

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

Studijní program: B4106 Zemědělská specializace

Studijní obor: Pozemkové úpravy a převody nemovitostí

Katedra: Katedra krajinného managementu

Vedoucí katedry: doc. Ing. Pavel Ondr, CSc.

Bakalářská práce

Porovnání nejnovějších metod pro výpočty vodní eroze

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Pavel Ondr, CSc.

Autor bakalářské práce: Kristýna Kovářová

České Budějovice, 2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Kristýna KOVÁŘOVÁ**
Osobní číslo: **Z11031**
Studijní program: **B4106 Zemědělská specializace**
Studijní obor: **Pozemkové úpravy a převody nemovitostí**
Název tématu: **Porovnání nejnovějších metod pro výpočty vodní eroze.**
Zadávající katedra: **Katedra krajinného managementu**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je zpracování podrobné literární rešerše týkající se matematického modelování procesů u vodní eroze. Bude vyhodnocena jejich vhodnost pro možné zpracování výpočetního software. Literární rešerše bude zpracována tak, aby sloužila jako kvalitní podklad pro případné zpracování diplomové práce zabývající se navazující problematikou.

1. Literární rešerše na daná témata:

a/ teoretický rozbor erozních jevů

b/ vodní eroze

c/ posouzení přesnosti výpočtů používaných k vyhodnocení vodní eroze

d/ komplexní pozemkové úpravy a řešení eroze v krajině

2. Aplikace teoretických poznatků v konkrétním projektu KPÚ.

3. Zobecnění získaných výsledků.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **35 stran textu**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

DUMBROVSKÝ, M., MEZERA, J., STŘÍTECKÝ, L.: Metodický návod pro vypracování návrhů pozemkových úprav, Česká komora pro pozemkové úpravy, Praha 2004, 190 stran
SKLENÍČKA, P. Základy krajinného plánování, Naděžda Skleníčková, Praha 2003, ISBN 80-903206-1-9
TOMAN, F. Pozemkové úpravy, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně 1995, ISBN 80-7157-148-8
Časopisy: Pozemkové úpravy, Urbanismus a územní rozvoj, Landscape and urban planning, Land use policy
Holý, M.: Protierozní ochrana. SNTL, Praha, 1978
Janeček, M.: Základy erodologie. ČZU Praha, Praha, 2008
Kokolia, V., Kos, M.: Protierozní osevňovací postupy. UVTIZ Praha, Praha 1989

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Pavel Ondr, CSc.**
Katedra krajinného managementu

Datum zadání bakalářské práce: **4. března 2013**
Termín odevzdání bakalářské práce: **15. dubna 2014**

M. Šoch

prof. Ing. Miloslav Šoch, CSc.
děkan

JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA
studijní oddělení
Studentská 13 ④
370 05 České Budějovice

Pavel Ondr
doc. Ing. Pavel Ondr, CSc.
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 20. března 2013

Prohlášení:

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské, a to v nezkrácené podobě, v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Zemědělskou fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce.

Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích, dne 10.4.2014

.....

Poděkování:

Ráda bych poděkovala panu doc. Ing. Pavlu Ondrovi, CSc. za vedení mé bakalářské práce a také za odborné připomínky, pomoc a cenné rady, které mi byly dány při tvorbě této bakalářské práce.

Abstrakt:

Obsahem této práce je vysvětlení problematiky eroze, převážně objasnění problematiky eroze vodní. V úvodní části práce je vysvětlení vodní eroze, její příčiny a důsledky, a také možná protierozní opatření, kterými lze vodní erozi částečně potlačit nebo alespoň zmírnit její důsledky.

Hlavním cílem této práce je ale porovnání dostupných metod při výpočtu vodní eroze. Jsou zde uvedeny metody výpočtu průměrného ročního odnosu zemin a následně vybrané modely, které slouží pro výpočet okamžitého odnosu zemin. Mezi metody výpočtu průměrného ročního odnosu zemin patří metody USLE a RUSLE. Pro výpočet okamžitého odnosu zemin byly do této práce vybrány pouze nejdostupnější možné modely.

Závěrem práce bylo zhodnocení teoretických poznatků v konkrétním projektu pozemkových úprav. Pro jednotlivé modely okamžitého odnosu zeminy byla posouzena jejich vhodnost k danému povodí. Pro výpočet průměrného ročního odnosu zeminy bylo dosazeno do jednotlivých vzorců metody USLE, která se postupně vyvíjela, a jednotlivé výsledky byly porovnány.

Klíčová slova: vodní eroze, USLE, RUSLE, model, faktor

Abstract:

The substance of this thesis is to explain erosion matters, mainly water erosion matters. The opening part explains the water erosion, its causes and consequences, and also possible antierosion measures, which can partly scumble the water erosion or at least reduce its consequences.

The main goal of this thesis is to compare and contrast available methods of water erosion calculation. What is presented here are the methods of calculation of average annual soil wash-away and consequently the selected models which serve for calculation of immediate soil wash-away. Methods for calculation of average annual soil wash-away include USLE method and RUSLE method. Only the most available possible models of calculation the immediate soil wash-away were selected for the purposes of this thesis.

The closing part of the thesis evaluates teoretical findings in the particular project of land consolidation. Convenience to a given drainage area was considered for individual models of immediate soil wash-away. While calculating the average annual soil wash-away the individual patterns of the USLE method were used. This method developed gradually and individual results were compared.

Key words: water erosion, USLE, RUSLE, model, factor

Obsah

1	Úvod	9
2	Literární přehled	10
2.1	Členění eroze a její druhy	11
2.1.1	Vodní eroze.....	12
2.1.2	Větrná eroze.....	13
2.2	Příčiny eroze	14
2.2.1	Klimatické a hydrologické.....	14
2.2.2	Morfologické	14
2.2.3	Půdní a geologické	15
2.2.4	Vegetační.....	15
2.2.5	Způsob využívání a obhospodařování půdy	16
2.3	Důsledky vodní eroze.....	17
2.3.1	Ztráta půdy.....	17
2.3.2	Odnos půdních částic.....	18
2.3.3	Transport chemických částic	19
2.4	Opatření proti erozi	20
2.4.1	Organizační.....	20
2.4.2	Agrotechnická.....	22
2.4.3	Technická.....	24
3	Cíl práce.....	28
4	Metodika.....	28
4.1	Metody výpočtu průměrného ročního odnosu zeminy.....	28
4.1.1	USLE (univerzální rovnice pro výpočet průměrné dlouhodobé ztráty půdy erozí)	28
4.1.2	RUSLE (Revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy).....	35
4.2	Modely pro výpočet okamžitého odnosu zemin	37
4.2.1	Model CREAMS (Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems).....	38
4.2.2	Model SWRRB (Simulator for Water resources in Rural Basins).....	38
4.2.3	Model EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator)	39
4.2.4	Model ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation).....	39
4.2.5	Model AGNPS (AGricultural NonPoint Source).....	40
4.2.6	Model SHE (Systeme Hydrologique Européen)	40

4.2.7	Model EUROSEM (EUROpean Soil Erosion Model)	40
4.2.8	Model EROSION 2D/3D	41
4.2.9	Model WEPP (Water Erosion Prediction Project)	42
4.2.10	Model SWAT (Soil and Water Assessment Tool)	43
5	Aplikace teoretických poznatků v konkrétním projektu KPÚ.....	43
5.1	Metody výpočtu průměrného ročního odnosu zeminy.....	44
5.2	Posouzení vhodnosti použití vybraných modelů	49
6	Výsledky a diskuse	50
7	Závěr.....	51
8	Seznam použité literatury	52
9	Seznam použitých obrázků.....	54

1 Úvod

Eroze půdy je do značné míry přirozený proces. V přírodních podmínkách probíhá většinou pozvolna bez patrných škodlivých důsledků. Hodnoty přípustné ztráty půdy erozí jsou dány hloubkou půdního profilu. Proto bychom se při hospodaření měli snažit udržovat erozi na právě na těchto hodnotách tak, abychom nepřipustili větší odnos půdy, než kolik jí na daném místě vznikne.

Půda je vyčerpatelný, nenahraditelný zdroj a jen velice pomalu se obnovuje. Je důležitým základem udržitelného zemědělského hospodaření a jako s takovou by se s ní mělo být zacházeno. Zatímco se jeden centimetr půdy může podle místních podmínek tvořit desítky až stovky let, k odnosu stejného či většího množství může následkem eroze dojít během jediného přívalového deště.

Bohužel v intenzivní zemědělské výrobě se eroze podstatně zrychluje. Na území naší republiky je přibližně 31 procent orné půdy ohroženo právě vodní erozí, dalších téměř 9 procent je ohroženo erozí větrnou. Na většině těchto ohrožených ploch není prováděna taková ochrana, která by pomáhala omezit ztrátu půdy, aby byly splněny přípustné hodnoty. Při erozi dochází nejdříve k odnosu nejjemnějších a nejmenších půdních částic. Důsledkem erozních procesů je změna půdní textury a struktury, dále pak snížení vodní kapacity půdy. Z půdy se vytrácí organické složky, dochází ke snížení schopnosti vázat živiny, vyrovnávat pH a celkovému snížení sorpční kapacity. Tyto důsledky zaznamenají zejména zemědělci, neboť pro ně znamenají zhoršení kvality sklizně a snížení výnos. Škody působené erozí půdy na zemědělské produkci se projevují i ve znečištění vodních zdrojů, zejména ve zhoršené kvalitě pitné vody splachem zeminy, hnojiv a pesticidů. O negativních účincích eroze je možné se přesvědčit při jarním tání sněhu či po silných deštích, kdy je půda z pozemků s nedostatečnou protierozní ochranou splachována na veřejné komunikace, případně v intravilánu obce ohrožuje stavby.

2 Literární přehled

Slovo „eroze“ je latinského původu a je odvozeno od slova „erodere“ – rozhlodávat. V nejširším slova smyslu 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 vod, větru, ledu a jiných tzv. erozních činitelů. Výraz eroze půdy se začal běžně používat ve 30. a zejména 40. letech minulého století, i když termín eroze byl znám již dříve.

Bennet (1939) rozlišil erozi normální, neboli geologickou, kterou nazýváme přirozenou a erozi zrychlenou. Úkolem ochranných opatření je snížení lidským působením zrychlené eroze na úroveň normální, geologické eroze. Je známo, že klima má značný vliv na rychlost eroze. Eroze půdy pak nejvíce ochuzuje zemědělské půdy o nejúrodnější část-ornici, zhoršuje fyzikálně-chemické vlastnosti půd, snižuje obsah živin a humusu, zmenšuje mocnost půdního profilu, zvyšuje šterkovitost, poškozují plodiny a kultury, znesnadňuje pohyb strojů po pozemcích a způsobuje ztráty sadby a osiv, hnojiv a přípravků na ochranu rostlin. Transformované půdní částice a na nich vázané látky znečišťují vodní zdroje, snižují průtočnou kapacitu toků, vyvolávají zakalení povrchových vod, zanášejí akumuláční prostory nádrží, zhoršují prostředí pro vodní organismy, zvyšují náklady na úpravu vod a těžbu usazenin. Velké povodňové průtoky poškozují budovy, koryta vodních toků, dále komunikace apod. V případě větrné eroze jde o narušování zejména klíčících rostlin, znečišťování ovzduší, škody navátím ornice apod.

Eroze je charakterizována jako přírodní proces, při kterém působením vody, větru, ledu a případně jiných činitelů dochází k rozrušování povrchu půdy a transportu půdních částic a jejich následném usazování (Janeček a kol., 2008).

Podle Li a kol. (2007) je eroze uznávána jako hlavní příčina degradace půdy v orné půdě. Z historického hlediska se předpokládá, že vodní a větrná eroze jsou hlavní formy eroze půdy. Každý proces eroze půdy má charakteristickou strukturu v krajině a každá z nich do určité míry přispívá k celkové erozi půdy na polích. Například vodní eroze způsobuje především ztrátu půdy na polovině svahu půdy a při zpracovávání půdy způsobuje vodní eroze ztrátu půdy především na vrcholcích kopců. Vzor celkové eroze půdy je složitý vzhledem k propojení vzájemných interakcí mezi erozními procesy. Interakce se vyskytují, když jeden proces eroze mění erodovatelnost krajiny pro další proces eroze, nebo když proces eroze funguje jako mechanismus pro další proces eroze.

2.1 Členění eroze a její druhy

Podle erozních součinitelů je možné erozi třídit na erozi:

- Vodní (akvatickou, či fluviální)
- Větrnou (eolickou)
- Ledovcovou (glaciální)
- Sněhovou (nivální) (Janeček a kol., 2008)

a dále eroze:

- Zemní
- Antropogenní

Všechny druhy eroze se mohou vyskytovat jednotlivě nebo v kombinaci, což poté způsobuje různou intenzitu erozních procesů. Největší škody však celosvětově působí vodní a větrná eroze (Holý, 1978).

Sněhová eroze (Nivální)

Vzniká pohybem sněhu ve formě lavin, často zcela zdevastuje zasažený pás území. Sněhová eroze může být vyvolána, také pomalým pohybem vrstvy sněhu po neumrzlém půdním povrchu při jarním tání (Holý, 1978).

Dynamika sněhových lavin je silně ovlivněna erozí sněhové pokrývky. Erozní procesy ovlivňují pohyb lavin ve dvou směrech. Na jedné straně se vytváří odporující účinek na pohybující se hmotu, z důvodu přenosu hybnosti mezi pohybujícím se sněhem a částí sněhové pokrývky, která má být uvolněna a zrychlí na rychlost laviny. Na druhou stranu zvýšení hmotnosti laviny vede ke snížení síly tření na jednotku hmotnosti a potenciální energii proudění (Barbolini a kol. 2005).

