

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra pedologie a ochrany půd



**Aplikace vybraných materiálů a látek jako nástroj
kontroly vodní eroze půd**

Bakalářská práce

Autor práce: Jakub Kováč

Vedoucí práce: Ing. Penížek Vít, Ph.D.

© 2014 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci " Aplikace vybraných materiálů a látek jako nástroj kontroly vodní eroze půd " jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne _____

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce, panu Ing. Vítu Penížkovi, Ph.D. za odborné vedení a poskytnutí materiálů.

Aplikace vybraných materiálů a látek jako nástroj kontroly vodní eroze půd

Souhrn

Cílem práce je formou literární rešerše rozebrat vhodná protierozních opatření, zejména pro prudké svahy pozemních komunikací. První část práce zahrnuje obecný úvod do problematiky vodní eroze, jejích příčin a důsledků. Zaměřuje se na účinek kinetické energie dešťové kapky a důvody vzniku soustředěného povrchového odtoku. Z morfologických charakteristik svahu má na vodní erozi největší vliv sklonitost a jeho tvar. Na prudších svazích dosahuje stékající voda vyšších rychlostí, unáší tak více půdních částic. Nejvíce ohroženy jsou svahy konvexního tvaru, z důvodu korelace maximální délky s maximálním sklonem. Ke zkoumání rozsahu a hodnocení eroze je využíváno měření celkového objemu povrchového odtoku a obsah transportovaných půdních částic. Nejvhodnější formou jsou polní pokusy, které jsou nejbližší přirozeným podmínkám. Pro odhad eroze bylo vyvinuto mnoho simulačních modelů. Nejznámější je univerzální rovnice ztráty půdy (USLE) a její modifikace, dále WEPP, EUROSEM a pro naše podmínky nejvhodnější model SMODERP. V další části je charakterizována problematika svahů podél komunikací. Silniční násypy a zářezy jsou nejzranitelnější v průběhu výstavby až do chvíle, kdy je vytvořen vegetační pokryv. Poslední část bakalářské práce se zaměřuje na možnosti protierozních opatření, které jsou rozděleny do kategorie vegetačních opatření, využití geomateriálů a nakonec chemické stabilizace svahů. Z mnohých výzkumů vyplývá, že nejúčinnější formou ochrany svahů je vytvoření vegetačního krytu. K tomu se vybízí užití metody hydroosevu, díky kterému je svah okamžitě chráněn v důsledku přítomnosti protierozních přísad a mulče. Další vhodnou metodou je použití různých druhů geotextilií, lišící se strukturou, či materiálem. Přírodní materiály v průběhu rozkladu poskytnou vegetaci živiny, na druhou stranu mohou mít kratší životnost. V poslední době se rozmáhá využití georohoží s trojrozměrnou strukturou, poskytující významnou ochranu strmých svahů. Pro využití chemikálií ke stabilizaci svahů by bylo vhodné provést vlastní pokusy, neboť většina zveřejněných experimentů se zabývá použitím chemických stabilizátorů ke snížení prašnosti na nezpevněných cestách.

Klíčová slova: eroze, komunikace, geotextilie, hydroosev, chlorid vápenatý, křemičitany, vodní sklo

Application of materials and chemical agents as a tool for soil erosion prevention

Summary

The aim of this bachelor thesis is to bring literature review about last knowledge about erosion control at road construction sites and unpaved roads. First part of the thesis contains general introduction to water erosion issue, its causes and results. It is focused on the effect of kinetic energy of rain drop and reason of creating concentrated surface runoff. From morphological characters of a slope, the slope gradient and its shape has highest influence on water erosion. On the steep slope, the water flowing down is reaching higher speed, so it can transport more soil particles. Convex slopes are most vulnerable. There are many methods for erosion measurements and assessment. The example could be measuring of the total volume of surface runoff and content of transported particles. Most adequate form is field experiments that best represent to natural conditions. Many simulation models had been developed for assessment of erosion. The best known is universal soil loss equation (USLE) and its modification, then WEPP, EUROSEM and for our conditions most appropriate model SMODERP. The issue of slope along roads is characterized in next part of my thesis. Road fill slopes and cuts are most assailable in process of constructing until the vegetative cover establishment. The last part of the bachelor's thesis focused on opportunities of erosion control precaution that are divided into category of vegetative precaution, use of geomaterials and at last, slope chemical stabilization. The result of many researches is that most effective form of slope protection is to create a vegetative cover. Using of hydroseeding, the slope is protected immediately after application due to anti-erosion ingredients and mulch. Another adequate methods is usage of wide variety of geotextile, varying by the structure or material. Natural materials in process of decomposition provides nutrients for vegetation, on the other hand they can have shorter service life. Latest trend is using geomats with 3D structure providing best protection of steep slopes at construction sites. Chemical components usage such calcium chloride, silicates or liquid glass for slope stabilization is not widely described. More research would be appropriate to find the potential of chemical stabilization.

Keywords: road erosion, geotextiles, hydroseeding, calcium chloride, silicates, liquid glass

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce.....	2
3	Literární rešerše	3
3.1	Vodní eroze půdy	3
3.1.1	Příčiny vodní eroze.....	3
3.1.2	Srážky	3
3.1.3	Povrchový odtok	4
3.1.4	Morfologické vlastnosti území.....	5
3.1.5	Geologické a půdní atributy.....	6
3.2	Svahy podél komunikací	8
3.3	Metody měření a hodnocení eroze	9
3.3.1	Měření.....	9
3.3.2	Pokusné parcely	10
3.3.3	Simulátor deště.....	11
3.3.4	Modelování erozních procesů	13
3.4	Prevence eroze.....	18
3.4.1	Vegetační opatření.....	18
3.4.2	Geomateriály	21
3.4.3	Chemické přípravky	26
4	Závěr	32
5	Seznam literatury.....	33

1 Úvod

Antropogenní vliv na degradaci půdy započal ve chvíli, kdy člověk narušoval vegetační kryt země. Na našem území docházelo k dramatičtějším změnám v době kolem 13. století, kdy se objevily nové způsoby obhospodařování a protáhnutí pozemků do kopců a podhůří (Janeček et al. 2002). V současnosti se problematika eroze nejvíce týká zemědělských půd, u kterých v důsledku odnosu kvalitní orniční vrstvy dochází ke ztrátě úrodnosti. Dva hlavní erozní činitelé, voda a vítr, s sebou neodnáší pouze úrodnou půdu, která končí nevyužita v korytech řek, ale také agrochemikálie, a jiné polutanty, znehodnocující životní prostředí. Prevence eroze znamená v ideálním případě snížení ztráty půdy na úroveň, jaké by dosáhla v přirozených podmínkách (Morgan, 2005). Celosvětový odhad ztráty půdy kolísá od 0,088 mm.rok⁻¹ do 0,3 mm.rok⁻¹. Existují protierozní opatření různých typů, například technické, agrotechnické, chemické, biotechnologické či biologické, lišící se účinností i cenou. Význam protierozních opatření spočívá v tom, že prevence je levnější, než případné řešení následků. Hlavním cílem takovýchto opatření je ochrana půdy před účinkem dopadajících kapek deště, podpora infiltrace vody do půdy, zlepšit soudržnost půdy a omezit účinek povrchového odtoku (Janeček et al. 2002). Intenzivní urbanizace si vyžaduje stále více zásahů do přirozených půdních poměrů. Při výstavbě pozemních komunikací se nelze vyhnout tvorbě prudkých svahů a to buď náspů, nebo zářezů. Náspy pozemních komunikací jsou vymílány povrchovým odtokem, čímž může dojít k ohrožení bezpečnosti na silnicích. Erodivaný materiál posléze zanáší odvodňovací zařízení, krajnice i samotnou vozovku. Nejefektivnějším řešením vodní a větrné eroze svahů z dlouhodobého hlediska je založení travního porostu. Půda užívaná k výstavbě svahů je většinou nevhodná pro vývoj vegetace v důsledku nevhodné struktury a nedostatku živin. Proto je vhodné zatravnění kombinovat s jiným protierozním opatřením, v závislosti na sklonu svahu. Na mírných svazích lze použít chemické stabilizátory půdy, jež po aplikaci na půdu vytvoří ochranný film, či krustu (chlorid vápenatý), popřípadě zlepši stabilitu agregátů (polyakrylamid). Z důvodu tvorby krusty je nutné zvolit takový přípravek, který nebrání klíčení a růstu vegetace. Na prudších svazích je vhodnější pokládka geotextilií a georohoží, které poskytnou okamžitou ochranu před povětrnostními vlivy. V období sucha dokáží udržet vhodné vlhkostní poměry. Geotextilie z přírodních vláken během biodegradace poskytují živiny, potřebné pro správný růst a vývoj vegetace. Syntetické materiály jsou vhodné pro svou dlouhou životnost a

odolnost vůči mikrobiologickému rozkladu. Na půdy s nízkým obsahem živin je nejlepším řešením aplikace kompostu, čistírenského kalu, či mulče.

2 Cíl práce

Cílem práce je přinést přehled stávajících poznatků z literatury o možnostech aplikace vybraných materiálů a látek, včetně chloridu vápenatého a silikátů, jako nástroje na omezení vodní eroze na prudkých svazích v blízkosti komunikací.

3 Literární rešerše

3.1 Vodní eroze půdy

Eroze půdy je trojfázový proces, skládající se z oddělení částic půdy a jejich následného transportu. Při poklesu energie dochází k další fázi, kterou je ukládání erodovaného materiálu. (Morgan, 2005). Erodovaný materiál se hromadí buďto v pozemních depresích, nebo je splaven do recipientů, čímž zhoršuje kvalitu vody v nich. V případě splachu do vody hrozí kontaminace agrochemikáliemi či jinými polutanty.

Vodní a větrná eroze jsou dva hlavní činitelé v procesu degradace půdy. Vodní eroze celosvětově ovlivňuje téměř 1 100 milionů ha půdy, tedy zhruba 56% z celkového množství znehodnocované půdy. Existují dva hlavní typy eroze, a sice geologická (přírozená) a zrychlená (antropologická). Geologická eroze je přírodním a nezbytným jevem, ke kterému v malé míře dochází ve všech typech půd, jako součást půdotvorných procesů. V momentě, kdy míra eroze překročí určitou hladinu, jedná o zrychlenou erozi, v důsledku lidské činnosti, jako je odlesňování, intenzivní orba apod. (Blanco a Lal, 2008).

