

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH  
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

Studijní program: B4106 Zemědělská specializace  
Studijní obor: Pozemkové úpravy a převody nemovitostí  
Katedra: Krajinového managementu

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

POROVNÁNÍ METOD VÝPOČTU VODNÍ EROZE

Autor: Tomáš Murčo

Vedoucí bakalářské práce:  
Ing. Pavel Ondr, CSc.

České Budějovice, duben 2011

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH  
Zemědělská fakulta  
Akademický rok: 2009/2010

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Tomáš MURČO  
Osobní číslo: Z08635  
Studijní program: B4106 Zemědělská specializace  
Studijní obor: Pozemkové úpravy a převody nemovitostí  
Název tématu: Porovnání metod výpočtu vodní eroze  
Zadávací katedra: Katedra krajinného managementu

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

Práce je řešeršního charakteru posuzující teoretické podklady pro stanovení hodnot vodní eroze.

Vyhodnotit literární prameny řešící možné modely výpočtů vodní eroze.

Popsat jednotlivé parametry výpočetních metod vodní eroze.

Vyhodnotit softwarové produkty DELTA a SWAT řešící výpočty erozního smyvu.

Vyhodnotit klimatické změny a jejich vliv na erozní transporty.

---

Rozsah grafických prací: dle potřeby  
Rozsah pracovní zprávy: 40 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


- Forman, R.T., Godron, M.: Landscape ecology. J.Wily and sons, New York, 1986  
Sklenička, P.: Základy krajinného plánování. Naděžda Skleničková, Praha, 2003  
Dumbrovský, M.: Metodický návod pro pozemkové úpravy a související informace. VÚMP Praha, 2000  
Holý, M.: Protierozní ochrana. SNTL, Praha, 1978  
Janeček, M.: Základy erodologie. ČZU Praha, Praha, 2008  
Časopis Soil and Water

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

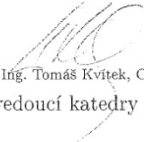
Datum zadání bakalářské práce: 15. března 2010

Termín odevzdání bakalářské práce: 15. dubna 2011

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

  
prof. Ing. Miloslav Šoch, CSc.  
děkan

L.S.

  
prof. Ing. Tomáš Kvítek, CSc.  
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 15. března 2010

Prohlášení:

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Porovnání metod výpočtu vodní eroze“ jsem vypracoval samostatně, na základě literatury a přiložených podkladů uvedených v seznamu citované literatury. Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě (v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Zemědělskou fakultou JU) elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Lišově, dne 15. dubna 2011

.....

Tomáš Murčo

Poděkování:

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Ondrovi, CSc. za odborné připomínky k danému tématu a cenné rady v průběhu tvorby bakalářské práce.

#### ABSTRACT:

Tato bakalářská práce se zabývá porovnáním metod výpočtu vodní eroze. Cílem je shrnutí dostupných poznatků, týkajících se problematiky vodní eroze. Jsou zde uvedeny vybrané metody jak pro výpočet průměrného ročního odnosu zemin, tak vybrané modely pro výpočet okamžitého odnosu zemin. Dále jsou zde uvedena možná protierozní opatření, díky kterým je možné účinek eroze alespoň zpomalit, nikoli úplně zastavit.

Klíčová slova: eroze, opatření, predikce, metoda, model

#### ABSTRACT:

This bachelor thesis presents a comparison of methods for calculating water erosion. The aim is to summarize available evidence concerning the problems of water erosion. There are presented some methods how to calculate average annual erosion of soils, and selected models for calculating the erosion immediately. There are also listed possible erosion control measures through which we can at least slow the effects of erosion, rather than stop completely.

Key words: erosion, measure, prediction, method, model

# OBSAH

<b>1 Úvod</b> .....	8
<b>2 Literární přehled</b> .....	9
2.1 Druhy půdní eroze.....	9
2.2 Vodní eroze.....	9
2.3 Příčiny vodní eroze .....	11
2.4 Protierozní opatření.....	12
2.4.1 Organizační opatření.....	12
2.4.1 Agrotechnická opatření.....	14
2.4.1 Biotechnická opatření.....	16
<b>3 Cíl práce</b> .....	20
<b>4 Metody výpočtu průměrného ročního odnosu zemin</b> .....	21
4.1 Metoda USLE (Universal Soil Loss Equation) Univerzální rovnice Wischmeier - Smith.....	21
4.2 Metoda RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation).....	28
4.2.1 Rozdíl mezi USLE a RUSLE.....	29
<b>5 Metody výpočtu okamžitého odnosu zemin</b> .....	30
5.1 Model SWAT (Soil and Water Assessment Tool).....	32
5.2 Model AGNPS (Agricultural Non-Point Source Pollution Model) .....	33
5.3 Model SMODERP (Simulační Model Odtoku a Erozního Procesu) .....	34
5.4 Model EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator).....	36
5.5 Model CREAMS (Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems).....	36
5.6 Model EROSION 2D / 3D.....	37
5.7 Model EUROSEM (EUROpean Soil Erosion Model).....	39
5.8 Model WEPP (Water Erosion Prediction Project).....	40
<b>6 Závěr</b> .....	41
<b>7 Seznam použité literatury</b> .....	42

# 1 Úvod

Půda jako jeden z hlavních zdrojů biosféry je omezený a nenahraditelný přírodní zdroj. Intenzivní využívání půdy pro zemědělskou výrobu a velkoplošné odlesňování porušilo postupně přirozený kryt půdy a vystavilo její povrch působení erozivních sil. Rozvinula se eroze, spočívající v destrukčním účinku vody a větru na půdní povrch. Eroze vede ke ztrátě nejurodnější vrstvy půdy, jejíž nahrazení trvá stovky let. V mnoha zemích světa (hlavně v těch se vzrůstající populací) se půdní eroze stává nejen jedním z největších ekologických ale i ekonomických problémů. Nedostatek orné půdy způsobuje i nedostatek potravin a tím i ekonomické problémy země. Problém eroze zemědělsky využívaných půd je problémem celosvětovým, který má za následek každoroční úbytek tisíců km<sup>2</sup> zemědělské půdy. Na celém světě je každoročně postihováno erozí asi 24 miliard tun ornice.

Půdní eroze způsobená činností vody, větru a ledovců je třífázový proces. První fází je uvolňování částic z půdní hmoty, druhou je jejich transport uvedenými činiteli. Třetí fází je ukládání materiálu, k němuž dochází tehdy, není-li k dispozici dostatek energie, jež by částice dále transportovala. Činnost vody, větru a ledovců, jež v přirozených podmínkách probíhala zvolna, se v intenzivně využívané krajině výrazně zrychlila a přinesla pro společnost řadu nepříznivých důsledků. Při normální erozi nedochází k porušení přírodní rovnováhy a ztráta půdních částic je doplňována tvorbou nových částic z půdního podkladu. Při zrychlené erozi je porušena přírodní rovnováha a dochází k takovému smyvu půdních částic a živin, že nemohou být nahrazeny půdotvorným procesem.

Eroze je jev, se kterým se setkáváme velmi často. Je-li její intenzita mírná, nezpůsobuje žádné velké škody. Je-li eroze silná, je výsledkem snížení hloubky úrodné půdy na pozemku, snížení obsahu živin a humusu, poškození rostlin, dále zanášení příkopů, vodních toků a nádrží, poškození komunikací a budov a další škody. Určit intenzitu nebo stupeň eroze je velmi důležité proto, aby bylo možné ji mírnit a předcházet škodám způsobovaným erozí. Pro snížení eroze se navrhuje a aplikují různá protierozní opatření, která jsou charakteru technického, biotechnického, agrotechnického a organizačního. Aby navržená opatření byla funkční, je nutné předem znát místa, kde se eroze projevuje a určit její množství. Pro



určování množství eroze a míst, kde se vyskytuje, se používají různé empirické nebo matematické modely.

## 2 Literární přehled

### 2.1 Druhy půdní eroze

Podle činitele, který způsobuje vznik a působí na průběh erozních procesů, rozeznáváme:

- erozi vodní,
- erozi ledovcovou,
- erozi sněhovou,
- erozi větrnou,
- erozi zemní,
- erozi antropogenní (Holý, 1994).

### 2.2 Vodní eroze

Vodní eroze je vyvolána mechanickou silou povrchově tekoucí vody, která splachuje, vymílá a odnáší svrchní, nejvíce úrodnou vrstvu půdy. Podzemní voda způsobuje sesuvy půdy, které jsou doprovázeny jevem eroze. Vodní eroze se projevuje prudkými povrchovými odtoky vyvolanými občasnými přívalovými dešti nebo náhlým táním sněhu. Při vzniku eroze a jejich účincích se nejvíce uplatňují přívalové srážky o vysoké intenzitě a krátké době trvání. Velké nebezpečí představují zejména prudké přívalové deště s úhrnem srážek nad 20 mm, které mohou mít za následek i katastrofální erozní účinky. Z těchto srážek působí erozivně voda, která odtéká jako povrchový odtok. Ten se tvoří různě podle povahy dešťů. Nejnebezpečnější je povrchový odtok z krátkodobých prudkých přívalů, stékající po silně sklonité a ulehle ploše, zejména na devastovaných horských svazích. V našich podmínkách působí vodní eroze nejintenzivněji na jaře a v létě, méně intenzivně na podzim a v létě. Smyvem a vymíláním nejvíce trpí pole oraná až na jaře a půdy chráněné slabým porostem. Podle účinku se rozlišují v zásadě čtyři stupně vodní eroze:

*1) Eroze plošná* – Je možno tento jev charakterizovat jako rozrušování a transport půdní hmoty na celé ploše erodovaného území. Prvním stupněm plošné

eroze je selektivní eroze, při které povrchový odtok odnáší nejjemnější půdní částice a spolu s nimi i chemické a organické látky. Erodivané půdy se tak stávají hrubozrnnější, s výrazně nižším obsahem živin a humusu. To má za následek snížení úrodnosti půdy. Selektivní eroze je o to nebezpečnější, že na povrchu půdy nezanechává viditelné stopy, a že ji lze spolehlivě dokázat jen zrnitostním a chemickým rozbořem. Dalším projevem plošné eroze může být za určitých podmínek (střídání málo odolných a odolných vrstev v půdním profilu) vrstevná eroze, při které voda odnáší půdní hmotu po vrstvách. Obvykle způsobuje ztrátu celé orníční vrstvy. Vyskytuje se zejména v případech přívalových dešťů, po plošných záplavách a někdy i při nesprávném zavlažování zemědělské půdy.