Ledovcová eroze (Glaciální)

Tento druh eroze je způsoben působením ledovce pohybujícím se působením tíže do údolí. Při pohybu je vynakládána ledovcem převážná část energie na erodování skalního podloží, které tím obrušuje a následně vyhlazuje. Dále rýhuje valouny zamrzlými k ledu. Ledovec strhuje a unáší do nižších ploch obrovské množství horninných zvětralin, jež po uložení vytváří morény. Podle způsobu dopravy sutě na povrchu ledovce pak vznikají morény svrchní, po okrajích vznikají morény boční a při dně ledovce morény spodní. Dále

setkají se dva ledovcové proudy, spojí se jejich boční morény v morénu střední. U paty ledovce se vytváří obloukovitá moréna čelní.

Zemní eroze

Jedná se o činnost suťových proudů, jenž je tvořen suťovým materiálem prosyceným vodou. Při svém pohybu do údolí rozrušují suťové proudy půdu i její podklad a vytvářejí hluboké rýhy. Materiál suťových proudů ohrožuje údolní polohy, osady, komunikace, technické stavby atd.

Antropogenní eroze

Člověk má také vliv na vznik a průběh erozních procesů svými zásahy do přírody, je tak výrazným činitelem při vzniku zrychlené eroze. Na erozní procesy působí nepřímo a přímo. Nepřímý vliv se projevuje ničením přirozeného vegetačního krytu půdy a jeho nahrazením vegetací s nízkým ochranným účinkem, zhoršením, chemických, biologických a fyzikálních vlastností půdy, soustředěním povrchového odtoku různými úpravami území, znečištěním půdy odpady a podobně. Přímý vliv se projevuje zejména realizací technických staveb a urbanizací (Holý, 1978).

2.1.1 Vodní eroze

Vodní eroze je podle Holého (1978) a Tomana (1995) vyvolána kinetickou energií dešťových kapek dopadajících na půdní povrch a mechanickou silou povrchově stékající vody. Na tuto skutečnost poukazuje ve své studii i Vrielinf (2006) a dodává, že vodní eroze je řízena klimatickými charakteristikami, topografií, půdními vlastnostmi, vegetací a obhospodařováním půdy. Vyčlenění půdního materiálu je způsobeno dopadajícími dešťovými kapkami a silou odporu tekoucí vody. Oddělené částice jsou transportovány pozemním průtokem a jsou odneseny až do míst, kde se sníží rychlost proudění. Takto mohou vzniknout rozšířené rýhy, ale jejich vznik je obecně složitější a zahrnuje dílčí povrchové toky a postranní procesy. Dále uvádí, že vodní erozi je nejdůležitější celosvětový problém způsobující degradaci půdy. Má silné dopady na životní prostředí a také vysoké ekonomické náklady v důsledku na zemědělskou výrobu, infrastrukturu a kvalitu vody.

Vodní eroze se na povrchu půdy projevuje selekcí půdních částic a vznikem odtokových drah různých rozměrů (rýžek, rýh, výmolů), v místech výrazné koncentrace povrchového

odtoku se mohou vytvářet strže. V depresích a na místech sníženého sklonu dochází zpravidla na níže ležících plochách k ukládání půdních částic. Částice transportované za hranice pozemku se dostávají do hydrografické sítě, kde vytváření splaveniny. Ty sedimentují v nádržích a v úsecích toků se sníženou transportní schopností. Z hlediska splavenin je jejich největším zdrojem smyv orné půdy, je však třeba počítat i s erozí ploch stavenišť, s erozí lesní půdy při mechanizované těžbě dřeva, s břehovou a dnovou erozí v tocích (Janeček a kol., 2007).

2.1.2 Větrná eroze

Větrná eroze spočívá v rozrušování půdní hmoty kinetickou energií větru, v přemístování uvolněných částic a jejich následným ukládání při poklesu energie vzdušného proudu (Holý, 1978). Větrná eroze obnažuje kořínky rostlin, přesekává jemné stonky mladých rostlin větrem unášenými zrnky zeminy (Toman, 1995).

Větrnou erozí jsou ohroženy obvykle oblasti s průměrnými ročními srážkami menšími než 250 až 300 mm, se stálými větry s jedním převládajícím směrem, narážejícími na rovinný nebo mírně zvlněný půdní povrch, a to nekrytý nebo nedostatečně krytý vegetací (Holý, 1978).

Větrná eroze nejen snižuje produktivitu půdy prostřednictvím ztráty půdy a živin, ale také snižuje potenciál půdy vázat uhlík z atmosféry (Tisdall a kol., 2012).

Poznatky o různých druzích eroze ukazují, že větrná eroze není v celosvětovém měřítku tak závažným problémem jako je eroze vodní, přestože se však vyskytují rozsáhlé oblasti, v nichž větrná eroze působí stejně velké nebo i větší škody. Větrná eroze je typickým jevem v aridních a semiaridních zemích, s jejími projevy se však setkáváme i v humidních zemích, zejména v sušších oblastech na půdě s nepříznivými fyzikálními vlastnostmi (Holý, 1978).

2.2 Příčiny eroze

2.2.1 Klimatické a hydrologické

- zeměpisná poloha
- nadmořská výška
- množství, rozdělení a intenzita srážek
- teplota, oslunění, výpar, odtok
- výskyt, směr a síla větru (Janeček a kol., 2008)

Srážky jsou hlavním faktorem při vodní erozi. Důležitý je jejich účinek ve vztahu množství k jeho intenzitě. Eroze nastává, pokud voda nemůže proniknout do půdy a následuje povrchový odtok, který se pohybuje směrem dolů po svahu. Půda ztrácí schopnost absorbovat vodu v okamžiku, kdy intenzita srážek překračuje infiltrační kapacitu půdy, nebo pokud srážky dopadají na nasycený povrch (Bissonnais a kol., 2002).

Ztrátou půdy je nejvíce postihováno 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, což má při dlouhodobém procesu tvorby nové půdy pro zemědělskou i lesní výrobu velmi nepříznivé důsledky (Holý, 1978).

2.2.2 Morfologické

- sklon území
- délka a tvar svahu
- expozice, návětrnost (Janeček a kol., 2008)

Vodní eroze je zapříčiněna 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 destrukčního účinku na půdní povrch. Intenzita erozních procesů se obvykle snižuje se zmenšováním sklonu (Holý, 1978).

Intenzita eroze bývá zvětšována s rostoucí délkou svahu. Ta je definována jako horizontální vzdálenost od vzniku místa povrchového odtoku bodu, kde je sklon snižován natolik, že tím dochází k ukládání erodovaného materiálu (Janeček a kol., 2007).

Na průběh a intenzitu erozních procesů má vliv tvar svahů. Svahy jsou děleny na vypuklé, přímé a kombinované. Takto rozdělené svahy pak zajišťují odlišný průběh erozních procesů, neboť sklon, který je převládajícím erozním součinitelem, dosahuje na jednotlivých

typech svahů maximální hodnoty v různé vzdálenosti od rozvodí a přísluší mu tak různá velikost sběrného území. Maximální účinek erozních procesů se projeví v těch místech svahu, v nichž jsou sklon a vzdálenost od rozvodí v nejnepříznivějším poměru.

Expozice svahu je dána jeho umístěním vzhledem ke světovým stranám. Sluneční expozice na jižních a západních svazích je příčinou rychlejšího tání sněhu při změnách denních a nočních teplot. Důsledkem je větší povrchový odtok ze sněhových vod, vymrzání vegetace a intenzivnější rozrušování půdního substrátu, což zvětšuje intenzitu eroze ve srovnání se svahy zastíněnými, exponovanými k sever a západu (Holý, 1978).

2.2.3 Půdní a geologické

-povaha horninového substrátu

-půdní druh a typ

-textura a struktura půdy, její vlhkost a zvrstvení, obsah humusu (Janeček a kol., 2008)

Pro velikost a časový průběh infiltrace srážkové vody do půdy je rozhodující textura půdy a její zvrstvení a vlhkost, pro odolnost půdy vůči vodní a větrné erozi ještě zejména obsah humusu a nasycenost sorpčního komplexu. Působením geologických poměrů na průběh a vznik eroze se uplatňuje přímo, a to odolností obnaženého geologického podkladu vystaveného styku s tekoucí vodou a ovzduším, nepřímo působením na povrchu půdního substrátu, jehož vlastnosti jsou dány druhem geologického podkladu (Holý, 1978).

2.2.4 Vegetační

-hustota a délka trvání pokryvu (Janeček a kol., 2008)

Vegetace chrání půdu proti vodní erozi a přispívají ke zvýšení infiltrace v půdě. Rostliny ochraňují svými listy a kořeny půdu, snižují energii dopadajících dešťových kapek (Nondedeu a Bédécarrats, 2007).

Holý (1978) dále uvádí, že působení vegetace na průběh a intenzitu erozních procesů se projevuje 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 k zpevnění půdy kořenovým systémem vegetace. V zimním období vegetace způsobuje pravidelně rozložení sněhové pokrývky a podle míry vývoje zmenšuje nebezpečí zamrzání půdy.

Vegetace také působí jako fyzická bariéra, která mění tok sedimentů na povrchu půdy (Nondedeu a Bédécarrats, 2007).

Za vegetaci je považován travní, ale i lesní a keřový porost. Lesní porost s hustým korunovým zápojem, dobrým stavem porostu a neporušenou vrstvou hrabanky vykazuje nejvýraznější vliv na utváření povrchové odtoku, a tím i na intenzitu a průběh eroze. Lesní porost má výrazný vliv na utváření odtoku z povodí, v němž se infiltrací srážkové vody, intercepce a retardací povrchově stékající vody zmenšují maximální odtok, což snižuje intenzitu erozních procesů z povodí v korytech toku. Travní porost s dobře vyvinutým drnem má podobný příznivý vliv na velikost a průběh povrchového odtoku a na ochranu půdního povrchu jako lesní porost. Nízký stupeň protierozní ochrany ale poskytují polní kultury, což je způsobeno poměrně malou listovou plochou připadající na plošnou jednotku půdy, obvykle menším vzrůstem nadzemních částí v převážné části roku a menším rozsahem kořenového systému (Holý, 1978).

2.2.5 Způsob využívání a obhospodařování půdy

-poloha a tvar pozemku

-směr obdělávání

-střídání plodin

Výběr vhodné velikosti pozemku je závislá na více faktorech a v konkrétních případech je kompromisním výsledkem zejména dvou navzájem opačně působících faktorů- a to faktorů přírodních (působících k vytváření menších půdních celků) a ekonomických (naopak upřednostňujících tvorbu pozemku dostatečně velkých). Z výše uvedeného vyplývá, že dodržet vhodnou velikost pozemku je opravdu velmi obtížné, protože v každém konkrétním případě bude výsledkem různé zohlednění možných vlivů místních podmínek (Janeček a kol., 2008, Janeček a kol., 2007).

Tvar a velikost pozemků, jež se volí pro rovinná území, musí být v oblastech ohrožených erozí upraven podle požadavků protierozní ochrany a musí být účelně přizpůsoben reliéfu, který výrazně ovlivňuje vodní i větrný režim území. Šířka pozemků nemá přesáhnout dovolenou mez. V území ohrožením erozí mají být na půdách se klonem větším než 5% pozemky delší stranou ve směru vrstevnic a stejným směrem se mají obdělávat. Nejvhodnějším tvarem pozemku je obdélník nebo rovnoběžník s vnitřními úhly 50 až 60, s delší stranou ve směru obdělávání. Vhodný poměr délek stran je 1:2 až 1:3, nejvýše 1:6. Délka pozemku v území neohroženém erozí je dána ekonomickým využitím mechanizačních prostředků. Nejpriznivější je délka od 500 do 1000 m, šířka honu je

násobkem zásobníkem šířky záběru stroje (Holý, 1978).

Z hlediska protierozní ochrany je žádoucí, aby rozměr pozemku orné půdy ve sklonu nepřevyšoval přípustnou délku stanovenou na základě vypočtené přípustné ztráty půdy erozí. Tato podmínka platí jak pro rozměr pozemku, který je obděláván jako jeden celek, tak pro skupinu pozemků, oddělených pouze hranicemi, které nejsou schopné zachycovat povrchový odtok (Janeček a kol., 2007).

Obhospodařováním půdy se mají připravit vhodné podmínky pro optimální sklizně, zlepšit odolnost půdy vůči působení vody a větru, umožnit však vody do půdy, vytvořit předpoklady k neškodnému odtoku srážkové vody po povrchu území a zabezpečit zásobování vláhou. Erozi nejlépe vzdoruje půda s příznivými fyzikálními, chemickým, chemickými a biologickými vlastnostmi, jež podmiňují vznik drobtovité struktury. Takové půdy se vyznačují soudržností a propustností pro vodu. Účinná je zejména péče o vytvoření sorpčně nasyceného komplexu v půdě, jež podporuje přítomnost organických látek dodávaných hnojením, zejména vápenatými hnojivy, komposty a vhodným složením. Podrobný rozbor péče o půd podávají příslušné odborné publikace (Holý, 1978).

2.3 Důsledky vodní eroze

2.3.1 Ztráta půdy

Nejvíce je ztrátou půdy postihnuto zemědělství (Holý, 1978). Na orné půdě sice nevzniká největší množství půdního smyvu na jednotku plochy, ale v důsledku velké plochy je celkový smyv větší než jakýkoliv jiný zdroj (Janeček a kol., 2008).