3.1.1 Příčiny vodní eroze

Janeček et al. (2002) rozděluje příčiny vodní eroze do několika skupin faktorů:

klimatické a hydrologické

- množství, rozdělení
a intenzita srážek
- povrchový odtok
- teplota, oslunění, výpar
- 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
a obsah humusu

vegetační

- hustota a délka trvání
vegetačního krytu

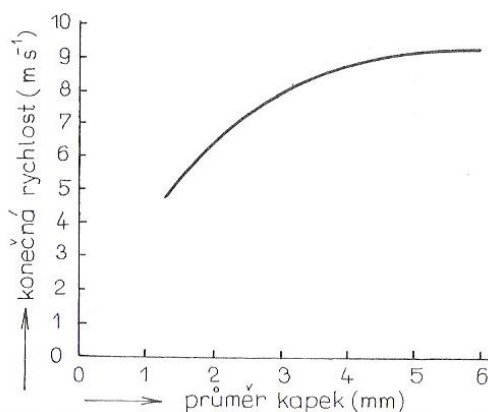
3.1.2 Srážky

Janáček et al. (2002) uvádí, že kinetická energie dopadajících dešťových kapek na holou půdu má destruktivní účinek, projevující se zejména rozrušováním povrchu. Po dopadu kapky dojde k vystřelení částic půdy jak do výšky, tak do stran do vzdálenosti několik desítek

centimetrů (obrázek 3). Dalším účinkem je tvorba škraloupu z jemných jílových částic silná cca 1 mm, pod níž se nachází vrstva do 3 mm, ve které se nachází ucpané póry. Škraloup po zaschnutí brání infiltraci až o 90 % a zvyšují tím povrchový odtok. Míra jakou kapky působí na půdu, závisí na velikosti či hmotnosti kapky a rychlosti při dopadu. Všeobecně uznávaná minimální velikost dešťové kapky, která má dostatečnou kinetickou energii k erozní činnosti, se pohybuje v rozmezí 0,8 – 1,0 mm. Z důvodu velmi nízkých hodnot je měření kinetické energie kapek velmi obtížné, proto se upřednostňuje například výpočet energie z hmotnosti a konečné rychlosti. Erozní účinek kapky je eliminován při vytvoření vrstvy povrchové vody, Janáček et al. (2002) uvádí minimální tloušťku vodní vrstvy od 1/5 průměru kapky až celkový průměr, po překročení této hodnoty kapky pouze podporují turbulentní činnost vody.

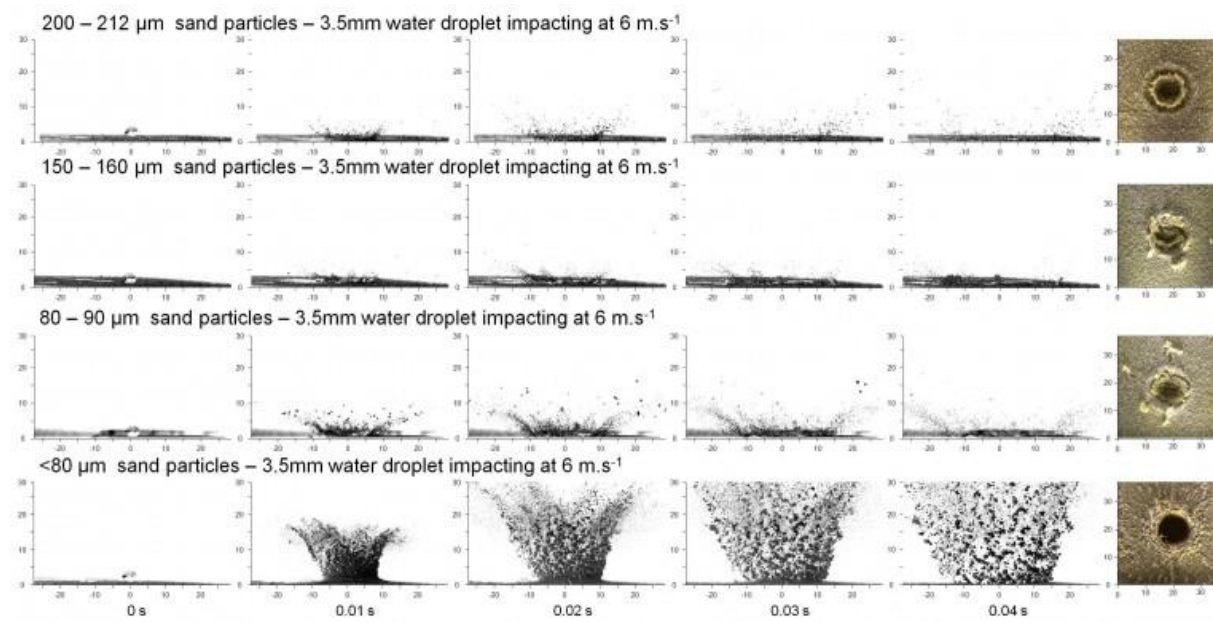
Charakteristiky srážek (Blanco a Lal, 2008)

- **Intenzita** neboli množství srážek na jednotku času [mm.h^{-1}]
- **Množství** srážek je funkcí délky trvání deště a intenzity.
- **Konečná rychlost** je stav, kdy kapka dosáhne maximální rychlosti, tedy přestane zrychlovat v důsledku vyrovnání odporu vzduch a gravitačních sil. Na povrch může narazit rychlostí až 35 km.h^{-1} . Úzce souvisí s velikostí kapky. Čím větší, tím více má energie a letí větší rychlostí. Kapka při průměru 5mm dokáže letět rychlostí až 9 m.s^{-1} (obrázek 1).
- **Velikost** dešťových kapek se pohybuje od 0,25mm po 8mm. Větší kapky se mohou za letu rozpadnout na více menších. Janáček et al. (2002) udává, že při velikosti 5,8 - 6mm se kapky stávají nestabilními. Z původní velké kapky se vytvoří těleso zvané toroid, s průměrem až 10 krát větším než původní kapka, který se posléze rozpadne až na 12 menších kapek.

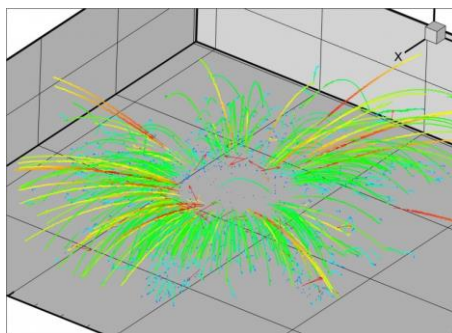


obrázek 1 Vztah mezi rychlostí a průměrem dešťových kapek podle J. O. Lawse (Holý, 1994)

Na obrázku 2 je znázorněno srovnání dopadu dešťových kapek o stejné velikosti 3,5 mm, při stejné rychlosti 6 m.s^{-1} , do substrátu o různé zrnitosti. Při srovnání je patrné, že velmi významným faktorem destruktivní činnosti kapek je velikost půdních částic. Čím jemnější materiál na který kapka dopadne, tím více je ho vymrštěno do vzduchu a posléze transportováno. Snímky byly pořízeny vysokorychlostní kamerou.



obrázek 2 Oddělení půdních částic po dopadu dešťové kapky zdroj: <http://www.sheffield.ac.uk/draem/splash>



obrázek 3 Trajektorie vystřelených částic po dopadu dešťové kapky (<http://www.sheffield.ac.uk/draem/splash>)

3.1.3 Povrchový odtok

Povrchový odtok má transportní charakter, přičemž s rostoucí vrstvou vody stoupá transportní potenciál. Zásadním faktorem povrchového odtoku je rychlost proudění vody. K oddělení půdních částic z matrice dojde v momentě překročení síly, jež udržují částice pohromadě, silami proudící vody. Po překročení infiltrační schopnosti půdy, nebo při zhutnění (Grismer, 2012), se voda pocházející z atmosférických srážek začne držet na povrchu půdy. Buďto v menších či větších depresích, nebo vytvoří souvislou vrstvu a v závislosti na sklonu svahu začne plošně odtékat. Taková forma povrchového odtoku se nazývá **plošný odtok**, jehož důsledkem je postupné ztenčování vrstvy půdy a odhalování skeletu. Zprvu dochází k odnosu těch nejjemnějších částic, někdy se užívá označení **selektivní eroze**. Postupně se začnou utvářet mělké rýhy či zářezy a to v důsledku soustředování odtoku. V závislosti na délce a sklonu svahu a množství vody dochází k postupnému prohlubování. Tohle stádium eroze se nazývá **rýžková** či **brázdová** eroze. Blanco a Lal (2008) uvádějí, že srážková spolu s rýžkovou erozí tvoří až 70 % z celkové vodní eroze. Následuje transformace v hlubší rýhy – **rýhová eroze**. Nejnebezpečnějším stupněm vodní eroze je **stržová**, vznikající při koncentraci velkého množství vody, nebo prohloubením rýh (Zachar, 1982), při níž se tvoří strže o hloubce a šířce minimálně 0,3 m x 0,3 m (Blanco a Lal 2008), s profilem ve tvaru písmene V nebo U, v závislosti na geologickém podloží. Strže mohou být buďto efemerní nebo permanentní. **Efemerní** strž je taková, kterou na základě menších rozměrů lze odstranit běžně užívanou agrotechnikou. Většinou se jedná o nahrnutí zeminy z okolí, čímž dochází k ztenčování vrstvy ornice. **Permanentní** strž je svými rozměry příliš velká na to, aby mohla být likvidována běžnou agrotechnikou. (Blanco a Lal 2008).

