Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
katedra geoinformatiky

Miroslav VLAŠANÝ

GIS MODELOVÁNÍ EROZNÍHO ÚČINKU PŘÍVALOVÝCH DEŠŤŮ

bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Michal BÍL, PhD.
Olomouc 2008

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval s použitím uvedené literatury.

V Olomouci dne 27. 5. 2008 …….

Miroslav Vlašaný

Děkuji vedoucímu bakalářské práce RNDr. Michalu Bílovi, PhD. za odborné vedení, cenné rady a konzultace. Dále bych chtěl poděkovat starostce Smržic, ing. Haně Lebedové, za pomoc při sběru informací k problému. Lukáši Macurovi a Lukáši Markovi za pomoc při měření s totální stanicí.

Vysoká škola: Univerzita Palackého **Fakulta:** Přírodovědecká

Katedra: Geoinformatiky **Školní rok:** 2006-2007

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro Miroslava V L A Š A N É H O

obor **Geografie a geoinformatika**

Název tématu:

GIS MODELOVÁNÍ EROZNÍHO ÚČINKU PŘÍVALOVÝCH DEŠŤŮ

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je vytvoření mapy potenciálního erozního ohrožení půdy v povodí nad obce Smržice (okr. PV) a mapy obsahují návrh protierozních opatření tamtéž. Výstupy budou vycházet z analýzy známých událostí, které se zde vyskyty v předchozích letech. Modelování bude probíhat v GIS pomocí vybraného erozního modelu. Podkladem pro digitální model reliéfu budou data ZABAGED zpřesněná o vlastní výšková data z terénního měření totální stanicí. Ostatní data pro model, zejména geotechnické parametry, budou stanovena na místě.

O bakalářské práci student vytvoří internetovou stránku, která bude v den odevzdání práce umístěna na server UP. Na závěr práce připojí jednostránkové resumé v anglickém jazyce. Výstupy budou odevzdány v digitální podobě na CD – ROM. Student odevzdá údaje všech datových sadách, které vytvořil nebo získal v rámci práce, pro potřeby zaevidování do Metainformačního systému katedry geoinformatiky ve formě vyplněného dotazníku. Práce bude zpracována podle zásad dle Voženílek (2002).

Rozsah grafických prací:
Mapy erozního ohrožení povodí a návrhu řešení ve vhodném měřítku.

Rozsah průvodní zprávy:
40 stran

Seznam odborné literatury:

Baker, V. R., Kochel, R. C., Patton, P. C. (1998): Flood geomorphology. Wiley, 528 s.
Holý, M. (1994): Eroze a životní prostředí, Vydavatelství ČVUT Praha
Janák, V a kol., (1984): Ochrana půd před erozí, SZN Praha
Pistocchi, A., Cassani, G., Zani, O. Use of the USPED model for mapping soil erosion and managing best land conservation practices. s. 163 – 168. (manuskript)
Votrubec, J., Vlasák, J. Výpočet erozní ohroženosti půdy s využitím gridu. Acta Montanistica Slovaca 10 (2005), 2, 247-255.
Voženílek, V. (2002): Diplomové práce z geoinformatiky. Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc, UP. 31 s.
Zachar, D. (1970): Erózia pody. Bratislava, 527 s.

Internetové zdroje:
soilerosion.net/

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Michal Bíl, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce: Mgr. Aleš Létal, Ph.D. , Mgr. Vilém Pechanec, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 26. 5. 2006

Termín odevzdání bakalářské práce: 30. 5. 2007

L.S

Vedoucí katedry

UNIVERZITA PALACKÉHO
771 46 OLOMOUC, tř. Svobody 26
Přírodovědecká fakulta
Katedra geoinformatiky
tel. 585 634 513, 585 634 516

Vedoucí bakalářské práce

V Olomouci dne: 26. 5. 2006

Obsah

1 Úvod 8
2 Cíl 9
3 Vymezení zájmového území 10
4 Metody a postup zpracování 12
4.1 Metody 12
4.2 Postup 13
4.2.1 Tvorba DMR 13
4.2.2 Smykové napětí 15
4.2.3 Sběr dalších dat 18
4.2.4 Tvorba dalších vrstev 19
5 Eroze půdy 20
5.1 Vodní eroze 20
5.2 Formy povrchové vodní eroze 20
5.2.1 Plošná vodní eroze 20
5.2.2 Výmolná vodní eroze 21
5.2.3 Proudová vodní eroze 24
5.3 Mechanizmus erozních procesů 24
5.3.1 Klimatický a hydrologický faktor 24
5.3.2 Morfologický faktor 26
5.3.3 Geologický faktor 27
5.3.4 Vegetační faktor 29
5.3.5 Hospodářsko-technický faktor 29
6 Důsledky erozních procesů 30
6.1 Ztráta půdy 30
6.2 Transport a sedimentace půdních částic 31
6.3 Transport chemických látek 32
7 Protierozní ochrana 33
7.1 Protierozní opatření organizační 34
7.1.1 Delimitace kultur 34
7.1.2 Protierozní rozmísťování plodin 34
7.2 Agrotechnická a vegetační protierozní opatření 36
7.2.1 Vrstevnicové obdělávání 37
7.2.2 Ochranné obdělávání půdy 37
7.3 Protierozní opatření technického charakteru 38
7.3.1 Protierozní meze 38
7.3.2 Hydrografické prvky 39
8 Modelování 41

8.1 USLE (Universal Soil Loss Equation) 41
8.1.1 Rozbor erozní účinnosti dešťových srážek (R) 42
8.1.2 Erodovatelnost půdy (K) 43
8.1.3 Rozbor morfologických poměrů (LS) 43
8.1.4 Ochranný vliv vegetace (C) 44
8.1.5 Účinnost protierozních opatření (P) 44
9 Použití modelu USLE 45
10 Analýza povodní ve Smržicích v roce 2007 47
11 Výstupy 52
12 Diskuze 55
13 Závěr 57
14 Summary 58
15 Použité zdroje 59
PŘÍLOHY 61

1 Úvod

Půda jako jeden z hlavních zdrojů biosféry je podle Holého (1994) s odvoláním na definici OSN „omezený a nenahraditelný přírodní zdroj; v případě postupující degradace a její ztráty se stává tento zdroj v mnoha částech světa hranicí dalšího rozvoje lidské společnosti. Jestliže by půda přestala existovat, přestane existovat biosféra s ničivými následky pro lidstvo“.

Erozní procesy, jak uvádí Pasák (1984), probíhají v nenarušených přírodních podmínkách velmi pozvolna bez škodlivých důsledků, v zemědělsky intenzivně využívané krajině mnohonásobně zrychlují. Nejzávažnějším důsledkem erozních procesů je poškozování až úplné zničení půdy. Velké škody působí eroze též na zemědělských plodinách, v lesním hospodářství, ale i poškozováním komunikací, budov, zanášením vodních nádrží a toků splaveninami, znečišťováním vody.

Jak zmiňuje Janeček (2002) je eroze půdy přírodní proces, jehož intenzitu lze výrazně omezit, a tak umožnit trvalé využívání půd k pěstování zemědělských plodin. V našich podmínkách je protierozní ochrana zvláště nutná na svazích s mělce uloženým skalním podložím a s vysokým obsahem štěrku. Na území ČR je téměř polovina ploch orné půdy různým stupněm ohrožena vodní erozí a vyžaduje důslednou protierozní ochranu. Kromě toho Janeček (2002) odhaduje, že asi 7,5 % orných půd je ohroženo větrnou erozí.

2 Cíl

Cílem bakalářské práce je vytvoření mapy potenciálního erozního ohrožení půdy v povodí nad obcí Smržice (okr. Prostějov) a mapy obsahující návrh protierozních opatření tamtéž.

Modelování bude vycházet z analýzy proběhlých událostí, ke kterým jsou dostupné informace, popřípadě fotodokumentace. Podkladem bude digitální model terénu tvořený daty ze ZABAGEDu a vlastními výškovými měřeními.

Obě mapy budou vytvořeny v prostředí ArcView GIS 3.3 pomocí erozního modelu USLE. Mapa potenciálního erozního ohrožení půdy bude obsahovat hodnoty smykového napětí půdy, pořízené v terénu, které zpřesňují chování půdního povrchu a složení svrchních vrstev půdy při modelaci erozních procesů.

Následně budou navrhnuty možnosti řešení dané situace a konkrétní mapa s návrhem protierozních opatření. Řešení musí být jednoduché a účelné, jelikož obec nedisponuje tolika zdroji pro výstavbu a udržování protierozních opatření jako například města. Musí být brán ohled na množství vlastníků pozemků v kritické oblasti, aby nedošlo ke vzniku konfliktu při návrhu řešení s majiteli. Protierozní opatření by měla významně zabránit erozi a následnému smyvu půdy do obce.

Součástí práce bude také přehled protierozních opatření a obecné seznámení s problematikou erozního modelu USLE v GIS prostředí.

3 Vymezení zájmového území

Studovaná oblast, nazývaná Stráže, se nachází v Olomouckém kraji, severozápadně od Prostějova, v katastru obce Smržice. Velikost povodí podle gridu je 57,5 ha.

Obr. 1: Pozice povodí v prostějovském okrese (červenou barvou).

Povodí je ohraničeno na jihovýchodě zástavbou obce, severní část polní cestou a strží (šířka strže je kolem 4,0 m). Zbytek území ohraničují polní cesty nebo hřbetnice povodí. Většina území je zemědělsky využívána, jen malá část je tvořena cestami a zástavbou. Náhled na povodí nad ortofoto snímkem se nachází v příloze 2.

Území se nachází v Hornomoravském úvalu. Celkový tvar povodí je mírně konkávní, část kolem „údolnice“ je tvořena silnicí (viz. Obr. 2). Převýšení v povodí je 55,5 m, přičemž nejnižší bod má výšku 220,0 m n. m., nejvyšší 275,5 m n. m.

Obr. 2: Pohled na povodí ze severovýchodu.

Z geologického hlediska, jak je uvedeno v aplikaci GeoINFO - geovědní informace na území ČR, která je dostupná online na http://nts5.cgu.cz/website/GEOinfo/, se severní část území nachází na kvartérní spraši a sprašové hlíně. Do jižní části uprostřed zasahují neogenní písky, štěrky a jíly (fluviální). Část jihozápadního cípu je tvořena nivními sedimenty (viz Obr. 7).

