin = jméno (název vstupního rastrového souboru, který obsahuje grid nadmořských výšek [m]); Stejně jako v předchozím případě byla tato vrstva vytvořena z vrstevnic pomocí příkazu *v.surf.rst*.

dxin = jméno (název vstupního rastrového souboru, který obsahuje x-derivace [-]); Příprava dat viz příkaz *r.sim.sediment*

dyin = jméno (název vstupního rastrového souboru, který obsahuje y-derivace [-]); Příprava dat viz příkaz *r.sim.sediment*

rain = jméno (název vstupního rastrového souboru, který obsahuje srážková data [mm/h])

manin = jméno (název vstupního rastrového souboru, který obsahuje rastr Manningova koeficientu drsnosti povrchu n [-]); Příprava dat viz modul *r.sim.sediment*

depth = jméno (název výstupního rastrového souboru hloubky vody [m])

disch = jméno (název výstupního rastrového souboru odtoku vody [m³/s])

Výsledky modelování pomocí modelu SIMWE jsou uvedeny v příloze 3.

13.1.2 Použití modelu USPED

Model USPED není distribuován společně se zdrojovým kódem GRASSu. Pro použití tohoto modelu je nutné vycházet z jeho matematické podstaty a vytvořit vlastní skript, který by bylo možné v GRASSu použít.

Níže uvedený postup byl vytvořen na základě webových stránek, kde jsou publikovány výsledky práce Heleny Mitášové dostupných na: <http://skagit.meas.ncsu.edu/~helenag/gmslab/index.html>.

Výpočet modelu USPED

Pro výpočet modelu je nutná mít tato data: rastrové vrstvy (*Elevation* - grid nadmořských výšek, *K* - grid faktoru K, *C* - grid faktoru C) a konstanty: (*R*- srážky (120), *rozlišení*=10)

Postup samotného výpočtu modelu je následující:

1. V prvním kroku je nutné vypočítat flow accumulation.

r.flow elevation dsout = flowacc

2. V druhém kroku se z gridu nadmořských výšek vytvoří grid sklonu svahu a orientace.

r.slope.aspect elevation slope = sklon aspect = orientace

3. Ve třetím kroku se počítá podle rovnice (11) uvedené v kapitole 10.

r.mapcalc sflowtopo = exp(flowacc*rozlišení,1.6)*exp(sin(sklon),1.3)

r.mapcalc qsx = 120 * K * C * sflowtopo * cos(orientace)

r.mapcalc qsy = 120 * K * C * sflowtopo * sin(orientace)

4. Z těchto gridů bylo dále nutné vypočítat jejich první derivace, tzn. byly provedeny následující kroky.

r.slope.aspect qsx dx = qsx.dx

r.slope.aspect qsy dy = qsy.dy

5. Posledním krokem je výsledný výpočet eroze/sedimentace.

r.mapcalc erdep = qsx.dx + qsy.dy

Výsledky modelování pomocí tohoto modelu jsou v příloze 3.

13.2 Použití vybraných modelů sesuvů

Jak již bylo zmíněno výše, oba použité modely (SINMAP a SHALSTAB) jsou ve své původní verzi extenze k ArcView 3.x (nutný je Spatial Analyst nebo 3D Analyst).

Aby bylo možné použít modely v prostředí GRASSu použít, bylo také nutné vytvořit skripty, které by toto umožňovaly. U obou modelů byl postup obdobný, proto jejich tvorba není popisována pro každý model zvlášť. Při tvorbě bylo nutné vycházet z matematické podstaty těchto modelů. Pro model SHALSTAB se jedná o rovnici hydrologické stability (14) a pro model SINMAP o rovnici indexu stability (16). Oba skripty jsou připojeny k diplomové práci jako příloha na CD-ROMu.

Výsledek modelování pomocí modelu SHALSTAB je k diplomové práci připojen jako příloha 6. Výsledek modelování pomocí modelu SINMAP je k diplomové práci připojen jako příloha 7.

Interpretace výsledků modelování byla provedena rozdílně pro každý model. Pro model SINMAP byla zachována jeho standardní klasifikace, jak je uvedena v tabulce 3. Pro model SHALSTAB byla vytvořena klasifikace vlastní, a to na základě efektivních srážek. Jednotlivé intervaly jsou v mm/den: 0 – 25, 26 – 50, 51 – 100, 101 – 200, 201 – 400, 401 a více.

14 Srovnání použitých modelů

V této kapitole je uvedeno srovnání výsledků modelování pomocí jednotlivých modelů. K těmto výsledkům by se však mělo přistupovat s velkou opatrností. Každý model totiž vyžaduje pro své modelování různá data.