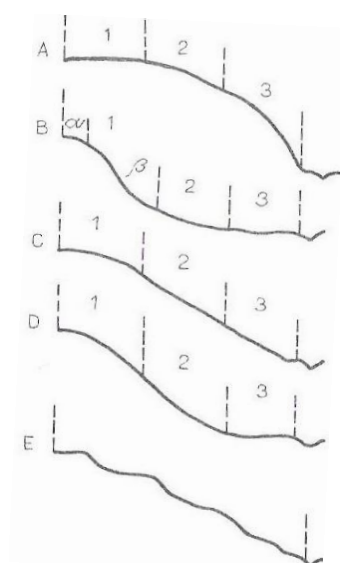


obrázek 4 Eroze silničního náspu (<http://www.landscapeonline.com/research/lasn/2011/02/img/ECT/ECT-9.jpg>)

Morfologické vlastnosti území

Janeček et al. (2002) mezi morfologické faktory eroze řadí sklon území, délku a tvar svahu, expozici a návětrnost. S rostoucím sklonem a délkou svahu narůstá rychlost proudící vody a tangenciálního napětí. Kombinace těchto faktorů má za následek vyšší degradační schopnost odtoku. Zpomalením odtoku na minimum začne docházet k akumulaci transportovaného erodovaného materiálu. Rozhodující je určení kritického sklonu svahu, což je sklon, při kterém dochází k nebezpečnému rozrušování půdního povrchu – místa, kde se plošný odtok soustřeďuje a vznikají tak rýhy a strže (Holý, 1994). Podle Blanco a Lal (2008) je konvexní svah vodní erozí mnohem více ohrožený oproti svahu konkávnímu.

Obrázek 5 Tvar svahu: A- vypuklý svah, B- vydutý svah, C- přímý svah, D - vypuklo-vydutý svah, E- stupňovitý svah (Holý, 1994)



Tvar svahu určuje průběh eroze. Například u vypouklého (konvexního) svahu jsou erozní procesy pozorovány nejvíce v jeho dolní části a to především díky interakci maximální délky a maximálního sklonu (obrázek 5A), zatímco u vydutého (konkávního) svahu místo s maximálním sklonem nekoreluje s maximální délkou, proto nedojde k plnému rozvinutí erozní činnosti. (5B). U přímého svahu (5C) se erozní činnost nejvíce projeví v místě s nejvyšším tangenciálním napětím. U kombinovaného svahu typu vypuklo-vydutý (5D) se maximální eroze projeví v části označené číslem 2. Na stupňovitém svahu (5E) dochází ke střídání intenzity erozní činnosti.

3.1.4 Geologické a půdní atributy

Geologické charakteristiky území určují povahu substrátu (Holý, 1994). Spolu s půdními poměry mají vliv na erodibilitu půdy. Morgan (2005) popisuje erodibilitu jako odolnost vůči oddělení částic a jejich následnému transportu. Odolnost se mění v závislosti na struktuře půdy, stabilitě agregátů, infiltrační kapacitě a pevnosti ve smyku. Určuje, jak velké množství vody, pocházející ze srážkové činnosti se infiltruje do půdního profilu a jaká část se transformuje do povrchového odtoku (Bergsma et al. 1996).

- **Textura půdy**

Neboli vzájemný poměr velikostních frakcí (Bergsma et al. 1996). Obecně lze říci, že velké částice jsou k erozi náchylné mnohem méně, neboť je potřeba více energie k jejich oddělení a následnému transportu povrchovým odtokem. Z hlediska složení půdy jsou k erozi nejnáchylnější půdy s vysokým obsahem prachových částic (Morgan, 2005). Písčité půdy jsou oproti půdám bohatým na jílovité částice, méně soudržné. Vysoký podíl makropórů jim však umožňuje rychlou infiltraci vody a tím snižují množství vody, která by jinak stékala ve formě povrchového odtoku. Jílovité půdy obsahují mnohem větší poměr mikropórů, které nejsou schopny dostatečně rychle absorbovat srážkovou vodu, jsou ale více soudržnější (Wischmeier a Mannering, 1969; Blanco a Lal 2008). Hlinité půdy jsou velmi nesoudržné z důvodu vysokého podílu prachových částic. Z hlediska propustnosti dosahují středních hodnot. Nejhoršími vlastnostmi se vyznačují nehumózní spraše a sprašové hlíny s velmi nízkým obsahem koloidních částic (Holý, 1994).

Janeček (2002) dělí půdy dle rychlosti infiltrace následovně:

- Půdy s **vysokou rychlostí infiltrace** (rychlost infiltrace $> 0,12 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ i při úplném nasycení, hluboké a dobře odvodněné šterky a písky)
- Půdy se **střední rychlostí infiltrace** ($0,06 - 0,12 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, hluboké, středně hluboké, hlinitopísčité až jílovité)
- Půdy s **nízkou rychlostí infiltrace** ($0,02 - 0,06 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, půdy s málo propustnou vrstvou, jílovitohlinité až jílovité)
- Půdy s **velmi nízkou rychlostí infiltrace** ($< 0,02 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, jíly s vysokou bobtnavostí, půdy s vrstvou jílu na povrchu)

- **Struktura půdy**

Struktura půdy je určena vzájemným uspořádáním a vazbou půdních částic (Holý, 1994). Základním ukazatelem kvalitní struktury jsou půdní agregáty. Těmi se rozumí nehomogenní prvky půdní struktury. Důležitým ukazatelem je velikost půdních agregátů a také jejich stabilita, která je dána zejména koncentrací půdních elektrolytů, typem výměnných kationtů, obsahem uhličitánů a organického materiálu (Jozefaciuk a Czachor, 2014). Obecně lze říci, že makroagregáty jsou méně stabilní. K jejich rozbití dochází během silných přívalových dešťů. Úbytek organického materiálu, například při nevhodných agrotechnických postupech, má za následek narušení půdních agregátů a tím i struktury půdy. S rostoucím obsahem organické hmoty roste infiltrace a tím pádem stoupá množství vody, potřebné k vytvoření povrchového odtoku (Wischmeier a Mannering, 1969). Piccolo et al. (1996) zkoumal efekt obsahu huminových kyselin derivovaných z oxidovaného uhlí na odolnost vůči erozi. Výsledky dokázaly výrazné zlepšení ve všech ukazatelích již při množství $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Půdy se špatnou strukturou snáze podléhají hutnění. Na zhutněných půdách vzniká povrchový odtok mnohem rychleji. Stabilitu agregátů zajišťují kohezní síly půdních částic, tím jsou schopny překonat destruktivní účinky erozních činitelů (Blanco a Lal 2008). Pozitivní vliv struktury se projevuje nejvíce u drobtovité struktury, která dokáže vázat velké množství vody v kapilárních pórech. Účinkům eroze nejlépe odolávají černozemě, středně dobře hnědozemě a nejméně vzdorují podzoly, vlivem nesoudržnosti půdních částic (Holý, 1994).

3.2 Svahy podél komunikací

Silniční svahy s nezpevněným povrchem jsou nejvíce ohroženy povrchovým odtokem, buďto vodou přímo z vozovky, nebo odtokem z okolních pozemků. Časem se odtok formuje do eroze rýhové až stržové, tím vznikají nebezpečné brázdy, které mohou poškodit komunikaci. Výzkumy s užitím simulátoru deště (Cerdà, 2007) prokázaly, že nechráněné svahy dosahují několikanásobně vyšších hodnot míry eroze, celkového sedimentu, povrchového odtoku a naopak nízkých hodnot míry infiltrace, oproti svahům chráněným vegetací. Svahy pozemních komunikací jsou nejzranitelnější v období jejich výstavby a poté do doby, než se vytvoří vegetační kryt, který snižuje ohrožení erozí. Unášený sediment končí v recipientech, čímž dochází k jejich zanášení. Dalším rizikem je možnost dopravních nehod. Ovšem podmínky, které panují na svazích během výstavby silnic a krátce po dokončení nejsou pro růst vegetace optimální. Náchylnost k erozi u těchto svahů navyšuje fakt, že jsou často tvořeny nevyvinutými půdami, či spíše jen odtěženými stavebními zeminami. Materiál na tvorbu svahů je primárně vybírán zejména pro jeho geotechnické vlastnosti (Oña, 2009). Dočasnou ochranou holých svahů může být užití různých variant geotextilií (Luo, 2013).

Umístění komunikací vzhledem ke svahům se dělí na komunikace (Technické podmínky 53, 2003):

- **v úrovni terénu** – přítomny jsou pouze odvodňovací příkopy, které svým sklonem nejsou ohroženy erozními procesy.
- **v zářezu** – kromě destrukčních vlastností vody, která spadne ve formě srážek na daný svah, jsou zářezy ohroženy nejvíce vodou z okolních pozemků. Erodovaná půda posléze zanáší odvodňovací soustavu. Zářezy jsou nejohroženější v době, kdy okolní pozemky postrádají potřebný vegetační kryt
- **v násypu** – Bergsma et al. (1996) definuje násyp jako podélnou vyvýšeninu nad úrovní země, jež slouží k odklonu, pojmutí vody, nebo jako podpůrný prvek silnice. Násypy jsou ohroženy vodou ze srážek, které dopadnou přímo na povrch násypů, ale také odtokem z vozovky. Míra eroze závisí na technickém provedení jak silnice samotné, tak i odvodňovacího systému.
- **v odřezu** – kombinace zářezů a násypů.

S rostoucím sklonem svahu se zvyšují parametry jako je koeficient odtoku, kinetická energie proudící vody a také schopnost oddělit a poté transportovat větší množství částic (Zachar, 1982).