Velmi obtížné je určit kvantitativní hodnoty tohoto odnosu, neboť záleží na množství, druhu a formě živin, jež se do půdy dodávají, a na půdních vlastnostech. Úrodnost půdy je snížena odnosem rostlinných živin. Šetření v různých zemích poukazují na fakt, že ztráta živin ze zemědělských půd je značná a že představuje vážný problém v ekonomice zemědělské výroby. Ztráta rostlinných živin znamená vedle snížení výnosu i snížení kvality sklizně. 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 (Holý, 1978).

Zhoršování struktury je menší na půdách, kde jsou agregáty stabilizovány humusem než jílem (Janeček a kol., 2008).

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 (Holý, 1978).

Dalším důsledkem vodní eroze je také degradace půdy. Spolu s účinkem dalších nepříznivých faktorů má za následek produkční schopnosti půd. Mezi nejzávažnější problémy patří degradace půdy ohrožující produkční schopnost ekosystémů. Degradace půdy vede vzhledem ke svému vlivu na životní prostředí a produkční schopnost půd k sociální a politické nestabilitě v řadě zemí světa a ovlivňuje samu existenci lidstva. Nejčastěji je definován jako pokles kvality a produkční schopnosti půd způsobené nesprávným využíváním lidmi. Pojem degradace vypovídá o nepříznivých změnách v koloběhu živin a organické hmoty v půdě, o změnách ve struktuře, textuře, respektive o nepříznivých změnách chemických, fyzikálních a biologických vlastností půdy (Janeček a kol., 2008).

Hluboké rýhy, výmoly a strže vzniklé vodní erozí rozdělují zemědělské pozemky do nepravidelných celků, což zhoršuje možnost ekonomického mechanizovaného obdělávání (Holý, 1978).

Půda je nejcennější přírodní bohatství a proto je nutné ji chránit (Janeček a kol., 2008).

2.3.2 Odnos půdních částic

Půdní částice, uvolňované při povrchovém odtoku, jsou ukládány na úpatí svahů. Transportované částice půdy pak vytváří splaveniny. Tyto splaveniny zanáší přirozené i umělé vodní toky, vodní nádrže a stavby na tocích. Dále zmenšují potřebnou kapacitu toků a kanálů a to následně ovlivňuje zásobování různých odvětví národního hospodářství vodou a mnohdy omezuje funkci kanálů. Zejména nepříznivě je tento problém vidět u zmenšování průtočné kapacity toků. Splaveniny v tocích zvyšují niveletu dna, jež vyvolává nebezpečí nežádoucích inundací a zvýšení hladiny podzemní vody v přilehlém území, a to způsobuje zamokření. Splaveniny ohrožují funkci a životnost staveb na tocích, zejména odběrných zařízení (Holý, 1978).

Při erozi se projevuje selekce velikosti částic, ale obecně je zrnitostní složení smytého materiálů opouštějící pozemek závislé na zrnitostním složení půdy, ze které vzniká. Také při transportu a usazování dochází k podstatné velikostní selekci, ale složení sedimentu především určuje podíl jemného materiálu, jenž je k dispozici pro transport ve formě suspenze (Janeček a kol., 2008).

Velké nebezpečí představují splaveniny pro vodní nádrže, v nichž dochází zanášením ke zmenšování kapacity prostoru a k potížím při provozu. Vzhledem k velkému počtu nádrží a

k jejich častému situování v horních členitých částech povodí jsou ztráty spojené s jejich zanášením světovým problémem. Svědčí o tom i četné studie. Zanášení se pak zejména rychle projevuje u malých vodních nádrží, budovaných v horních částech povodí. Mnohdy je nádrž vyřazena již za několik let. K výraznému zmenšování obsahu rybníčních nádrží zanášením dochází v mnoha zemích. Zanášení vodních nádrží má výrazný vliv na ekonomiku zásobování vodou. U vodních nádrží pro energetické účely znamená zmenšení objemu pokles produkce elektrické energie a ohrožení turbín, jimiž voda se splaveninami prochází. Transportem splavenin jsou také často ohrožovány vodní toky, plavební dráhy a kanály. Náklady na jejich čištění jsou velké, výrazně zdražují plavební provoz. Nebezpečné jsou zejména bystriny s transportem štěrku, ústící do splavných toků. V některých horských oblastech dochází působením přivalových dešťů k pohybu suťových proudů, jež ohrožují technické stavby i celá města (Holý, 1978).

2.3.3 Transport chemických částic

Tradiční pohled na erozní procesy, spočívající v hodnocení eroze jako činitele devastujícího půdní povrch a jako zdroje splavenin zanášejících vodní toky a nádrže, nedovoluje jejich plné hodnocení. V současné době, v níž se půda dostává do styku s velkým množstvím chemických látek různého druhu a s různým stupněm toxicity, představuje jejich transport, vznikající působením erozních procesů, výrazné nebezpečí pro společnost. Nebezpečí je tím výraznější, že se chemické látky uvádějí do pohybu velmi lehce a že erozní procesy probíhají rozptýlně, na velkých plochách, což znesnadňuje návrh účinných a ekonomických protierozních opatření. Chemické látky pronikají do povrchových i podzemních vod a ohrožují využití vodních zdrojů (Holý, 1978).

Výrazná ztráta organické hmoty působením eroze je doprovázena ztrátou základních živin, hlavně dusíku a fosforu (Janeček a kol., 2008). Vysoký obsah dusíku spolu s fosforem navíc způsobuje eutrofizaci mnoha vodních nádrží, zejména rybníků, což snižuje jejich rekreační i jiné využití (Holý, 1978). Na každou 1 tunu ztráty organické hmoty vlivem eroze připadá přibližně 60 kg dusíku, respektive smyvem 1 cm půdy na 1 ha se ztratí 300 kg dusíku (Janeček a kol., 2008).

Nejvýznamnějším zdrojem těchto látek jsou průmyslová hnojiva a různé druhy pesticidů, užívaných ve velkých množstvích v zemědělské výrobě, a různé druhy zemědělských odpadů i odpady průmyslové, ukládané na půdu nebo do půdy.

Z místa použití nebo uložení jsou chemické látky transportovány zejména vodou a větrem (Holý, 1978).

Ztráty organické hmoty mají poté velký vliv na efektivnost použití herbicidů. Herbicidy mohou často poškozovat úrodu na erodovaných půdách s nižším obsahem organických látek, i když jsou aplikovány v doporučených dávkách. Této skutečnosti si jsou vědomi i výrobci herbicidů a proto návody na použití herbicidů doporučují dávky v závislosti na obsahu organické hmoty v půdě tak, aby mohly být bezpečně a efektivně užívány (Janeček a kol., 2008).

2.4 Opatření proti erozi

Zemědělskou půdu na svazích je zejména třeba chránit před vodní erozí vhodnými protierozními opatřeními. O použití jednotlivých způsobů ochrany před vodní erozí rozhoduje zejména jejich účinnost. Nutná je ochrana objektů (vodních zdrojů, toků a nádrží, intravilánů měst a obcí atd.) a také požadované snížení smyvu půdy. Je nutné respektování zájmů vlastníků a uživatelů půdy, ochrany přírody, životního prostředí a tvorby krajiny (Janeček a kol., 2008).

Při návrhu protierozních opatření se vychází z hydrologického posouzení celého povodí, ze současného uspořádání pozemků a jejich využívání a z posouzení současného smyvu půdy. K návrhu protierozních opatření přistupujeme tehdy, když vypočítaný smyv na daném pozemku překročí přípustný smyv půdy (Toman, 1995).

2.4.1 Organizační

Základem organizačních protierozních opatření je situování pozemků delší stranou ve směru vrstevnic, zvolené vhodné velikosti a tvaru pozemku a vymezení parcel vhodných ke změně druhů pozemků (Janeček a kol., 2007).

Organizační opatření na orné půdě jsou zejména v projektech KPÚ navrhována v součinnosti s ostatními protierozními opatřeními a předpokládají dobrou spolupráci a zainteresovanost hospodařících subjektů (Janeček a kol., 2008).

Zásady ochrany proti vodní erozi organizačními opatřeními vycházejí ze znalosti příčin vzniku erozních jevů a zákonitostí jejich rozvoje a vyúsťují v obecné protierozní zásady:

- včasný termín výsevu plodin,
- výsev víceletých pícnin do krycí plodiny,

- posun podmítky do období s nižším výskytem přívalových dešťů, tzn. a září,
- zařazování bezkrevně setých meziplodin,
- rozmístění plodin podle ohroženosti pozemku (Janeček a kol., 2007).

Tvar a velikost pozemku

Vhodná velikost pozemku je závislá na několika faktorech a v konkrétních případech je kompromisním výsledkem dvou navzájem protichůdně působících skupin faktorů-tzn. Faktorů přírodních, působících k vytváření menších půdních celků a ekonomického faktoru, který naopak upřednostňuje tvorbu pozemků dostatečně velkých. viz **2.2.5 Způsob využívání a obhospodařování půdy.**

Delimitace druhu pozemků a ochranné zatravnění a zalesnění

Delimitace druhu pozemků se chápe jako prostorová a funkční optimalizace pozemku sloužící k pěstování jednotlivých kultur. Představuje členění v rámci organizace zemědělského půdního fondu na ornou půdu, zahrady, louky, pastviny, vinice, sady a chmelnice (Janeček a kol., 2007).

Ochranné zatravnění se používá na pozemcích, které z hlediska ztrát půdy erozí nelze využívat jako ornou půdu. Optimálně zapojený travní porost je nejlepší protierozní ochranou. Pro kvalitní vegetační kryt jsou preferovány trávy výběžkaté tvořící pevný drn (zejména u protierozních opatření liniového charakteru) (Janeček a kol., 2008).

Ochranné zalesnění se nejčastěji uplatňuje jako plošné zalesnění nebo jako ochranné lesní pásy. Dobře zapojený hustý les (optimálně je les smíšený) s bohatým bylinným patrem a s půdou pokrytou mocnou vrstvou hrabanky zajišťuje vysokou protierozní ochranu půdy (Janeček a kol., 2007).

Protierozní rozmístování plodin

Základní princip zajišťující ochranu půdy proti vodní erozi je pěstování plodin nedostatečně chránící půdu před erozí (kukuřice, okopaniny a ostatní širokořádkové plodiny) na pozemcích rovinných nebo mírně sklonitých. Protierozní rozmístění plodin na svazích patří k obecným zásadám ochrany půdy. Při tradičním pěstování lze podle protierozní účinnosti plodiny seřadit od nevyšší po nejnižší účinnosti v pořadí: travní porosty – jetel – vojtěška - obilnina ozimá - obilnina jarní - řepka ozimá – hrách - plodiny okopaninového charakteru (slunečnice, brambory, cukrovka, kukuřice) a podle toho i rozmístování plodiny na pozemcích (Janeček a kol., 2007).

Rozmístování plodin má velký vliv na vznik a průběh povrchového odtoku a na protierozní odolnost půdy. Kultyry 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, zastíňují půdu a zabraňují neúčinnému výparu, působí na proudění větru v přízemí atd. V území ohroženém erozí musí být proto rozmístění plodin podřízeno především požadavkům protierozní ochrany (Holý, 1978).

Pásové střídání plodin

Pásové pěstování plodin využívá ochranného účinku vegetace před erozí a jejího příznivého vlivu na vnik do půdy: spočívá ve střídání pásů s plodinami nedostatečně chránícími půdu před erozí-chráněných pásů (okopaniny, obiloviny) a ochrannými pásy (travními porosty), jež chrání plodinový pás ležící níže.

Podle druhu eroze, které mají ochranné pásy zabránit, se rozlišují:

- vrstevnicové plodinové pásy, poskytující ochranu před vodní erozí
- protideflační plodinové pásy, chránící půdu před větrnou erozí (Holý, 1978)

Šířka pásů je závislá na sklonu a délce svahu, propustnosti půdy, její náchylnosti k erozi a na šířce záběru strojů. Obecně se doporučuje šířka pásů od 20 do 40 m (podle sklonu pozemku). Počet pásů závisí dále na délce svahu, kterou je zpravidla nutné přerušit průlehy nebo příkopy. Vrstevnicové pásy by také měli být uspořádány tak, že mezi stejně široké pásy plodin budou umístovány zpravidla nestejně široké pásy travních porostů či jetelovin, zajišťující s ohledem na proměnlivý sklon terénu nutnou „opravu“ v zájmu zachování stejné šířky plodinových pásů (Janeček a kol., 2008).

2.4.2 Agrotechnická

Jsou použita ke zlepšení vsakovací schopnosti půdy, zvýšení její protierozní odolnosti a k vytvoření ochrany jejího povrchu především v období největšího výskytu přívalových srážek, kdy především širokořádkové plodiny (kukuřice, brambory, cukrová řepa, slunečnice apod.) svým vzrůstem a zapojením ještě nedostatečně kryjí půdu (Janeček a kol., 2008).

Nejvíce podléhá erozi půda holá, tedy bez vegetačního pokryvu. Agrotechnická protierozní opatření jsou proto založena na minimalizování časového úseku, kdy je půda bez

vegetačního pokryvu. K protierozní ochraně půdy lze cíleně využívat posklizňové zbytky plodin a biomasu mezi plodinami. Infiltrace vody do půdy by neměla být omezena výskytem zhutnělých vrstev v půdním profilu. Rizikovým obdobím z hlediska vodní eroze je jednak období tání sněhu a zejména pak období nejčastějšího výskytu přívalových dešťů (červen-srpen) (Janeček, 2007).