4 Metody a postup zpracování

4.1 Metody

Než jsem mohl začít řešit problematiku eroze a její předcházení, bylo třeba prostudovat odbornou literaturu. Literatury jsem našel dostatek, ale v žádné z nich nebyly dostatečně popsány erozní modely a řešení modelování eroze v GIS. Tyto informace jsem získal především z online zdrojů a odborných článků.

Abych se mohl seznámit se situací v zájmové oblasti u obce Smržice, kontaktoval jsem starostku obce a ředitele ZD Smržice. Od každého jsem získal mnoho cenných informací, kde se eroze vyskytovala, jaké byly její následky, proč se stále opakuje, co by mohlo mít vliv na chování odtoku aj. Provedl jsem průzkum terénu a zjistil problémy, které můžou při tvorbě digitálního modelu reliéfu (DMR) nastat.

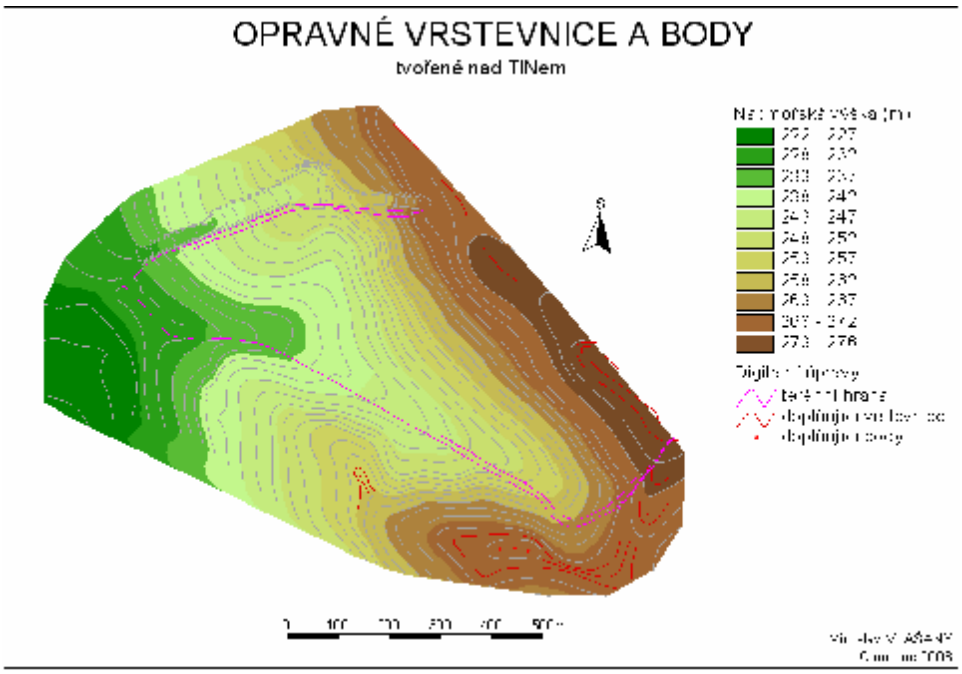
Požádal jsem ZABAGED o zaslání podkladových dat pro okolí Smržic, jednalo se o SM5 Vektor – výškopis (základní interval vrstevnic = 2 m) a polohopis a ortofota. Jako další datové podklady mi posloužily vlastní data vytvořená měřením v terénu. Pomocí totální stanice Trimble 5503 DR jsem doplnil výškopis ze ZABAGEDu o přesnější hodnoty na okrajích silnice a polí. Data jsem převedl z totální stanice pomocí programu Gromma 8. Pro potřeby přesnějšího modelu eroze, jsem několikrát provedl měření smykového napětí a vlhkosti. Z analýzy těchto dat vyšel jednoznačný závěr, že při vyšší vlhkosti je smykové napětí vyšší. Data o smykovém napětí jsem dále použil při tvorbě erozního modelu.

Veškeré mapy jsem zpracoval v ArcView 3.3 (extenze 3D Analyst a Spatial Analyst). Některé úpravy jsem prováděl pomocí freeware programů - Inkscape 0.46 a IrfanView 3.61. Práce byla napsána pomocí sady MS Office 2002. Webovou stránku jsem vytvářel v programu SeaMonkey 1.1.9 s použitím CSS stylu dostupného z http://www.freecsstemplates.org/.

4.2 Postup

4.2.1 Tvorba DMR

Hlavní kostru gridu nadmořských výšek tvořila vrstva vrstevnic (ZABAGED – výškopis, ZIV = 2 m). Z těchto dat jsem ořezal pouze přibližně zájmové území. Vrstvu jsem doplnil body a vrstevnicemi v místech s nulovým sklonem a přiřadil jim hodnotu podle nejbližších vrstevnic (viz. Obr. 1). Z důvodu malé podrobnosti jsem vrstevnice doplnil terénními měřeními pomocí totální stanice Trimble 5503 DR. Bylo nutné lépe namodelovat okolí silnic, především příkopy po stranách a dále okraj strže na severozápadě povodí, jejíž hrana tvoří část rozvodnice. Měření jsem prováděl třikrát(s pomocí kolegů Macura a Marka). Vstupní vrstvy jsou zobrazeny v příloze 1.



Obr. 3: Doplněné vrstevnice a body, terénní hrany.

Obr. 4: Zatáčka silnice, kde bylo prováděno měření příkopů a okraje silnice totální stanicí. Označeno v příloze 1.

Obr. 5: Střední část silnice, na obrázku vidíme pole pod úrovní silnice. V pravé části obrázku se poloha silnice a pole vyrovnává. Tento přechod nebyl v datech ze ZABAGEDu patmý.

Z vektorových vrstevnic s opravnými a doplňujícími body a liniemi jsem vytvořil TIN. Ten jsem převedl na grid o velikosti pixelu 1 x 1 m. Další úpravy jsem již prováděl pouze s gridy.

Na grid byl použit skript demfill, který upravuje grid nadmořských výšek s ohledem na odtokové poměry. Pomocí příkazu Map Calculatoru `([DMR].FlowDirection(false))` byla vytvořena vrstva směrů odtoku (FD) a příkazem `([FD].FlowAccumulation(Nil))` akumulace odtoku (FA). S využitím skriptu 1 (viz. níže) a s průtočným profilem, který jsem určil podle Flow Accumulation příkazem `(([FA]<500.AsGrid).SetNull(1.AsGrid))`, jsem si vytvořil hranici povodí, což je plocha na zemském povrchu, ze které

jsou povrchové vody sváděny do jednoho místa – průtočného profilu. Tím jsem měl vytvořenou masku povodí a DMR povodí.

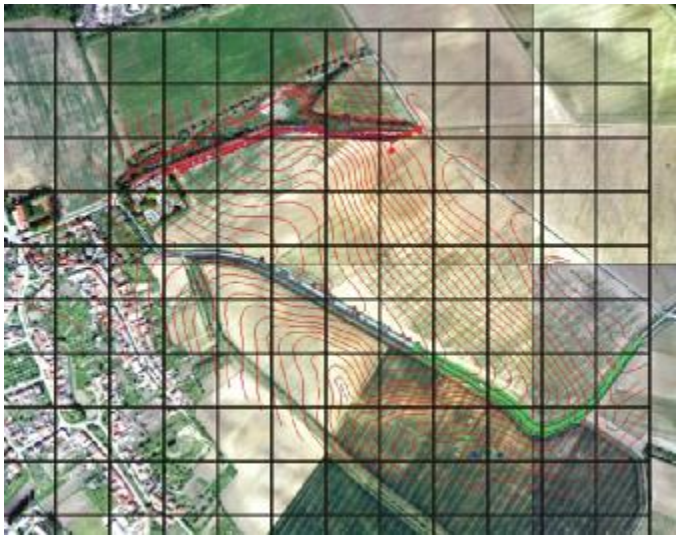
Skript 1: Vymezení povodí podle průtočného profilu

```
' pojmenovat FD a FA
' prvni shp prutocneho profilu a druhy filled grid

theView      = av.GetActiveDoc
theDisplay   = theView.GetDisplay
theGridTheme = theView.GetActiveThemes.Get(1)
theGrid      = theGridTheme.GetGrid
theBody      = theView.GetActiveThemes.Get(0)
theFTab      = theBody.GetFTab
theShape     = theFTab.FindField("Shape")
zaznam       = theFTab.REturnValue(theShape, 0)

'thePoint    = theDisplay.ReturnUserPoint
mPoint       = MultiPoint.Make({zaznam})
theSrcGrid   =
theGrid.ExtractByPoints(mPoint,Prj.MakeNull,FALSE)
theFlowDir   = theView.FindTheme("FD").GetGrid
theAccum     = theView.FindTheme("FA").GetGrid
theWater     =
theFlowDir.Watershed(theSrcGrid.SnapPourPoint(theAccum,240))

theGTheme    = GTheme.Make(theWater)
' check if output is ok
if (theWater.HasError) then
  return NIL
end

theView.AddTheme(theGTheme)
```

4.2.2 Smykové napětí

Smykové (tangenciální) napětí je hodnota, při jejíž překročení dochází podle Mohrovy hypotézy pevnosti k porušení zeminy usmýknutím podél

smykové plochy (uvedeno v Seznam Encyklopedii). Provedl jsem 3x měření smykového napětí přístrojem Field Inspection Vane Tester (viz. obr. 7). Grid povodí jsem proložil gridem viz. obr. 6.



Obr. 6: Mřížka pro vymezení oblastí pro měření smykového napětí

Díky tomu vzniklo 45 oblastí pro měření. Ty jsem v některých částech, kde 1 buňka obsahovala dvě rozdílné části povrchu, rozdělil ještě na dvě podčásti. Každý bod obsahoval informace o smykovém napětí a vlhkosti půdy na povrchu a v hloubce 5-10 cm. Velký vliv na hodnotu smykového napětí měla vlhkost půdy (měřená vlhkoměrem HH2 Moisture Meter), která byla nejčastěji ovlivněna vegetačním krytem, sklonem, typem půdy a orientací svahu.