Na obrázku 6 lze vidět plošnou a rýhovou erozi na jižně orientovaných svazích podél silnice. Z důvodu probíhající výstavby silnice, byly doposud bez jakékoliv vegetační ochrany. Na obrázku vpravo je názorně vyobrazeno zanášení odtokových žlabů, které jsou zcela zaplněny erodovaným materiálem, čímž ztrácí jakoukoliv účinnost. Při intenzivních deštích dochází ke splavení erodované materiálu přímo na vozovku, čímž je ohrožena bezpečnost provozu. Zatrávněný svah na jiné lokalitě při umělých srážkách vykazoval hodnoty míry eroze průměrně $3,36 \text{ g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ v létě a $9,62 \text{ g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ v zimě. Svahy na obrázku 6 vykazovaly hodnoty míry eroze $76,06 \text{ g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ v letních měsících a $138,95 \text{ g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ během zimního období. Celkový odtok na holých svazích byl několikanásobně vyšší.



obrázek 6 Erozní procesy na nově zbudovaných svazích (Cerdà, 2007)

3.3 Metody měření a hodnocení eroze

3.3.1 Měření

Způsob měření eroze závisí na cíli výzkumu. Nejspolehlivější formou výzkumů jsou terénní pokusy, které díky působícím přírodním činitelům přináší nejrealističtější výsledky. Zároveň však je obtížné z výsledků určit hlavní příčiny erozních procesů, neboť pokusná parcela je po dobu výzkumu vystavena mnoha faktorům, které ovlivňují celý proces. Proto je někdy vhodnější využívat laboratorní pokusy, u kterých lze simulovat a ovládat určité faktory (Morgan, 2005). Získaná data jsou posléze využívána k posouzení rozsahu eroze, vývoji matematických modelů, predikci eroze, znečištění vody. Odlišnost výsledků ze dvou totožných pokusných ploch, měřených za stejných podmínek, neznačí chybu lidského faktoru, nýbrž dokazuje variabilitu přírodních faktorů (Blanco a Lal, 2008). Při navrhování experimentu je nutné zvolit vhodnou velikost pokusných ploch a také počet sledovaných faktorů. V případě, že je pokus zaměřen na jeden faktor, například vliv sklonu, ostatní faktory

jsou považovány za konstantní. Každý experiment je nutné provést vícekrát, z důvodu vyloučení chyby a pro větší přesnost výsledků. Čistě teoreticky vzato, počet faktorů, které lze do experimentu zahrnout, není nijak omezen. V praxi jsou však pokusy omezeny jak časově, tak finančně (Morgan, 2005).

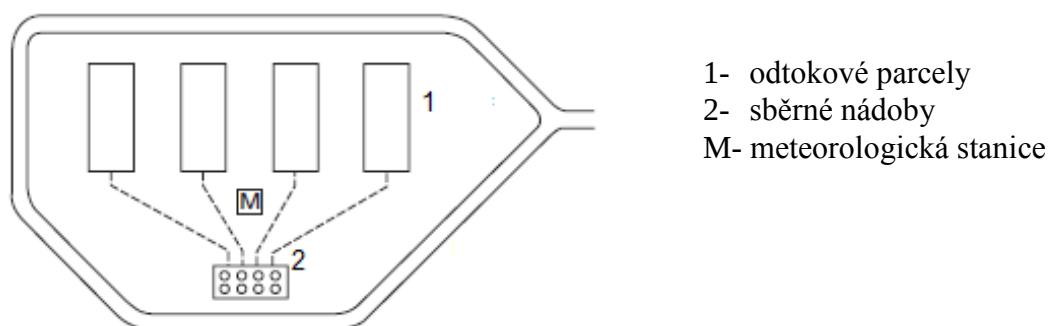
Metody výzkumu eroze

- Nivelační metody – sledují kvantitativní účinek eroze měřením vertikálních změn povrchu půdy. Tato metoda je vhodná pro latentní formu eroze. Dále je možné dělit na ambulantní nebo stacionární (Zachar, 1982).
- Volumetrické metody – probíhají na základě měření změn objemu půdy vlivem eroze nebo akumulace. Měření probíhá ambulantně nebo stacionárně, tedy dlouhodobě (Zachar, 1982). Jedním ze způsobů měření volumetrickými metodami, může být měření pomocí měřicího zařízení **erodoměru**. Tento přístroj za pomoci kovových jehlic, které jsou upevněny v rámu, kvantifikuje objem eroze v drahách soustředěného odtoku buďto erozních rýh nebo efemérních strží. Počáteční body jehlic jsou v kontaktu s povrchem půdy a pomocí koncových bodů lze zaznačit příčný profil daného útvaru (Pavlík a Uhrová. 2010).
- Pedologické – zahrnují stanovení půdních vlastností, týkajících se náchylnosti k erozi, nebo kvalitativních či kvantitativních změn, vlivem eroze.
- Měření celkového odtoku a sedimentu
- Metody fotogrammetrické

3.3.2 Pokusné parcely

Pokusné odtokové parcely se využívají nejen pro trvalý terénní výzkum, ale také pro laboratorní experimenty. Slouží k výzkumu faktorů, které mají rozhodující vliv na erozi. V polních podmínkách se využívají především pro ověření účinnosti agrotechnických postupů (Janeček et al. 2002). Standardní pozemek měří na délku 22 m a je široký 1,8 m. Je nutné znát sklon pozemku. Hrany parcely musí přesahovat alespoň 150mm nad povrch. Jsou vytvořeny z jakéhokoliv materiálu, který je odolný vůči povětrnostním podmínkám a odolá také sezónním změnám v půdě, jako je vymrzání a smršťování. Na konci svahu jsou umístěny sběrné nádoby, či žlaby, které by měly být uzavřeny, aby nedocházelo ke zkreslení výsledných objemů vlivem přímého vstupu atmosférických srážek. Do suspenze vody a smytých půdních částic je dávkováno flokulační činidlo, které urychlí proces sedimentace. Voda je následně odvedena a změřen se objem sedimentu, který zůstal na dně sběrné nádoby. Vzorky, které jsou odebrány za účelem sušení, se následně váží a z průměrných hodnot se určí

celková hmotnost ztráty půdy z dané parcely. Nevýhodou takovýchto parcel je to, že u postranních hran, které tvoří hranice plochy, se utváří rýhy, jež by se za normálních podmínek neformovaly. Dále je nutno brát zřetel na to, že se jedná o částečně uzavřený systém, proto dochází k ochuzení o část povrchového odtoku z horních částí svahů (Morgan, 2005). Při měření odtoku z větších ploch je téměř nemožné jímat veškerou vodu. Tento problém řeší různé typy reduktorů. Typ **Coshocton** větší část vody odvádí mimo jímací nádobu. Je konstruován tak, že voda z měrného žlabu dopadá na horizontální vodní kolo. Osa tohoto kola je odkloněna od vertikály. Při každé otáčce projede štěrbinu umístěnou na kole proudem vody a odebere menší část do sběrné nádoby (Janeček et al. 2002). Na obrázku 6 je znázorněno schéma odtokových parcel.



Obrázek 7 Schéma odtokových parcel (Morgan, 2005)

Velikost pokusných ploch (Blanco a Lal, 2008)

Při výběru velikosti je nutné dbát na to, jaký typ eroze bude experiment zkoumat.

- Mikropozemky – 0,05-2m², vhodné pro laboratorní použití, rýžkovou erozi
- Střední (USLE) pozemky – velikost pozemků většinou 4 x 22,1 m (šířka minimálně 2 m, z důvodu potlačení vlivu hranic pozemku)
- Velké pozemky nebo povodí – velikost alespoň 100 m², slouží k ověřování několika hypotéz současně, k výzkumu kombinace rýžkové a rýhové eroze. Plochy povodí slouží k dlouhodobému výzkumu a zaměřují se také na výzkum efemerálních strží.

3.3.3 Simulátor deště

Simulátory deště napodobují jak oddělení částic po dopadu kapky, tak i erozi povrchovým odtokem (Grismer, 2012).

Charakteristiky (Hudson, 1993)

- Velikost kapky: průměrně 2-3 mm, maxima kolem 7 mm
- Distribuce kapek různých velikostí: napodobení různých typů deště

- Kinetická energie: roste s intenzitou deště, ale je omezena horní hranicí 75 mm.hod^{-1} , z důvodu maximální velikosti kapek
- Rychlost dopadu: až 9 m.s^{-1}
- Intenzita srážek: většinou konstruovány pro jednu hodnotu, z praktických důvodů
- Rovnoměrnost srážek

Mezi největší výhody simulátorů deště patří to, že potlačují problémy související s rozměry počasí. Dále jsou přenosné, lze kontrolovat množství vody a velikost kapek. Ideální zadešťovací zařízení by mělo věrohodně simulovat přirozené srážky, v praxi se však setkávají s mnoha limity, kupříkladu kinetická energie kapek je nižší než u přirozených srážek. Napodobit kinetickou energii deště lze pouze při výšce několik metrů. Jedním z typů simulátorů jsou kapkovací, na nichž se kapky tvoří za pomoci vláken, trubiček nebo injekčních jehel. Kapkovací zařízení se užívá především pro laboratorní experimenty malých rozměrů a v místech s obtížným přístupem, či nedostatkem vody (Grismer, 2012). Dalším typem je simulátor tryskový, vhodný především pro terénní výzkum, či laboratorní pokusy na větších plochách. Pomocí tryskového simulátoru lze vyvinout kapky o velikosti 0-7 mm. Kapky se v takovýchto zařízeních tvoří buďto tlakovou vodou, nebo přetlakem vody, tedy konstantní výtokovou hladinou. U takových simulátorů bývá v horní části posazen rezervoár na vodu. Tlak u tryskových simulátorů může být vytvářen pomocí různých typů čerpadel, poháněných buďto elektrickou energií, nebo benzinem (Iserloh et al. 2013). Při měření rychlosti, v jaké kapky dopadají na povrch půdy, se berou v úvahu dva faktory a to rychlost při ústí trysky, která je následně připočtena k letové rychlosti. K reálnějšímu napodobení intenzity deště, jsou užívány různé kývavé pohyby trysek, či kolektorů, neboť umělý déšť většinou přesahuje intenzitu přirozeného (Janeček et al. 2002). Iserloh et al. (2013) ve své studii porovnává 13 simulátorů používaných v Evropě. Srovnává je z hlediska velikosti kapek, intenzity deště, tvaru ostříkované plochy, typu trysek či kapkovačů. Intenzita srážek, velikost kapek a jejich rychlost byly měřeny pomocí laserového paprsku $23 \times 2 \text{ cm}$. Ze získaných hodnot se vypočítala kinetická energie deště a zprůměrovaly se velikostní charakteristiky kapek. Znalost přesných charakteristik simulátoru předurčuje kvalitní výsledky výzkumu.