Důležité je také zmínit, že řada parametrů, s kterými modely pracují, je těžko odhadnutelná a ne vždy přesná. Příkladem jsou hodnoty K a C faktoru v modelu USPED. Při modelování tedy vždy závisí na přesnosti a podrobnosti dat, která jsou pro běh konkrétního modelu nutná.

14.1 Srovnání modelů SIMWE a USPED

Jednoduché srovnání parametrů těchto modelů je uvedeno v příloze 2. Grafické srovnání výsledků modelování těchto modelů je pak v příloze 5. Protože vstupní parametry modelování se liší, i výsledky modelování jsou různé.

Přehledné srovnání výstupních hodnot těchto modelů je uvedeno v tabulce 5, kde se jedná o hodnoty eroze, a v tabulce 6, kde jsou uvedeny hodnoty sedimentace. Zvlášť jsou uvedeny hodnoty pro místa, kde nedochází k erozi nebo sedimentaci. Tato místa se u obou modelů výrazně liší. Zatímco model SIMWE modeluje 13 229 takových pixelů (132,29 ha), model USPED modeluje takových pixelů 32 (0,32 ha).

Tabulka 5: Srovnání procesu eroze modelovaných modely SIMWE a USPED.

Model	SIMWE		USPED	
	počet buněk	plocha [ha]	počet buněk	plocha [ha]
méně než 25	5 694	56,94	36 329	363,29
25–50	5 663	56,63	21 441	214,41
50–100	10 263	102,63	18 837	188,37
100–250	22 059	220,59	14 369	143,69
250–500	14 272	142,72	4 358	43,58
500 a více	4 850	48,50	8 556	85,56

Z uvedených hodnot je zřejmé, že model USPED předpovídá na studovaném území mnohem větší erozi (na 1 038,90 ha) než model SIMWE, který předpovídá erozi jen na ploše 628,01 ha. Z toho vyplývá i rozdílnost v určení sedimentace v území - 312,88 ha pro model USPED a 592,12 ha pro model SIMWE. U modelu SIMWE je nutné připočítat i místa, kde neprobíhá eroze ani sedimentace, kterých je oproti modelu USPED značná

Tabulka 6: Srovnání procesu eroze modelovaných modely SIMWE a USPED.

Model	SIMWE		USPED	
	počet buněk	plocha [ha]	počet buněk	plocha [ha]
méně než 25	5 398	53,98	10 054	100,54
25–50	5 303	53,03	4 430	44,30
50–100	9 625	96,25	4 143	41,43
100–250	19 724	197,24	4 426	44,26
250–500	12 227	122,27	1 905	19,05
500 a více	6 935	69,35	6 330	63,30

převaha (cca o 131,97 ha).

Uvedené rozdíly jsou výsledkem rozdílných postupů těchto modelů při výpočtu eroze (sedimentace). Model USPED využívá parametry typické pro rovnici USLE (faktory C a K). Je možné, že tento jeho přístup (USLE) vede k silnému nadhodnocení erozního procesu, zatímco sedimentace je podhodnocena. Naopak poměr ohodnocení eroze a sedimentace u modelu SIMWE je vcelku vyrovnaný. Rozdíl těchto procesů činí 35,89 ha.

14.2 Srovnání modelů SHALSTAB a SINMAP

Srovnání výsledků těchto modelů není snadné, protože výsledné hodnoty modelů jsou odlišné. Zatímco výsledkem modelování pomocí modelu SHALSTAB je množství srážek respektive intenzita srážek - mm/den), které musí spadnout, aby se svah stal nestabilní, výsledkem modelu SINMAP je index stability.

U modelu SHALSTAB tedy platí, že místa, kde stačí relativně nízký úhrn srážek (25 mm/den), jsou nejméně stabilní. Je zde velká pravděpodobnost vzniku sesuvů. Naopak místa, kde je zapotřebí velkého úhrnu srážek (více než 400 mm/den), se jeví jako nejstabilnější a pravděpodobnost vzniku sesuvů je zde nejmenší. U tohoto modelu se ještě určují místa, která jsou chronicky nestabilní. Jedná se o místa, kde je sklon tak velký, že se zde neudrží deluvium, a nemůže zde tedy dojít k sesuvu.

U modelu SINMAP je interpretace výsledku modelování zřejmější, protože je zde pravděpodobnost vzniku sesuvů vyjádřena pomocí indexu stability. U tohoto modelu se žádná chronicky nestabilní místa neurčují. I to srovnání výsledků těchto modelů stěžuje.