Agrotechnická opatření jsou nepochybně nejzávažnější, poněvadž jsou záležitostí rozhodujícího podílu zemědělské půdy, tj. orné půdy a dlouhodobých kultur (ovocné sady, vinohrady, chmelnice). Jde o 4/5 zemědělského půdního fondu (prům. 82 %, ve výrobně oblastních rozmezích 46-95%, z čehož takřka 46% tvoří plochy se svažitostí vyšší než 8° (5°). Navíc tyto plchy zůstávají po značnou dobu bez vegetačního pokryvu., čímž jsou více náchylné k erozi (Pasák a kol., 1974).

Protierozní osevní postupy

Osevní postupy mají mnohostranný význam nejen pro intenzifikaci rostlinné výroby, úrodnost půdy, organizaci a ekonomiku zemědělského podniku, ale také pro ochranu půdy, vodních zdrojů a krajiny (Kokolia a kol., 1989).

Protierozní osevní postupy znamenají rozmístění zemědělských kultur do honu tak, aby bylo zajištěno pravidelné střídání za určitý počet let. Obiloviny, píce, okopaniny a technické plodiny se střídají v rotaci tak, aby se zachovala úrodnost půdy a zajistily vysoké výnosy se zřetelem na předplodinu. Vhodná základní struktura polního osevního postupu v našich podmínkách je dána 45-50% zastoupení obilovin, 25-30% zastoupení okopanin a 25-30% zastoupení pícnin a luštěnin. Při správném použití jsou osevní postupy významným prostředkem ochrany půdy před erozí. Složení osevních postupů se však musí volit tak, aby se v rotaci vyskytovalo co nejvíce možných plodin s ochranným účinkem, jímž se vyznačují pícniny, zejména pak trávy a vojtěška. Ochranný účinek osevních postupů je přímo úměrný podílu, který v nich zaujímají několikaleté pícniny. Ohrožení orné půdy erozí zvyšují plodiny okopaninového typu s nedostatečným ochranným účinkem (Janeček a kol., 2007).

Řešení osevních postupů podle všech ekonomických a ekologických kritérií je poměrně náročný a složitý úkol vyžadující komplexní přístup (Kokolia a kol., 1989).

Ochranné obdělávání půdy

Ochranným obděláváním půdy (Conservation Tillage) je nazýváme systém obdělávání a pěstování plodin, který udržuje nejméně 30% rostlinných zbytků na povrchu půdy a vede tak ke snížení vodní nebo větrné eroze. Jde v zejména o redukované obdělávání, zmenšováním

poštu operací jejich slučováním při současné ochraně povrchu půdy rostlinnými zbytky. Tento systém ochrany půdy chrání povrch půdy před působením eroze zapojeným porostem pěstování plodin nebo ponecháváním posklizňových zbytků na jejím povrchu. Místo orby se půda pouze kypří kypříči. Při bezorebném zpracování strništních ploch se posklizňové zbytky zapravují do půdy jen částečně. Na povrchu se tvoří nastýlka neboli mulč. Stroje půdu nepřeklápí, ale drobí (Janeček a kol., 2008).

2.4.3 Technická

Technická protierozní opatření slouží k vyrovnání terénních příčných nerovností a snížení podélného sklonu velmi svažitéch pozemků, k ochraně pozemků před tzv. „cizí“ vodou například vytékající z lesních porostů na zemědělskou půdu, k retardaci povrchového odtoku, k neškodnému odvedení povrchových vod z povodí a zachycování smyté zeminy, k ochraně intravilánů v obcích a komunikací před škodami povrchovým odtokem a smytou zeminou apod. Používají se tehdy, pokud nelze hodnot přípustné ztráty půdy dosáhnout organizačními opatřeními nebo pokud je řešení technickými opatřeními výhodnější. K prvé skupině opatření se řadí zemní úpravy, jako jsou terénní urovnávky, meze a terasy. Ke druhé hydrotechnické prvky, jako jsou příkopy, průlehy, ochranné hrázky a nádrže (Janeček a kol., 2008).

Technická protierozní opatření dále také zmenšují intenzitu erozních procesů tím, že na dva základní morfologické faktory-na sklon a na délku svahu-a že vytváření podmínky pro přeměnu povrchového odtoku v odtok podzemní (Holý, 1978).

Při terénních urovnávkách jde především o odstranění nerovností zeminy na orné půdě. Snížení nebo odstranění sklonů pozemku vede k omezování koncentrace povrchového odtoku a snížení nebezpečí erozního smyvu. Terénní urovnávky je možné provádět jen na půdách hlubokých (zejména sprašových) (Janeček a kol., 2007).

Protože se ale jedná o nákladné protierozní opatření, je nutné rozsah technických opatření minimalizovat (Toman, 1995).

Terasy

Jsou jednou z možností, jak chránit před erozí extrémně svažité pozemky o sklonu >20% na hlubokých až velmi hlubokých půdách. Terasováním se zároveň vytvoří podmínky pro zemědělské využití velmi svažitéch pozemků, především pro pěstování speciálních trvalých kultur (sadů a vinic). Terasy by měli být navrhovány tak, aby vytvářely tvary, které optimálně vyhovují pozemků, zajišťují přístupnost a umožňují optimální regulaci

vodohospodářských poměrů. Jsou budovány jako terasy úzké, o šířce terasové plošiny umožňující výsadbu 1 aneb 2 řad ovocných stromů nebo vinné révy, nebo jako široké, o šířce terasové plošiny, které umožňují výsadbu 3 a více řad, případně pěstování běžných zemědělských plodin (Janeček a kol., 2007).

Terasy se provádějí také stupňovité, které upravují na hlubokých půdách svahy o velkém sklonu, obvykle větších než 15%, v mírně sklonité až vodorovné terasy a přerušují, zadržují, popř. odvádějí povrchově stékající vodu. Výška a tvar terasových stupňů jsou závislé na sklonu území, na vyrovnání zemních prací, na zpřístupnění území pro mechanizaci, na určeném způsobu obhospodařování, na hloubce půdního profilu (Holý, 1978).

K terasám je nutné poznamenat, že tento způsob se dnes u nás prakticky nenavrhuje a neprovádí z důvodu technické a ekonomické náročnosti. Jsou zde však problémy spojené s vlastnictvím pozemků ve z terasovaném území a se špatným technickým stavem teras-zborcené svahy, zaplevelení apod. (Janeček a kol., 2007).

Příkopy

Navrhují se v území se sklonem $< 20\%$ výrazně ohroženém erozí, aby zachytily a neškodně odvedly povrchově stékající vodu, popřípadě umožnily však vody do půdy. Podle funkce se dělí na záchytné příkopy odváděcí a vsakovací (Holý, 1978).

Protierozní příkopy se na pozemcích navrhují jako jednotlivé prvky nebo v soustavě jako otevřené, nezpevněné nebo zpevněné, s příčným profilem ve tvaru lichoběžníku (Janeček a kol., 2008).

Navrhované příkopy by měli být schopné odvést navrhovaný kulminační průtok s pravděpodobností výskytu alespoň za 10 let. Někdy se také rozdělují na příkopy svodné, záchytné a sběrné (Toman, 1995).

Z funkčního hlediska se navrhují takto:

- Záchytné (obvodové) k ochraně pozemků před přítokem vnějších vod, zejména lesů
- Sběrné pro zachycení vnitřních vod, zpravidla k omezení příliš velké nepřerušené délky povrchového odtoku po pozemku
- Svodné pro zajištění neškodného odtoku do recipientu (Janeček a kol., 2008).

Průlehy

Mají obdobnou funkci jako příkopy. Mohou být buď nezpevněné, obdělávané jako orná půda, nebo zpevněné např. osetím. Jsou účinné při sklonu terénu 5-15%, výjimečně do 18%. Navrhují se jako sběrné i svodné (Toman, 1995).

Jelikož se průlehy navrhují k zachycování, infiltraci a odvádění krátkodobého povrchového odtoku způsobeného přivalovými dešti či náhlým jarním táním a jsou považovány za jedno z nejúčinnějších protierozních opatření. Jsou mělké, zpravidla pouze vegetací zpevněné široké příkopy s mírnými sklony (1:5 až 1:10). Z funkčního hlediska se průlehy navrhují jako:

- **Záchytné**- slouží zpravidla k ochraně pozemku před „cizí“ vodou

- **Sběrné**

vsakovací-s nulovým nebo malým podélným sklonem, vhodné pouze pro půdy propustné

odváděcí- slouží k odvádění vody z pozemku do svodných průlehů (příkopů)

- **Svodné**- zpravidla v podobě zatravněných drah soustředěného povrchového odtoku (Janeček a kol., 2008).

Protierozní hrázky

Budují se k ochraně důležitých objektů, především jako zemní o výšce 1 m až 1,5 m, opevněné zatravněním (Toman, 1995).

Nejmenší hloubka průlehů se doporučuje 0,5 m, sklony svahů 1:5 (lépe 1:10), aby bylo umožněno přejíždění, plocha příčného profilu maximálně 0,8 m². Průlehy k odvádění vody mimo zájmové území, zakládáné v málo propustných nebo nepropustných půdách, mají podélný sklon 1 až 5‰, zaústějí se do odpadů (Holý, 1978).

Hrázky musí být vybaveny vypouštěcím zařízením, které zajistí odtok relativně čisté vody po usazení půdních částic před hrázkou a zachycení plovoucích předmětů ochranou mříží (česlemi) osazenou před vypouštěcím zařízením. Ochranné hrázky se s výhodou budují na místo málo účinných vrstevnicových mezí a zejména tam, kde by v důsledku malého podélného sklonu docházelo k zanášení příkopů a průlehů. Vhodnou volbou místa vypouštěcího zařízení je možné i měnit místo odtoku (Janeček a kol., 2008).

Protierozní nádrže

Jsou jedním z velmi účinných opatření regulujících odtok vody a zachycují cích náplavy, tj. transportované splaveniny. Záchytný prostor by měl být tak veliký, aby zachytil objem vody odtékající z přívalového deště, popř. z jarního tání s průměrnou dobou opakování alespoň 50 let. Výhodné jsou tzv. suché nádrže, plněné jen v případně zvýšených odtoků, jinak využívané jako louka (Toman, 1995).

V zájmu maximální účinnosti při zachycování splavenin je nutné, aby jejich záchytný prostor byl tak velký, aby zachytil objem vody odtékající z návrhového přívalového deště, popř. z jarního tání, s průměrnou dobou opakování alespoň 50 let. Po usazení splavenin odtéká z nádrže relativně čistá voda zbavená nerozpuštěných látek. Z tohoto požadavku vyplývá i možnost stavby těchto nádrží pouze v malých povodích (Janeček a kol., 2008).

3 Cíl práce

Práce si klade za cíl porovnat různé možnosti kvantifikace erozních jevů. V práci jsou uvedeny metody výpočtu průměrného ročního odnosu zemin a následně vybrané modely, které slouží pro výpočet okamžitého odnosu zemin.

4 Metodika

Jako základní metodika byly vybrány dvě metody výpočtu, a to Univerzální rovnice pro výpočet průměrného ročního odnosu zeminy-USLE a Revidovaná rovnice pro výpočet ztráty půdy-RUSLE. Dále bylo vybráno celkem deset modelů okamžitého odnosu zeminy.

Z postupného rozvoje metody Univerzální rovnice pro výpočet průměrného ročního odnosu zeminy byly vybrány tři rovnice, které byly konkrétně ověřeny na projektu KPÚ. Tyto rovnice byly také porovnány s poslední upravenou rovnicí pro Výpočet průměrného ročního odnosu zeminy. U vybraných modelů okamžitého odnosu zeminy byla posouzena vhodnost pro použití v konkrétním projektu KPÚ.

4.1 Metody výpočtu průměrného ročního odnosu zeminy

4.1.1 USLE (univerzální rovnice pro výpočet průměrné dlouhodobé ztráty půdy erozí)

Za první empirický model erozního procesu se považuje vztah odvozený Zingem (1940) pro odhad průměrné roční ztráty půdy vodní erozí na základě rozsáhlého výzkumu vlivu sklonu a délky svahu:

$$G=C.S^{1,4}.L^{0,6}$$

Kde: G - průměrná roční ztráta

S - sklon svahu

L - délka svahu

C - konstanta, která zahrnovala ostatní faktory ovlivňující erozi

Dále uvedené odhady intenzity vodní eroze ukazují historický vývoj předpovědních metod v USA, který vyplýval z prohlubování teorie vodní eroze, založené na dlouhodobém terénním i laboratorním výzkumu eroze.

Smith (1941) rozšířil v r. 1941 Zinggovu rovnici:

$$G = C \cdot S^{7/5} \cdot L^{3/5} \cdot P$$

Kde: P - faktor protierozního opatření
C - faktor zahrnující vliv klimatu, půdy a vegetačního pokryvu
S - sklon svahu
L - délka svahu (Janeček a kol., 2008).

R.K. Frevert sestavil empirický model pro stát Iowa v USA, tento model se liší od vztahu tím, zahrnuje větší proces erozních faktorů. Jedná se o rozšíření na tzv. Frevertvu rovnici:

$$G = 10 \cdot (K' \cdot O' \cdot L' \cdot S' \cdot C' \cdot P')$$

Kde: G - průměrná roční ztráta půdy
K - faktor erodovatelnosti půdy
O - faktor geologického podkladu
L - faktor délky svahu
S - sklon svahu
C - faktor vegetačního pokryvu
P - faktor druhu protierozních opatření
10 - součinitel vyjadřující vliv klimatu (srážek) ve státě Iowa na erozní proces (Holý, 1978).