3.3.4 Modelování erozních procesů

Modelování eroze slouží k pochopení procesů, jež mají vliv na její průběh. Umožňuje predikci povrchového odtoku, následků eroze či návrh protierozních opatření. Při vývoji modelů je nutností multidisciplinární přístup k řešení problému.

Typy modelů podle K. J. Gregoryho a D. E. Wallinga (Morgan, 2005)

- **Fyzikální** – zmenšené modely obvykle postavené v laboratoři, vyžadují dynamické měřítko podobnosti mezi modelem a skutečností
- **Analogové** – používají mechanické nebo elektrické systémy umožňující analogii vzhledem k vyšetřovaným systémům, například tok elektrického proudu simuluje tok vody
- **Digitální** – jsou založeny na použití digitálních počítačů ke zpracování velkého množství dat
 - a) **fyzikálně podložené** – založeny na matematických rovnicích. Popisují procesy zahrnuté do modelu a berou v úvahu zákony o zachování hmoty a hybnosti
 - b) **stochastické** – založeny na generování syntetických sekvencí dat, získaných ze statistických charakteristik existujících vzorků dat, potřebných pro generování vstupních sekvencí pro fyzikálně podložené nebo empirické model, kde jsou k dispozici data jen pro krátké období pozorování
 - c) **empirické** – založeny na identifikaci statisticky významných vztahů mezi proměnnými. Nutností je dostatečný počet dat.

3.3.4.1 USLE

Univerzální rovnice ztráty půdy (Universal soil loss equation) umožňuje předpovědět průměrnou dlouhodobou ztrátu půdy. Pojednává pouze však o ztrátě půdy vlivem plošné a rýhové eroze. Model USLE byl vytvořen pro zemědělské účely, lze jej však použít i pro nezemědělský sektor (Stone a Hilborn, 2002) čili pro svahy komunikací. Je nutné brát zřetel na to, že byl založen na základě výzkumu dat, která pochází z více než 10 000 pokusných ploch, nebyly ovšem zkoumány v souvislosti s nezemědělským využitím, například pro svahy pozemních komunikací. (Baihua Fu et al. 2010). Řadí se mezi nejrozšířenější empirické modely na světě. Jeho výhoda spočívá v jednoduchosti a nenáročnosti na vstupní data. Nevýhodou však zůstává to, že nedokáže podrobně posoudit ztrátu živin, denní ztrátu půdy, či samostatné typy eroze (Blanco a Lal, 2008).

Univerzální rovnice ztráty půdy je definována vztahem: $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$

Faktor erozní účinnosti deště R [MJ.ha⁻¹.cm.h⁻¹]

Hodnota R kvantifikuje vliv dopadu kapky a poskytuje relativní informaci o množství a rychlosti odtoku.

Faktor erodovatelnosti půdy K [t.ha⁻¹]

Kvantifikuje náchylnost dané půdy k erozi na základě experimentálních stanovení.

Topografický faktor LS

Kombinace vlivu délky svahu a jeho sklonu. Délka svahu je brána od bodu, z něhož pochází povrchový odtok, po místo, kde je svah natolik mírný, že dochází k ukládání sedimentu (Wischmeier a Smith, 1978). Přirozené svahy bývají většinou nepravidelné, proto dané výpočty nejsou zcela přesné (Janeček et al. 2002). Model byl založen na výzkumu erozních procesů na pozemku s přesně definovanými parametry. Plocha měřila na délku 22,13 m s jednotným podélným sklonem 9 %. Půda na pozemku byla udržována po dva roky bez vegetace a pravidelně obdělávána aby se zabránilo růstu vegetace a tvorbě povrchového škraloupu. (Wischmeier a Smith, 1978). Výpočet LS je založen na vztahu celkové délky svahu a sklonu.

Ochranný faktor vegetace C

C je poměrem ztráty půdy z daného pozemku ke ztrátě půdy na pozemku s trvalým úhorem. Vliv vegetace na ochranu před erozí je přímo úměrný pokryvnosti a hustotě porostu. Rostliny eliminují destruktivní účinek deště a hustý porost zpomaluje povrchový odtok. Pozitivní účinek rostlin se projevuje také zlepšením vlastností půdy jako je pórovitost, propustnost a zpevnění půdy díky kořenovému systému. C faktor je dále vztažen k užití agrotechnice (Janeček et al. 2007; Wischmeier a Smith, 1978)

Účinnost protierozních opatření P

Faktor P je poměrem mezi ztrátou půdy s plochy, která byla obhospodařována správnými protierozními postupy a ztrátou půdy bez takovýchto opatření. Nabývá hodnot 0 – 1, přičemž 1 určuje pozemek bez protierozních úprav.

Výsledek USLE je vhodné porovnat s přípustnými ztrátami půdy. Tyto hodnoty byly určeny na základě mocnosti půdního profilu. Hloubka půdy je určována terénním průzkumem. Samotné měření probíhá v místech, kde je pozemek nejsvažitější. Mocnost profilu lze určit též orientačně podle BPEJ, podle páté číslice v kódu, označující skeletovitost a hloubku půdy.

Pokud výsledek z univerzální rovnice převyšuje přípustnou ztrátu půdy, poukazuje to na nedostatečnou ochranu před erozí. Pro pozemky, kde mocnost půdního profilu nepřesahuje 30

cm, se nedoporučuje intenzivní využití. Vhodný způsob obhospodařování takových parcel je zakládání trvalých travních porostů (TTP), (Janeček et al. 2007).

Tabulka 1 Přípustná ztráta půdy erozí podle hloubky půdy (Janeček, 2007)

Hloubka půdy	Kód BPEJ (5. číslo)	Přípustná ztráta půdy erozí (t.ha-1.rok-1)
středně hluboká (30-60cm)	1, 4, 7	4,0
hluboká (>60cm)	0, 2, 3	10,0

3.3.4.2 Modifikace USLE

MUSLE

Modifikovaná univerzální rovnice ztráty půdy. Na rozdíl od USLE je ve faktoru R erozní účinek deště nahrazen erozním účinkem povrchového odtoku. Ten zde představuje hybnou sílu v oddělení a transportu částic. (Chutachindakate a Sumi, 2008).

RUSLE

RUSLE, neboli revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy, vznikla na základě dalšího vývoje USLE. V podstatě se jedná o počítačovou verzi svého předchůdce. Hlavním rozdílem je zdokonalení všech faktorů (Stone a Hilborn, 2002). Je daleko obsáhlejší a náročnější na vstupy. Zahrnuje procesy jako vymrzání a rozmrazování půdy. Využívá počítačových procesů k výpočtům složitých interakcí LS faktoru (Blanco a Lal, 2008).

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Rozdíly v porovnání s USLE (Renard et al. 1991)

R – Ke zlepšení došlo zejména v oblasti isoerodentních map pro území USA. Dále se snížili hodnoty R pro ploché svahy, vyskytující se v lokalitách s intenzivními a dlouhými bouřkami.

K – Hodnota K není v průběhu roku konstantní. Nejvyšší hodnoty nabývá v období jara, kdy je půda narušována procesy zamrazování a tání.

LS – Ztráta půdy je mnohem citlivější na změny ve strmosti svahu, oproti změnám délky. Chybné určení sklonu svahu o 10 %, má za následek rozdíl ztráty půdy až 20 %. Zatímco chybné určení délky svahu o 10 % ovlivní ztrátu půdy jen o 5 %. Na svazích do 20 % se výpočty pomocí RUSLE a USLE víceméně shodují. U strmých svahů však nastává zvrát, kdy výsledky RUSLE ukazují téměř o polovinu menší ztrátu půdy.

C – V RUSLE je vypočten pomocí váženého průměru SLR (poměr ztráty půdy), který je vypočten na základě čtyř subfaktorů: PLU (předchozí využití půdy), CC (vegetační kryt – canopy cover), SC (povrchové pokrytí, ve smyslu mulče, posklizňových zbytků), SR (drsnot povrchu).

P – V RUSLE se objevil P faktor také po pastviny.

Model RUSLE lze využít i pro nezemědělsky využívané plochy (Janeček et al. 2002), tím pádem je vhodný také pro svahy silničních komunikací.

3.3.4.3 WEPP (Flanagan a Nearing, 1995)

WEPP (Water erosion prediction project) se řadí do skupiny procesně založených modelů. Je vhodný pro predikci eroze v rozsahu jednoho svahu až pro celé povodí, přičemž povodí je zde definováno jako jeden nebo více svahů, svádějící vodu do jednoho a více kanálů nebo do nádrží. Rozdílem oproti ostatním modelům je to, že zahrnuje vliv procesů vyskytujících se v zimních měsících jako je vymrzání a následné rozmrzání půdy. Ačkoliv původně byl WEPP určen pro zemědělské plochy, lze jej využít v oblasti eroze podél komunikací, neboť do něj lze aplikovat prvky jako zářezy a násypy. V případě nezpevněných silnic také povrch vozovky (Fu et al. 2010). Výhodou modelu WEPP oproti ostatním je to, že dokáže předpovídat ztrátu půdy z různého časového hlediska od denních až po roční hodnoty. Z hlediska prostorového pracuje s jednotlivými svahy až celými povodími, od malých až po velké (Blanco a Lal, 2008).

3.3.4.4 EUROSEM (European Soil Erosion Model)

EUROSEM je procesně založený model, navržen pro výpočet transportu sedimentu, erozi a následnou depozici materiálu během bouře. Model lze aplikovat pro jednotné plochy nebo malá povodí (Morgan, 2005). Vytváří hydrogramy a grafy sedimentů pro každou událost. Struktura EUROSEM je modulární, přičemž každý modul je propracovaný na nejvyšší úrovni.

Model se zabývá následujícím (Morgan et al. 1998):

- Intercepce srážek rostlinami – srážky jsou v modelu udávány jako R – hloubka [mm] pro každý časový úsek v průběhu bouře. Srážky jsou rozděleny na dvě části a to na ty, které projdou skrze vegetační kryt a ty, jež se zachytí ve formě intercepce na rostlinách.
- Povrchové půdní podmínky – drsnost povrchu ovlivňuje množství vody zadržené v pozemních depresích. Tento faktor byl v mnohých hydrologických modelech ignorován.
- Procesy povrchového odtoku – EUROSEM zahrnuje pouze turbulentní proudění, z důvodu jeho výskytu při bouřích.