2) Eroze rýhová - Při déle trvajících srážkách a na dlouhých svazích se povrchově odtékající voda postupně soustředí a v půdním povrchu vytváří hustou síť úzkých zářezů (rýh), ve kterých transportuje rozrušené půdní částice. Tento stupeň plošné eroze se označuje termínem rýhová eroze. Při zvyšování objemu a rychlosti povrchově odtékající vody se rýhy spojují, přičemž vzniká řidší síť mělkých, ale širších zářezů v půdním povrchu - síť brázd. Tento stupeň eroze se označuje termínem brázdová eroze. Při rýhové a brázdové erozi se vytvářejí zářezy v půdním povrchu značných rozměrů, nelze je tedy zahladit běžnou agrotechnickou operací např. orbou. Nápravné zásahy je možno zařadit již do prací rekultivačního charakteru. Poškození půdy je značné, stále se ale provádějí opatření na zachování zemědělské půdy.

3) Eroze výmolová (stržová) – vzniká postupným soustředěním povrchově stékající vody, která vyrývá v půdním povrchu mělké zářezy, a ty se postupně prohlubují. Prvním stádiem je eroze rýžková, při které vznikají v půdním povrchu drobné úzké zářezy, a eroze brázdová, která se vyznačuje mělkými širšími zářezy. Bývají označovány jako nejvyšší stádium plošné eroze, protože postihují velkou část povrchu svahu. Z rýžek a brázd vznikají soustředěným odtokem hlubší rýhy, které se směrem po svahu postupně prohlubují. Jedná se o erozi rýhovou. Ta přechází v erozi výmolovou a ta v nebezpečnou, území devastující erozi stržovou.

4) Eroze proudová (bystřinná a říční) – probíhá ve vodních tocích působením vodního proudu. Je-li rozrušováno dno toku, jedná se o erozi dnovou. Jsou-li rozrušovány břehy, jde o erozi břehovou (Cáblík, Jůva, 1963).

## 2.3 Příčiny vodní eroze

Vznik, průběh a intenzita erozního procesu je ovlivněna kombinovaným působením řady přírodních a člověkem ovlivněných podmínek. Tyto tzv. faktory eroze lze rozdělit na:

### Klimatické a hydrologické

- zeměpisná poloha
- nadmořská výška
- množství, rozdělení a intenzita srážek
- teplota, oslunění, výpar, odtok
- výskyt, směr a síla větrů

### Morfologické

- sklon území
- délka a tvar svahu
- expozice, návětrnost

### Geologické a půdní

- povaha horninového substrátu
- půdní druh a typ
- textura struktura půdy, její vlhkost a zvrstvení, obsah humusu

### Vegetační

- hustota a délka trvání pokryvu

### Způsob využívání a obhospodařování půdy

- poloha a tvar pozemků
- směr obdělávání
- střídání plodin (Janeček, a kol., 2008)

## 2.4 Protierozní opatření

Zemědělskou půdu na svazích je třeba chránit před vodní erozí vhodnými protierozními opatřeními. O použití jednotlivých způsobů ochrany rozhoduje jejich účinnost, požadované snížení smyvu půdy a nutná ochrana objektů (vodních zdrojů, toků a nádrží, intravilánů měst a obcí, apod.) při respektování zájmů vlastníků a uživatelů půdy, ochrany přírody, životního prostředí a tvorby krajiny (Janeček, a kol., 2002).

Ve většině případů jde o komplex organizačních, agrotechnických a technických opatření, vzájemně se doplňujících a respektujících současně základní požadavky a možnosti zemědělské výroby v nových podmínkách. Nemalou roli při volbě soustavy protierozních opatření hrají i náklady na jejich realizaci a platné legislativně – právní předpisy (Podhrázská, Dufková, 2005).

### 2.4.1 Organizační opatření

Základem jsou návrhy změn druhů pozemků a protierozní rozmístování plodin. Zásahy organizačního charakteru vycházejí především ze znalostí příčin erozních jevů a zákonitostí jejich rozvoje. Základem je situovat pozemky delší stranou ve směru vrstevnic. Vegetační kryt půdy snižuje erozní činnost na půdě.

Dělení plodin dle rozdílného stupně ochrany půdy proti vodní erozi:

- 1) plodiny s vysokým protierozním účinkem po celou dobu vegetace - travní porosty, jetelotrávy, jeteloviny
- 2) plodiny s dobrým protierozním účinkem po většinu vegetační doby - obilniny, meziplodiny, luskoviny
- 3) plodiny s nedostatečným protierozním účinkem po většinu vegetační doby - kukuřice, brambory, cukrovka (Dumbrovský, Mezera, Střítecký, 2004).

Organizační opatření:

- 1) delimitace kultur zatravněním a zalesněním (změny druhů pozemků)
- 2) protierozní osevní postup
- 3) návrh velikosti a tvaru pozemku
- 4) ochranné zatravnění

## 5) pásové střídání plodin (Holý, 1978)

### Delimitace kultur zatravněním a zalesněním:

Obvykle delimitace kultur představuje optimální rozmístění trvale travních ploch na území. Ochranné zatravnění se aplikuje na půdách s velkými sklony, kde jsou jiná protierozní opatření náročná. Optimálně zapojený travní porost je nejlepší ochranou jak pro plošné zatravnění, tak pro vegetační zpevnění liniových prvků. Kvalitní vegetační kryt s odpovídajícími parametry, který je pěstován a ošetřován na erozně ohrožených lokalitách, je nejdůležitější část tohoto opatření.

### Protierozní osevní postup:

Protierozní osevní postup je nepostradatelným řešením na erozně ohrožených pozemcích, kde nelze z organizačních a technologických důvodů uplatnit jiný způsob rozmístování protierozních plodin. Protierozní uspořádání pozemků a plodin v osevních postupech využívá především protierozně ochranných účinků plodin. Jsou to opatření organizační, nenákladná, upravující zejména organizaci a strukturu plodin. Uvedených skutečností se využívá při protierozním rozmístění pěstovaných plodin na svazích.

### Návrh velikosti a tvaru pozemku:

Účelné přerozdělení a nové uspořádání pozemků zemědělské půdy je podstatou každých pozemkových úprav - bez ohledu na to, o jaký stupeň jejich vývoje se jedná a bez ohledu na stát, ve kterém se provádějí. Jedná-li se o vývojový stupeň, který naší terminologií označujeme jako komplexní pozemkové úpravy, pak nové rozdělení pozemků je jedním z celé řady dalších opatření; jedná-li se v našem slova smyslu o jednoduché pozemkové úpravy je nové vyčlenění pozemků v podstatě jejich jedinou náplní. V našich podmínkách se při jednoduchých pozemkových úpravách nové pozemky navrhují většinou v rámci stávajících ucelených bloků zemědělské půdy. V případě komplexních pozemkových úprav budou bloky zemědělské půdy připadající k rozdělení na nové pozemky v řadě případů nově vytvořeny. To proto, že dojde k reorganizaci cestní sítě; vytvoří se nový systém protierozní ochrany, ekologické stability atd. O každém takto vymezeném bloku se předpokládá, že bude dopravně přístupný, erozně chráněný a ekologicky únosný.

Vyplývá z toho, že v různých podmínkách budou mít tyto bloky různou velikost a podle okolností se může celý blok stát jedním samostatným pozemkem nebo bude rozdělen na několik pozemků vlastnických.

#### Ochranné zatravnění:

Ochranné zatravnění se aplikuje na orné půdě větších sklonů. Optimálně zapojený travní porost je nejlepší ochranou jak pro plošné zatravnění, tak pro vegetační zpevnění liniových prvků. Kvalitní vegetační kryt s odpovídajícími parametry, který je pěstován a ošetřován na erozně ohrožených lokalitách, je nejdůležitější část tohoto opatření, přičemž jsou preferovány trávy výběžkaté tvořící pevný drn (zejména u protierozních opatření liniového charakteru).

#### Pásové střídání plodin:

Pásové střídání plodin sleduje snížení erozního účinku vložением různě širokých pásů s plodinami erozně méně ohroženými (travní porost, vojtěška, jetel, příp. obilovina) na pozemek s pěstovanou erozně ohroženou plodinou.

### **2.4.2 Agrotechnická opatření**

Erozi ohrožená orná půda by neměla zůstat bez dostatečného vegetačního krytu, anebo alespoň bez krytu z posklizňových zbytků (strniště), zejména v období častého výskytu přívalových dešťů (od poloviny května do počátku září). V první třetině tohoto období mají nedostatečnou pokrývnost okopaniny, zvláště kukuřice. V tomto období přívalových dešťů lze ornou půdu výrazně ohroženou erozí chránit osevními postupy bez těchto plodin. Při pěstování kukuřice lze její ochranný účinek podstatně zvýšit přímým výsevem do hrubé brázdy a bezorebným výsevem do strniště.