V roce 1946 začala v rámci SCS pracovat výzkumná skupina pod vedením Musgrava a výsledkem práce tohoto týmu byla „rovnice Musgrava“:

$$G = K \cdot C \cdot S^{1,35} \cdot L^{0,35} \cdot R_{30}^{1,75}$$

Kde: G - roční ztráta půdy v palcích
K - faktor erodovatelnosti půdy
C - faktor účinku vegetačního krytu
S - sklon svahu (%)
L - délka svahu
R - úhrn 30 min. deště s periodicitou $p=0,5$ (Musgrave, 1947).

O rok později pak byla vytvořena rovnici pro odhad velikosti ztrát půdy ve státě Missouri:

$$G = A \cdot S \cdot L \cdot K \cdot P$$

Kde: A - průměrná roční ztráta půdy na pozemku se sklonem 3%, délkou 27,43 m s jílovitohlinitými půdami
S - faktor sklonu
L - faktor délky
K - faktor druhu půdy
P - faktor protierozních opatření

Pro vyhodnocení erozní ohroženosti a k posuzování ekonomických vlivů protierozních opatření v našich podmínkách upravil Zdražil (1965) Frevertovu rovnici a doplnil ji o vliv organického hnojení

$$X = 0,63 \cdot G \cdot P \cdot S \cdot D \cdot H \cdot O \cdot PO$$

Kde: X - průměrná ztráta půdy (mm za rok)
G - součinitel geologického podkladu
P - součinitel druhu půdy
S - součinitel sklonu pozemku
D - součinitel nepřerušené délky pozemku svahu
H - součinitel hnojení
O - součinitel osevního postupu
PO - součinitel druhu protierozní ochrany

Zatím nejdokonaleji vyjadřuje kvantitativní účinek hlavních faktorů, ovlivňujících vodné erozi způsobovanou přívalovými dešti, tzv. univerzální rovnice pro výpočet průměrné dlouhodobé ztráty půdy erozí z pozemků dle Wischmeiera, Smithe (1978)

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

- Kde: G - průměrná dlouhodobá ztráta půdy ($t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$)
R - faktor erozní účinnosti deště-vyjádřený v závislosti na četnosti výskytu, úhrnu, intenzivně kinetické energie deště
K - faktor erodovatelnosti půdy-vyjádřený v závislosti na textuře a struktuře ornice, obsahu organické hmoty a propustnosti
L - faktor délky svahu- vyjadřují vliv nepřerušené délky svahu na velikost ztráty půdy erozí
S - faktor sklonu svahu-vyjádřující 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 (Hovorka a kol., 1990).

Rozbor jednotlivých faktorů:

Faktor R-erozní účinnost

R- faktor erozní účinnosti deště ($MJ \cdot ha^{-1} \cdot cm \cdot H^{-1}$) – R faktor je podle Skleničky (2003) definován jako součin celkové kinetické energie deště- E ($J \cdot m^2$) a maximální 30-ti minutové intenzity deště i_{30} ($cm \cdot h^{-1}$). Totéž popisuje i Janeček a kol. (2008) ve své publikaci. Dále Sklenička (2003) uvádí, že exaktní stanovení faktoru R pro určenou lokalitu a dané území je celkem obtížné.

Erozní účinnost dešťových srážek se projevuje nejvýrazněji na počátku erozního procesu, kdy dešťové kapky padají na půdní povrch, na kterém se ještě nestačila vytvořit vrstva povrchově odtékající vody.

Vztah pro faktor erozní účinnosti deště R byl v USA odvozen na základě velkého množství dat o dešťových srážkách. Vzorec:

$$\mathbf{R = E . i_{30}/100}$$

Kde: R – faktor erozní účinnosti deště ($\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)
 E celková kinetická energie deště ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$)
 $I_{30 \text{ max}}$ 30-ti minutová intenzita deště ($\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)

Celková kinetická energie deště E je:

$$E = \sum E_i$$

Kde: E_i – kinetická energie i -tého úseku deště ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$)
 N – počet úseku deště

$$E_i = (206 + 87 \log i_{si}) \cdot H_{si}$$

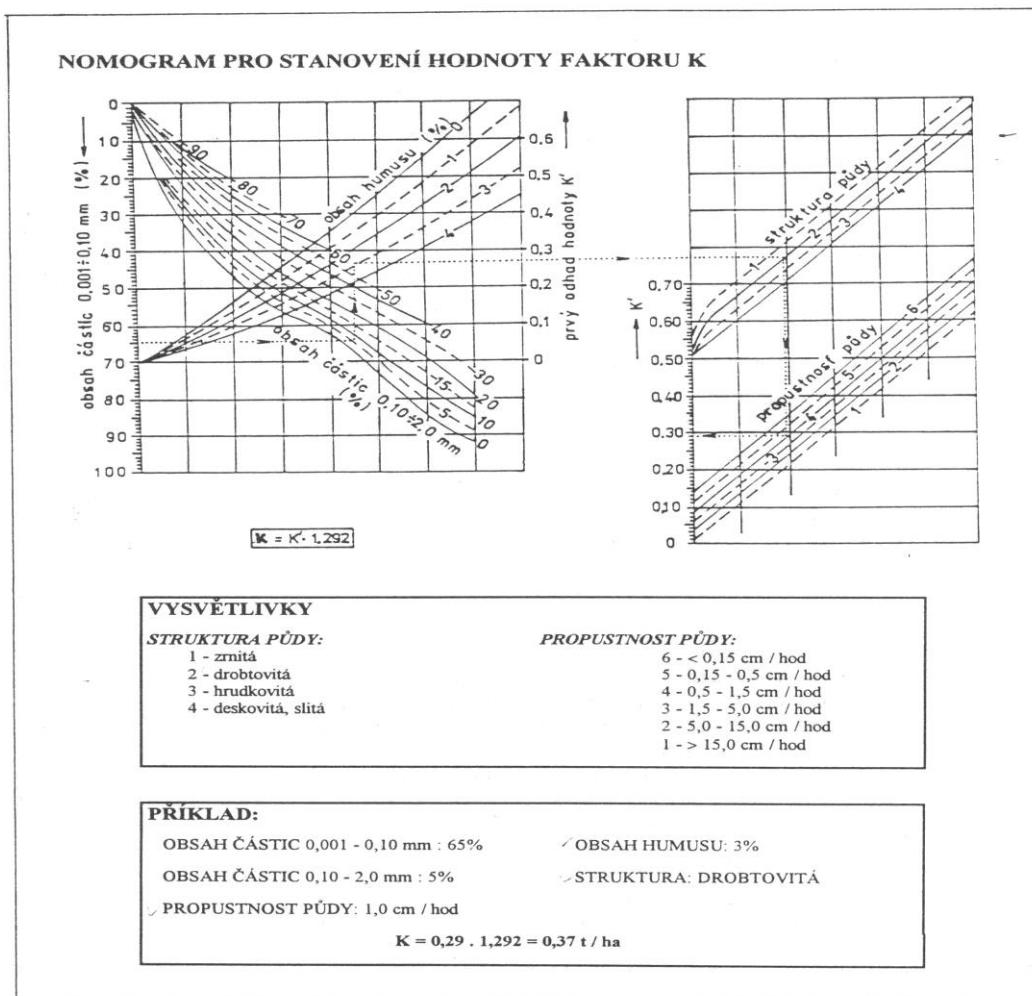
Kde: i_{si} – intenzita deště i -tého úseku ($\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)
 H_{si} – úhrn deště v i -tém úseku (cm) (Janeček a kol., 2008).

Faktor K - erodovatelnost půdy

Vlastnosti půdy ovlivňují infiltrační schopnost půdy a odolnost povrchu půdy a půdních agregátů proti rozrušujícímu účinku dopadajících kapek deště a transportu povrchovým odtokem. Faktor erodovatelnosti půdy neboli náchylnosti půdy k erozi je univerzální rovnicí definován jako odnos půdy v $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ na jednotku dešťového faktoru R ze standartního pozemku 22,13 m (na svahu o sklonu 9%), který je udržován jako kypřený černý úhor kultivací ve směru sklonu. Pokud obsah prachu práškového písku (0,002-0,1 mm) v půdě nepřekračuje 70%, lze faktor K určit ze vztahu:

$$100K = 2,75 M^{1,14} 10^{-4/12-a/+3.25/b-2/+2.5/c-3/}$$

Kde: M - (%prachu + práškového písku) x (100 - % jílu) (% prachu + % práškového písku = částice 0,002 + 0,1 mm, % jílu = částice < 0,002 mm)
 a - % organické hmoty
 b - třída struktury ornice
 c - třída propustnosti půdního profilu



Obr. č. 1 Nomogram pro stanovení hodnoty K (FSV ČVUT, 2004)

Faktor L – délka svahu

Vzhledem k tomu, že podle definice má jednotka pozemku délku 22,13 m a klon 9%, má rovnice pro výpočet faktoru délky vztahu tvar:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m$$

Kde: 22,13 – délka standardizovaného pozemku (m),
 λ – horizontální projekce nepřerušené délky svahu,
 m – exponent délky svahu vyjadřující náchylnost svahu k tvorbě rýžkové eroze (Kinnell, 2001).

Intenzita eroze se zvyšuje s rostoucí délkou svahu. Délka svahu je definována jako horizontální vzdálenost od místa vzniku povrchového odtoku k bodu, kde se sklon svahu snižuje natolik, že dochází k ukládání erodovatelného materiálu nebo se plošný odtok soustředí do odtokové dráhy (Janeček a kol., 2008).

Faktor S - sklon svahu

Ztráta půdy se zvyšuje se vzrůstajícím sklonem svahu, a to rychleji než je tomu u délky svahu. Hodnota faktoru svahu S se určuje pomocí vztahů:

$$S = 10,8 \sin s + 0,03 \text{ pro } s < 9\%$$

$$S = 16,8 \sin s - 0,50 \text{ pro } s > 9\%$$

Pro vyjádření vlivu proměnného sklonu svahu, příp. k vyjádření vlivu změn půdních vlastností (K) na svahu na ztrátu půdy erozí, lze rozdělit svah na 10 stejně dlouhých úseků a faktor sklonu svahu S stanovit jako vržený průměr faktoru S, příp. K dílčích úseků. Výsledná hodnota faktoru sklonu svahu S pro svahy nepravidelného tvaru se stanoví podle vah následovně od nejvyšší polohy S1 po nejnižší S10 ze vztahu:

$$S = 0,03. S_1 + 0,06. S_2 + 0,07. S_3 + 0,09. S_4 + 0,10. S_5 + 0,11. S_6 + 0,12. S_7 + 0,13. S_8 + 0,14. S_9 + 0,15. S_{10}$$

Kde: S je hodnota faktoru S pro i-tý úsek svahu, rozděleného na deset úseků stejné délky

Obdobně se postupuje pro zohlednění různých hodnot faktoru K .

Faktor C - ochranného vlivu vegetace

Ochranný vliv vegetace je přímo úměrný pokryvnosti a hustotě porostu v době největšího výskytu přívalových dešťů (měsíce duben – září). Proto dokonalou protierozní ochranu představují porosty trav a jetelovin, zatímco běžným způsobem pěstované širokořádkové plodiny (kukuřice, okopaniny, sady a vinice) chrání půdu nedostatečně.

Pro řešení protierozní ochrany pozemků a posouzení jejich dlouhodobé erozní ohroženosti se faktor C stanoví pro jednotlivé po sobě pěstované plodiny, včetně období mezi střídáním plodin, při zohlednění nástupu a způsobu agrotechnických prací v 5-ti základních obdobích:

1. období podmínky a hrubé brázdy
2. období od přípravy pozemku k setí do jednoho měsíce po zasetí nebo sázení
3. období po dobu druhého měsíce od jarního nebo letního setí či sázení, u ozimů do 30.4
4. období od konce 3. období do sklizně
5. období strniště (Janeček a kol., 2008).

Faktor P - účinnosti protierozního opatření

Pokud jsou na pozemku svahu aplikována některá protierozní opatření, jako například hrázkování, terasování, vrstevnicové obdělávání, pásové střídání plod, zahrnuje se jejich vliv do výpočtů. V případě přímých řádků libovolného směru se volí do výpočtu číslo 1 (Agroprojekt, 1987)

Tabulka hodnot faktoru P

Protierozní opatření	Sklon svahu			
	2-7	7-12	12-18	18-24
Přímé řádky libovolného směru	1,0	1,0	1,0	1,0
Vrstevnicové obdělávání při šířce pásového pozemku	0,6	0,7	0,9	1,0
Pásové střídání plodin při max. šířce a počtu pásů	6 pásů po 40 m	4 pásy po 30 m	4 pásy po 20 m	2 pásy po 20 m
Střídání okopanin a víceletých píceňin	0,30	0,35	0,40	0,45
Střídání okopanin a ozimých obilovin	0,50	0,60	0,75	0,90
Hrázkování, důlkování	0,25	0,30	0,40	0,45
Terasování (podle typu)			0,05-0,15	0,05-0,20

4.1.2 RUSLE (Revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy)

Na základě zkušeností s použitím tzv. Univerzální rovnice ztráty půdy (USLE), došlo v 90. letech k jejímu prověření, aktualizaci a úpravě. Tyto úpravy vedly k určitým změnám ve způsobu stanovení jednotlivých faktorů rovnice, a proto byla tato rovnice „Revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy (RUSLE - Revised Universal Soil Loss Equation) (Janeček a kol., 2008).