Obr. 7: Field Inspection Vane Tester na měření smykového napětí

Jedno měření jsem provedl s pomocí kolegů Hladiše a Janíkové, abych zjistil odchylku vlivem lidského faktoru. Měřily jsme každý 3x na 10 bodech. Pro odhad odchylky jsem měl tedy 9 hodnot na každý bod. V tabulce 1 jsou znázorněny vybrané hodnoty pro 3 body v povodí. Odchylka pro jednotlivé měření se vždy pohybovalo vždy v rozmezí až 20 kPa. V případě, kdy měření prováděl někdo jiný, dosáhl podobných výsledků. Z toho vyplívá, že lidský faktor na hodnoty měření vliv nemá. Rozptyl hodnot je vždy přibližně stejný.

Tabulka 1: Rozptyl hodnot smykového napětí

Měřič	Hodnoty smykového napětí			Průměr
A	140	135	151	142,0
B	122	149	137	136,0
C	152	138	149	146,3
A	22	18	14	18,0
B	16	13	15	14,7
C	15	14	19	16,0
A	45	31	40	38,7
B	29	35	32	32,0
C	42	47	36	41,7

Hodnoty jsem převedl do digitální formy a vytvořil bodovou vrstvu (viz. příloha 2). Pro modelaci jsem použil hodnoty z měření, kdy vlhkost půdy byla průměrně 5 %. Z bodové vrstvy jsem následně interpoloval metodou IDW příkazem Surface / Create Contours izolinie a z nich grid smykového napětí (viz. příloha 2).

4.2.3 Sběr dalších dat

Od SEMA Smržice jsem získal srážková data z let 2000 až 2006, která ovšem nejsou věrohodná pro zájmové území. Jejich meteorologická stanice se nachází na druhé straně obce, asi 2 km od studovaného povodí. Charakter srážek bývá v obou oblastech často odlišný a podle zpráv občanů v době přívalových srážek byly hodnot ze SEMA daleko nižší než v oblasti Stráže.

Od Zemědělského družstva Smržice jsem zjistil údaje o srážkách právě pro jeden výskyt přívalového deště, který vedl k erozi a následným záplavám obce sedimenty a nahromaděnou srážkovou vodou. Probral jsem též problematiku povodní a eroze a získal osevní postupy a způsob práce s půdou. ZD Smržice na obou honech střídá následující plodiny: kukuřice, pšenice, ozimá pšenice, řepka. Jako meziplodiny bývají hořčice, vojtěška a pícniny. Kromě období, kdy se povrch upravuje nebo při ponechání pole v pooraném stavu, nebývá povrch bez vegetačního krytu. Problémem je, že plodiny většinou nerostou rovnoměrně, jak vertikálně, tak i horizontálně. Tyto holiny pak napomáhají povrchovému odtoku. Hony jsou mechanicky upravovány vždy po spádnici kvůli zabránění převrhnutí techniky. Pouze ve spodních částech svahů, kde sklon dosahuje hodnot pod 5°, se zpracovává povrch po vrstevnici.

Během roku jsem prováděl fotodokumentaci povodí. Důraz byl kladen především na vegetační kryt zemědělské půdy, dále na způsob a směr obrábění půdního povrchu.

4.2.4 Tvorba dalších vrstev

Pomocí ortofota a katastrální mapy okolí Smržic ze ZABAGEDu jsem vytvořil vrstvu landuse. Jednotlivým kategoriím jsem přiřadil váhy odolnosti povrchu vůči erozi. Pomocí landuse jsem vymaskoval silnice a stavby z erozního modelu.

Následně jsem se již zabýval modelováním. Vytvořil jsem si vrstvy potřebné pro model USLE, viz. Kapitola 9.

Podle erozních modelů jsem navrhnul protierozní opatření.

5 Eroze půdy

Podle Janečka (2002) je slovo „eroze“ 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. Eroze je proces reliéfotvorný starší než pohoří tvořená sedimentárními horninami.

5.1 Vodní eroze

Vodní eroze je vyvolávána kinetickou energií dešťových kapek dopadajících na půdní povrch a mechanickou silou povrchově stékající vody. Zdrojem bývají dešťové srážky nebo tající sníh. Dále způsobuje erozi chemická činnost vody, evorze nebo abraze.

5.2 Formy povrchové vodní eroze

Povrchová vodní eroze, tedy eroze vzniklá narušováním půdy dešťovými kapkami a jejím odtokem po povrchu, jak uvádí Holý (1994), se podle účinků vody dělí na plošnou, výmolnou a proudovou.

5.2.1 Plošná vodní eroze

Charakteristické znaky plošné vodní eroze jsou rozrušování a smyv půdního materiálu rovnoměrně na celé ploše území. Vyskytuje se i při méně intenzivních deštích.

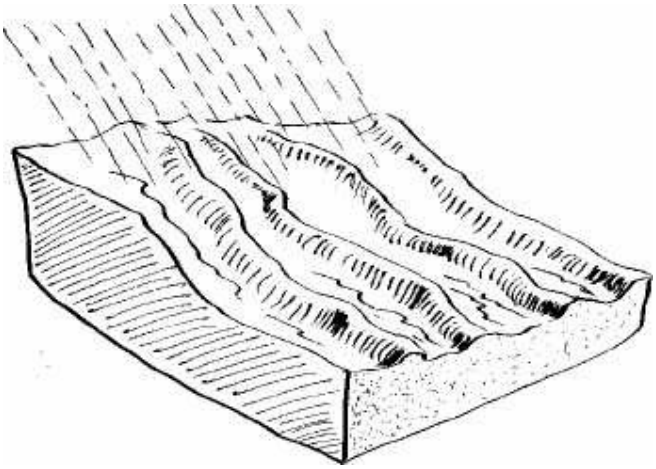
První fází podle Holého (1994) je eroze selektivní. U ní dochází k odnosu jemných půdních částic a na ně vázaných chemických látek. Mění se půdní textura a obsah živin v půdě. Půdy napadené selektivní erozí se stávají hrubozrnnější a málo výživné, půdy, na kterých probíhala sedimentace jemných částic, jsou jemnozrnnější s vysokým obsahem živin. Selektivní eroze bývá pozvolná, těžko pozorovatelná a bez viditelných stop. Poznat ji můžeme podle akumulovaného materiálu v dolních částech svahu po přívalových deštích nebo zanesených příkopů a komunikací.

Obr. 8: Schéma plošné eroze (zdroj - Sustainable Agriculture Extension Manual)

Při větší kinetické energii povrchově stékající vody a nepříznivém utváření půdního profilu (střídání málo odolných a odolných vrstev), jak je uvedeno v Holý (1994), 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 celé orniční vrstvy.

5.2.2 Výmolná vodní eroze

Postupným soustřeďováním povrchově stékající vody vzniká výmolná vodní eroze, která vyrývá v půdním povrchu postupně se prohlubující mělké zářezy.

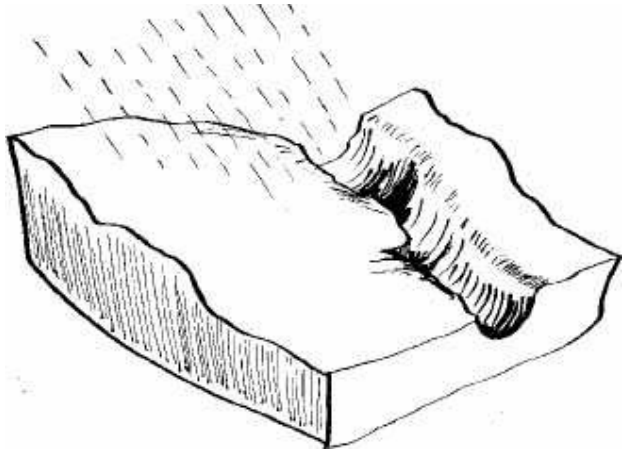


Obr. 9: Schéma výmolné eroze (zdroj - Sustainable Agriculture Extension Manual)

Jak uvádí Holý (1994) je prvním stádiem 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. Vzhledem k tomu, že postihují obvykle velkou část povrchu svahu, se označuje tato eroze jako nejvyšší stupeň plošné eroze.

Obr. 10: Rýhy na poli u Smržic po přívalovém dešti 26.5.2008

Z rýžek a brázd vznikají pokračujícím soustřeďováním povrchově stékající vody hlubší rýhy, které se směrem po svahu postupně spojují a prohlubují; jsou výsledkem rýhové eroze, která přechází ve vyšší stupeň – erozi výmolovou a ta v nebezpečnou, území devastující erozi stržovou.



Obr. 11: Schéma stržové eroze (zdroj - Sustainable Agriculture Extension Manual)

5.2.3 Proudová vodní eroze

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

5.3 Mechanizmus erozních procesů

Erozní procesy vznikají interaktivním působením přírodních a antropogenních činitelů, které je vyvolávají a ovlivňují. Nejvýznačnějšími faktory jsou dle Holého (1978) klimatický a hydrologický, morfologický, geologický a půdní, vegetační, hospodářsko-technický a sociálně ekonomický.

5.3.1 Klimatický a hydrologický faktor

Klimatické a hydrologické faktory, jak uvádí Holý (1978) jsou charakterizovány zeměpisnou polohou, nadmořskou výškou, teplotou ovzduší, srážkami, výparem, vlhkostí vzduchu, směrem a silou větrů a povrchovým odtokem. Pro účely protierozní ochrany je nutno vyšetřovat zejména výskyt, rozdělení a intenzitu srážek a utváření a průběh povrchového odtoku.

Rozdílný účinek na povrch mají srážky kapalné a srážky pevné. Kapalné srážky mají vliv na erozi především ve formě přívalových dešťů. Pevné srážky – sněhové ovlivňují povrch při jarním táním. Vlivem těchto faktorů dochází ke vzniku povrchového odtoku.

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 (Holý, 1994).

K povrchovému odtoku na svahu dochází podle Holého (1994) v okamžiku, v němž intenzita deště překročí vsakovací schopnost půdy, která je závislá na mnoha činitelích, z nichž nejvýznamnější jsou činitelé klimatičtí, fyzicko-geografičtí (z nichž 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 úměrně s jejím poklesem, až do fáze, kdy nabude rovněž konstantní hodnoty.

Povrchový odtok probíhá plošně nebo soustředěně. Jak uvádí Holý (1994), za plošný odtok pokládáme odtok probíhající po povrchu území v souvislé vrstvě o přibližně stejné hloubce v jednotlivých příčných profilech svahu nebo ve formě rozptýlených stružek v nezřetelných odtokových drahách. Odtok po povrchu půdy bývá narušován různými překážkami (většími kameny, chomáči trávy, křovisky apod.), což způsobuje porušení souvislé vrstvy vody. Při zjišťování charakteristik povrchu odtoku se obvykle toto narušení nebere v úvahu.