V poslední třetině období přívalových dešťů jsou zvláště intenzivně postihována erozí pole připravená k setí a osetá letními meziplojinami a ozimou

řepkou. Východiskem je letní bezorebné setí meziplodin a ozimé řepky, které se při dostatečné PEO výnosově vyrovnává tradičnímu setí do zorané půdy.

Vlastní protierozní agrotechnika, tj. způsob obdělávání zemědělské půdy, v první řadě směr orby, setí a všechny ostatní kultivační i sklizňové operace by měly být vždy prováděny, pokud to sklon a systém mechanizačních prostředků dovolí, ve směru vrstevnic nebo nejvýše s malým odklonem od tohoto směru. Agrotechnická opatření využívají znalost erozních procesů u běžně pěstovaných plodin a snaží se zabránit erozní činnosti předběžným nebo dalším zpracováním orné půdy. Mohou se použít i tam, kde nelze z jakýchkoliv důvodů použít jiné protierozní opatření. Agrotechnická opatření mohou být (stejně jako opatření organizační) předepsána nebo doporučena, ale jejich dodržování respektive používání je plně závislé na organizacích nebo jednotlivcích, kteří plochy obhospodařují.

Mezi agrotechnická opatření řadíme:

- 1) výsev do ochranné plodiny nebo do strniště
- 2) protierozní agrotechnologie
- 3) hrázkování a důlkování povrchu půdy
- 4) zatravnění nebo krátkodobé porosty v meziřadí
- 5) mulčování (Janeček, 2007)

#### Výsev do ochranné plodiny nebo do strniště:

Technologie výsevu plodin do ochranné plodiny, strniště, mulče či posklizňových zbytků je často spojena s omezeným zpracováním půdy. K protierozní ochraně se využívá rostlinného materiálu v různých formách, který je ponechán na povrchu půdy nebo je částečně zapraven a zabraňuje tak volnému povrchovému odtoku.

#### Protierozní agrotechnologie:

Účelem zatravnění meziřadí v sadech, vinicích a chmelnicích erozně ohrožených, je zajištění vegetačního krytu půdy plodinou s vysokým protierozním účinkem.

#### Hrázkování a důlkování povrchu půdy:

Účelem hrázkování meziřadí a důlkování povrchu půdy je zabránění vzniku povrchového odtoku vytvořením dostatečných prostor pro spadlé srážky přímo na pozemku. Obě technologie se realizují speciálními stroji - hrázkovačem nebo důlkovačem.

#### Zatravnění nebo krátkodobé porosty v meziřadí:

Porost podkultury ve výsadbách speciálních kultur snižuje vodní erozi podobně jako zatravnění, avšak s nižší účinností. Pěstování podkultury je možno aplikovat u všech meziřadí nebo pouze u některých meziřadí s přihlédnutím ke směru výsadby.

#### Mulčování:

Mulčování (nastýlání) půdy ve vinicích a sadech spočívá v zajištění nastýlky organické hmoty v tloušťce 10 - 20 cm. Při dočasném nastýlání se dává vrstva 10 - 15 cm po ukončení jarních prací a na podzim se zaorá. Trvalé nastýlání spočívá v přidávání organické hmoty tak, aby její výška zabránila prorůstání plevelů, tj. asi 20 cm.

### **2.4.3 Biotechnická opatření**

Při řešení protierozní ochrany v určitém povodí nejsou samostatně použita agrotechnická a organizační opatření schopna ve většině případů podstatně omezit povrchový odtok. Proto je nezbytné rozdělit svažité, plošně značně rozsáhlé pozemky s neúměrnou délkou svahu, protierozními opatřeními (zejména liniového charakteru) a spolu s realizací nových svodných prvků (upravené a zatravněné dráhy soustředěného povrchového odtoku) vytvořit v povodí odpovídající síť nových hydrolinií.

Technické prvky (v případě doplnění liniových prvků doprovodnou zelení mají charakter prvků biotechnických) však není možno navrhnout izolovaně, pouze dle výpočtu limitní šířky pásu (znemožňovalo by to vůbec zemědělskou činnost v často sklonitém, vertikálně a horizontálně členitém území České republiky). Biotechnická opatření se v řešeném území navrhuje jako základní prvek komplexního



systemu ochranných opatření, který byl doplněn prvky organizačními a agrotechnickými.

Biotechnické liniové prvky protierozní ochrany jsou trvalou překážkou přerušující délkou a napomáhající rozptýlení povrchového odtoku. Jsou navrhovány tak, aby svou lokalizací usměrňovaly směr obdělávání pozemků a způsob hospodaření zemědělských subjektů. Vedle základní funkce - protierozní - mají spolu s doprovodnou dřevinnou zelení na nich rostoucí velký význam i z hlediska krajinně estetického a ekologického. Systém liniových protierozních prvků v kombinaci se zelení může fungovat v krajině i jako nezbytná součást lokálních biokoridorů a tvořit tak základ územních systémů ekologické stability krajiny.

#### Celková ochrana povodí sleduje tři základní cíle:

- chránit půdu před účinky dopadajících kapek deště
- co nejvíce podpořit vsakování vody do půdy
- omezit možnost, aby se odtok soustřeďoval do stružek, tzn. podpořit jeho rozptylování
- zpomalovat a neškodně odvádět povrchový odtok tak, aby nenabyl unášecí síly schopné odnášet zeminu

Mezi základní biotechnická opatření patří:

- 1) protierozní průlehy
- 2) protierozní meze
- 3) zasakovací pásy
- 4) protierozní nádrže
- 5) protierozní příkopy
- 6) terasování (Dumbrovský, Mezera, Střítecký, 2004).

#### Protierozní průleh:

Průleh je mělký, široký příkop s mírným sklonem svahů, kde se povrchově stékající voda zachycuje a je neškodně odváděna. V průběhu erozně nebezpečných dešťů stéká voda se splaveninami po pozemku. Na zasakovacím sedimentačním pásu intenzívně zasakuje a dochází k usazování splavenin. Intenzivní zasakování a

usazování splavenin je způsobeno snížením sklonu pozemku těsně nad mezí a drsnostním účinkem travního porostu. Nevsáknutý zbytek vody odtéká do svodného průlehu, který je součástí zatravněné údolnice.

#### Protierozní mez:

Meze byly a jsou významným technickým protierozním opatřením. Svoji funkci plní pouze v případě, že jsou situovány téměř ve směru vrstevnic, ale s mírným sklonem a doplněny hydrotechnickými prvky. Jejich protierozní účinek spočívá především v ovlivnění směru obdělávání pozemku po vrstevnici, v možnosti pásového střídání plodin a v mírném snížení sklonu svahu. Meze se vytvářejí postupně orbou a je vhodné je doplnit naoráním mělkého průlehu nad mezí.

#### Zasakovací pás:

Zasakovací pásy navrhované v šířce cca 50 m jako doplněk protierozních průlehů jsou účinné liniové prvky protierozní ochrany, které jsou investičně málo náročné. Zasakovací pásy travní (mohou být dále křovinné, popř. lesní) se navrhují jak na svažitéch pozemcích v mírném odklonu od vrstevnic, tak podél suché ochranné nádrže za účelem omezení vnikání erozního smyvu do nádrže. Záchytná účinnost pásů je závislá na charakteru vegetačního krytu, půdě, vlhkosti půdy, sklonu svahu, šířce pásů a intenzitě přívalového deště. Účinnost těchto pásů je zvýšena spojením s dalšími technickými protierozními opatřeními, jako průlehy. Účinnost zasakovacích pásů spočívá v převedení povrchově odtékající vody, zejména vody přitékající z výše ležících pozemků, v odtok podpovrchový.

#### Protierozní nádrže:

Ochranné nádrže se navrhují jako účinná protierozní a protipovodňová opatření k akumulaci, retenci, retardaci a infiltraci povrchového odtoku a k usazování splavenin. Navrhují se nejčastěji ve formě závěrečných prvků protierozní a protipovodňové ochrany v kombinaci s jinými prvky protipovodňové ochrany nejčastěji v systému společných zařízení, kdy dojde k optimálnímu vyřešení vlastnických vztahů, jako jsou:

- a) suché ochranné protierozní nádrže (poldry), které slouží ke krátkodobému zachycení povrchového odtoku a k zachycení splavenin
- b) ochranné nádrže s vodním obsahem a vymezeným sedimentačním a retenčním prostorem.

Ke snížení zvýšeného povrchového odtoku, k omezení záplav níže ležícího území, zejména obcí a zachycení transportovaných splavenin slouží sedimentační nádrže, zejména suché. Jednou ze základních podmínek pro návrh a realizaci ochranné nádrže jsou vhodné geomorfologické a geologické podmínky v území pro zřízení hráze a vytvoření akumulacího prostoru nádrže. Návrh protipovodňové ochranné nádrže, která může být průtočná nebo boční, musí vycházet z komplexního posouzení hydrologických morfologických a geologických poměrů. Naplněním ochranného prostoru nádrže lze dosáhnout zmenšení aktuálního průtočného množství a tím i odtoku povodňového průtoku při nižších výškách hladiny vody. Odtok se tak rozloží do delšího časového intervalu oproti přirozenému stavu.

Skutečný účinek pro konkrétní povodeň závisí na tom, v jaké fázi povodně dojde k naplnění ochranného prostoru nádrže a jaké jsou možnosti využití neovladatelného ochranného prostoru (nad úroveň bezpečnostního přelivu). Pro zajištění maximálního účinku retenčních nádrží je třeba zajistit, aby se ochranný prostor naplňoval až v období kulminující povodňové vlny. Jeho předčasné naplnění v období nástupu povodně může retenční účinek na průtok pod nádrží výrazně omezit. Pro správnou funkci a zajištění největšího účinku je proto nezbytné navrhnout správný poměr kapacity spodních výpustí u průtočné nádrže ve vztahu k očekávanému přítoku za povodní, nebo zajistit řízené plnění a prázdnění suché nádrže.