Srovnat lze tedy jen mezní hodnoty - místa, kde je pravděpodobnost vzniku sesuvů nejmenší a naopak největší. Toto srovnání je uvedeno v tabulce 7. Je však nutné mít na paměti že u modelu SHALSTAB nejsou zahrnuta chronicky nestabilní místa.

Tabulka 7: Porovnání stabilních a nestabilních míst (modely SHALSTAB a SINMAP).

Model	Nestabilní plochy		Stabilní plochy	
	počet pixelů	plocha [ha]	počet pixelů	plocha [ha]
SHALSTAB	79 223	792,23	7 841	78,41
SINMAP	6 399	63,99	9 989	99,89

14.3 Srovnání modelu DYLAM s ostatními modely

Stejně jak tomu bylo v předchozím případě (srovnání SHALSTAB – SINMAP), i porovnávání výsledků modelu DYLAM s těmito modely je složité. U modelu SHALSTAB je to zřejmé – výsledky jsou ve formě efektivních srážek.

Srovnání s modelem SINMAP však lze s určitou přesností provést. Oba tyto modely jsou založeny na rovnici faktoru bezpečnosti a výsledné hodnoty je možné porovnávat. Rozdíl je v interpretaci výsledků. Zatímco model DYLAM rozděluje výsledky do tří kategorií (viz tabulka 4), model SINMAP určuje těchto kategorií šest (viz tabulka 3). Jednotlivé výsledné hodnoty jsou však (tedy FS u DYLAMu a SI u SINMAPu) srovnatelné. Je třeba také zmínit, že model SINMAP je statický, zatímco DYLAM je dynamický. Už z tohoto parametru vyplývá určitá odlišnost, která se dá u výsledků předpokládat.

Jak je patrné z jednotlivých mapových výstupů (příloha 7 a příloha 9), model SINMAP oproti modelu DYLAM generuje mnohem více nestabilních svahových zón. Z toho by se dalo vyvodit, že SINMAP modeluje ohrožená místa (lépe možná – ohrožené oblasti), zatímco model DYLAM se snaží vymodelovat konkrétní sesuvy.

15 Diskuze

I když byla celá práce zpracována v prostředí GIS GRASS, vizualizace výsledků byla provedena v ArcView 3.1. K tomuto kroku bylo přistoupeno, aby bylo dosaženo vyšší kvality grafických výstupů. Prostředí GIS GRASS nedovoluje tak komfortní ovládání jednotlivých grafických prvků v mapovém výstupu. Tento problém plně neřeší ani Quantum GIS. Kvalita výstupů není tedy vysoká.

V práci je popsáno značné množství modelů (i když zdaleka ne úplné), avšak modelů, které by bylo možné v GRASSu použít není mnoho. Jedná se např. o modely ANSWERS, AGNPS nebo SIMWE. Problémem je, že tyto modely nejsou součástí novějších verzí GRASSu. Použita byla tedy verze GRASS 5.3, která tyto modely obsahuje. Jediná možná instalace je ze zdrojového kódu. Základní instalace však tyto modely neobsahuje, proto se musí instalovat každý zvlášť. Celý tento proces je časově značně náročný (i kvůli chybějícím knihovnám).

16 Závěr

Tato práce se věnuje modelování mělkých sesuvů a eroze. Cílem bylo podat ucelený přehled o přístupu k modelování těchto procesů. Dále jsou v práci uvedeny dostupné modely pro modelování eroze a mělkých sesuvů. Ty jsou aplikovány na vybrané povodí.

Z těchto modelů byly vybrány modely SIMWE (Simulation of Water Erosion) a USPED (Unit Stream Power Based Erosion Deposition) pro modelování eroze a modely SHALSTAB (Shallow Stability) a SINMAP (Stability Index Mapping) pro modelování sesuvů. Tyto modely byly poté aplikovány na povodí Horní Bečvy. To se nachází v SV části okresu Vsetín.

Veškeré modelování bylo provedeno v prostředí GIS GRASS. Model SIMWE je součástí GRASSu 5.3. Není však součástí základní instalace, musí se tedy instalovat zvlášť. Pro model USPED byl vytvořen skript, který je snadno použitelný v GRASSu. Modely SHALSTAB a SINMAP jsou ve své původní verzi distribuovány jako extenze pro ArcView 3.x. Tato extenze však předpokládá uniformní litologii, fyzikální a hydrologické parametry ve zkoumaném území. Využití této extenze, pro určení vzniku mělkých sesuvů, je tedy omezené. Pro použití těchto modelů v prostředí GRASS bylo nutné vytvořit skripty, které poté byly aplikovány na povodí Horní Bečvy. Na vytvoření skriptu byla použita jen jejich matematická podstata.