Dle Zachara (1970) působí srážková voda erozně nejen při povrchovém odtoku, ale i při jejím podpovrchovém odtoku, způsobujícím vnitropůdní erozi. To je mechanické vyplavování jemných, různě dispergovaných frakcí půdy gravitační vodou mezi agregáty, přispívající ke skeletizaci půdy. Zvláštní formou podzemní eroze je tunelová eroze (sufoze), spočívající ve vymílání podpovrchových chodeb vodou nad nepropustným podložím. Konečným stadiem tunelové eroze jsou erozní rýhy, vzniklé probořením stropů.

5.3.2 Morfologický faktor

Jak zmiňuje Holý (1994) je vodní eroze podmíněna povrchovým odtokem po skloněném území. Se zvětšováním sklonu a délky svahu, za předpokladu trvání deště, nabývá stékající voda vyšší rychlost a tangenciální napětí, a tím i větší destrukční účinek na půdní povrch a schopnost transportovat uvolněné půdní částice. Intenzita erozních procesů se obvykle snižuje se zmenšováním sklonu, dojde k poklesu rychlosti a tangenciálního napětí do té míry, že nastane usazování půdních částic transportovaných po povrchu území. Z průběhu erozních procesů vyplývá, že vodní erozí jsou nejvíce postiženy oblasti s členitým reliéfem, který napomáhá soustřeďování povrchově stékající vody a rychlejšímu odtoku.

Sklon území

Teoretický rozbor vlivu sklonu území na vodní erozi a četná pozorování a měření prokázala, že sklon je jedním z rozhodujících erozních činitelů (Holý, 1994). Jeho vliv na vznik a průběh erozních procesů může být ostatními činiteli, např. půdními vlastnostmi, vegetačním krytem půdy aj., zeslaben, nikdy však plně potlačen.

Prokázaný rozhodující vliv sklonu svahu na vznik a průběh erozních procesů vedl podle Holého (1994) k určení tzv. kritického sklonu svahu, jímž se obvykle rozumí sklon, při němž dochází k nebezpečnému rozrušování půdního povrchu. Stupeň rozrušení autor blíže neurčuje. Pro podmínky ČR lze

předpokládat, že k nebezpečnému rozrušování půdního povrchu dochází v tom místě svahu, kde se mění plošný povrchový odtok na odtok soustředěný a v němž přechází plošná vodní eroze v erozi výmolnou. Pro podmínky bývalé ČSSR uvádí Holý (1978) s odvoláním na Cablíka a Jůvu (1963), že vodní eroze není na zemědělských půdách nebezpečná do sklonu 2°, stává se patrnou při sklonu 4° a zřetelně výraznou na půdách o sklonu větším než 8°.

Délka svahů

Pokud je sklon konstantní, jak zmiňuje Holý (1978), a ostatní podmínky jsou nezměněné, dochází při dešti trvajícím déle než doba, za niž dospěje vodní částice od rozvodí k úpatí svahu, ke zvětšování množství povrchově stékající vody i její rychlosti a tangenciálního napětí, což vede i k růstu intenzity erozního procesu.

5.3.3 Geologický 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 (Holý, 1978).

Přímý vliv geologického podkladu se podle Holého (1978) projevuje zejména v místech, v nichž snadno větrající podložní hornina vystupuje těsně k povrchu území a je obnažena různými formami výmolné vodní eroze nebo větrnou erozí. Potom obvykle dochází k rychlému rozrušování této horniny a ke vzniku rýh, výmolů a strží, jež se postupně rozšiřují a prohlubují.

Nepřímý vliv geologického podkladu, jak zmiňuje Holý (1978), se projevuje ve vlastnostech půdotvorného substrátu, který podmiňuje význačné vlastnosti půd, zejména strukturu a obsah minerálních a chemických látek, jež spolu s organickými substancemi usměrňují půdotvorné procesy. Vzniklé půdy se vyznačují různou odolností vůči působení povrchově tekoucí vody a větru.

Půdní poměry

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

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

Půdní struktura, je dle Holého (1978) 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 a větru než půdy, u nichž není struktura vyvinuta v dostatečné míře.

Při zkoumání vlivu půdní textury na erozní procesy se prokázalo, jak uvádí Holý (1978), že k erozi jsou nejméně náchylné písčité půdy, jež se vyznačují, ve srovnání s ostatními druhy půd, velkou propustností; při malé soudržnosti vzdoruje převažující podíl těžších půdních částic nejdéle kinetické energii vody i kinetické energii větru. Na druhé místo lze řadit 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, jež se vyznačují střední propustností a značnou nesoudržností, způsobenou velkým podílem prachových částic. Nejméně příznivé vlastnosti mají nehumózní spraše a sprašové hlíny s nedostatkem tmelících koloidních částic.

5.3.4 Vegetační faktor

Působení vegetace na průběh a intenzitu erozních procesů se projevuje podle Holého (1978) ochranou půdního povrchu před přímým dopadem dešťových kapek a před působením větru, podporou vsaku srážkové vody do půdy, zpomalením povrchového odtoku a zlepšením fyzikálních, chemických a biologických vlastností půdy. Významné je zpevnění půdy kořenovým systémem vegetace. Dle pozorování a měření byly sestaveny jednotlivé kultury podle protierozní účinnosti do pořadí: les, travní porost, obiloviny a okopaniny.

5.3.5 Hospodářsko-technický faktor

Hospodářsko-technické poměry záleží, jak zmiňuje Holý (1978), na způsobu užívání a obhospodařování půdy, na volbě a polohovém rozmístění kultur, na jejich zařazení do vhodného osevního postupu a na provedení různých technických zásahů; jsou důležitým činitelem, který může v kladném i záporném smyslu ovlivnit intenzitu erozních procesů.

6 Důsledky erozních procesů

Degradace půdy vlivem eroze, spolu s účinkem dalších nepříznivých faktorů, má podle Holého (1994) za následek snížení produkční schopnosti půd. Ačkoliv je to problém starý jako zemědělství samo, jeho rozsah a vliv na život lidstva a globální prostředí je nyní větší než kdykoliv předtím. Mezi největší a nejvážnější problémy patří degradace půdy, ohrožující produkční schopnosti ekosystému.

6.1 Ztráta půdy

Ztráta půdy při erozních procesech postihuje, jak uvádí Holý (1994), nejvíce zemědělství. Uvolňování a odnos půdních částic se často děje ve velkém měřítku. Mnohdy se při intenzivních srážkách smyje mělká půdní vrstva a obnaží se půdní podklad (viz. Obr. 12), což má při dlouhodobém procesu tvorby nové půdy pro zemědělskou i lesní výrobu velmi nepříznivé důsledky. Pokles úrodnosti půdy ztrátou půdních částic záleží na druhu půdy a hloubce půdního profilu.

Při erozních procesech s nižší intenzitou dochází dle Holého (1994) ke ztrátě jemných půdních částic. Tím se mění půdní textura i struktura a snižuje se vodní kapacita půdy. Při procesech vodní eroze s vyšší 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.

Obr. 12: Obnažený půdní podklad v severní (nalevo) a jižní části povodí.

6.2 Transport a sedimentace půdních částic

Půdní částice, jak je uvedeno na www.sweb.cz/eroze/index.htm, uvolněné povrchově stékající vodou jsou ukládány po poklesu jejího tangenciálního napětí a rychlosti na úpatí svahů (viz. obr. 13). V případě, že má krajina prvky s vysokou drsností, brzdící odtok, zachycující splaveniny a podporující infiltraci (meze, remízky, lesy, průlehy, travní pásy, mokřady apod.), je množství částic, které dosáhnou vodoteče malé. Naopak v případě homogenních, nevhodně obdělávaných pozemků a nepřiměřeně velkých pozemků při absenci přirozených překážek je zachycení půdy v povodí velmi nízké a téměř veškerý uvolněný a nesený materiál se dostává do hydrografické sítě, v níž tvoří převážnou část splavenin. Splaveniny zanášejí přirozené i umělé vodní toky (plavební, odvodňovací, závlahové a jiné kanály), vodní nádrže a stavby na tocích. Zmenšují potřebnou kapacitu toků a kanálů (viz. obr. 13).

Obr. 13: Zanesený silniční příkop na úpatí svahu u Smržic, hloubka příkopu je až 50 cm

6.3 Transport chemických látek

Spolu s jemnými půdními částicemi jsou do toku přinášeny erozními procesy i toxické látky, aplikované při ochraně rostlin nebo hnojení (zejména pesticidy), které ohrožují využití vodních zdrojů.

7 Protierozní ochrana

Ekonomická aktivita společnosti se stále rozvíjí a pokud chceme účelně a hospodárně využívat přírodní zdroje, potřebujeme protierozní ochranu. Jejím úkolem je podle Holého (1994) chránit dva nejcennější z těchto zdrojů – půdu a vodu – a zabránit nepříznivým důsledkům, jež by mohlo mít jejich poškození pro různá odvětví hospodářství.

Holý (1994) uvádí nutnost sladit soubor protierozních opatření s požadavky zemědělské výroby, vodního hospodářství, dopravy, průmyslu a dalších odvětví hospodářství, aby se dosáhlo optimálního efektu i nezbytné ochrany půdního fondu a vodních zdrojů.

Návrh protierozních opatření vychází podle Holého (1994) z ovlivnění dvou rozhodujících erozních činitelů – sklonu a délky svahu. Zeslabení jejich nepříznivého vlivu na vznik a průběh erozních procesů spočívá v omezení tangenciálního napětí a rychlosti povrchově stékající vody na hodnotu, při níž nedochází k intenzivnímu rozrušování půdního povrchu. Nejúčinnějším opatřením je zmenšení sklonu svahu terasováním.

Tato úprava svahových pozemků je však poměrně nákladná a lze ji uplatnit většinou jen na hodnotných půdách pro cenné kultury, a proto se ochrana zaměřuje na snížení nepříznivé délky. Rozhodující je tzv. přípustná (kritická) délka svahu (Holý, 1994), kterou lze definovat jako vzdálenost, na níž dochází na nepřerušeném svahu k přeměně povrchového plošného odtoku na soustředěný a na níž se plošná eroze mění ve výmolnou. Intenzita eroze na svahu nepřesahující kritickou délku se nepokládá pro zemědělskou výrobu za nebezpečnou.