#### Protierozní příkopy:

Příkop z pohledu protierozního opatření je menší umělé otevřené koryto sloužící dočasně k zadržení i odvádění povrchové vody i smyté půdy. Základním cílem návrhu a realizace protierozních příkopů je vyřešit neškodné odvedení vody při ochraně intravilánů, ochranných pásem či jiných významných území a objektů a zamezit přítoku cizí vody na pozemek. K zachycení přítoku vnější cizí vody na pozemek, k zachycení povrchové vody uvnitř pozemku a k neškodnému odvedení

přebytečné vody ze zájmového území se užívají především záchytné a svodné protierozní příkopy. Musí být vždy napojeny na stálou hydrografickou síť v povodí.

#### Terasování:

Terasování je protierozní opatření na svahových pozemcích sloužící ke zmenšení jejich velkého sklonu terénními stupni, k rozdělení svahu na úseky, aby povrchový odtok nedosáhl nebezpečného erozního účinku a ke zlepšení využití mechanizace. Terasování umožňuje využívat pozemky, které pro velký sklon a členitost by nebylo možno současnými formami zemědělské výroby jinak efektivně využívat. Terasy jsou vždy značným zásahem do geologie, geomorfologie, pedologie i biologie krajiny a mohou narušit přirozené ekologické mechanismy, jejichž rozsah lze i dnes těžko předvídat. Z tohoto důvodu nutno brát terasy jako krajní protierozní řešení, až když jsou vyčerpány možnosti z hlediska krajiny méně drastické, jako jsou opatření agrotechnická, organizační a vegetační.

### **3 Cíl práce**

Cílem bakalářské práce je shrnutí dostupných poznatků týkajících se problematiky vodní eroze a porovnání jednotlivých metod využívaných pro její predikci. Popsat erozní modely, které se z hlediska výpočtu dělí do dvou skupin. Empirické erozní modely, které vycházejí z analýzy a statistického vyhodnocení dlouhodobého experimentálního sledování měření v terénu a vlivu jednotlivých erozních faktorů na erozi. Jsou méně náročné na výpočet a vstupní data, ale také méně přesné. Simulační erozní modely vycházejí z fyzikálního popisu erozního procesu a matematickým způsobem řeší jeho prostorový a časový průběh, čímž odstraňují nevýhody empirických modelů. Jsou náročné na výpočet a vstupní data a je nutné využití výpočetní techniky.

## **4 Metody výpočtu průměrného ročního odnosu zemin**

### **4.1 Metoda USLE (Universal Soil Loss Equation) Univerzální rovnice Wischmeier - Smith**

Při posouzení míry ohroženosti pozemků je třeba vycházet nejen ze stavu obhospodařování půdy na jednotlivých pozemcích, ale i z posouzení většího územního celku (týkající se zejména reliéfu terénu), kam vyšetřované pozemky patří, tzn. celého povodí, případně dílčího povodí. U výpočtu metodou USLE se vychází z univerzální rovnice Wischmeier-Smith, která počítá smyv vynásobením šesti faktorů ovlivňujících hodnotu smyvu. Rovnice byla formulována pro území USA za účelem zjištění dlouhodobé průměrné ztráty půdy vodní erozí na jednotlivých pozemcích. Pozemkem se v této souvislosti myslí plocha vymezená hydrologicky relevantními prvky (rozvodí, příkopy, vodní toky,...) s nepřerušenou dráhou povrchového odtoku. Vypočítaná ztráta se porovnává s hodnotami přípustné ztráty. Toto srovnání dokáže upozornit na ty pozemky, u nichž dochází z dlouhodobého hlediska k větší ztrátě půdy, než se dokáže na daném místě vytvořit přirozenými půdotvornými procesy, tedy ke ztrátě větší, než je přípustná. Tyto pozemky je pak nutné podrobit podrobnějšímu šetření z hlediska návrhů protierozních opatření.

Je dobré zde upozornit na možné případy, kdy pamětníci a znalci místních poměrů označí za ohrožené jiné pozemky, než které byly určeny pomocí následujícího vztahu. Přestože lze považovat podobné konzultace či místní šetření za nezastupitelné, je třeba si uvědomit, že pomocí univerzální rovnice se určuje průměrná dlouhodobá ztráta půdy erozí, která může být v některých letech překročena, v jiných letech může být naopak minimální. (Wischmeier, Smith, 1978). Použitím uvedené rovnice se zjistí dlouhodobá průměrná roční ztráta půdy. Rovnici nelze použít pro kratší než roční období, tím méně pro zjištění ztrát půdy erozí z jednotlivých srážek (Toman, 1996).

V průběhu let se rovnice univerzální ztráty půdy stala standardním nástrojem pro predikci půdní eroze a to nejen v USA, ale po celém světě (Meyer, 1984).

Pro analýzu území z hlediska erozního smyvu se používá univerzální rovnice Wischmeier-Smith ve tvaru:

$$G = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

**G** = průměrná dlouhodobá ztráta půdy (t / ha / rok)

**R** = faktor erozní účinnosti deště

**K** = faktor náchylnosti půdy k erozi

**L** = faktor délky svahu

**S** = faktor sklonu svahu

**C** = faktor ochranného vlivu vegetace

**P** = faktor vlivu protierozních opatření (Dumbrovský, Mezera, Střítecký, 2004).

#### Faktor R - faktor erozní účinnosti deště:

Pro účely protierozní ochrany půdy je nutné vyšetřovat zejména výskyt, rozdělení a intenzitu srážek. Pro vznik a intenzitu erozních procesů jsou ve většině případů rozhodující přívalové srážky, které se u nás vyskytují převážně od května do konce září. Vzhledem ke stálému zdokonalování metod výpočtu smyvu půdy byl postupně upřesňován i vliv klimatických podmínek.

Stehlík (1975) při stanovení potenciální eroze hodnotí klimatické podmínky na základě četnosti tzv. intenzivních srážek o době trvání 10 - 60 minut, které stanovil podle kritéria G.Wussova. Minimální výška uvažovaných srážek  $h = 2(5T)^{0.5}$  (mm), je-li T doba trvání deště v minutách.

V univerzální rovnici pro stanovení pravděpodobného smyvu půdy používají Wischmeier a Smith (1965) k vyjádření erozního účinku dešťů tzv. dešťový faktor R. Tento faktor vymezil jako součin celkové kinetické energie deště a jeho maximální 30 minutové intenzit  $R = EI_{30}$ . Pro stanovení R byly uvažovány deště o vydatnosti větší než 12,5 mm.

Parametr  $EI_{30}$ , jehož použití se osvědčilo v USA, však není možno přijímat bez úvah pro jiné podmínky, neboť dešť o nízké intenzitě s malým průměrem kapek nepůsobí erozně do té míry, aby jej bylo účelné uvažovat (Holý, 1978).

Pro československé podmínky vyšetřoval hodnotu  $EI_{30}$  Pretl (1973), který na základě výzkumu vyloučil deště s menší intenzitou než 0,05 mm/min, jež

nevyvolávaly erozní smyvy. Faktor R vyjádřil v závislosti na průměrném ročním úhrnu srážek H (mm) rovnicí  $R = 0,058 H + 10,5$ . Podle nejnovějších údajů však průměrný roční faktor R není na našem území úměrný průměrnému ročnímu úhrnu srážek (Šabata, 1978).

$$R = E \cdot I_{30}/100$$

R = faktor erozní účinnosti deště (MJ / ha / cm / h)

E = celková kinetická energie deště ( $J \cdot m^{-2}$ )

$I_{30}$  = max. 30minutová intenzita deště (cm / h).

Hudson (1971) při stanovení dešťového faktoru vyloučil deště o intenzitách nižších než 0,4 mm/min a zavedl index  $KE > 25$ , což je násobek kinetické energie a intenzity deště s větší intenzitou jak 25 mm/h. Jak uvádí Janeček, a kol. (1992), při výpočtu faktoru R se neberou v úvahu deště o vydatnosti do 12,5 mm, oddělené od předcházejících a následných dešťů, 6-ti hodinovou či delší přestávkou, a deště, jejichž maximální intenzita nepřekročí 24 mm/h.

tab. č. 1: Průměrné roční hodnoty „R“ faktoru

Měsíc	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen
%	0,5	10	23	32	27	7	0,5