V této práci je popsán i model DYSLAM (Dynamic Landslide Model). Jedná se o model vyvíjený na Přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého v Olomouci. Tento model je napsán v MATLABu, ve kterém probíhá i modelování. I tento model byl aplikován na povodí Horní Bečvy.

Nakonec bylo provedeno srovnání výsledků modelování vybraných modelů. Modely SIMWE a USPED vykazují velké rozdíly v ohodnocení eroze a sedimentace na studovaném území. Je to způsobeno řadou parametrů, s kterými pracují. Ty jsou často velmi nejednoznačné. Příkladem jsou hodnoty K a C faktoru v modelu USPED. Při modelování tedy vždy závisí na přesnosti a podrobnosti dat, která jsou pro běh konkrétního modelu nutná.

Srovnání bylo provedeno také mezi modely SHALSTAB a SINMAP. Toto srovnání je však těžko interpretovatelné, protože uvedené modely mají rozdílné výstupní parametry.

17 Summary

This thesis is focused on modelling the shallow landslides and erosion. The aim of the thesis was present a self-contained summary on an approach to model these processes. There are introduced accessible models to model shallow landslides and erosion. These models are applied to selected watershed.

Among these models, SIMWE (Simulation of Water Erosion) and USPED (Unit Stream Power Based Erosion Deposition) models for erosion modelling and SHALSTAB (Shallow Stability) and SINMAP (Stability Index Mapping) models for landslide modelling have been chosen. These models were applied to watershed of Horní Bečva. This watershed is situated in N-E part of Vsetín district.

All modeling was made in GIS GRASS. SIMWE model is a component of GRASS 5.3. For USPED model a script was created, which is easily applicable in GRASS. SHALSTAB and SINMAP models are originally distributed as extensions for ArcView 3.x. These extensions require uniform lithology, physical and hydrological parameters for the studied area. Applicability of these extensions for a specification of formation of shallow landslides is limited. Thus, it was necessary to create scripts for applicability of these models in GRASS. These scripts were then applied to Horní Bečva watershed. Only mathematical essence of these models was used to create these scripts.

In this thesis, the DYLAM model (Dynamic Landslide Model) is described too. It is a model developed at Faculty of science of Palacky University in Olomouc. The source code is written in MATLAB software, in which the modelling also takes place. This model was applied to Horní Bečva watershed.

Literatura

- [1] HOLÝ, M.: *Protierozní ochrana*. Praha, SNTL, 288 s.
- [2] HOLÝ, M.: *Eroze a životní prostředí*. Praha. Vydavatelství ČVUT, 1994, 383 s.
- [3] JANEČEK, M. a kol.: *Z Ochrana zemědělské půdy před erozí*. Praha, ISV nakladatelství, 2002, 201 s.
- [4] Klimeš, J.: Statistické metody tvorby modelů náchylnosti území ke vzniku svahových deformací. In Geomorfologický sborník. 2003, Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni
- [5] KUNEŠ, J. - VAVROCH, O. - FRANTA, V.: *Základy modelování*. Praha, Nakladatelství technické literatury, 1989, 264 s.
- [6] MACHALA, J.: *Systémová analýza a programování*. Brno, Vysoká škola zemědělská v Brně, 1982, 188 s.
- [7] STANEK, J. - KOŘÍNEK, R.: *Hornická mechanika zemin - stabilita svahů*. Ostrava, VŠB v Ostravě, 1991, 238 s.
- [8] SVATOŇOVÁ, H. - VRANKA, P.: *AnnAGNPS - model pro kontinuální simulaci eroze a transportu splavenin*. In Geografické aspekty středoevropského prostoru. Brno, Masarykova univerzita v Brně, 2003, 308 - 311 s.
- [9] TUČEK, J.: *Geoinformatické informační systémy: Principy a praxe*. Praha, Computer Press, 1998, 424 s.
- [10] ZACHAR, D.: *Erózia pody*. Bratislava, Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1970, 528 s.
- [11] VOŽENÍLEK, V.: *Diplomové práce z geoinformatiky*. Olomouc, UP, 2002, 61 s.