3.3.4.5 SMODERP

SMODERP (Simulační Model Odtoku a Erozního procesu) je fyzikálně založený model, jež byl vyvinut pro podmínky České republiky, v čemž tkví největší výhoda. Využití nachází v zemědělském sektoru, ale také při protierozním řešení svahů výsypek a silničních svahů. Protierozní řešení a ohroženost pozemku zkoumá na základě srážko-odtokových vztahů. Maximální přípustná velikost plochy je cca 100ha (Janeček et al. 2002).

Model se skládá ze dvou modulů:

- Hydrologický modul (model plošného povrchového odtoku)
- Erozní modul (model plošné rýžkové a mezirýžkové eroze)

Vstupní data potřebná k simulaci (web SMODERP)

- **Morfologie terénu:** každý svah je v modelu zastoupen charakteristickým profilem, neboť model SMODERP funguje na bázi jednoho rozměru. Zvolené profily musí charakterizovat odtokové poměry daného území. Nesmí však být vedeny v drahách soustředěného odtoku ani na hřbetnicích, takové profily nejsou dostatečně charakteristické.
- **Půdní vlastnosti:** k získání přesných dat je nutností terénní průzkum dané lokality se zaměřením na půdní zrnitost a hydraulickou vodivost. Množství vzorků je závislé na heterogenitě území.
- **Povrch a vegetace:** Míra pozitivního vlivu závisí na konkrétní plodině a fenofázi. Důležitými ukazateli jsou potenciální intercepce a poměrná plocha listová.
- **Srážky:** SMODERP jakožto epizodní model pracuje s jednotlivou srážkou. U posudku ohroženosti ploch nebo návrhu protierozních opatření se volí návrhové srážky s konkrétní dobou opakování. V závislosti na významu lokality se volí delší opakování. Například u posouzení erozní ohroženosti zemědělské plochy se volí návrhový déšť s dobou opakování 2 až 5 let, u ochranných pásem vodních zdrojů se volí opakování 10 let.

Aplikovatelnost zahraničních modelů bez předchozího podrobného testování, se na našem území jeví jako nevhodná (Janeček et al., 2002).

3.4 Prevence eroze v okolí komunikací

V době neustálého rozvoje lidské společnosti jsou protierozní opatření nezbytností. Při navrhování takovýchto opatření je nutno přistupovat k určitému místu komplexně a vhodnými zásahy tak upravit odtokové poměry (Holý, 1994). Protierozní ochrana je definována jako aktivní prevence ztráty půdy. Tento přístup byl shledán mnohem efektivnějším, než pozdější záchyt erodovaného materiálu. Cílem protierozních opatření je minimalizovat potenciál erozních procesů a zabránit transportu materiálu. K řešení problému by se mělo přistupovat již ve fázi plánování projektu (Fay et al. 2012).

3.4.1 Opatření technického charakteru

Ke snížení ztráty půdy lze využít mnohé technické postupy zakládající se na zdrsnění povrchu pomocí válců s různým vzorem, rýhováním povrchu apod. Výhodou této metody je dostupnost nástrojů, podpora vegetace a snížení objemu odtoku. Na základě experimentu (Flanagan a Ascough, 2001) vyšla z testů nejlépe metoda válcování se vzorem, kde došlo ke snížení ztráty půdy o celých 76 %. Při použití válců s hroty (tzv. sheepfooting) kleslo množství erodované o více než polovinu.

3.4.2 Vegetační opatření

Vegetace má v ochraně před erozí zásadní roli. Vegetační pokryv je poměr půdy zakryté rostlinnou biomasou. Jeho hlavní funkce tkví v tom, že zabraňuje kapkám dopadnout na holý povrch půdy a tím v podstatě snižuje kinetickou energii deště na minimum. Hustota porostu zásadně zpomaluje povrchový odtok, čímž brání transportu půdních částic. Zároveň dochází ke zpevnění půdy vlivem kořenového systému a obohacování půdy organickým materiálem (Blanco a Lal, 2008).

Zatrávňování

Jedna ze standardních metod prevence před erozí. Travniny vytváří hustý porost, který chrání svahy jak před vodní erozí, tak i před větrnou. Nejvhodnější variantou je setí travní směsi, která obsahuje semena trav výběžkatých i trsnatých. Trsnaté trávy sice netvoří tak hustý zápoj, takže by kolem jednotlivých rostlin mohla vznikat holá místa podléhající erozi, avšak o to více mají rozvinutý kořenový systém do hloubky. Proto je vhodné doplnit o výběžkaté druhy trav, které vyplní holá místa. Směs je vhodné namíchat podle rychlosti

klíčení, kdy část druhů vyklíčí rychle a poskytne tak rychlou předběžnou ochranu před povětrnostními podmínkami a druhá část klíčící pomalu, poskytne v budoucnu dlouhodobou ochranu (Fay et al. 2012). Zakládání trávníků podél pozemních komunikací se řídí ČSN 83 9031. Půda musí mít vlastnosti podobné ornici. Výsev se provádí na vrstvu substrátu o hloubce 10 cm, pokud se počítá s pozdější výsadbou, vrstva půdy je 20 cm. Povrch musí být zbaven nerovností, bez kamenů větších než 5cm, zbaven plevelů mechanicky nebo chemicky. Travní směs je zvolena na základě vyhodnocení stanovištních podmínek. Cao et al. (2005) se zabýval vlivem zatravnění nezpevněných polních cest na odtokové poměry. Ze sedmi použitých druhů nejvýraznější snížení odtoku a ztráty půdy prokázal Žitňák z čeledi lipnicovitých (*Agropyron cristatum*). Oproti neošetřeným plochám došlo ke snížení celkového odtoku o 88 % a ztráta půdy klesla o 91 %. V průměru na zatravněných plochách ztráta půdy klesla o 67 % a odtok o 57 %. Jelikož mnohé druhy trav lze využít ke krmným účelům, jedná se tedy o vhodné řešení i z ekonomického hlediska.

Travní směs musí splňovat podmínky jako vytrvalost na stanovišti, dostatečně rychlé vzcházení a počáteční růst, nízký vzrůst nevyžadující časté kosení, tolerance vůči stresovým podmínkám, nenáročnost na živiny a intenzitu péče, protierozní účinek, dobré odnožování a dobrá konkurenceschopnost. Při porovnávání již provedených experimentů, je nutné brát ohled na místní druhy travin, klimatické charakteristiky a půdní charakteristiky (García-Palacios, 2010)

Zakládání trávníku

- **Suchý výsev:** Provádí se ručně nebo mechanicky. Ruční způsob výsevu je vhodný jen na mírných svazích. Výhodou je to, že k aplikaci není potřeba žádného zařízení. Jedná se o nejlevnější způsob výsevu. Nevýhodou je však narušení povrchu při pocházení během procedury a dále absence protierozní ochrany do vytvoření souvislého porostu.
- **Drnování:** používají se buď travní drny, nebo travní koberce stejných rozměrů, nejméně 0,25m. Pokládání se provádí dvojím způsobem. Celoplošně, jen s úzkými spárami, kde příčné spáry nesmí navazovat. Úsporně, ve čtvercových, nebo pásových formacích, mezi kterými se spáry vyplní zeminou, která se posléze oseje. Travní koberec nebo drn na prudkém svahu musí být připevněn alespoň 2 kolíky/m².
- **Hydroosev:** provádění metody se řídí ČSN 83 9041. Nachází uplatnění na velkých plochách se sklonem do 60°. Jedná se o nanášení směsi osiva, vody, hnojiv, organické

hmoty (rašelina, mulč), včetně protierozní přísady. Nanášení všech komponentů směsi se provádí jednorázově nebo maximálně ve třech fázích.

- Dvoufázový nástřik: první etapa zahrnuje nástřik směsi osiva, hnojiva, organické hmoty a vody. Ve druhé etapě je aplikována směs protierozní přísady, vody a případně organické hmoty.
- Třífázový nástřik: v první etapě je nanesena směs osiva, hnojiva, rašeliny a vody. Druhá etapa zahrnuje organickou hmotu a vodu. V poslední fázi se nanáší protierozní přísada s vodou.

Protierozní přísady musí být neškodné vůči životnímu prostředí, nesmí omezovat klíčivost a následný vývoj rostlin. Jako protierozní přísady se používají asfalto-latexové emulze SA 4 a SA 10, které jsou z hlediska životního prostředí nepříliš žádoucí. Často dochází k vytvoření škraloupu, který omezuje schopnost klíčení semen. Dále se užívají akrylátové disperze, které sice vynikají svými protierozními vlastnostmi, ale stejně jako asfalto-latexová emulze omezují klíčivost. Poslední možností je použití upravených sulfitových pryskyřic s nízkou protierozní účinností, ale s pozitivním vlivem na klíčivost.

Mezi hlavní výhody osevu patří zejména produktivita práce, okamžitá ochrana před erozí a splavením semen, ochrana před povětrnostními podmínkami, tvorba humusu rozkladem mulče. Nevýhodou je vyšší cena oproti mechanickému či ručnímu výsevu (TP 99).

Druhy trav vhodné na protierozní opatření:

- Kostřava červená (*Festuca rubra* L.)
- Kostřava ovčí (*Festuca ovina* L.)
- Lipnice luční (*Poa pratensis* L.)
- Lipnice smáčknutá (*Poa compressa* L.)
- Jílek vytrvalý (*Lolium perenne* L.)
- Psineček tenký (*Agrostis tenuis* Sibth.)
- Pohánka hřebenitá (*Cynosurus cristatus* L.)
- Metlice trsnatá (*Deschampsia caespitosa*)

Kromě zatravnění lze použít i jiné byliny, vynikající svou vytrvalostí, odolností extrémním podmínkám, bez potřeby častého sečení. V našich podmínkách se nejčastěji do travních směsí přidávají bobovité rostliny, které navíc půdu obohacují o dusík a organickou hmotu (TP 53).