#### Faktor K - faktor náchylnosti půdy k erozi:

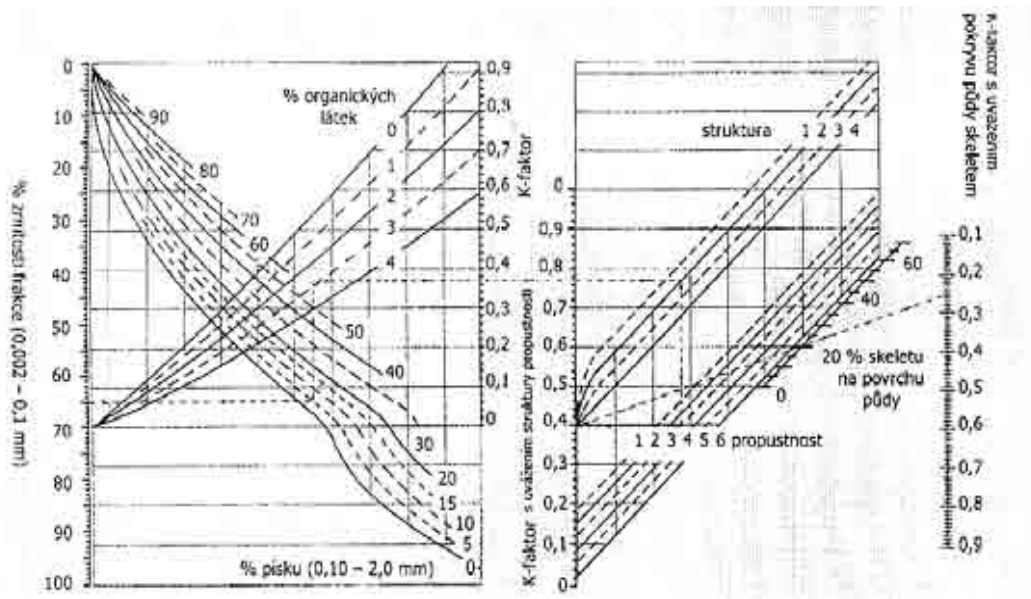
K-faktorem je vyjádřena erodovatelnost, resp. náchylnost půdy k erozi. Jeho hodnota závisí na zrnitostním složení půdy, na obsahu organických částí, na struktuře a propustnosti. Tyto půdní charakteristiky ovlivňují infiltrační schopnost půdy a odolnost půdy proti erozi z dopadajících kapek a proti erozi z povrchového odtoku. Hodnoty faktoru K lze také přímo odečíst z nomogramu. Třídy propustnosti c se vztahují na půdní profil, ostatní vstupní hodnoty platí pro ornici.

#### Třída struktury ornice:

- zrnitá - 1
- drobtovitá - 2

- hrudkovitá - 3
- deskovitá, slitá – 4

obr. č. 1: Nomogram pro odvození „K“ faktoru



Hodnotu faktoru K určenou z nomogramu je nutno převést na jednotky SI přenásobením součinitelem 1,32.

Pokud obsah prachu a práškového písku (0,002 - 0,1 mm) nepřekročí 70 %, lze faktor K určit ve vztahu:

$$100 K = 2,1 \cdot M^{1,4} \cdot 10^{-4} \cdot (12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3)$$

M = součin (% prachu + % práškového písku) x (100 - % jílu)

a = % organické hmoty

b = třída struktury ornice

c = třída propustnosti půdního profilu

Faktory L a S - faktor délky a sklonu svahu:



Vliv délky a sklonu svahu na erozi je vyjádřen topografickým faktorem LS. Závisí na délce nepřerušného svahu na pozemku a na sklonu svahu. Intenzita eroze se zvyšuje s rostoucí délkou svahu, která je definována jako horizontální vzdálenost od místa vzniku povrchového odtoku k bodu, kde se sklon svahu snižuje natolik, že začne ukládání erodovaného materiálu nebo se plošný odtok soustředí do dráhy soustředěného odtoku. Vliv sklonu a délky svahu na velikost půdního smyvu vyjádřili (Wischmeier a Smith, 1978) topografickým faktorem LS, který představuje poměr ztrát půdy na jednotku plochy svahu ke ztrátě půdy na jednotkovém pozemku o délce 22,13m se sklonem 9 %.

Obě hodnoty jsou spolu navzájem propojené a pro jejich určení se používají různé podklady. Až do nedávna to byly převážně tištěné mapy v měřítku 1 : 5 000 (SMO5) nebo 1 : 10 000 (ZM10) obsahující polohopis a výškopis, nejčastěji ve formě vrstevnic. Na mapách bylo zvoleno několik charakteristických profilů v trasách plošného povrchového odtoku a určena hodnota LS. Pro pozemek či celý svah byl potom určující profil s nejvyšší hodnotou LS. V případě proměnlivého sklonu je možné určit výslednou hodnotu sklonu váženým průměrem, nebo použít opravné hodnoty pro svahy konkávní, konvexní a kombinované (Janeček, 2002). Hodnota topografického faktoru LS pro přímé svahy se vypočítává ze vztahu:

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

$l_d$  = nepřerušná délka svahu (%)

$s$  = sklon svahu (%)

Samostatně lze stanovit hodnoty faktoru délky svahu výpočtem ze vztahu:

$$L = (l_d / 22,13)^\alpha$$

$l_d$  = nepřerušná délka svahu (m)

$\alpha$  = exponent zahrnující vliv sklonu svahu

tab. č. 2: Hodnoty exponentu  $\alpha$

Sklon v %	5	3 - 5.	1 - 3.	1
$\alpha$	0,5	0,4	0,3	0,2

Hodnoty faktoru svahu S lze vypočítat ze vztahu:

$$S = 0,43 + 0,30s + 0,043s^2 / 6,613$$

s = sklon svahu (%)

#### Faktor C - faktor ochranného vlivu vegetace:

Vliv vegetace na půdě je obsažen ve faktoru C, který se nazývá ochranný vliv vegetace. Porosty chrání povrch půdy před dopadajícími kapkami, zpomalují povrchový odtok a zlepšují půdní vlastnosti důležité z hlediska vodní eroze. Je možné říci, že čím hustší a vyšší porost se na pozemku nachází, zejména v období nejčastějšího výskytu přívalu dešťů od dubna do října, tím účinnější je ochrana půdy. Mezi plodiny nejméně chránící patří širokořádkové plodiny jako je kukuřice a okopaniny, v pořadí další je řepka, obilniny jarní a ozimé. Nejvyšší ochranu poskytují pícniny a travní porosty. Celý rok je pro každou plodinu rozdělen do pěti období v závislosti na stavu pozemku a porostu a pro tato období je dána dílčí hodnota faktoru C.

1. období podmítky 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 ozimu do 30. 4.
4. období od konce 3. období do sklizně
5. období strniště (Wischmeier a Smith, 1978)

Podle agrotechnických termínů v určité lokalitě se z těchto dílčích hodnot určí průměrná hodnota faktoru C pro danou plodinu a podle osevního postupu je možné určit i průměrnou dlouhodobou hodnotu pro období několika let.

#### Faktor P - faktor vlivu protierozních opatření:

Pokud jsou na pozemku na svahu aplikována některá protierozní opatření, jako je vrstevnicové obdělávání, pásové střídání plodin, hrázkování či terasování, je

možné jejich vliv zahrnout do výpočtu. Jinak se v obecných případech volí rovna jedné.

tab. č. 3: Přípustná ztráta půdy vodní erozí

<b>Hloubka půdy</b>		<b>G – přípustné</b> [t / ha / rok ]
Půdy mělké	0-30 cm	1
Půdy středně hluboké	30-60 cm	4
Půdy hluboké	nad 60 cm	10

Je-li vypočtená průměrná ztráta půdy větší než přípustná, je nutno na pozemku zajistit protierozní ochranu (Sklenička, 2003).

## 4.2 Metoda RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)

Na základě zkušeností s používáním tzv. univerzální rovnice ztráty půdy, 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 nazvána „Revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy (RUSLE).

RUSLE se stejně jako USLE používá pro predikci dlouhodobé průměrné roční ztráty půdy vodní erozí ze zemědělsky využívaných pozemků ležících v klimatické oblasti daného typu, s daným druhem půdy, o určitém sklonu a délce svahu, při určitém systému pěstování plodin, obdělávání půdy a uplatňování protierozních opatření. Lze ji však aplikovat i pro území s nezemědělským využitím, např. na staveništích. RUSLE je nyní především v USA jedním z nejvyužívanějších prostředků pro uvedené účely, neboť vyhovuje inženýrským i vědecko-výzkumným požadavkům. Její předností je jednoduchost, účelnost, rychlost výpočtu a možnost využití velkého množství v databázích uvedených vstupních údajů, zahrnujících hlavní erozní faktory. RUSLE je také volně přístupná na internetu, ve formě počítačového programu. Program RUSLE stanovuje hodnoty některých faktorů na základě algoritmů, používaných v USLE. RUSLE umožňuje řešiteli předpovědět průměrnou velikost ztráty půdy pro každou z mnoha možných kombinací systémů

obdělávání, osevního postupu a ochranných opatření na konkrétním místě. Jsou-li tyto předpokládané ztráty půdy porovnány s hodnotami přípustné ztráty půdy pro vyšetřovanou lokalitu, dává RUSLE v rozmezích určitých limitů podklady pro návrhy protierozních opatření.

Výstupem RUSLE ani USLE není množství splavenin. Množství splavenin totiž nelze ztotožnit se ztrátou půdy, splaveniny představují erodované půdní částice, které byly transportovány do místa v povodí, ležícího v určité vzdálenosti od původního místa jejich uvolnění. Množství splavenin v povodí je dáno erozí ze zdrojových ploch v povodí a v hydrografické síti po odečtení množství, které se v území usadilo (Janeček, a kol., 2005). RUSLE rozšířila seznam uživatelů, takže má větší možnost využití. Jádro použití je však stále v predikci dlouhodobé ztráty půdy na narušených svazích. Jako taková, RUSLE stále neposkytuje odhady klasické rýhové eroze, půdní selhání hmoty ani eroze v nenarušených lesích. RUSLE neposkytuje informace o ztrátě půdy z povodí, i když technologie RUSLE by mohla být použita k nahrazení faktorů z USLE pro model MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation – tedy modifikovaná univerzální rovnice ztráty půdy) určený pro tento účel. RUSLE také může nahradit faktory USLE používané pro odhad eroze u takových modelů jako je AnnAGNPS a EPIC (Williams, 1977).