7.1 Protierozní opatření organizační

Mezi organizační opatření patří delimitace kultur, ochranné zatravňování, ochranné zalesňování, protierozní rozmísťování plodin a velikost a tvar území.

7.1.1 Delimitace kultur

Delimitace kultur znamená jejich umístění v rámci půdního fondu z hlediska terénních, půdních a klimatických podmínek se zřetelem k jeho účelnému využití pro zemědělskou a lesní výrobu.

Polohové umístění kultur má podle Holého (1994) velký vliv na vznik a průběh povrchového odtoku a na protierozní odolnost půdy. Kultury poskytují rozličné podmínky pro vsakování srážkové vody do půdy, a tím pro průběh povrchového odtoku, zpevňují půdu svými podzemními orgány, obohacují ji o organické zbytky, čímž zlepšují její fyzikální, chemické i biologické vlastnosti, zastiňují půdu a zabraňují neužitečnému výparu, působí na proudění větru v přízemní vrstvě apod. V území ohroženém erozí musí být proto polohové umístění kultur podřízeno především požadavkům protierozní ochrany.

7.1.2 Protierozní rozmísťování plodin

Doporučenými protierozními opatřeními jsou osevní postupy a pásové střídání kultur.

Osevní postupy

Osevní postup, jak uvádí Holý (1994), znamená rozmístění zemědělských kultur do honů tak, aby se pravidelně za určitý počet let vystřídali. Obiloviny, okopaniny, pícniny a technické plodiny se střídají v rotaci tak, aby se zachovala úrodnost půdy a zajistily se vysoké výnosy se zřetelem na předplodinu. V tabulce 2 je uvedeno porovnání smyvu pod jednotlivými kulturami podle Holého (1994) s odvoláním na Suse (1949).

Tabulka 2: Porovnání smyvu půdy v různých porostech podle Holého (1994)

Plodina	Poměrný smyv (%)
pícní směsky	0
jetel	1
ozimé obiloviny	50
jarní obiloviny a kulturní úhory	100
okopaniny	200

Pásové střídání plodin

Pásové střídáni plodin využívá ochranného účinku vegetace před erozí a jejího příznivého vlivu na vsak vody do půdy. Spočívá ve střídání pásů s plodinami nedostatečně chránícími půdu před erozí – chráněných pásů (okopaniny, obiloviny) s ochrannými pásy (travními porosty), chránícími plodinový pás ležící níže (viz. obr. 14).

Obr. 14: Pásové střídání plodin na ostrově Prince Edwarda

Plodinové pásy, jak zmiňuje Holý (1994), jež mají zabránit vodní erozi, se musí střídat tak, aby srážková voda stékající z pásu s plodinami s nedostatečnou protierozní odolností byla zachycena na ochranném pásu a vsákla do půdy. Nesmějí sousedit dva pásy okopanin nebo jiných kultur s malou protierozní odolností nebo se stejnou dobou sklizně.

Šířka chráněných pásů nemá překročit kritickou délku svahu. Ochranný pás musí být tak široký, aby se na něm zachytila a do půdy vsákla veškerá voda přitékající z pásu položeného výše i srážková voda spadlá na ochranný pás.

Pásy se zakládají vrstevnicově. Pravidelný tvar terénu umožňuje dle Holého (1994) konstantní šířku pásů, a tím ekonomické použití mechanizačních prostředků, nepravidelný terén vede k proměnné šířce pásů, a to podle změn sklonu.

7.2 Agrotechnická a vegetační protierozní opatření

Protierozní agrotechnická opatření se používají podle Janečka (2002) ke zlepšení vsakovací schopnosti půdy, zvýšení její protierozní odolnosti a k vytvoření ochrany jejího povrchu především v období výskytu přívalových srážek tj. v našich podmínkách od poloviny května do začátku září, kdy zejména širokořádkové plodiny (kukuřice, brambory, cukrová řepa) svým vzrůstem a zapojením nedostatečně kryjí půdu.

Do skupiny protierozních opatření agrotechnického charakteru Janeček (2002) zahrnuje půdoochranné technologie pěstování plodin, jako je vrstevnicové či konturové obdělávání, výsev do ochranné plodiny nebo strniště, hrázkování a mulčování. Tyto technologie zpravidla vyžadují speciální stroje a použití přípravků na ochranu rostlin. Erozí ohrožená půda by neměla zůstat delší dobu bez dostatečného vegetačního pokryvu.

7.2.1 Vrstevnicové obdělávání

Orbou po vrstevnici nebo s malým odklonem od vrstevnic oboustrannými otočnými pluhy, jak uvádí Janeček (2002), které překlápějí půdu proti svahu, je možné významným způsobem přispět k ochraně půdy před erozí (viz. obr. 15).

Obr. 15: Vrstevnicové obdělávání půdy

7.2.2 Ochranné obdělávání půdy

Ochranným obděláváním půdy je nazýván, systém obdělávání a pěstování plodin, který udržuje nejméně 30 % rostlinných zbytků na povrchu půdy a vede ke snížení vodní nebo větrné eroze, uvedeno v Janeček (2002). Místo orby se půda pouze kypří kypřiči. Na povrchu se tvoří nastýlka (mulč). Ponechání rostlinných zbytků mulče na povrchu půdy při uplatnění bezorebné technologie má své výhody i nevýhody. Výhody spočívají ve zvýšení vlhkosti, zlepšení infiltrace, snížení výparu, omezení vzniku krusty (půdního škraloupu), omezení eroze a snížení počtu pojezdů a úspoře energie.

Nevýhody představuje snížení teploty, zvýšení možnosti zaplavení a potřeby herbicidů, zvýšení množství škůdců a rozšíření chorob rostlin, potřeby výkonnějších traktorů a dražších bezorebných secích strojů, předplodiny a podplodiny odčerpávají živiny a vláhu.

7.3 Protierozní opatření technického charakteru

Technická protierozní opatření, jak je popsáno v Janeček (2002), slouží k vyrovnání terénních příčných nerovností a snížení podélného sklonu velmi svažitých pozemků, k ochraně pozemků před tzv. „cizí vodou“ např. přitékající z lesních porostů na zemědělskou půdu, k neškodnému odvedení povrchových vod z povodí, k retardaci povrchového odtoku a zachycování smyté zeminy, k ochraně intravilánu obcí a komunikací před škodami povrchovým odtokem a smytou zeminou apod. Mezi ochranná technická opatření patří terénní urovnávky, protierozní meze, terasování, hydrografické prvky a hrazení bystřin a strží.

7.3.1 Protierozní meze

Meze slouží jako významné technické protierozní opatření. Protierozní funkci však naplňují pouze meze trasované ve směru vrstevnic a doplněné hydrotechnickými prvky (průlehy, příkopy). Protierozní účinek mezí spočívá podle Janečka (2002) v ovlivnění směru obdělávání pozemků po vrstevnici, v možnosti uplatnění pásového střídání plodin nad a pod mezemi a v mírném snížení sklonu svahu.

7.3.2 Hydrografické prvky

Povrchový odtok vyvolaný přívalovými dešti v malých povodích představuje vážné ohrožení půd, staveb a území různého druhu.

Průlehy

Průlehy, jak uvádí Janeček (2002), se navrhují k zachycování, infiltraci a odvádění krátkodobého povrchového odtoku způsobeného přívalovými dešti či náhlým jarním táním a jsou považovány za jedno z nejúčinnějších protierozních opatření.

Průlehy jsou mělká zpravidla pouze vegetací zpevněné široké příkopy s mírnými sklony svahů (1 : 5 až 1 : 10). Z funkčního hlediska se průlehy navrhují jako:

a) záchytné – slouží zpravidla k ochraně pozemků před „cizí“ vodou;

b) sběrné

   - vsakovací – s nulovým nebo malým podélným sklonem, vhodné pouze pro půdy propustné (viz obr. 16)
   - odváděcí – slouží k odvádění vody z pozemku

c) svodné – zpravidla v podobě zatravněných drah soustředěného povrchového odtoku.

Uvnitř pozemků se navrhují k přerušení povrchového odtoku převážně jako sběrné prvky. Jsou vhodné pro svahy s hlubšími půdami do sklonu nejvýše 8°.

Obr. 16: Vsakovací průleh u Vojnic na Olomoucku

Ostatní hydrografické prvky

Dalšími hydrografickými prvky, které uvádí Janeček (2002), jsou zatravněné údolnice, polní cesty situované tak, aby plnily protierozní funkci, protierozní hrázky budované na úpatí svahů sloužící zpravidla k ochraně komunikací před zaplavením vodou a zanesením splaveninami, ochranné nádrže k akumulaci, retenci, retardaci a infiltraci povrchového odtoku a k zachycení splavenin a protierozní příkopy k zachycování a odvádění povrchové vody a splavenin..

8 Modelování

Určit intenzitu nebo stupeň eroze je podle Votrubce a Vlasáka (2005) velmi důležité proto, aby bylo možné ji mírnit a předcházet škodám způsobovaným erozí. Pro snížení eroze se navrhují a aplikují různá protierozní opatření, která jsou charakteru technického, biotechnického, agrotechnického a organizačního. Aby navržená opatření byla funkční, je nutné předem znát místa, kde se eroze projevuje a určit její množství. Pro určování množství eroze a míst, kde se vyskytuje, se používají různé empirické nebo matematické modely. Mezi nejrozšířenější empirické modely patří univerzální rovnice ztráty půdy (USLE).

8.1 USLE (Universal Soil Loss Equation)

Univerzální rovnice ztráty půdy z pozemku (USLE) vyjadřuje, jak zmiňuje Janeček (2002), nejdokonaleji kvantitativní účinek hlavních faktorů ovlivňujících vodní erozi způsobovanou přívalovými dešti. Univerzální rovnice ztráty půdy se vyvinula do současné formy, jak uvádí www.crwr.utexas.edu/gis/gishydro99/class/niedermeier/term.htm#USLE, díky rozsáhlému výzkumu, který začal a probíhal někdy v 19. a 20. století. Autory rovnice jsou W. H. Wischmeier a D. D. Smith. Model USLE slouží ke stanovení dlouhodobé průměrné ztráty půdy z pozemku vodní erozí.

Účinek jednotlivých členů rovnice na intenzitu erozního procesu podle Holého (1994) byl posouzen autory na jednotkovém pozemku s přesně definovanými parametry; jeho délka byla 22,13 m, sklon 9°, pozemek byl trvalý úhor obdělávaný ve směru sklonu.