Internetové zdroje

1. – [online]. [cit. 10. 4. 2005]. Dostupné z: <<http://skagit.meas.ncsu.edu/~helena/>>
2. AGEN 526 [online]. [cit. 10. 3. 2005]. Dostupné z: <<http://pasture.ecn.purdue.edu/~engelb/agen526/glossary.html>>

3. AGNPS - Erosion Modelling [online]. poslední revize 4. 1. 1999. [cit. 15. 10. 2005].
Dostupné z: <<http://www.geog.uni-hannover.de/phygeo/grass/agnps.html>>
4. BAE Soil and Water/Environment Research, Teaching, and Extension [online]. c1993. poslední revize 15. 3. 2005 [cit. 10. 5. 2006]. Dostupné z:
><http://www3.bae.ncsu.edu>>
5. David Tarboton [online]. [cit. 10. 5. 2006]. Dostupné z:
<<http://www.engineering.usu.edu/dtarb/>>
6. Fine Ltd. [online]. poslední revize 15. 10. 2005 [cit. 20. 6. 2006]. Dostupné z:
<<http://www.fine.cz>>
7. Geotechnical Engineering Software - GEO-SLOPE International Ltd. [online]. [cit. 5. 4. 2006]. Dostupné z: <<http://www.geo-slope.com/products/>>
8. GRASS GIS - The World Leading Free Software GIS [online]. c1999-2006. poslední revize 11. 8. 2006. [cit. 15. 10. 2005]. Dostupné z: <<http://grass.itc.it>>
9. KOLEJKA, J.: Sesuvy pod kontrolou prostředků geoinformatiky. In Computer Design [online]. 25. 5. 2001 [cit. 20. 4. 2006] Dostupné z: <<http://www.cdesign.cz/h/Clanky/AR.asp?ARI=248>>
10. LISEM Homepage [online]. [cit. 10. 5. 2005]. Dostupné z: <<http://www.geog.uu.nl/lisem/>>
11. Model [online]. [cit. 6. 5. 2005]. Dostupné z: <<http://www.ncl.ac.uk/medaction/WEB/dss-linkages.htm>>
12. NSRI - European Soil Erosion Model (EUROSEM) [online]. [cit. 10. 5. 2005]. Dostupné z: <<http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/nsri/research/erosion/eurosem.htm>>
13. PRMS [online]. poslední revize 29. 3. 2000 [cit. 15. 10. 2005]. Dostupné z: <<http://water.usgs.gov/software/prms.html>>
14. RIB Stavební software s.r.o. [online]. poslední revize 10. 6. 2006 [cit. 20. 6. 2006]. Dostupné z: <<http://www.rib.cz/>>
15. SHALSTAB [online]. c1998. poslední revize 29. 11. 1998. [cit. 15. 10. 2005]. Dostupné z: <<http://socrates.berkeley.edu/~geomorph/shalstab/>>

16. Sinmap [online]. [cit. 15. 10. 2005]. Dostupné z: <<http://hydrology.neng.usu.edu/sinmap/>>
17. Slope Stability Analysis Software [online]. [cit. 15. 5. 2006]. Dostupné z: <http://www.slope-analysis.com/html/galena_overview.html>
18. Soil Erosion Site [online]. poslední revize 13. 3. 2005 [cit. 10. 10. 2005]. Dostupné z: <<http://soilerosion.net>>
19. Vodní eroze [online]. poslední revize 10. 10. 2002 [cit. 5. 3. 2005]. Dostupné z: <<http://www.sweb.cz/eroze/home.htm>>
20. Watershed Model Steps: Illinois Watershed Management Clearinghouse [online]. [cit. 10. 5. 2006]. Dostupné z: <http://web.aces.uiuc.edu/sriit/watershed/model/models_index.htm>
21. Watershed Physical Processes Research Unit: AGNPS [online]. [cit. 15. 10. 2005]. Dostupné z: <<http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=5199>>
22. Welcome [online]. [cit. 10. 5. 2006]. <Dostupné z: <http://www.brc.tamus.edu/>>
23. WEPP Software [online]. poslední revize 5. 6. 2005 [cit. 20. 9. 2005]. Dostupné z: <<http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/wepp.html>>

PŘÍLOHY

Seznam příloh

1. Všeobecné parametry vybraných modelů eroze
2. Srovnání parametrů modelů SIMWE a USPED
3. SIMWE
4. USPED
5. Srovnání výsledků modelování modelů SIMWE a USPED
6. SHALSTAB
7. SINMAP
8. Ukázka výstupů modelu DYLAM (.jpg)
9. Výsledek modelování pomocí modelu DYLAM
10. Vstupní a výstupní data volná (CD-ROM)