RUSLE je představována rovnicí:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

A = průměrná dlouhodobá ztráta půdy (t / ha / rok)

R = faktor erozní účinnosti deště

K = faktor náchylnosti půdy k erozi

L = faktor délky svahu

S = faktor sklonu svahu

C = faktor ochranného vlivu vegetace

P = faktor vlivu protierozních opatření

### 4.2.1 Rozdíl mezi USLE a RUSLE

RUSLE byla vyvinuta na základě revize a aktualizace USLE, která znamenala 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 půd

LS faktor – zavedení nového vztahu pro vliv délky a sklonu svahu, který uvažuje poměr rýžkové a mezirýžkové 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, stavenišť a rekultivované plochy, včetně zahrnutí vlivu předchozího využití půdy, druhu vegetace, pokryvu půdy a drsnosti půdního povrchu

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

Na rozdíl od USLE vyžaduje RUSLE větší množství vstupních dat, což na jedné straně umožňuje přesnější popsání zájmové lokality a vede k přesnějším výsledkům, na druhé straně však přináší problémy s možnostmi jejich získání (Janeček, a kol., 2005).

## 5 Metody výpočtu okamžitého odnosu zemin

Simulace eroze je založena na terénním pozorování, laboratorních experimentech a použití časových řad. Z tohoto zkoumání vyvozené vztahy byly v ranném období používání výpočtu eroze použity k navržení a používání tzv. empirických modelů erozního procesu. V polovině 70. let dochází k počátku rozvoje

výpočetní techniky. Spolu s tímto dochází také k rozvoji teoretických znalostí v oblasti hydrauliky povrchového odtoku, mechanismu erozních procesů, infiltračních teorií a dalších. Tyto možnosti a nové zkušenosti vedly k navržení a použití dokonalejších postupů a metod v podobě řešení erozních jevů, jako dynamického procesu měnícího se v prostoru a čase. Spolu s dalším rozvojem této oblasti došlo k vývoji simulačních modelů erozního procesu, který na základě fyzikálního popisu všech zúčastněných procesů řeší průběh a výslednou intenzitu erozních jevů. Poznání zákonitosti vzniku a průběhu procesu vodní eroze je – tak jako při sledování všech přírodních procesů – založeno na dlouhodobém terénním pozorování a laboratorních experimentech. Je tedy zcela logické, že vztahy kvantifikující vlivy jednotlivých erozních faktorů i intenzitu erozních jevů mají svůj základ v analýze a zpracování časových řad a vedly v počátečním období výpočetních metod k odvození a používání tzv. empirických modelů erozního procesu.

V polovině 70. let teoretický rozvoj v oblasti hydrauliky povrchového odtoku, infiltračních teorií, mechanismu erozních procesů atd. a v neposlední řadě i rozvoj výpočetní techniky umožnily přechod od empirických postupů k řešení erozního jevu jako dynamického procesu proměnného v prostoru a v čase. Tento přístup vedl k prudkému rozvoji metod tzv. „simulačních modelů erozního procesu“, které na základě fyzikálního popisu všech zúčastněných procesů řeší průběh a výslednou intenzitu erozních jevů.

Simulační modely vodní eroze vycházejí z definice eroze jako přírodního procesu uvolňování, transportu a ukládání půdních částic působením erozních činitelů. U vodní eroze jsou těmito činiteli ve většině případů dešťové srážky a z nich vzniklý povrchový odtok. Pro prognózu intenzity eroze a transportu látek a účinnosti protierozních opatření se podrobně vyhodnocují všechny přírodní a člověkem ovlivněné faktory, které se podílejí na vzniku a průběhu těchto jevů a kvantifikuje se jejich podíl na výsledné intenzitě erozního procesu a jeho vliv na prostředí. Použití simulačních modelů je v současnosti spojováno s programovými prostředky GIS pro přípravu vstupních podkladů řešení a prezentaci jeho výsledku. Toto spojení představuje moderní inženýrský nástroj, kterým lze účinně řešit různé varianty (scénáře) využití a ochrany území a vytvořit dostatečné množství podkladů pro rozhodovací a projekční činnost v této oblasti. Potřeba takového přístupu byla

vyvolána i nutností posuzovat vodní erozi jako největší plošný zdroj znečištění s negativním dopadem na kvalitu vodních zdrojů a prostředí.

## **5.1 Model SWAT (Soil and Water Assessment Tool)**

Je to komplexní dynamický numerický model, který může být použit pro kompletní hodnocení potenciálu krajiny ve vztahu k odtokovým poměrům, půdní erozi a transportu sedimentů, nebo na jiné geo-ekologické vlastnosti (energetické bilance ekosystému, dostupnosti vody a živin v půdě, apod.). Model SWAT patří do skupiny fyzikálních modelů. To znamená, že při výpočtu půdní eroze model respektuje fyzikální principy vzniku a formování povrchového odtoku, a také následný proces eroze, přepravy a ukládání zeminy. Pomocí SWAT modelu můžeme simulovat mnoho procesů nejen v oblasti hydrologie, ale také v oblasti hospodaření s půdou. Model může odhalit vodu, živiny a energetické faktory nezbytné pro pěstování rostlin. Může také simulovat pohyb důležitých chemických prvků v povodí, zejména dusíku a fosforu, a je velmi důležitý pro zemědělské plánování. Schopnost modelu simulovat pohyb pesticidů z povrchových a podpovrchových vrstev povodí je také velmi důležitá. Model SWAT se používá hlavně pro posouzení dopadů zemědělských aktivit na vodu, půdu a zemědělskou krajinu v dlouhodobém horizontu. Z hlediska času je to kontinuální model, z hlediska prostorového rozložení číselných jednotek se jedná o semidistribuovaný model.

Avšak tento fakt nevyklučuje možnost jeho využití pro řešení eroze v kratším časovém kroku včetně přívalových srážek. Model je totiž schopen pracovat se srážkovými vstupy v hodinovém kroku, přičemž nejjemnější časový krok výstupu je jeden den. To se může na první pohled jevit pro hodnocení eroze za přívalových srážek jako nedostačující, avšak zamysleme-li se nad smyslem výstupu v kratším než denním kroku, je zřejmé, že právě v případě eroze je takovéto časové rozlišení zbytečné a denní krok je dostatečný. Jinými slovy model je schopen postihnout časový průběh přívalové srážky v hodinovém kroku, přičemž pak poskytuje míru eroze v kroku denním. Jisté omezení zde určitě je, nicméně model disponuje nástroji pro kalibraci jak srážko-odtokových vztahů, tak i vztahů srážkoodtokovo-erozních. Velkou výhodou tohoto modelu je jeho plná integrace do GIS platforem, a to jak ESRI ArcView a Arc GIS, tak i GRASS GIS. Model poskytuje vedle celé řady

výstupů souvisejících s erozí půdy i výstupy vhodné pro hodnocení geochemických toků v povodí a celou řadu dalších. Jeho vysoká komplexita je však „vykoupena“ vysokou náročností modelu na vstupní data a uživatelskou znalost teoretických vztahů modelovaných procesů a podmínek zájmového území (Arnold, Allen, 1993).

Shrnutí: Simulační model SWAT je kontinuální matematický model určený pro velká, zemědělsky využívaná povodí. Hlavním cílem modelu je vyhodnocení dopadů zemědělského hospodaření na odtokové poměry, erozní procesy, transport splavenin a znečištění z plošných zdrojů (živiny). Doporučeným časovým krokem výpočtu je jeden den. SWAT je velmi náročný na vstupní data a uživatel musí mít velkou znalost teoretických vztahů modelovaných procesů. V Evropě je model SWAT jedním z doporučených nástrojů pro uplatňování cílů rámcové směrnice vodní politiky EU.

## **5.2 Model AGNPS (Agricultural Non-Point Source Pollution Model)**

Jedná se o relativně jednoduchý simulační model, využívající ověřené vztahy pro výpočet plošného a soustředěného odtoku, eroze, transportu a ukládání splavenin a transportu chemických látek (N, P) z plošných a bodových zdrojů z jednotlivého navrhovaného deště v povodí do velikosti maximálně 200 km<sup>2</sup>. Vyšetřované povodí je schematizováno sítí homogenních čtvercových elementů (velikost 0,5 – 16 ha), z nichž každý tvoří samostatnou hydrologickou jednotku, na které probíhají odtokové, erozní a transportní procesy, jejichž výsledky se přenášejí do elementů sousedních. Tato schematizace umožňuje analýzu odtoku, eroze, transportu a získání požadovaných výstupních informací v kterémkoli bodě uvnitř povodí i v jeho uzávěrovém profilu. Hydrologický modul simuluje výšku přímého odtoku a kulminační průtok. Simulace vychází z metody odtokových křivek (CN). V erozním modulu je použita upravená Univerzální rovnice ztráty půdy; transportní schopnost odtoku je vyjádřena upravenou rovnicí R. A. Bagnolda. Simulace uvolňování a transportu chemických látek (N, P) se provádí pro látky rozpuštěné v povrchovém odtoku a adsorbované na povrchu půdních částic; ukazatelem vlivu transportních procesů na kvalitu vody je hodnota CHSK.

Model pracuje se dvěma vstupními soubory; první soubor tvoří vstupní údaje společné pro všechny elementy (velikost a počet elementů, úhrn návrhového deště a



jeho erozní účinnost, metoda výpočtu kulminačního průtoku), druhý pak tvoří specifické údaje pro každý element (směr povrchového odtoku, sklon a tvar svahu, délka plošného odtoku, hodnota CN křivky, Manningův součinitel drsnosti, faktory K, C, a P z Univerzální rovnice, druh půdy, informace a druhu a množství aplikovaných hnojiv a pesticidů, geometrické informace o bodových zdrojích chemických látek a eroze, geometrické a drsnostní charakteristiky prvků soustředěného odtoku v elementu). Základní výstupní data pro každý element povodí a jeho uzávěrový profil tvoří výška přímého odtoku, kulminační průtok, ztráta půdy, množství splavenin, celkové množství a koncentrace rozpuštěného a vázaného dusíku a fosforu, CHSK. Kromě těchto celkových hodnot lze získat podrobné informace o přítoku a odtoku transportovaných látek v jednotlivých elementech a transportu jednotlivých zrnitostních frakcí.