Tvar rovnice je:

$$\mathbf{G = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P}$$

Kde: G – průměrná dlouhodobá ztráta půdy ($t \cdot ha^{-1}$ za rok)

R – faktor erozní účinnosti deště – vyjádřený v závislosti na četnosti výskytu, úhrnu, intenzitě a kinetické energii deště

K – faktor erodovatelnosti půdy – vyjádřený v závislosti na textuře a struktuře ornice, obsahu organické hmoty a zrnitosti

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

S – faktor sklonu svahu – vyjadřující vliv sklonu svahu na velikost ztráty půdy erozí

C – faktor ochranného vlivu vegetačního pokryvu – vyjádřený v závislosti na vývoji vegetace a použité agrotechnice

P – faktor účinnosti protierozních opatření

8.1.1 Rozbor erozní účinnosti dešťových srážek (R)

Erozní účinnost (tzv. erozivita) dešťových srážek se projevuje nejvýrazněji na počátku erozního procesu, kdy dešťové kapky dopadají na půdní povrch, na kterém se ještě nestačila vytvořit vrstva povrchově odtékající vody. Z fyzikálního hlediska vykonávají dešťové kapky na půdním povrchu práci, která způsobuje rozbíjení půdních agregátů, uvolňování půdních částic a zhutňování povrchové vrstvy půdy.

Faktor R je dle Votrubce a Vlasáka (2005) odvozen z dlouhodobých pozorování na meteorologických stanicích. Optimální doba sledování je 50 let, připouští se však i kratší doba sledování. Hodnota faktoru závisí na četnosti výskytů, srážkovém úhrnu, intenzitě a kinetické energii přívalové srážky. To je taková srážka, která má úhrn větší než 12,5 mm a intenzitu 24,0 mm / h. Pro území České republiky je možné použít průměrnou hodnotu R = 20.

Podrobnější mapa rozložení faktoru R se zpracovává na podkladě údajů ČHMÚ podobně jako je tomu v sousedních a dalších zemích.

Vzhledem k předpokládaným velikostem území zpracovávaných při pozemkových úpravách, které jsou v řádu jednotek km^2, se neočekává častý případ tvorby gridu pro faktor R, ale bude stačit použít průměrnou nebo aktualizovanou hodnotu pro celý region.

8.1.2 Erodovatelnost půdy (K)

K faktorem je vyjádřena erodovatelnost půdy. Jak uvádí Votrubec a Vlasák (2005) s odvoláním na Wischmeier-Smith (1978) hodnota faktoru K závisí na zrnitostním složení půdy, na obsahu organických částí, na struktuře a propustnosti. Tyto půdní charakteristiky ovlivňují infiltrační schopnost půdy a odolnost půdy proti erozi z dopadajících kapek a proti erozi z povrchového odtoku. Při znalosti všech uvedených vlastností půdy je možné použít. Pro přibližné určení faktoru K je v Janeček (2002) sestavena tabulka hodnot podle bonitovaných půdně ekologických jednotek (BPEJ). V případě zastoupení různých hodnot faktoru K v rámci jednoho erozního profilu se určí jedna průměrná hodnota váženým průměrem.

8.1.3 Rozbor morfologických poměrů (LS)

Velikost sklonu a délky svahu na velikost půdního smyvu vyjádřili, jak uvádí Janeček (2002) s odvoláním na Wischmeier a Smith (1965), topografickým faktorem LS, který představuje poměr ztrát půdy na jednotku plochy svahu ke ztrátě půdy na jednotkovém pozemku o délce 22,13 m se sklonem 4°. Hodnota topografického faktoru LS pro přímé svahy se vypočítá ze vztahu:

$$LS = l_d^{0,5} \quad (0{,}0138 + 0{,}0097s + 0{,}00138\,s^2)$$

kde: l_d – nepřerušená délka svahu (m)

s – sklon svahu (%)

Přírodní svahy jsou zpravidla nepravidelné a proto je určení topografického faktoru LS uvedeným způsobem nepřesné.

Vliv délky a sklonu svahu na erozi je vyjádřen topografickým faktorem LS. Závisí na délce nepřerušeného svahu na pozemku a na sklonu svahu. Délky a sklony pozemků se určují z vrstevnicových map a aktualizují se terénní pochůzkou. V případě proměnlivého sklonu je možné určit výslednou hodnotu sklonu váženým průměrem podle Janeček (2002), nebo použít opravné hodnoty pro svahy konkávní, konvexní a kombinované.

8.1.4 Ochranný vliv vegetace (C)

Faktor C zahrnuje vliv vegetace na půdě. Porosty chrání povrch půdy před dopadajícími kapkami, zpomalují povrchový odtok a zlepšují půdní vlastnosti důležité z hlediska vodní eroze. Je možné říci, že čím hustší a vyšší porost se na pozemku nachází, zejména v období nejčastějšího výskytu přívalu dešťů od dubna do října, tím účinnější je ochrana půdy. Mezi plodiny nejméně chránící patří podle Votrubce a Vlasáka (2005) širokořádkové plodiny jako je kukuřice a okopaniny, v pořadí další je řepka, obilniny jarní a ozimé. Nejvyšší ochranu poskytují pícniny a travní porosty. Celý rok je pro každou plodinu rozdělen do pěti období v závislosti na stavu pozemku a porostu a pro tato období je dána dílčí hodnota faktoru C. Podle agrotechnických termínů v určité lokalitě se z těchto dílčích hodnot určí průměrná hodnota faktoru C pro danou plodinu a podle osevního postupu je možné určit i průměrnou dlouhodobou hodnotu pro období několika let.

8.1.5 Účinnost protierozních opatření (P)

Pokud jsou na pozemku na svahu aplikována některá protierozní opatření, jako je vrstevnicové obdělávání, pásové střídání plodin, hrázkování či terasování, je možné jejich vliv zahrnout do výpočtu. Podle tabulky uvedené v Janeček (2002) se upraví hodnota faktoru P. V obecných případech je P = 1.

9 Použití modelu USLE

Pro tvorbu modelu bylo potřeba vytvořit několik vrstev a získat data. Základní vrstvou byla vrstva DMR, ze které jsem vycházel.

1. Pomocí Map Calculatoru jsem určil Flow Direction.
2. Faktor S jsem získal z DMR příkazem Derive Slope
3. Faktor L jsem vytvořil v MapCalculatoru příkazem `([FD].Flowlength (Nil, True))`
4. Faktor R je pro ČR 20
5. Faktor K = 0,27 dle tabulky 3 jsem vypočítal průměr hodnot v závislosti na procentuálním zastoupení.

Tabulka 3: Faktor K podle hodnot BPEJ

BPEJ (2. a 3. číslo)	Rozloha (%)	Faktor K (Janeček, 2002)	Půdní substrát *
01	24,8	0,29	spraše
08	10,4	0,34	spraše, sprašové pokryvy, svahoviny
10	19,5	0,37	spraše, sprašové hlíny (na slín.)
20	45,3	0,21	slíny, měkké břidlice

* http://tilia.zf.mendelu.cz/~xkucera0/galerie2004_5/bpej1.htm

6. Faktor P = 1, protože nemohou být dodrženy maximální délky a počty pásů podle Janeček (2002) s odvoláním na Wischmeiera a Smithe (1965).
7. Faktor C je následující:

Tabulka 4: Faktor C podle plodin uvedené v Vlasáka a Votrubec (2005)

Plodina	Faktor C
jeteloviny	0,02
obiloviny a řepka	0,30
kukuřice	0,75
holá půda	1,00

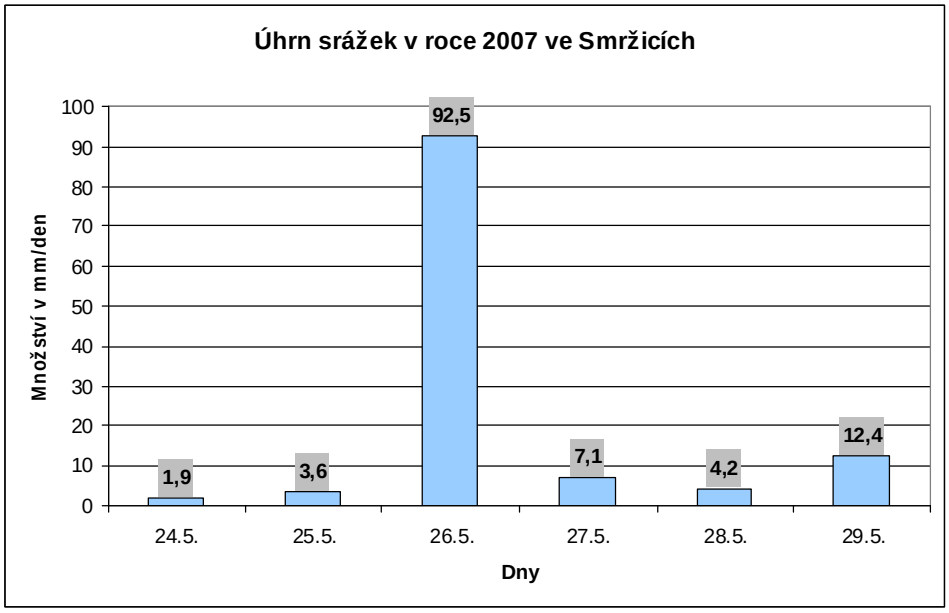
Hodnoty K a C musely být vynásobeny 100, aby byly použitelné pro práci s gridem v ArcView.

Dále jsem provedl výpočet erozních modelů v několika kombinacích. Jak ukazují přílohy 3 až 6, byly vytvořeny modely pro jednotlivé plodiny s a bez hodnot smykového napětí. Na základě těchto výstupů jsem navrhnul protierozní opatření (příloha 7). Vrstva protierozních opatření obsahovala dva důležité atributy – výšku, resp. hloubku a váhy odolnosti vůči erozi. Hodnoty gridu s vertikálními hodnotami jsem přičetl k DMR. Váhy protierozní odolnosti jsem vynásobil s gridem landuse. Vznikly dvě nové vrstvy protierozní ochrany. Ty jsem nahradil ve všech čtyřech mapách eroze za jejich původní hodnoty (DMR a landuse) a vyšly mi nové modely eroze s aplikovanými ochrannými prvky (viz. přílohy 8 a 9).