Jedná se zejména o:

- jetel plazivý (*Trifolium repens* L.)

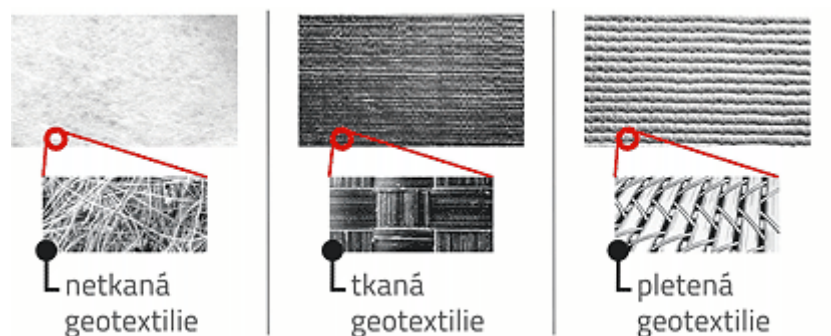
- štírovník růžkatý (*Lotus corniculatus* L.)
- tolíce dětelová (*Medicago lupulina* L.)
- vičenec ligrus (*Onobrychis viciifolia* L.)
- čičorka pestrá (*Coronilla varia* L.)

3.4.3 Geomateriály

Geomateriály slouží jako plošná kontaktní ochrana svahů před erozními činiteli. Existuje několik typů, které se následně dělí podle metody výroby, materiálu a způsobu použití.

Geotextilie

Je plošná propustná textilie. Podle způsobu výroby se dělí na tkané, netkané, pletené a kombinované. V závislosti na použitém materiálu se rozlišují na geotextilie z polyakrylnitrátu (PAN), polyesteru (PET), polyamidu (PAD), polypropylenu (PP), polyetylenu (PE) a geotextilie z přírodních vláken jako len, juta, kokos (TP 53). Shao et al. (2013) porovnávali tři typy geotextilií a to jutovou, polyesterovou a polyesterovou síť. Z výsledků vyplývá, že nejlepší volbou je jutová geotextilie, která poskytovala dostatečnou ochranu před smyvem půdy, dopadem kapek, udržovala vhodnou vlhkost a podmínky pro klíčení rostlin. Účinnost každého druhu geotextilie závisí na jeho struktuře, čím jednodušší, tím menší účinnost.

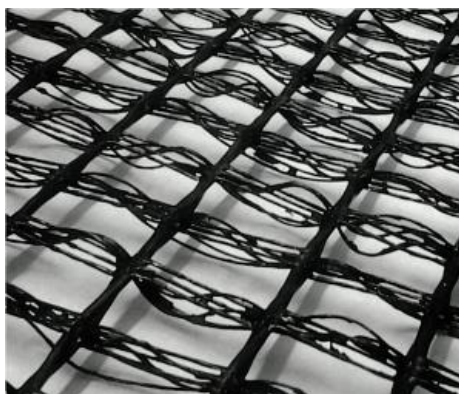


obrázek 8 Typy geotextilií z hlediska technologie výroby (<http://www.geomat.cz/img.php?id=2654>)

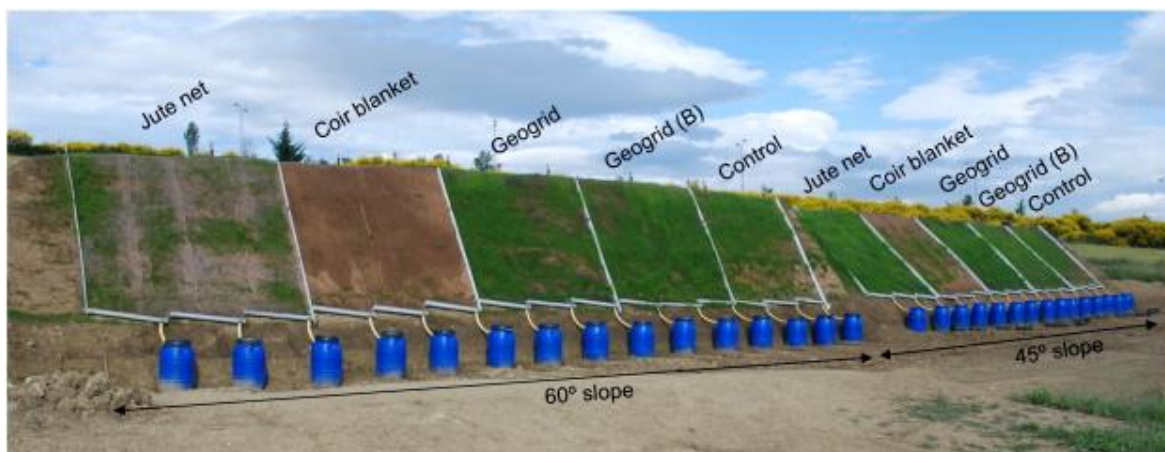
Geotextilie slouží k ochraně svahů před poškozením vlivem povětrnostních podmínek a proudící vody. Chrání výsev a výsadbu do doby, než vytvoří potřebný zápoj (Fay, 2012). Největší výhodou je okamžitá ochrana svahu před erozí a možnost využití biodegradabilních materiálů s životností 2-3 roky (Janeček et al. 2002). Užití geotextilií se doporučuje na svazích o sklonu 1:1,15 a více.

Technické požadavky: nezávadnost pro životní prostředí, nesmí tvořit překážku pro správný vývoj porostu, odolnost vůči fotodegradaci (nejméně odolným materiálem je PAT, naopak nejodolnější je PP), pevnost vůči mechanickému namáhání a přívalové vodě, přilnavost k terénu. U geotextilií z přírodního vlákna platí pravidlo, že čím větší hmotnost na m^2 , tím lépe zadržuje vláhu a zachytí větší množství materiálu. Varianta textilie z jutového vlákna má hmotnost přibližně $1,0-1,2 \text{ kg.m}^{-2}$ (Howell, 1999).

Pokládce předchází zarovnání terénu a odstranění kamenů apod. Aplikace na svah se provádí nejlépe od shora, přičemž horní konec musí přesahovat horní okraj svahu v takové míře, aby se stékající voda nedostala pod geotextilii. Poté je možné provést výsev, buďto hydroosevem nebo mechanickou cestou. Méně častý způsob použití geotextilie je ten, že se se svah nejprve oseje a teprve poté se položí textilie. Musí být zvolen takový druh, který nebrání prorůstání klíčících rostlin. Álvarez-Mozos et al. (2013) porovnával účinnost geotextilií na prudkých svazích o sklonu 45° a 60° (obrázek 10). Použil geotextilie z jutového, kokosového vlákna a polyesteru s 3D strukturou. Na kontrolních variantách byl aplikován hydroosev. Nejnižší hodnoty ztráty půdy prokázala georochož, díky 3D struktuře. Co se objemu povrchového odtoku týče, nejvyšší hodnoty vykazovaly obě přírodní geotextilie, což bylo vysvětleno tím, že voda se nestihla infiltrovat do půdy. Z výzkumu vyplynulo, že na prudké svahy je nejlepší variantou geomříž s 3D strukturou (obrázek 9), jež plní funkci protierozní a zpevňující. Geomříž byla pokládána ve dvou variantách. První na povrch bez následného zahrnutí zeminou, kde průměrná ztráta půdy činila $0,6 \text{ g.m}^{-2}$. Druhá varianta s následným zahrnutím se prokázala jako méně účinná a to s průměrnou ztrátou půdy $2,1 \text{ g.m}^{-2}$. Obě hodnoty porovnávány na svahu o sklonu 45° .



obrázek 9 Geosít' Fortrac s 3D strukturou (<http://www.svenskageotech.se/images/fortrac3.jpg>)



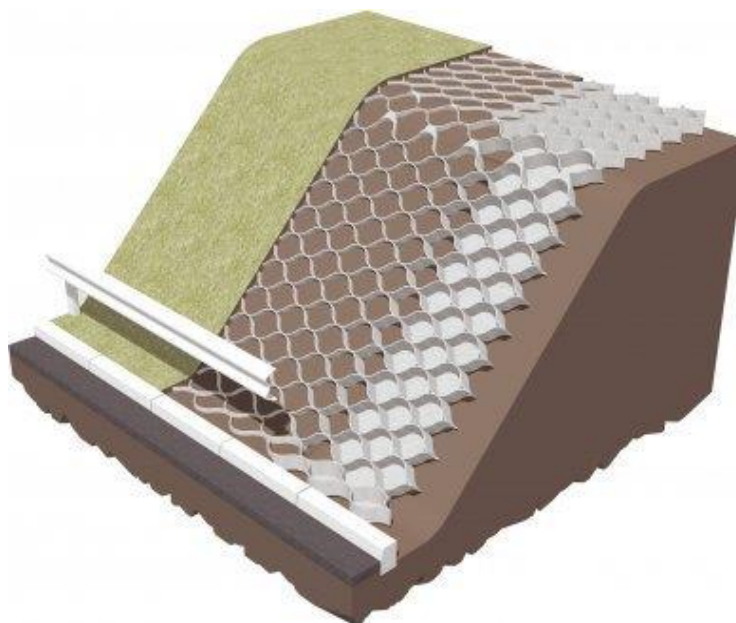
obrázek 10 Srovnání různých typů geotextilií při různém sklonu. Zleva geotextilie z juty, kokosu a polyesteru. (Álvarez-Mozos et al. 2013)

Travní rohože

Jsou to geotextilie skládající se z několika vrstev, mezi nimiž je aplikováno osivo s dalšími látkami podporující vývoj vegetace. Užívají se zejména v místech s nesoudržným podkladem, u zemin s vyšším obsahem prachových částic, u dlouhých a strmých svahů apod. Hlavní výhodou je možnost aplikace po celý rok, udržení vlhkosti a potlačení plevelů. K řádnému upevnění travních rohoží je potřeba vrstva minimálně 25 cm. Vyrábí se většinou z přírodních vláken, s přídavkem syntetických vláken pro delší životnost. Po rozpadu materiálu slouží přírodní vlákna jako zdroj živin.