Model nebyl vyvíjen jako predikční, ale především jako inženýrský nástroj pro podporu rozhodovacích procesů v protierozní ochraně. Vstupní údaje a výstupy simulace jsou prezentovány v tabelární a názorné grafické formě a jsou vhodným podkladem pro identifikaci kritických míst ve vyšetřovaném povodí a k porovnání vlivu jednotlivých scénářů využití a ochrany povodí na vyšetřované procesy (Young, a kol., 1989).

Shrnutí: Simulační model AGNPS je určen pro povodí menší a střední velikosti, řádově desítky až stovky km<sup>2</sup>. Používá se pro výpočet střednědobého odnosu látek z dílčích povodí a zemědělské půdy. Model hodnotí odtokové, erozní a transportní procesy na daném území, využíván je ale především v protierozní ochraně. AGNPS je kombinací empirického a fyzikálně založeného přístupu. Náročnost na objem vstupních dat je střední až vysoká.

### **5.3 Model SMODERP (Simulační Model Odtoku a Erozního Procesu)**

Model je výsledkem vývoje simulačního modelu s využitím fyzikálních principů pro podmínky České republiky. SMODERP byl sestaven na katedře hydromeliorací a krajinného inženýrství FSv ČVUT v Praze (Holý, Váška, Vrána, 1988) pro řešení návrhových úloh v protierozní ochraně zemědělských pozemků i pro nestandardní aplikace při stabilizaci svahů výsypek, silničních svahů, apod. (Kuráž, Váška, 1993).

Model simuluje srážkoodtokové vztahy a erozi na jednotlivém svahu (pozemku) a jeho výstupy tvoří podklady pro posouzení erozní ohroženosti svahu (pozemku) a pro návrh prvků protierozní ochrany. SMODERP je tvořen dvěma základními moduly – modulem hydrologickým (model plošného povrchového odtoku) a modulem erozním (model plošné rýžkové a mezirýžkové eroze). Povrchový odtok a eroze se simulují ze srážky proměnné intenzity na ploše o velikosti do cca 100 hektarů s nehomogenními morfologickými, půdními a vegetačními poměry.

Vstupní údaje pro simulaci tvoří:

- informace o návrhovém dešti (časový průběh deště)
- informace o vyšetřovaném svahu (pozemku)
- informace o geometrii (sklon, délka a šířka charakteristického odtokového profilu)
- informace o půdě (druh půdy, součinitel hydraulické vodivosti, sorptivita)
- informace o vegetačním pokryvu (druh pokryvu, potencionální intercepce, poměrná listová plocha, drsnost, faktor ochranného vlivu vegetace – C)

Vstupní údaje se určují na základě výsledků terénního průzkumu a z doporučených hodnot, uvedených v uživatelském manuálu.

Jeho výstupy tvoří:

- charakteristiky povrchového odtoku (objem odtoku, vrcholový průtok, hloubka, rychlost a tangenciální napětí) ve zvolených profilech vyšetřovaného svahu a ve zvolených časových intervalech od počátku srážky
- přípustná délka svahu (pozemku) na základě hodnoty krajního nevymílacího tečného napětí a hodnoty krajní nevymílací rychlosti povrchového odtoku
- ztráta půdy (transport půdních částic za dolní hranici svahu (pozemku))

Výstupy lze použít pro posouzení erozní ohroženosti pozemku (na základě přípustné délky svahu), pro výběr druhu protierozních opatření na pozemku (organizační opatření, technická opatření), situování protierozních opatření na pozemku a dimenzování technických protierozních opatření (vsakovací a odváděcí prvky).

V současné době se připravuje rozšíření modelu SMODERP pro simulaci povrchového odtoku a eroze v malém, geometricky jednoduchém povodí.

Simulační modely odtoku, eroze a transportu znečišťujících látek jsou perspektivní metodou pro řešení vztahů mezi využitím území a jeho ekologickou stabilitou (Foster, 1991).

Shrnutí: Simulační model SMODERP je určen pro malá povodí, jejich dílčí části nebo pro jednotlivé svahy v povodí, plochy nejvýše jednotky až desítky km<sup>2</sup>. Používá se v oblasti výpočtu srážko-odtokového procesu, přesného množství erodovaných a transportovaných látek v jednotlivých fázích procesu. Výstupy tvoří podklady pro projektování protierozní ochrany, můžeme také spočítat maximální přípustnou délku svahu. Náročnost na objem vstupních dat je vysoká.

#### **5.4 Model EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator)**

Je určen pro hodnocení vlivu erozních procesů (ztráty půdy) na změnu půdních vlastností a na úrodnost půdy. Model podrobně simuluje vývoj plodiny v závislosti na klimatických a hydrologických podmínkách a na probíhajících erozních procesech, je simulován rovněž vliv pesticidů a podzemního drenážního systému. Vyšetřované území je charakterizováno prvkem plošného a soustředěného odtoku. Model je určen pro homogenní plochy do velikosti cca 1,0 hektaru. EPIC je kontinuální model, který v hydrologické části vychází z hodnoty denního srážkového úhrnu a využívá pro stanovení charakteristik povrchového odtoku metodu čísel odtokových křivek (CN) a v erozní části modifikaci Univerzální rovnice ztráty. Model jako jediný uvažuje také vliv větrné eroze na úrodnost půdy (Williams, Dyke, Jones, 1982).

Shrnutí: Simulační model EPIC je určen pro malá území, do velikosti cca 1 hektaru. Jedná se o obsáhlý simulační model vyvinutý pro určení vztahů mezi vodní erozí a úrodností pozemku. Skládá se z různých modulů – řeší vliv eroze, režimu odtoku, transportu živin a způsobu hospodaření na růst plodin. Náročnost na objem vstupních dat je vysoká.

#### **5.5 Model CREAMS (Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems)**

Model CREAMS je určen k prognóze pohybu chemických látek, odtoku vody a eroze v různých zemědělských systémech. Hodí se pro kvantitativní hodnocení

vlivu zemědělských technologií na přírodní prostředí v území, které se vyznačuje jednotným způsobem využívání, relativně homogenními půdními poměry a rovnoměrným rozdělením srážek na celé ploše území.

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

Erozní složka zahrnuje účinek dešťových srážek a povrchového odtoku, který se uvažuje odděleně na plochách mezi erozními rýhami a v erozních rýhách a výmolech; zahrnuje i sedimentaci splavenin. Model provádí porovnání množství částic uvolněných srážkami a povrchovým odtokem a transportní schopnosti tekoucí vody (Kniesel, 1980).

Shrnutí: Simulační model CREAMS je komplexní model řešení hydrologických a erozních procesů a transportu některých látek (N,P, pesticidů) na plochách s homogenními půdními podmínkami, jednotným využitím a rovnoměrným zasažením plochy srážkou. Maximální plocha je závislá na homogenitě území, může být až několik desítek hektarů. Umožňuje vyhodnotit vliv jednotlivého deště na transport látek, nebo řeší pohyb látek v delším časovém období. Náročnost na vstupní data je vysoká.

## **5.6 Model EROSION 2D / 3D**

Simulační model EROSION 3D byl vyvinut z verze modelu EROSION 2D, který řešil ztrátu půdy na svahu (Schmidt, 1991). Model EROSION 3D je schopen pracovat s plochou celého povodí a do svých výpočtů zahrnuje ztrátu půdy způsobenou plošným i soustředěným odtokem. Jako geometrický základ pro model EROSION 3D slouží pravidelná čtvercová síť. Tato struktura je nejběžněji používána u digitálních modelů terénu a umožňuje dostatečné popsání povrchu území.

Skupinu modelů EROSION (2D / 3D) lze použít pro:

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

Vstupní data pro modely EROSION (2D / 3D) tvoří:

1. Charakteristiky povrchu vyšetřovaného území:

- digitální model terénu (čtvercový rastr)

2. Charakteristiky půdy:

- objemová hmotnost
- počáteční půdní vlhkost
- obsah organického uhlíku
- erodovatelnost
- drsnostní součinitel (Manningův součinitel drsnosti)
- stav pokryvu (vegetace, ornice, atd.)
- zrnitost rozdělená do 9 stupňů (od jílu po hrubé písky podle klasifikace DIN)
- opravný faktor hydraulické vodivosti

3. Charakteristiky návrhového deště (časový průběh deště):

- doba trvání srážky
- intenzita srážky

Pro každý element čtvercové sítě výstupní údaje simulace tvoří:

- odtok
- transportovatelné množství splavenin

- ztráta půdy / ukládání
- koncentrace splavenin
- zrnitost splavenin

Výstupní parametry vztahující se k celkové ploše vyšetřovaného povodí:

- ztráta půdy
- množství usazeného materiálu
- intenzita eroze

Výpočetní program modelu je rozdělen na dvě části, tzv. Preprocesor a Hlavní program. Program Preprocesor slouží k přípravě vstupních dat, která umožní uživateli zrychlit a časově minimalizovat vlastní fázi výpočtu eroze; Hlavní program provádí simulaci eroze a připravuje grafické výstupy výsledků simulace v plošném a prostorovém zobrazení. Zahrnuje prvky GIS pro práci s daty a jejich vizualizaci; program pracuje s nejrozšířenějšími GIS. Dvojměrný pohled zobrazí mapu se čtvercovou sítí, ve které lze pro každý element dále zobrazit podrobné výsledky simulace. Trojrozměrné zobrazení nabízí pohled na řešené území s barevným rozlišením intenzity eroze a ukládání erodovaného materiálu (Nováková, 1999).