Vzhledem ke své skromné datové náročnosti a transparentní strukturu modelu zůstává Universal Soil Loss Equation (USLE) v současné době nejpopulárnější a nejrozšířenější model pro předpověď rizika vodní eroze a plánování opatření ochrany půd. Tento koncentrovaný empirický model eroze byl přijat v roce 1958 Službou ochranou půdy

v USA. První aktualizace poté byla v roce 1978 pomocí různých datových souborů získaných experimentů v USA, a poté byly odvozeny násobky modelů, jako například revidované Universal Soil Loss Equation-RUSLE a nebo byly změněny Universal Soil Loss Equation-MUSLE, za účelem zlepšení předvídání schopností v USLE. Nicméně všechny tyto modely jsou založeny na empirických koeficientech, které musí být přesně hodnoceny z pozorování v terénu pro konkrétní situaci (typ plodiny, ochrana, klima...) (Raclot a Alberger, 2006).

S Raclotem a Albergerem se shoduje Zhang a kol. (2013). Dodává, že i přes značné nedostatky a odvození jsou Universal Soil Loss Equation (USLE) a revidované Universal Soil Loss Equation (RUSLE) stále nejčastěji používané rovnice pro odhad eroze půdy. To je způsobeno především jednoduchostí použití rovnice a i její schopnosti předvídat průměrnou dlouhodobou erozi na jednotkových plochách. Avšak extrakce topografických faktorů se stává velkým problémem, zejména u délky svahu. Vliv topografie na erozi v USLE / RUSLE připadá LS faktoru. L a S faktory rovnice jsou často koncentrovány spolu jako „LS“. Vypočítají se podle délky svahu a úhlu sklonu svahu. Tradičně byly nejlepší odhady délky svahu získané z měření v terénu, ale ty nejsou vždy k dispozici a praktické. Nicméně v průběhu posledních 20 let byly vyvinuty postupy, které umožňují použití geografického informačního systému (GIS), technologie pro generování jak USLE a RUSLE- ověření algoritmu používaného k simulaci délky svahu uznává, že vyšší eroze nebo rychlostní dispozice dochází na konvergenci povodí, jak také postuloval v USLE / RUSLE. To znamená, že faktor LS není jednorozměrný při použití USLE nebo RUSLE na velké ploše pomocí GIS.

RUSLE byla vyvinuta na základě revize a aktualizace USLE a znamená změny ve způsobu stanovení jednotlivých erozních faktorů:

R faktor: revize a aktualizace existujících map isoerodent 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, 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 uvažuje poměr rýžkové a mezi rýžkové eroze, upřesnění hodnoty sklonu svahu pro stanovení ztráty půdy.

C faktor: zpřesnění faktoru pro hodnocení vlivu jednotlivých druhů zemědělských plodin a způsobů jejich pěstování pro nevyužívané půdy, pastviny, poškozené lesy, území s povrchovou těžbou surovin, rekultivované plochy a staveniště, včetně zahrnutí vlivu předchozího využití půdy, pokryvu půdy a druhu vegetace, drsnosti půdního povrchu tak, že se stanovuje SLR (soil – loss ratio) jako poměr ztráty půdy při aktuálních podmínkách hospodaření, ke ztrátě půdy za standartních podmínek (úhoru):

$$\mathbf{SLR = PLU . CC . SC . SR . SM}$$

SLR se počítá pro každý interval ve kterém lze předpokládat kontaktní podmínky (max. 15 dní). Každé z těchto hodnot je přiřazena příslušná část erozní účinnosti deště (EI) v tom daném období.

Další dílčí faktory poměru ztrát:

- **PLU** (prior land use subfactor) - vlivu předchozího způsobu pěstování plodin a obdělávání. Závisí na konsolidaci povrchu půdy (např. změně hustoty povrchu vyvolaného orbou), hmotnosti povrchových (do 2,5 cm) zbytků rostlin, živých a odumřelých kořenů.
- **CC** (canopy cover subfactor) – ochrany povrchu půdy vegetačním krytem, který není v kontaktu s půdou. Vyjadřuje účinnosti vegetace při snižování energie kapek dopadajících na půdní povrch. Jeho velikost záleží na % pokrytí a výšce pádu kapek.
- **SC** (surface over subfactor) - vyjadřuje účinnost ochrany povrchového krytu, který je přímo v kontaktu v povrchem půdy (zbytky rostlin kameny apod.) na redukci transportní kapacity povrchově odtékající vody, sedimentaci a zmenšení plochy na kterou dopadají dešťové kapky. Je důležitější z hlediska určení hodnot SLR.
- **SR** (surface roughness subfactor) - drsnosti povrchu půdy způsobené agrotechnickými zásahy.
- **SM** (soil moisture subfactor) - vlivu vlhkosti půdy (Janeček a kol., 2008).

4.2 Modely pro výpočet okamžitého odnosu zemin

Posouzení erozní ohroženosti pozemků

V současné době je snaha empirický základ hodnocení intenzity erozních procesů (Universální rovnici) nahradit kvalitativně vyššími metodami. Je to dáno zejména současnou úrovní znalostí v oborech, které zkoumají vztahy způsobující erozi, rozvojem výpočetní techniky včetně GIS, ale zejména změnou v prioritách protierozní ochrany, kdy je třeba posuzovat erozi nejen ve vztahu k ochraně půdy, ale i k ostatním ekologickým dopadům. Vznikají proto simulační modely erozních procesů, které řeší erozní jevy na základě fyzikálních popisů jednotlivých procesů.

Pro modelování eroze bylo vytvořeno mnoho modelů a některé nejsou ani nijak doložené. Z tohoto důvodu je zde uveden výběr z těchto modelů.

4.2.1 Model CREAMS (Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems)

Model byl odvozen v USA jako první komplexní model řešení hydrologických a erozních procesů a transportu vybraných chemických látek (N, P, pesticidy) na plochách s homogenními půdními podmínkami, jednotlivým využitím a rovnoměrným zasažením lochy srážkou. Tento model umožňuje vyhodnotit vliv jednotlivého deště na transport látek a také řeší pohyb látek v delším časovém období (Podhrázská a Dufková, 2005).

Model Creams se skládá ze tří složek: erozní, chemické a hydrologické. Složka hydrologická určuje objem povrchového odtoku a maximální odtok, evapotranspiraci, obsah vody v půdě, infiltraci a infiltraci se simulačním krokem 1 den. Složka erozní hodnotí proces erozní a množství splavenin včetně rozdělení transportovaných půdních zrn podle zrnitostního složení na úpatí svahu. Složka chemická zahrnuje transport rostlinných živin (N, P) a pesticidů a určuje jejich koncentraci v povrchovém odtoku, v infiltrujiící vodě a v sedimentech.

Vyhodnocení: Jedná se o komplexní model, který řeší hydrologické a erozní procesy transportu chemických látek N, P a pesticidů. Jako většina modelů má velkou náročnost na objem vstupních dat.

4.2.2 Model SWRRB (Simulator for Water resources in Rural Basins)

SWRRB byl sestaven pro simulaci hydrologických procesů a transportu splavenin v zemědělsky využívaných povodích do velikosti cca 100 km² bez přímých pozorování a pro vyhodnocení vlivu změny systému hospodaření na tyto procesy. Hydrologická část vychází z hodnoty denního srážkového úhrnu a využívá pro stanovení charakteristik povrchového odtoku metodu čísel odtokových křivek CN a erozní část využívá princip Univerzální rovnice ztráty půdy (Podhrázská a Dufková, 2005).

Vyhodnocení: Model byl vyvinut z dřívějších modelů, zejména z modelu CREAMS. Je určen pro malá povodí do 100 km², které převládají zemědělské procesy, s důrazem na hydrologii a sedimentaci látek. SWRRB je dynamický simulační model vytvořený pro dlouhodobé simulace k určení statistik odtoku a ukládání. Zahrnuje také bouřkové události, období mezi bouřkami, růst rostlin, evapotranspiraci a vysoušení.

4.2.3 Model EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator)

Je určen pro vyhodnocení vlivu erozních procesů (ztráty půdy) na změnu půdních vlastností a na úrodnosti půdy. Model podrobně simuluje vývoj plodiny v závislosti na hydrologických a klimatických podmínkách, na probíhajících erozních procesech: je zahrnut rovněž režim dusíku a fosforu (EPIC-WQ) a pesticidů (EPIC-PST) a podzemního drenážního systému (EPIC-WT). Vyšetřované území je charakterizované prvkem plošného a soustředěného odtoku. Model je určen pro podobné plochy do velikosti cca 1 ha. Hydrologická část vychází z hodnot denního srážkového úhrnu a je využívána pro stanovení charakteristik povrchového odtoku metodu čísel odtokových křivek CN a pro erozní část různé modifikace Universální rovnice ztráty půdy. Tento model jako jediný uvažuje také vliv větrné eroze na úrodnost půdy (Podhrázská a Dufková, 2005).

Vyhodnocení: Model EPIC slouží k vyhodnocení vlivů erozních procesů na změnu půdních vlastností a na úrodnosti půdy. Model byl vyvinut k ohodnocení zemědělských strategií. Hlavní výhodou je detailní zaměření na povrchový odtok a procesy rostlinného růstu. Používá se pro homogenní plochy do velikosti 1ha.

4.2.4 Model ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation)

Je dynamický model, který řeší hydrologické procesy a také transport splavenin z nehomogenních povodí o velikost do cca 100 km². Model je určen pro řešení odezvy povodí na jednotlivou návrhovou srážku s časově proměnnou intenzitou. Charakteristiky povrchového odtoku jsou řešeny hydrologickým modelem, který je postaven na fyzikálním základě a erozní část modelu využívá jednoduché empirické závislosti pro definování uvolňování a transportu půdních částic procesy plošné eroze. Klíčovým hydrologickým procesem v modelu je infiltrace, která ovlivňuje akumulaci povrchové vody a odtok (Podhrázská a Dufková, 2005).

Vyhodnocení: Model ANSWERS je určený pro simulaci hydrologických a erozních procesů v zemědělsky využívaných malých povodích. Model je určený pro procesy odtoku

během a bezprostředně po srážkové činnosti. Model je řízen srážkami a je konfigurován pro příjem čtyř srážkových měření. Parametry reprezentují intercepci, infiltraci a povrchové sníženiny.

4.2.5 Model AGNPS (AGricultural NonPoint Source)

Model je určen pro řešení eroze, transportu chemických látek (N, P) a odtoku jednotlivých srážek v povodí velikosti do cca 200 km². Hydrologická část modelu je založena na využití metody čísel obtokových křivek CN, erozní část používá Universální rovnici ztráty půdy. Simulace transportu chemických látek se provádí pro jejich formy rozpuštěné v povrchovém odtoku a adsorbované na povrchu půdních částic, chemická část modelu využívá postupu použitého v *modelu CREAMS* (Podhrázká a Dufková, 2005).

Vyhodnocení: Model AGNSP byl vyvinut pro zhodnocení nebodového zdroje znečištění a jeho pohybu v povodí. Pomocí modelu se simulují nánosy živin, sedimentů a pesticidů dle využití území. Současné vyžití půdy může být pomocí modelu využito pro vyhodnocení oblastí, které přispívají k znečištění v různých bodech povodí. Model je určen pro menší povodí a náročnost objemu dat je středně vysoká.

4.2.6 Model SHE (Systeme Hydrologique Européen)

Jedná se o komplexní hydrologický model, jehož výstupy v oblasti povrchového (plošného a soustředěného odtoku) a podzemního odtoku umožňují navázání dalších modelů pro řešení vodohospodářské problematiky a ekologických dopadů transportu látek odtokem (šíření znečištění povrchovým a podzemním odtokem, erozní procesy, atd.) (Podhrázká a Dufková, 2005).

Vyhodnocení: Model SHE je vhodný například pro předvídaní dopadů využívání půdy a klimatických změn v aplikaci na povodí. Náročnost na vstupní data není nijak vysoká. Model je možné použít na povodí od 30 m² do 5000 km².

4.2.7 Model EUROSEM (EUROpean Soil Erosion Model)

Vývoj v evropském měřítku směřuje k vytvoření modelu EUROSEM, který by se stal modulem hydrologického modelu SHE. Model EUROSEM zahrnuje procesy uvolnění půdních částic deštěm (jako funkce energetických parametrů deště), transport povrchovým odtokem v tenké vrstvě a dále procesy plošné rýžkové eroze a rýhové eroze, která je simulována na základě mechanismu tvorby erozní rýhy (Podhrázká a Dufková, 2005).

Vyhodnocení: Simulační model EUROSEM je určen pro předpověď vodní eroze na malých územích, případně na jednotlivých polích. Slouží k stanovení rizika vodní eroze a tak se může navrhnout případné opatření proti vodní erozi. Má vysokou náročnost na objem vstupních dat.

4.2.8 Model EROSION 2D/3D

Model, který počítá půdní erozi vyvolanou množstvím srážek a následně je ukládá na jednotlivé svazky (2D) a na malých povodích (3D). Tento model byl vyvinut se záměrem vytvořit snadno využitelný nástroj pro předpověď eroze půdy a pro její ochranu. Simulační model Erosion 3D byl vyvinut z verze modelu svahu Erosion 2D. Ten řešil ztrátu půdy na svahu. Model Erosion 3D je ale schopen pracovat již s celou plochou povodí. Do výpočtů je zařazena i ztráta půdy způsobená plošným i soustředným odtokem. Geometrický základ pro model Erosion 3D slouží pravidelná čtvercová síť.