10 Analýza povodní ve Smržicích v roce 2007

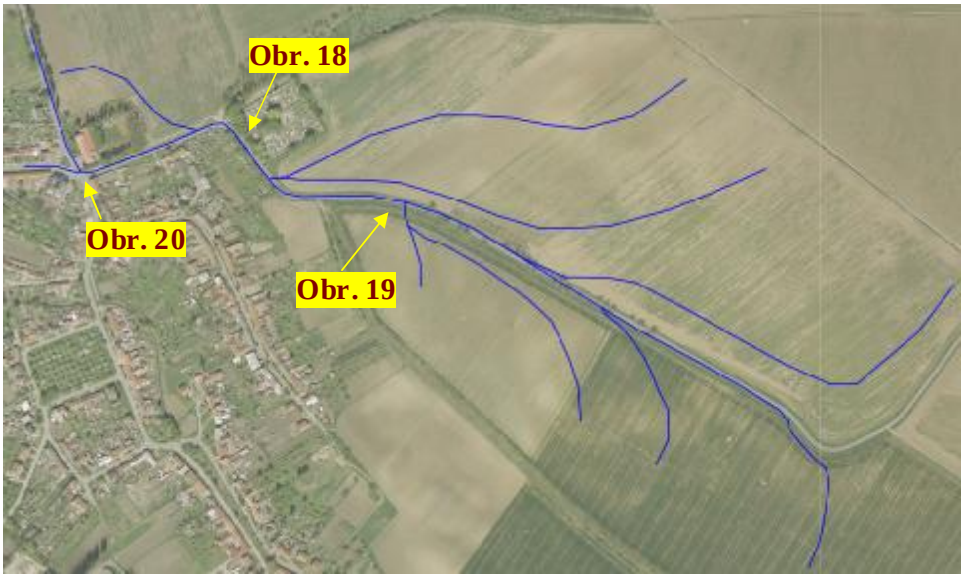
Poslední květnový víkend, 26. v sobotu navečer, začalo ve Smržicích a okolí hustě pršet. Déšť se na nějakou dobu změnil v přívalový a poté pokračoval až do neděle. Dne 26.5. bylo naměřeno 92,5 mm srážek. Další dny již srážky nebyly vysoké, až 29.5. došlo k drobné odchylce a to na 12,4 mm, jinak delší dobu bylo zase sucho.

Graf 1: Srážky v období kdy nastala povodeň (zdroj ZD Smržice)



Na polích byla v tuto dobu nízká vojtěška a hořčice, která navíc nebyla rovnoměrně vyrostlá. Pole napravo od silnice směr Smržice (Šamanovský kopec, v mapě povodí severní část) byl v dolní části, kde se orá po vrstevnici a sklon je téměř nulový, dobře narostlý hrách (pravidelně rozmístěný a bez holin). Na mnohých místech byla půda holá a náchylná k erozi. Počasí v předchozích dnech bylo velmi teplé, podle ZD Smržice průměrně 28 °C, půda byla vysušená. Srážky se pohybovaly v rozmezí 1,9 až 3,6 mm/den.

Pole, ležící po obou stranách cesty, byla deštěm narušena a docházelo k výmolné erozi. Na svazích se vytvořily stružky přecházející v rýhy, ve kterých voda soustředěně odtékala k patě svahu, kde vlivem změny směru orby po spádnici na orbu po vrstevnici a sklonem samotným voda začala téct podél příkopy. Situace (viz obr. 17) byla na každé straně cesty odlišná, vlevo směrem do Smržic je pole v zatáčce nad silnicí a tady došlo k proražení hradby příkopy a část vody se splaveným materiálem stékala zde ještě příkopou dolů a od střední části komunikace po silnici, ostatní voda ze spodních částí svahu tekla dále podél příkopy v místech, kde je pole na stejné výškové úrovni jako silnice.



Obr. 17: Průběh hlavních povrchových odtoků při přívalovém dešti analyzovaný z následků (erozních rýh, sedimentů)

Na Šamanově, je situace opačná. V horní části komunikace je pole pod úrovní silnice a ve střední se opět vyrovnává se silnicí. Tudíž voda se zde nahromadila ve větším množství a stékala až do místa vyrovnání (střední část komunikace) podél míst osetých hrachem a erodovala povrch. Dolní část cesty,

u hřbitova, se zahlubuje pod úroveň polí a je oboustranně ohraničená asi metrovým valem (viz. obr. 18).

Ten byl na obou stranách provalen taktéž vodou a oba proudy se spojily. V nejužším místě (asi 7 metrů – silnice a malé příkopy) voda dosahovala hloubky půl metru. Po vstupu do obce byly během několika minut ucpány odvodňovací roury kanálů (hlavně větvemi a odpadky z příkopů) a voda tedy pokračovala po silnici.

Obr. 18: Zúžené místo před vjezdem do obce, kde se spojily všechny proudy

Obr. 19: Sesuv stěny příkopu na levé straně silnice do Smržic

Vrstva sedimentů v obci se pohybovala mezi 10 až 30 cm. Proud tekl směrem po silnici na křižovatku (Prostějov – Čelechovice na Hané; Dubany – Kostelec na Hané) a tam se rozdělil na dva. Jeden pokračoval dál do obce po silnici směr Kostelec (nakonec se vlil do Českého potoka), druhý do polí a zahrad směr Čelechovice.

Hloubka erozních rýh na poli byla místy až 20 cm. Příkopy byly zaplněné splaveným materiálem (viz. obr. 13). Během podzimu roku 2007 byly oba příkopy v určitých částech prohloubeny na cca půl metru.

Obr. 20: Sedimenty z polí v obci po přívalovém dešti. Na obrázku je zmiňovaná křižovatka, kde se proudy rozdělily.

11 Výstupy

První část výstupů je analýza erozních procesů v povodí nad obcí Smržice. Pro analýzu jsem použil model USLE. Eroze byla modelována na základě různých faktorů. Hlavním faktorem byl vegetační kryt. V úvahu byly vzaty, podle způsobu obdělávání půdy v problematické oblasti, 4 možnosti. Vegetační kryt tvořený jetelovinami, obilovinami nebo řepkou, kukuřicí a poslední možností je holá půda, připravená na osetí, nebo s plodinami před dosažením dostatečné hustoty a výšky. Míra eroze je přímo úměrná uvedenému pořadí faktorů vegetačního krytu (C). Tyto možnosti faktoru C jsou brány v úvahu v časovém období od jara (tání sněhu) do konce září, kdy se již nevyskytují přívalové deště. Kromě vegetačního krytu mělo vliv na erozi také smykové napětí. Jeho hodnoty významně ovlivnily místa s výskytem kritické eroze. Z výstupů je patrné, že k největší erozi docházelo na svazích se sklonem od 8 - 10°, střední eroze se vyskytovala převážně v rozmezí 4 - 8° a do 4° byla eroze minimální (mapa sklonů viz. příloha 1). Tyto hodnoty odpovídají hodnotám uvedeným v kapitole 5.3.2, které uvádí Holý (1978). Tento fakt však nemusí nastat vždy, pokud je délka svahu malá, tak nedochází k tak silné erozi. Vlivem orby po spádnici na téměř celém území, se povrchový odtok bez překážek zvětšuje. Proud vody je pak tak silný, že s sebou odnáší velké množství jemného materiálu společně s veškerými rostlinnými zbytky na povrchu půdy. Dochází k ucpání příkopů a splaveniny tak odtékají po silnici do obce.

Navržená protierozní opatření vycházela z požadavků omezení eroze na půdách v povodí. Kromě snížení míry eroze bylo nutné brát ohled na možnost zemědělského využívání pozemků a na majitele, kterých je mnoho. Z finančního hlediska musely být erozní opatření přijatelné pro obec a zemědělské družstvo. Proto jsem došel k závěru, že návrh je třeba zkonstruovat tak, aby bylo užito každé úpravy pro jiné účely. Navrhl jsem, po prostudování odborné literatury a projednáním se starostkou a ředitelem ZD Smržice

následující řešení. Na svazích vytvořit celkem tři mělké zatravněné vsakovací průlehy, které by kopírovali směr vrstevnic. Průlehy jsem rozdělil na malý (nejjižnější), střední a velký (severní). Jejich šířka by byla pro malý 4 m, střední 6 m a velký 10 m, hloubka by neměla přesáhnout 25 cm, aby nedošlo k odstranění veškeré ornice. Tvar průlehů by byl lichoběžník. Průlehy by sloužily také jako místo pro vytáčení zemědělské techniky, jelikož by nedošlo ke snížení sklonu na celém území. Možnost orby po vrstevnici tudíž stále nepřichází v úvahu, realizace by obnášela celkové přerovnání povrchu. Vybagrovaná ornice by byla následně použita ke tvorbě protierozních mezí, navazujících přímo za průlehy, při pohledu ze svahu. Výška mezí by měla být 50 cm a šířka, v závislosti na šířce průlehu, 1, 3 a 6 metrů. Meze by byly osety trávou a drobnými křovinami nebo stromky. Tyto dvě opatření by měla zkrátit délku svahu a tím zabránit zvětšování povrchového odtoku. Průlehy by měly také infiltrovat srážkovou a odtokovou vodu.

Dalším nutným opatřením, by bylo vytvoření ovocného sadu v oblasti největšího sklonu. Pod stromy by byla oblast zatravněna, půda by se tak zpevnila a mohla dobře vsakovat vodu. U hřbitova, kde došlo k proražení příkopní hrady povrchovým odtokem, by se vytvořila zatravněná plocha, která by zbylou vodu, kterou nezastaví ostatní protierozní opatření zastavila, nebo zmírnila její sílu a rychlost. Tím by se do obce již nemělo dostat tolik splavenin., jelikož voda se bude lépe infiltrovat, příkopy nebudou tolik zanášeny a kanály které slouží v obci pro odvod vody by měli kapacitně zvládnout lépe přítok vody z kopce.

Řešení je k majitelům šetrné, jelikož nemění výšku odváděné daně z pozemku. V případě změny orné půdy na pastvinu, bude daň dokonce snížená. Pro zemědělce by vytvoření protierozních opatření znamenalo snížení plochy orné půdy z původních 38,9 ha na 35,9 ha. Ze zbylých 3 ha by ještě jako ovocný sad sloužilo 0,5 ha. Finančně by tvorba řešení neměla příliš zatížit obec.