Shrnutí: Simulační model EROSION (2D / 3D) je určen pro povodí až do velikosti 400 km<sup>2</sup>. Využívá se k prognóze plošné eroze půdy a ukládání látek v částech povodí, k prognóze objemu povrchového odtoku při silných srážkových jevech, k hodnocení zemědělského zpracování půdy s ohledem na snižování odtoku a bránění vzniku eroze, odhad hromadění nebezpečných látek a sedimentů, aj. Náročnost na objem vstupních dat je vysoká.

## **5.7 Model EUROSEM (EUROpean Soil Erosion Model)**

EUROSEM je výsledkem společného evropského projektu zaměřeného na vytvoření erozního hydrologického modelu SHE (Systeme Hydrologique Européen). EUROSEM zahrnuje procesy uvolnění částic deštěm a transport povrchovým odtokem v tenké vrstvě, rozšířená verze modelu zahrnuje dále procesy plošné rýžkové eroze a rýhové eroze, která je simulována na základě mechanismu tvorby erozní rýhy (Morgan, Quinton, Rickson, 1993).

Shrnutí: Simulační model EUROSEM je procesně podložený model pro předpovídání vodní eroze půdy pro pole a malá povodí pro jednotlivé události. Model pracuje pro krátké časové periody již od jedné minuty. Jedná se o odtokový a erozní model vyvinutý pro stanovení rizika eroze půdy a pro zhodnocení úrovně ochrany půdy. Náročnost na objem vstupních dat je vysoká.

## **5.8 Model WEPP (Water Erosion Prediction Project)**

Je společný projekt USDA a USDI, zahájený v USA koncem osmdesátých let s cílem zvýšit univerzálnost modelů a nahradit empirické postupy v oblasti ochrany půdy a vodních zdrojů jednotnou metodikou na bázi simulačních modelů. V rámci projektu je vyvíjen soubor simulačních modelů pro řešení odtoku, eroze a transportu látek:

- na jednotlivém svahu (pozemku)
- v jednoduchém povodí
- ve složitém nehomogenním povodí, schematizovaném čtvercovou sítí homogenních elementů

Modely projektu WEPP jsou náročné z hlediska množství a kvality vstupních dat, z nichž většina je obsažena v databázích, které jsou přímou součástí modelů (Foster, 1991).

Shrnutí: Simulační model WEPP je určen pro malá povodí. Byl vytvořen pro lepší znázornění erozních procesů vztahy blízkými k základní fyzice. Model WEPP usiluje o více „procesně podložené“ vyjádření spíše než o statistické vztahy a je programován speciálně pro PC prostředí. Základními součástmi modelu WEPP jsou svahy a kanály.

-Model WEPP sestává z různých komponent, a to:

- a) stochastický generátor počasí, který dovoluje simulaci denních klimatických dat na základě existujících záznamů;
- b) infiltrační/ odtoková část
- c) rovnováha půdní vláhly založená na odpovídající části modelu SWRRB;
- d) část vegetačního růstu založená na modelu EPIC;
- e) část popisující rozklad rostlinných zbytků; a
- f) zavlažování.

Náročnost na objem vstupních dat je vysoká.

## 6 Závěr

Simulační modely odtoku, eroze a transportu látek jsou perspektivní metodou řešení vztahů mezi využitím území a jeho ochranou. Modely procházejí neustálým vývojem a jejich využití a informační schopnosti zvyšuje spojení s geografickými informačními systémy (GIS) při přípravě vstupních údajů a interpretaci výstupů (Foster, 1991).

Výstupy simulačních modelů odtoku, eroze a transportu látek lze použít především jako informace pro (Dostál, Váška, Vrána, 1998):

- rozhodovací procesy při řešení koncepce využití území, systému ochrany půdy a vody a zvýšení ekologické stability území (koncepční a rozhodovací činnost)
- návrh jednotlivých prvků systému ochrany půdy a vody (projektová činnost)

Při používání každého modelu je třeba dodržovat předpoklady a podmínky, pro které byl model odvozen (především homogenita území a plošné a časové měřítko modelu). V současné době u nás existují možnosti snadného získání software simulačních modelů. Je však třeba si uvědomit, že přímá aplikovatelnost modelů odvozených v zahraničí bez jejich podrobného testování v našich poměrech, může být v řadě případů problematická.

Další vývoj a verifikace simulačních modelů erozních a transportních procesů bude postupně přinášet jejich zdokonalování a možnosti širšího využití při řešení problematiky využití a ochrany povodí.



## 7 Seznam použité literatury

- 1) ARNOLD, J. G., ALLEN P. M.: A comprehensive surface - ground water flow model. J. Hydrol., 1993.
- 2) CÁBLÍK, J., JÚVA, K.: Protierozní ochrana půdy. SZN, Praha, 1963.
- 3) DOSTÁL, T., VÁŠKA, J., VRÁNA, K.: Transportní procesy v povodí. In: Sborník konference Orlice '98. Králíky, 1998.
- 4) DUMBROVSKÝ, M., MEZERA, J., STRÍTECKÝ, L.: Metodický návod pro vypracování návrhů pozemkových úprav. Brno: Českomoravská komora pro pozemkové úpravy, 2004.
- 5) FOSTER, G. R.: Advances in Wind and Water Erosion Prediction. J. of Soil and Water Conservation Engineering, 1991.
- 6) HOLÝ, M., VÁŠKA, J., VRÁNA, K.: Simulační model povrchového odtoku a erozního procesu. Vodní hospodářství, řada A, č. 10. 1988.
- 7) HOLÝ, M.: Protierozní ochrana. Praha: SNTL, 1978.
- 8) HOLÝ, M.: Eroze a životní prostředí. 1. vyd. Praha: vyd. ČVUT, 1994.
- 9) HUDSON, N.: Soil conservation. Ithaca, New York, Cornell University Press., 1971.
- 10) JANEČEK, M. A KOL.: Ochrana zemědělské půdy před erozí. Metodika UVTIZ, Praha, 1992.
- 11) JANEČEK, M. A KOL.: Ochrana zemědělské půdy před erozí. Praha, ISV nakladatelství Praha, 2002.

- 12) JANEČEK, M. A KOL.: Ochrana zemědělské půdy před erozí. Praha, ISV nakladatelství Praha, 2005.
- 13) JANEČEK, M. A KOL.: Ochrana zemědělské půdy před erozí. Praha: VÚMOP, 2007.
- 14) JANEČEK, M. A KOL.: Základy erodologie, 4eská zemědělská univerzita v Praze, 2008.
- 15) KNISEL, W. G.: CREAMS (A Field-Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems ). US Dpt. Of Agriculture. Conservation Research Report, 1980.
- 16) KURÁŽ, V., VÁŠKA, J.: Numerické modelové řešení vodní eroze II. studie pro VÚMOP Praha. KMH FSv ČVUT Praha, 1993.
- 17) MEYER, L. D.: Evolution of the universal soil loss equation. J. Soil Water Conservation, 1984.
- 18) MORGAN, R. P. C., QUINTON, J. N., RICKSON, J. R.: EUROSEM – A User Guide, Granfield University, Silsoe College, UK., 1993.
- 19) NOVÁKOVÁ, H.: Testování matematického simulačního modelu erozních procesů EROSION 3D. Diplomová práce. Katedra hydromeliorací FSv ČVUT Praha, 1999.
- 20) PODHRÁZSKÁ, J., DUFKOVÁ, J.: Protierozní ochrana půdy. Brno, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Agronomická fakulta Brno, 2005.
- 21) PRETL, J.: Návrh nového způsobu prognózy velikosti půdního smyvu v podmínkách ČSR. Kandid. disertace, Praha, ČVUT, 1973.

- 22) SCHMIDT, J.: A mathematical model to simulate rainfall erosion. *Catena Suppl*, 1991.
- 23) SKLENIČKA, P.: *Základy krajinného plánování*. Praha: Naděžda Skleničková, 2003.
- 24) STEHLÍK, O.: Potenciální eroze půdy proudící vodou na území ČSR. *Stud.geogr.*, 42, 1975.
- 25) ŠABATA, M.: Postup při výpočtu míry ohrožení pozemků erozí za přívalových dešťů. *Závěrečná zpráva*, Praha - Zbraslav, Výzkumný ústav meliorací, 1978.
- 26) TOMAN, F.: *Protierozní ochrana půdy*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 1996.
- 27) WILLIAMS, J. R., DYKE, P. T., JONES, C. A.: EPIC – A Model for Assessing the Effect of Erosion on Soil Productivity. In: *Proceedings Third Int. Conf. On State-of-the Art in Ecological Modeling*. Colorado State University, Fort Collins, 1982.
- 28) WILLIAMS, J. R.: Sediment delivery ratios determined with sediment and runoff models. *Proc. Symposium on Erosion and Solid Matter Transport in Inland Water*. Int'l. Doc. Hydrological Sci. No. 122, 1977.
- 29) WISCHMEIER, W. H., SMITH, D. D.: Predicting rainfall - Erosion losses from cropland east of the Rocky mountains. *Agr.Handbook.No. 282*, Washington D. C., 1965.
- 30) WISCHMEIER, W. H., SMITH, D. D.: *Predicting Rainfall Erosion Losses*. USDA, Washington DC, 1978.
- 31) YOUNG, R. A., ONSTAD, C. A., BOSCH, D. D., ANDERSON, W. P.: AGNPS: A Nonpoint Source Pollution Model for Evaluating Agricultural Waterheds. *J. of Soil and Water Conservation*, 1989.