S ohledem na jeho využití vyžaduje model následující požadavky.

Měl by:

- být snadno použitelný s co nejmenším počtem vstupních parametrů, jak to jen je možné
- podat platné výsledky bez kalibrace pro každou specifickou aplikaci
- fungovat na základě událostí
- být kompatibilní se s távajícím GIS

Teoretický koncept základní EROSION 2D/3D zahrnuje následující erozní procesy:

- Generování odtoku;
- Oddělení částecek dopadající dešťové kapky a odtoku
- Transport oddělených částecek odtoku
- Směrování odtoku a usazenin přes povodí
- Ukládání usazenin

Model Erosion 2D/3D je založen především na fyzikálních principech. Eroze je omezena buď množstvím sedimentu, nebo transportní kapacitou povrchového odtoku. Aby bylo možné transportovat oddělené částice povrchovým odtokem (Schmidt, Wemer a Michael, 1999).

Vyhodnocení: Model byl založen pro předpověď povrchového odtoku při přívalových deštích a plošné eroze na zemědělských půdách. Dále je používán pro snížení vzniku eroze a odhadu hromadění nebezpečných látek a sedimentů. Jeho aplikace vyžaduje informace

rastrového rozložení na reliéf půdy a srážkové podmínky. Má velkou náročnost na objem vstupních dat.

4.2.9 Model WEPP (Water Erosion Prediction Project)

V poslední desetiletí bylo provedeno několik studií k vytvoření modelů na základě fyziky. Jedním z nich je Předpovědní Projekt vodní eroze (WEPP) fyzicky založený distribuovaný parametr modelu vyvinutý americkým ministerstvem zemědělství. Ten má představovat základní mechanismy kontrolující vodní erozi a odhadnout území a časové rozložení ztráty půdy. Má širokou škálu použití, a tak bylo možné omezit potřebu pro rozsáhlé oblasti experimenty a kalibrace. Je prezentována jako koncepčně významné zlepšení nad USLE (Raclot a Alberger, 2006).

Projekt vyvinutý americkým ministerstvem zemědělství (USDA), který byl zahájen v USA koncem osmdesátých let s cílem zvýšit univerzálnost modelů a také nahradit empirické postupy v oblasti ochrany půdy a vodních zdrojů jednotnou metodikou na bázi simulačních modelů (Dun a kol., 1999).

WEPP je kontinuální simulační model, který je schopen předpovědět prostorové a časové rozdělení čisté ztráty půdy a ukládání pro širokou škálu časových období a prostorovém měřítku. Tento model se skládá z několika složek, kterými jsou:

- klima
- hydrologie a vodní bilance
- růst rostlin se zbytky rozkladu a zemědělské postupy
- složení půdy
- konsolidace

Zejména s ohledem na počasí, může model WEPP číst klimatická data ze dvou různých vstupních souborů: CLIGEN nebo BCDG. Infiltrace je odhadnuta prostřednictvím upraveného Green - AMP rovnice pro nestacionární srážky. Odtok je směřován přes zemský povrch na základě kinematických rovnic. Rovnovážený stav rovnice kontinuity se používá pro výpočet míry eroze. Studií o vlivu aplikací modelu WEPP je málo. Správa velkého množství dat pro aplikaci WEPP na rozvodí je značně zjednodušena technologií GIS. Příklady použití GIS se vztahují pouze na hodnocení specifických parametrů, které mají být použity jako vstupní data pro použití modelu. (Amore a kol., 2004).

Vyhodnocení: Tento kontinuální simulační model je určený spíše na malá povodí a je schopen předpovědět prostorové a časové rozdělení čisté ztráty půdy a ukládání pro širokou škálu časových období a prostorovém měřítku. Používá se pro lepší znázornění erozních procesů a má velkou náročnost vstupních dat.

4.2.10 Model SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

Je hydrologický model vyvinutý v USDA Agricultural Research Service. Jedná se o model částečně distribuovaný spolu s GIS, která vymezuje povodí a říční síť pomocí Digital Elevation Model nebo-li DEM a vypočítává denní vodní bilanci v závislosti na typu půdy, sklonu území a údajích o počasí. Tento model byl vyvinut pro velká komplexní povodí. Pro svou jednoduchost je model SWAT široce používaný nástroj vědeckou komunitou na rozhodnutí v oblasti řízení půdy, toku potoka a kvality vody, hydrologické analýzy, studie o dopadu změny klimatu, posouzení zatížení znečišťující látky atd. SWAT používá výšková pásma pro výpočet orografické srážky. Denní srážky ve výškových pásmech se odhadují přidáním konstantního množství zaznamenaných srážek v srážkoměru (Galván a kol., 2014).

Vyhodnocení: SWAT model je matematický model, který byl vyvinut pro velká povodí. Cílem tohoto modelu je posouzení erozních procesů, transport splavenin a posouzení dopadů odtokovými poměry na hospodaření zemědělců. Swat model je používán v mnoha amerických federálních agenturách jako například Environmental Protection Agency (USEPA), v amerických státních agenturách a v dalších zemích. Jedná se o doporučený nástroj pro uplatňování cílů rámcové směrnice vodní politiky EU. I přes náročnost vstupních dat je velmi používaný.

5 Aplikace teoretických poznatků v konkrétním projektu KPÚ

- Stručný popis povodí-**Seletický potok**

Hlavní vodotečí povodí je Seletický potok, který se vlévá do potoka Kozačka asi 2 km jižně od obce Pojedy. Ta se dále vlévá do řeky Mrlina poblíž pozůstatků zámku Kuncberk. Průměrná šířka toku je kolem 0,5 m. Hloubka je zhruba 30 cm. Tento potok pramení ve smíšeném lese jižně od obce Seletice, odtud pochází jeho název. Směrem po toku se k Seletickému potoku připojuje Doubravanský potok. V horní části povodí se nachází půdní typ podle TKSP je Kambizem vyluhovaná perlická a podle WRB Haplic ambisol (Calcaris,

Clayic). V dolní části se nachází půdní typ podle TKSP je hnědozemě modální a podle WRB je Haplic Luvisol. Ve prostřed povodí podle TKSP černozem luvická a podle WBR Luvic chernozem.

5.1 Metody výpočtu průměrného ročního odnosu zeminy

- Frevertova rovnice $G_1 = 10 \cdot (K' \cdot O' \cdot S' \cdot C' \cdot P' \cdot L')$

K' faktor

Rozmězí 0,75-0,90...zvoleno 0,80

O' faktor

Rozmězí 0,70-0,90...zvoleno 0,90

C'faktor 2,00

P'faktor – 0.50

L'faktor

Číslo odtokové dráhy	Délka odtokové dráhy (m)	L' -dle tabulek	I (%)	S' - dle tabulek
0	426	6,3	2	0,22
1	1084	11,4	3	0,23
2	534	7,5	2	0,22
3	217	3,80	2	0,22
4	124	2,90	5	0,25
5	387	6,2	2	0,22
6	525	7,4	3	0,23
7	236	4,10	7	0,27
8	507	7,3	2	0,22
9	436	6,8	4	0,24
10	305	5,00	3	0,23
11	257	4,30	5	0,25
12	530	7,45	3	0,23
13	223	4,00	4	0,24
14	253	4,30	2	0,22
15	557	7,59	2	0,22
16	445	6,9	3	0,23
17	317	5,20	2	0,22
18	377	6,1	2	0,22
19	268	4,50	2	0,22
20	571	7,64	2	0,22

Dosazení jednotlivých faktorů do Frevertovi rovnice:

ODTOKOVÁ DRÁHA	10.(K'.O'.S'.C'.P'.L')	G (t/ha)
0	10.(0,8.0,9.0,22.2.0,5.6,3)	9,98
1	10.(0,8.0,9.0,23.2.0,5.11,4)	18,88
2	10.(0,8.0,9.0,22.2.0,5.7,5)	11,88
3	10.(0,8.0,9.0,22.2.0,5.3,8)	6,02
4	10.(0,8.0,9.0,25.2.0,5.2,9)	5,22
5	10.(0,8.0,9.0,22.2.0,5.6,2)	9,82
6	10.(0,8.0,9.0,23.2.0,5.7,4)	12,25
7	10.(0,8.0,9.0,27.2.0,5.4,1)	7,97
8	10.(0,8.0,9.0,22.2.0,5.7,3)	11,56
9	10.(0,8.0,9.0,24.2.0,5.6,8)	11,75
10	10.(0,8.0,9.0,23.2.0,5.5,0)	8,28
11	10.(0,8.0,9.0,25.2.0,5.4,3)	7,74
12	10.(0,8.0,9.0,23.2.0,5.7,45)	12,34
13	10.(0,8.0,9.0,24.2.0,5.4,0)	6,91
14	10.(0,8.0,9.0,22.2.0,5.4,3)	6,81
15	10.(0,8.0,9.0,22.2.0,5.7,59)	12,02
16	10.(0,8.0,9.0,23.2.0,5.6,9)	11,43
17	10.(0,8.0,9.0,22.2.0,5.5,2)	8,24
18	10.(0,8.0,9.0,22.2.0,5.6,1)	9,66
19	10.(0,8.0,9.0,22.2.0,5.4,5)	7,13
20	10.(0,8.0,9.0,22.2.0,5.7,64)	12,01

- **Frevertova rovnice upravená Zdražilem $G_2= 8,24.K'.O'.S'.C'.P'.L'$**

Zdražil upravil Frevertu rovnici na tvar $G_2= 8,24.K'.O'.S'.C'.P'.L'$. Jak tato úprava ovlivnila výsledek rovnice, můžeme vidět v následující tabulce.

ODTOKOVÁ DRÁHA	8,24.K'.O'.S'.C'.P'.L'	G (t/ha)
0	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.6,3	4,11
1	8,24.0,8.0,9.0,23.2.0,5.11,4	7,78
2	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.7,5	4,89
3	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.3,8	2,48
4	8,24.0,8.0,9.0,25.2.0,5.2,9	2,15
5	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.6,2	4,05
6	8,24.0,8.0,9.0,23.2.0,5.7,4	5,05
7	8,24.0,8.0,9.0,27.2.0,5.4,1	3,28
8	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.7,3	4,76
9	8,24.0,8.0,9.0,24.2.0,5.6,8	4,84

10	8,24.0,8.0,9.0,23.2.0,5.5,0	3,41
11	8,24.0,8.0,9.0,25.2.0,5.4,3	3,19
12	8,24.0,8.0,9.0,23.2.0,5.7,45	5,08
13	8,24.0,8.0,9.0,24.2.0,5.4,0	2,85
14	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.4,3	2,81
15	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.7,59	4,95
16	8,24.0,8.0,9.0,23.2.0,5.6,9	4,71
17	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.5,2	3,39
18	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.6,1	3,98
19	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.4,5	2,94
20	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.7,64	4,99

- Frevertova rovnice upravená o faktor hnojení H na tvar

$$G_3 = 8,24.K'.O'.S'.C'.P'.L'.H'$$

Jako možnost zpřesnění výsledků Zdražil umožnil rozšířit dále tuto rovnici navíc o faktor hnojení H'. Jak vliv hnojení ovlivnil výsledek rovnice, můžeme vidět v následující tabulce.

ODTOKOVÁ DRÁHA	8,24.K'.O'.S'.C'.P'.L'.H'	G (t/ha)
0	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.6,3.0,85	6,99
1	8,24.0,8.0,9.0,23.2.0,5.11,4.0,85	13,22
2	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.7,5.0,85	7,56
3	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.3,8.0,85	3,83
4	8,24.0,8.0,9.0,25.2.0,5.2,9.0,85	3,66
5	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.6,2.0,85	6,88
6	8,24.0,8.0,9.0,23.2.0,5.7,4.0,85	8,58
7	8,24.0,8.0,9.0,27.2.0,5.4,1.0,85	5,58
8	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.7,3.0,85	8,10
9	8,24.0,8.0,9.0,24.2.0,5.6,8.0,85	8,23
10	8,24.0,8.0,9.0,23.2.0,5.5,0.0,85	5,80
11	8,24.0,8.0,9.0,25.2.0,5.4,3.0,85	5,42
12	8,24.0,8.0,9.0,23.2.0,5.7,45.0,85	8,64
13	8,24.0,8.0,9.0,24.2.0,5.4,0.0,85	4,84
14	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.4,3.0,85	4,77
15	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.7,59.0,85	8,42
16	8,24.0,8.0,9.0,23.2.0,5.6,9.0,85	8,00
17	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.5,2.0,85	5,77
18	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.6,1.0,85	6,77
19	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.4,5.0,85	4,99
20	8,24.0,8.0,9.0,22.2.0,5.7,64.0,85	8,48

- Rovnice Wischmeiera, Smithe (1978), tvar: $G_4 = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$

Osevní postup

Kukuřice setá

Ječmen jarní

Řepka ozimá

Slunečnice

Pšenice ozimá

Hodnoty faktoru L a S

Hodnoty faktorů L a S byly určeny dle tabulek. Důležitý bod pro určení L byla délka jednotlivých odtokových drah. Ty byly změřeny pomocí pravítka v programu ArcMap na vybraném povodí Seletický potok. Následně byl vypočítán sklon podle vzorečku:

$$\frac{\text{převýšení}}{\text{délka odtokové dráhy}} \cdot 100$$

a podle výsledku byl zaokrouhlen na celá čísla. Ze sklonu (I) byl následně zjištěn dle tabulek S faktor.