Aplikace protierozních opatření tvoří poslední výstupy. Antierozní opatření jsou zaneseny do DMR a landuse s hodnotami erozní náchylnosti. Díky nim je možné při porovnání výstupů dosáhnout snížení eroze.

12 Diskuze

Práce byla celá založena na podrobnosti DMR. Od jeho kvality se odvíjely veškeré výsledky. Pro takto malé území by bylo vhodnější, kdyby bylo celé povodí do detailu zmapováno pomocí totální stanice a GPS. Podrobné DMR, které by z tak rozsáhlého a časově náročného měření vzniklo, by s pomocí GIS nástrojů vytvořilo reálnější simulaci erozních procesů.

Erozní modely vs. realita, jak moc velký je mezi nimi rozdíl? Počítačový model eroze se ve většině případů docela liší od reálného průběhu erozních procesů v přírodě. Modely nejsou natolik dokonalé, aby vytvořily věrohodnou kopii reality, ale i tak můžeme předpokládat, že průběh eroze bude z velké části podobný a navrhnutá protierozní opatření budou plnit svoji funkci.

Jaký vybrat erozní model, aby byl nejvhodnější pro malé povodí? Nejvhodnějšími by mohly být LISEM, USPED, USLE. Bohužel výsledky a zpracování dat se pro jiné modely na tak malém povodí potýkají s mnoha problémy. Klasický výpočet směru odtoku - SFD, na kterém jsou postaveny některé modely, není vhodný. Výsledek je nečitelný. Vhodnější by bylo užití Multiple FD, které ovšem bylo problematické vytvořit pomocí ArcView 3.3. Extenze SHALSTAB, která vytváří specifické FD, nedokázala také vytvořit vhodné základy pro jiné modely. Další kandidát, model LISEM, nepoužívá běžně dostupné formáty, má vlastní datový formát *.map, který obsahuje mnoho komplikací, v případě převádění ASCII rasteru do formátu LISEMu, což se stalo nevyřešitelným problém i s pomocí manuálu a nápovědy k programu, kde se LISEM vytváří.

Jiné možné alternativy, které by zabránili i lépe erozi a hlavně povrchovému odtoku, by se potýkaly s mnoha překážkami. První z nich by byl nesouhlas majitelů pozemků. Ti, jelikož pronajímají půdu zemědělskému družstvu, by v případě vytvoření masivních protierozních opatření, které mění druh a daň z pozemku (např. poldry, ochranné nádrže, protierozní hrázky aj.), dostávali za pronájem méně peněz, protože by byla odváděna vyšší daň.

Druhým problém by se stalo zmenšení využitelné plochy pro sadbu (zatravněním velkých ploch, zalesněním oblasti rozvodí apod.).

Nyní blíže popíšu vzhled a funkci některých alternativních řešení, které jsem v kapitole 7 nezmínil, kvůli jejich nevhodnosti.

Ochranné obdělávání půdy, by při obdělávání po spádnici mohlo mít své nevýhody. Při přívalových deštích, by zbytky materiálu byly odnášeny dolů po svahu do silničních příkopů a snižovaly by jejich kapacitu. Pokud by se dostali až do obce, mohly by ucpat kanalizaci.

Cena odstranění nerovností v terénu přesunem zeminy vedoucí ke snížení příčného sklonu částí pozemku by byla vysoká, a její realizace náročná. Půda v povodí je střední až středně hluboká. Realizovat by se toto opatření dalo. ZD však tuto možnost zamítlo.

Výstavba protierozních hrází na okrajích polí při silničních příkopech by sice ochránily komunikace před zaplavením vodou a zanesením splaveninami, ale v případě, kdy bychom chtěli zabránit navíc i erozi a ne jen zaplavení obce, museli bychom ušetřit na dalších opatřeních. Délka zdi by musela být minimálně 1 km, pokud by měla zabránit odtoku na nejvíce náchylných místech.

Pokud by jsme neřešili přímo erozi, ale její následky. Pro ochranu obce by bylo vhodné postavit ochranné nádrže sloužící, jak uvádí Janeček (2002), pro akumulaci, retenci, retardaci a infiltraci povrchového odtoku. Vhodná místa pro výstavbu v obci jsou. Ovšem opět by se jednalo o zemědělské pozemky v podnájmu.

13 Závěr

Tato práce řeší problematiku eroze a protierozní ochrany na příkladě povodí nad obcí Smržice na Prostějovsku. Cílem bylo vytvoření map potenciálního ohrožení půdy při přívalových deštích a návrh protierozních opatření. Dále je v práci uvedeno, jak eroze vzniká, jaké jsou její následky a způsoby, jak se erozi bránit a způsob modelace pomocí erozního modelu USLE, který je aplikován na povodí.

Celé modelování bylo provedeno v prostředí ArcView 3.3 s využitím extenzí 3D Analyst a Spatial Analyst. Byly vytvořeny mapové výstupy pro různé možnosti vegetačního krytu na obdělávané půdě.

Na závěr jsem provedl porovnání výsledků před a po aplikování protierozních opatření. Míra eroze byla díky nim snížena z kritické a silné na střední až mírnou. Vyvrátil jsem možnosti alternativních řešení protierozní ochrany.

O bakalářské práci byly vytvořeny internetové stránky, které jsou umístěny na serveru Katedry Geoinformatiky.

14 Summary

The bachelor thesis “GIS simulation of erosion influence by rainstorms“ tries to resolve problem with soil erosion in small water basin near Smržice in Prostějov region. The aim is to create potential maps of soil erosion and design the solution with using soil protection from erosion. I describe the creation of erosion process, its influence and ways how to protect surface against the erosion. In thesis is explained using of USLE erosion model and its aplication to the water basin.

The process of modelling was created by ArcView 3.3 with use of 3D Analyst and Spatial Analyst extensions. The map outputs show four possibilities of erosion acording to the vegetation cover.

I compared the results with and without soil protection from erosion of the thesis at the end. The critical and strong measure of erosion was reduced to medium and small. I disprove other possibilities to solve this problem.

The web site was created about the bachelor thesis and it’s located at Department of Geoinformartic server.

15 Použité zdroje

Tištěné zdroje:

1. HOLÝ, Miloš. *Protierozní ochrana*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, n.p., 1978. 288 s.

2. HOLÝ, Miloš. *Eroze a životní prostředí*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1994. 383 s.

3. KVÍTEK, Tomáš. *Ochrana povrchových vod před dusičnany z vodní eroze a hlavní zásady protierozní ochrany v krajině*. Praha : Ústav zemědělských a potravinářských informací, 2003. (Obr. 15)

4. PASÁK, Vlastimil, et al. *Ochrana půdy před erozí*. Praha : Státní zemědělské nakladatelství, 1984. 164 s.

5. VOTRUBEC, Jan, VLASÁK, Josef. Výpočet erozní ohroženosti půdy s využitím gridu. *Acta Montanistica Slovaca*. 2005, roč. 10, č. 2, s. 247-255. Dostupný z WWW: <http://actamont.tuke.sk/pdf/2005/n2/27vlasak.pdf>.

6. VOŽENÍLEK, Vít. *Diplomové práce z geoinformatiky*. Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci, 2002. 61 s.

7. ZACHAR, Dušan. *Erózia Pôdy*. 2. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Slovenskej akádemie vied, 1970. 528 s.

Elektronické zdroje:

1. *Ekologická charakteristika hlavních půdních jednotek (HPJ)* [online]. [2004] [cit. 2008-05-25]. Dostupný z WWW: <http://tilia.zf.mendelu.cz/~xkucera0/galerie2004_5/bpej1.htm>.

2. *freeCSStemplates.org* [online]. [2006] [cit. 2008-05-25]. Dostupný z WWW: <http://www.freecsstemplates.org/>.

3. *GeoINFO - geovědní informace na území ČR* [online]. 2003 [cit. 2008-05-25]. Dostupný z WWW: <http://nts5.cgu.cz/website/GEOinfo/>.

4. *Pozemkový úřad Olomouc : KPÚ Vojnice* [online]. [2004] , duben 2008 [cit. 2008-05-25]. Dostupný z WWW: <http://www.pu-olomouc.org/?page_id=19>. (Obr. 16)

5. *Seznam Encyklopedie* [online]. [2006] , 13.10.2006 [cit. 2008-05-25]. Dostupný z WWW: <http://encyklopedie.seznam.cz/heslo/95483-smykova-pevnost-zeminy>.

6. *Sustainable Agriculture Extension Manual* [online]. [2008] [cit. 2008-05-25]. Dostupný z WWW: <http://www.iirr.org/saem/contents.htm>. (Obr. 3, Obr. 4, Obr. 6)

7. *Vodní eroze* [online]. [2006] , 20.6.2006 [cit. 2008-05-25]. Dostupný z WWW: <http://www.sweb.cz/eroze/po.htm>.

8. *Well managed soil the pride of this PEI producer* [online]. [2004] [cit. 2008-05-25]. Dostupný z WWW: <http://www.ccse-swcc.nb.ca/whatsnew.cfm?ideb=5&title=9&lg=en>. (Obr. 14)

PŘÍLOHY

Seznam volných příloh:

1. Vstupní data pro DMR

   Mapa Sklonů

2. Místa měření smykového napětí

   grid smykového napětí

3. Aplikace modelu USLE – vegetační kryt jeteloviny

   Aplikace modelu USLE s hodnotami smykového napětí – vegetační kryt jeteloviny

4. Aplikace modelu USLE – vegetační kryt obiloviny a řepka

   Aplikace modelu USLE s hodnotami smykového napětí – vegetační kryt obiloviny a řepka

5. Aplikace modelu USLE – vegetační kryt kukuřice

   Aplikace modelu USLE s hodnotami smykového napětí – vegetační kryt kukuřice

6. Aplikace modelu USLE – vegetační kryt žádný

   Aplikace modelu USLE s hodnotami smykového napětí – vegetační kryt žádný

7. DMR s návrhem protierozních opatření

8. Protierozní opatření na upraveném modelu USLE – vegetační kryt jeteloviny

   Protierozní opatření na upraveném modelu USLE – vegetační kryt obiloviny a řepka

9. Protierozní opatření na upraveném modelu USLE – vegetační kryt kukuřice

   Protierozní opatření na upraveném modelu USLE – vegetační kryt žádný

10. CD ROM – elektronická verze bakalářské práce, metadatový formulář, vytvořená vstupní a výstupní data