Číslo odtokové dráhy	Délka odtokové dráhy (m)	L-dle tabulek	I (%)	S- dle tabulek
0	426	4,28	2	0,18
1	1084	6,97	3	0,26
2	534	5,09	2	0,18
3	217	3,28	2	0,18
4	124	2,64	5	0,45
5	387	4,13	2	0,18
6	525	5,01	3	0,26
7	236	3,19	7	0,70
8	507	4,84	2	0,18
9	436	4,38	4	0,35
10	305	3,74	3	0,26
11	257	3,47	5	0,45
12	530	5,06	3	0,26
13	223	3,37	4	0,35
14	253	3,42	2	0,18
15	557	4,85	2	0,18
16	445	4,47	3	0,26
17	317	3,89	2	0,18

18	377	4,02	2	0,18
19	268	3,62	2	0,18
20	571	4,97	2	0,18

K faktor

Číslo odtokové dráhy	Číslo BPEJ	K faktor jednotlivých polí	K faktor
0	32011	0,17	0,29
	30210	0,41	
	31911	-	
	31914	-	
1	31914	-	0,51
	31010	0,51	
	31911	-	
2	35411	0,30	0,41
	32011	0,17	
3	32212	0,13	0,32
	31010	0,51	
	31911	-	
4	31911	-	0,13
	32212	0,13	
5	32011	0,17	0,17
	32054	0,17	
6	31911	-	0,51
	31010	0,51	
7	31914	-	0,51
	31010	0,51	
	31911	-	
8	32011	0,17	0,17
9	35411	0,30	0,21
	32011	0,17	
	32041	0,17	
10	32001	0,17	0,17
	32011	0,17	
11	32001	0,17	0,16
	32212	0,13	
	32011	0,17	
12	32212	0,13	0,22
	32312	-	
	35411	0,30	
13	31010	0,51	0,51
14	30501	0,41	0,41
15	32212	0,13	0,13
	36000	-	
16	30511	0,41	0,29
	32011	0,17	
17	30511	0,41	0,41
	36000	-	
	36300	-	
18	30511	0,41	0,41
	36300	-	
19	30501	0,41	0,41
20	31901	-	0,24
	35411	0,30	
	32011	0,17	

Dosažení jednotlivých hodnot faktorů do vzorce: $G_4 = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$

ODTOKOVÁ DRÁHA	R . K . L . S . C . P	G (t/ha)
0	40*0,29*4,28*0,18*0,302*1	2,699
1	40*0,51*6,97*0,18*0,302*1	7,729
2	40*0,41*5,09*0,18*0,302*1	4,538
3	40*0,32*3,28*0,18*0,302*1	2,282
4	40*0,13*2,64*0,45*0,302*1	1,866
5	40*0,17*4,13*0,18*0,302*1	1,527
6	40*0,51*5,01*0,26*0,302*1	8,025
7	40*0,51*3,19*0,70*0,302*1	13,757
8	40*0,17*4,84*0,18*0,302*1	1,789
9	40*0,21*4,38*0,35*0,302*1	3,889
10	40*0,17*3,74*0,26*0,302*1	1,997
11	40*0,16*3,47*0,45*0,302*1	3,018
12	40*0,22*5,07*0,26*0,302*1	3,503
13	40*0,51*3,37*0,35*0,302*1	7,267
14	40*0,41*3,42*0,18*0,302*1	3,049
15	40*0,13*4,85*0,18*0,302*1	1,371
16	40*0,29*4,47*0,18*0,302*1	2,819
17	40*0,41*3,89*0,18*0,302*1	3,468
18	40*0,41*4,02*0,18*0,302*1	3,584
19	40*0,41*3,62*0,18*0,302*1	3,227
20	40*0,24*4,97*0,18*0,302*1	2,594

5.2 Posouzení vhodnosti použití vybraných modelů

MODEL	VHODNOST
CREAMS	Vhodný
SWRRB	Vhodný
EPIC	Nevhodný
ANSWERS	Vhodný
AGNPS	Vhodný
SHE	Vhodný
EUROSEM	Vhodný
EROSION 2D/3D	Vhodný
WEPP	Vhodný
SWAT	Nevhodný

6 Výsledky a diskuse

G ₁	<p>Nevhodná, po dosazení hodnot do rovnice</p> $G_1 = 10 \cdot (K' \cdot O' \cdot S' \cdot C' \cdot P' \cdot L')$ <p>ani jedna odtoková dráha nesplnila podmínku G-přípustného</p>
G ₂	<p>Vhodnější, po dosazení hodnot do rovnice</p> $G_2 = 8,24 \cdot K' \cdot O' \cdot S' \cdot C' \cdot P' \cdot L'$ <p>téměř polovina odtokových drah již splňovala podmínku G-</p>
G ₃	<p>Vhodná za předpokladu, že se do rovnice $G_3 = 8,24 \cdot K' \cdot O' \cdot S' \cdot C' \cdot P' \cdot L' \cdot H'$ za faktor H' použije správné množství hnojení. Při špatně zvoleným H' se výsledky G-přípustného rapidně zhorší, jako v tomto případě, kdy po dosazení faktoru H' již G-přípustné splňovali pouze 2 odtokové dráhy</p>
G ₄	<p>Nejvhodnější</p> <p>Po dosazení hodnot do rovnice $G_4 = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$ pouze 5 odtokových drah nesplňovalo G-přípustné pro středně hluboké půdy.</p>

Rovnice G₁ se jeví jako nevhodná, neboť bylo zjištěno, že po dosazení jednotlivých faktorů nesplnila ani jedna odtoková dráha přípustný smyv půdy, který je v našem případě u středně hlubokých půd do 4t/ha za rok. Tato zjištění odpovídají výsledkům Holého (1978).

Oproti tomu se pro výpočet průměrného ročního odnosu zeminy jako vhodnější jeví rovnice G₂. Po dosazení do této rovnice splňuje danou podmínku téměř polovina odtokových drah. Jako nejvhodnější se jeví po dosazení jednotlivých faktorů rovnice G₄. Tato rovnice je zatím nejlépe upravenou rovnicí pro výpočet průměrného ročního odnosu zeminy a byla do této podoby upravena Wischmeierem a Smithem (1978). K podobným výsledkům došel v knize Základy erodologie i Janeček a kol. (2008).

Univerzální rovnice upravená naposledy podle Wischmeiera a Smithe (1978) je velmi oblíbená zejména kvůli poměrně jednoduchému získání hodnot jednotlivých faktorů do této rovnice.

Při posouzení vhodnosti vybraných modelů pro výpočet okamžitého odnosu zeminy se jako nejvhodnější jeví tyto modely: SWRRB, ANSWERS, AGNPS A SHE. Dalšími vhodnými modely mohou být i modely CREAMS, EUROSEM, EROSION 2D/3D a WEPP, ale tyto modely mají velkou náročnost na vstupní data. Modely EPIC a SWAT jsou nevhodné, neboť jsou určeny na velká povodí.

7 Závěr

Posouzení jednotlivých modelů není nijak lehké, neboť každý model má své určité specifikace. Jednotlivé modely lze použít na různě velká povodí a také mají odlišnou náročnost na objem vstupních dat.

Postupem času se snaha o nahrazení empirického základu hodnocení intenzity erozních procesů- Univerzální rovnice vyššími a lepšími metodami opravdu daří a pro modelování eroze bylo vytvořeno mnoho modelů. Některé modely se stále vytvářejí k dokonalosti, a proto jejich funkčnost není ani nijak doložená.

Vytváření nových modelů je více méně podporováno znalostmi v oborech, které zkoumají vztahy působící na erozi. Nemalý podíl na vznik nových modelů má i velký rozvoj výpočetní techniky GIS. V protierozní ochraně je důležité neposuzovat pouze erozi ve vztahu k půdě, ale je důležité přihlížet i k dalším dopadům. Proto je důležitý postupný vznik simulačních modelů erozních procesů. Tyto modely řeší jednotlivé erozní jevy jako je eroze půdy, povrchový odtok a transport látek na základě fyzikálních popisů jednotlivých procesů. Jednotlivé modely v této práci byly popsány a vyhodnoceny.

Je ale důležité mít na paměti, že postupný vývoj simulačních modelů erozních a transportních procesů v budoucnu přinese zdokonalování procesů a jistě i širšího uplatnění při této problematice ochrany povodí.

8 Seznam použité literatury

- 1) Agroprojekt Praha, *Protierozní ochrana zemědělských pozemků*, Typizační směrnice, 2, Praha, 1987, 129 str., Sg. B 31.338
- 2) AMORE, E. a kol., *Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins*, Journal of Hydrology, 293, 2004, 110-114 str.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169404000587#>
- 3) BARBOLINI, M. a kol., *Laboratory study of erosion processes in snow avalanches*, Cold Regions Science and Technology, 2005, 1-9 str.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165232X05000807>
- 4) BENNET, H.H., *Soil conservation*, New York – London, 1939, ISBN není uvedeno
- 5) BISSONNAIS, Y.L. a kol., *Mapping erosion risk for cultivated soil in France*, Catena, 2002, 207-220 str.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816201001679>
- 6) DUN, S. a kol., *Adapting the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model for forest applications*, Journal of Hydrology, 366, 2009, 46–54 str.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002216940800615X#>
- 7) GALVÁN, L. a kol., *Rainfall estimation in SWAT: An alternative method to simulate orographic precipitation*, Journal of Hydrology, 509, 2014, 257–265 str.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169413008688>
- 8) HOLÝ, M., *Protierozní ochrana*, Nakladatelství technické literatury, Praha, 1978, 12-60. str., Sg. C 215.329
- 9) HOVORKA, V., a kol., *Projektová příprava protierozních opatření*, Výzkumný ústav pro zúrodnění zemědělských půd, Praha, 1990, 28 str., Sg. C 268.552
- 10) JANEČEK, M. a kol., *Základy erodologie*, Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008, 172 s., ISBN 987-802131842-7
- 11) JANEČEK, M., a kol., *Ochrana zemědělské půdy před erozí*, Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., 2007, 76 str., ISBN 987-80-254-0973-2
- 12) KINNELL, P.I.A., *Slope length factor for applying the USLE-M to erosion in grid cells*, Soil & Tillage Research 58, 2001, 11-17 str.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198700001793#>

- 13) KOKOLIA, V., Kos, M., Raszka, P., *Protierozní osevní postupy*, Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství, Praha, 1989, 32 str., Sg. C 265.250
- 14) LI, S., a kol., *Tillage and water erosion on different landscapes in the northern North American Great Plains evaluated using ¹³⁷Cs technique and soil erosion models*, Catena, 2007, 493-505 str.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816207000033>
- 15) MUSGRAVE, G.W., *The Quantitative Evaluation of Factors in Water Erosion*, A First Approximation. J. of Soil and Conservation, 1947, 133-138 str., ISBN není uvedeno
- 16) NONDEDEU, F.I., Bédécarrats, A., *Influence of alpine plants growing on steep slopes on sediment trapping and transport by runoff*, Catena, 71, 2007, 330–339 str.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816207000343>
- 17) PASÁK, V., Šabata, M., Dýrová, E., Macoun, S., *Ochrana zemědělské půdy proti erozi*, Ústav vědeckotechnických informací, Brno, 1974, 40str., Sg. C 95.204
- 18) PODHRÁZSKÁ, J., Dufková, J., *Protierozní ochrana půdy*, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, 2005, 95 str., ISBN 80-7157-856-8, Sg. S 31.673
- 19) RACLOT, D., Albergel, J., *Runoff and water erosion modelling using WEPP on a Mediterranean cultivated catchment*, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2006, 1038–1047 str.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706506001768>
- 20) SMITH, D.D., *Interpretation of Soil Conservation Data for Field Use*, Agr. Eng., 1941, 422-425 str.
- 21) SCHMIT, J., , Werner, M.v., Michael, A., *Application of the EROSION 3D model to the CATSOP watershed*, The Netherlands, Catena, 37, 1999, 449–456 str.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816299000326#>
- 22) SKLENIČKA, P., *Základy krajinného plánování*, Praha, Naděžda Skleničková, 2003, 321 str., ISBN 80-903206-1-9, Sg. C 313.295
- 23) TISDALL, J.M., a kol., *Stabilisation of soil against wind erosion by six saprotrophic fungi*, Soil Biology & Biochemistry, 50, 2012, 134-141 str.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071712001009#>

- 24) TOMAN, F., *Pozemkové úpravy*, Brno : Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1995, 142 str., ISBN 80-7157-148-2, Sg. S 23.184
- 25) VRIELING, A., *Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review*, CATENA, 2006, 2-18 str.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816205002031>
- 26) WISCHMEIER, W. H., SMITH, D. D.: *Predicting Rainfall Erosion Losses*, U.S. Dept. Of Agriculture, Washington DC, 1978.
- 27) ZDRAŽIL, K., *Ekonomické hodnocení protierozní ochrany*, ÚVTI MZLVH, Praha, 1965, ISBN není uvedeno
- 28) ZHANG, H. a kol., *Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor*, Computers & Geosciences, 52, 2013, 177–188 str.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300412003378>
- 29) ZINGG, A.W., *Degree and Length of Land Slope as it Affects Soil Loss in Runoff*, Agr., Eng., 1940, 59-64 str.

9 Seznam použitých obrázků

Obr. č. 2 Nomogram pro stanovení hodnoty K, FSV ČVUT, 2004