Geobuňky

Geobuňky, neboli tzv. celulární systémy jsou trojrozměrné prvky podobné včelímu plástu. Většinou se vyrábí z polymerů. Jednotlivé sváry se vyznačují vysokou pevností. Po ukotvení ke svahu se jednotlivé buňky vyplní substrátem, který se posléze oseje vhodným druhem vegetace. Ta je díky celulární struktuře chráněna před splachem povrchovým odtokem. Výhodou je flexibilita materiálu, nízká hmotnost a odolnost vůči povětrnostním podmínkám, chemickým látkám a půdním mikroorganismům. Buňky jsou díky perforaci propustné pro vodu, aby mohla snadno protékat po svahu dolů, jinak by hrozilo vyplavení materiálu z jednotlivých buněk.



obrázek 11 Geobuňky na silničním svahu (www.terram.com/market-sector/highways/)

Georochože

Jedná se v podstatě o geotextilie s prostorovou strukturou. Skládá se tedy ze dvou částí a to z plošné sítě, ke které je připojena prostorově uspořádaná síť.

Lineární textilní vlákno

Podstatou metody je smíchání lineárních vláken se zeminou, popřípadě s osivem a následná aplikace směsi na svah. Takováto směs má armovací efekt, tedy zpevňující. S délkou vláken roste pevnost v tlaku. Rozměry se pohybují od 20 mm do 100 mm. Do určité míry se jedná o napodobení kořenového systému rostlin. Opět lze použít vlákna PET, nebo PP. Vhodnější jsou však vlákna přírodní.

Mulčování, aplikace kalu, kompostu

Mulčování je metoda, při které se na povrch půdy aplikuje sláma, popřípadě jiné vegetační zbytky, či syntetické látky. Použití mulče je pouze dočasným opatřením, sloužící jako podpora vegetace do založení kvalitního porostu. Chrání půdu před rychlým vysycháním a změnami teplot. Podobně jako vegetační pokryv snižuje kinetickou energii letící kapky a snižuje rychlost povrchového odtoku. Rozkladem mulčovacího materiálu vzniká cenný organický materiál. Proto se jedná o vhodnou metodu protierozní ochrany na svazích s chudými půdami. Při celoplošném mulčování se nanáší vrstva 50 mm (Howell, 1999). Při použití štěrky, kůry a slámy musí převažovat velikostní frakce 10-15cm (TKP 13). Mulčovací materiál může být tvořen ze slámy, papíru, nebo dřeva. Účinnost přírodního mulče lze zvýšit

přidáním polymeru nebo psyllia. Aplikace samotného kompostu na svah nemusí být tolik účinná v porovnání s mulčem (Flanagan a Ascough, 2001).

Pokusy (Bakr et al. 2012) dokazují výrazný pozitivní vliv na obsah nerozpuštěných látek ve vzorcích povrchového odtoku s použitím různých druhů mulče. Na svazích podél komunikací byla vybrána čtyři místa, na kterých bylo vybudováno 8 standardních pokusných parcel na měření sedimentu z povrchového odtoku. Plocha každé parcely byla 4x4m, s různou svažitostí 10 %, 15 %, 25 % a 34 %. Mulčovací směs obsahovala 70 % štěrky z tvrdého dřeva a 30 % dřeva borového a byla aplikována v tloušťkách 5 cm a 10 cm. Přičemž na některých parcelách byl mulč zapracován do půdy. K porovnání výsledků byly ponechány dvě kontrolní parcely, jedna s povrchovou úpravou a druhá bez úprav. Výsledky pokusů dokazují zvýšení odtoku na plochách bez aplikace mulče a tam, kde byl zapracován do půdy. Celkový pokles nerozpuštěných látek na ploše s vrstvou mulče 5 cm činil 70 % a na ploše s vrstvou 10 cm došlo ke zlepšení až o 74 %, oproti kontrolním plochám. Zároveň bylo prokázáno, že zapracování hmoty do půdy zvyšuje celkový povrchový odtok a také zvyšuje zákal. Ze závěrů tedy vyplývá, že k nejlepší ochranu před celkovým odtokem a zákalem, poskytuje vrstva mulče 10cm, bez zapravení do země. Avšak z hlediska poměru ekonomických nákladů a přínosů, se jako nejvhodnější metoda ukázala aplikace mulče 5cm bez zapracování do půdy.

Oña et al. (2006) provedl výzkum aplikace směsi kompostu a čistírenského kalu na silniční svahy. Porovnává vliv jednotlivých složek aplikovaných zvlášť a poté samotné směsi. Experimentu předcházela laboratorní analýza na obsah těžkých kovů a mikrobiologický rozbor obou v komponentech směsi. Poukázal na to, že v EU chybí legislativa, která by řídila obsah těžkých kovů v kalech pro aplikaci na silniční svahy. Výzkum probíhal na 32 pokusných parcelách, rozdělených do dvou skupin se sklonem 26,6° (2:1) a 33,7° (3:2). Každá pokusná plocha měla rozměry 4x5m. Na pokusné plochy byla aplikována dávka kalu 0, 60, 80 a 100 t.ha⁻¹ a to v průměrných vrstvách 0, 4.72, 6.30 a 7.87 mm. Na dalších parcelách byl aplikován kompost v dávkách 0, 40, 60, 80 t.ha⁻¹ ve vrstvě 0, 2.33, 3.49, a 4.65 mm. Na takto ošetřené svahy byly hydroosevem vysety *Stipa tenacissima* a *Thymus capitatus* a manuálně *Genista umbellata* a *Retama monosperma*. Nejhorších výsledků dosáhly kontrolní plochy bez jakékoliv úpravy, kde ztráta půdy činila v průměru 71,5 t.ha⁻¹ a zároveň vykazovaly nejnižší procento vytvořeného vegetačního krytu, v průměru pouhých 18,8 %, oproti 56,9 % s dávkou č. 16, kde ztráta půdy v průměru činila 7,5 t.ha⁻¹ (viz tabulka 3).

Tabulka 2 Dávkování kalu, kompostu (Oña et al. 2006)

dávka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
kal t.ha ⁻¹	0	100	80	60	0	0	0	100	100	100	80	80	80	60	60	60
komp. t.ha ⁻¹	0	0	0	0	80	60	40	80	60	40	80	60	40	80	60	40

Tabulka 3 Ztráta půdy t/ha/rok (Oña et al. 2006)

dávka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
svah 2:1	72	53	67	57	47	61	57	14	31	45	30	26	18	10	8	3
Svah 3:2	71	48	59	10	49	30	27	11	13	8	9	8	21	16	14	12

Z výzkumu tedy vyplynulo, že kombinace obou složek při vhodném poměru je mnohem vhodnější než aplikace mulče nebo kalu samostatně.

3.4.4 Chemické přípravky

Stabilizace půdy pomocí chemických přípravků spočívá v jejich aplikaci ke zlepšení jedné nebo více charakteristik. Aplikace probíhá buďto mechanickým zapravením do půdy, nebo aplikací na povrch půdy a následnou penetrací (Abood et al. 2007). Použití chemických stabilizátorů, nebo půdních kondicionérů, k ochraně svahů je pouze dočasným opatřením. Půda získá potřebný čas k vytvoření trvalé ochrany pomocí vegetace. Významnou skupinou takových látek jsou přípravky polymerní a kopolymerní povahy. V půdě vyvolávají syntetickou cestou tvorbu agregátů, což je způsobeno snížením elektrokinetického potenciálu povrchu částic, či adsorpcí polymerních molekul. Vlastnosti umělých agregátů jsou totožné s těmi přirozenými. Mají tedy pozitivní vliv na vzdušný i vodní režim půd. Agregáčnící procesy vyvolávají hlavně látky ze skupiny akrylových derivátů (kyselina akrylová, akrylamid, metaakrylamid, polyvinylalkohol) a ve vodě rozpustné polymery (polyvinylacetát, akrylonitril, methyakrylát apod.) (Holý, 1994). Polymer je přírodní nebo syntetická sloučenina s vysokou molekulární hmotností. Je složen z mnoha vzájemně propojených řetězců monomerů. Možnost využití polymerů ke zlepšení půdních vlastností je známa zhruba od poloviny minulého století. Hlavní nevýhodou tehdy byla jejich vysoká cena, což podnítilo další vývoj. Další skupinu tvoří chemické mulčovací látky. Řadí se sem zejména deriváty nafty (asfalt), alifatické uhlovodíky (polyetylen, pryskyřice apod.). Tyto sloučeniny vytváří povrchový ochranný film, avšak neovlivňují tepelný, vlhkostní ani vzdušný režim

půdy. V závislosti na chemické povaze látky vytvoří různé typy ochranných vrstev, jako například tvrdou krustu, flexibilní a elastickou krustu. Při postřiku na písčité povrchy se kapky stabilizátoru do průměru 8 μm dostanou do intersticiálních prostorů eolických částic, kde stmelí částice dohromady. Částice větší než 8 μm zůstávají na povrchu a utváří ochranný plášť (Han, 2002). Zvláštní skupinu tvoří umělý kaučuk, latexy a bitumen. Základním požadavkem je neškodnost vůči životnímu prostředí (Holý, 1994). Bitumenová pojiva jsou tvořeny ropnými pryskyřicemi, či modifikovanými asfaltovými emulzemi. K těmto produktům jsou přidávány katalyzátory, dispergační činidla a urychlovače penetrace, jež pomáhají spojovat půdní částice. Účinek se projevuje na půdách s podílem jílových částic alespoň 30 % (Birst a Hough, 1999).

Organické sloučeniny

Ke snižování erozním účinkům se užívají lepidla, izolační sloučeniny, které se nastříkají v souvislé vrstvě na povrch. Díky svým vlastnostem utěsní povrch a drží částice pohromadě. Do této skupiny patří bitumen a ropné oleje, které během suchých období nejsou stabilní. Dále se zde řadí lignin sulfonát a rostlinné oleje (Chunhua, 1992). Půdní kondicionéry na bázi ligninu jsou výrazně adhezivní. Lignin sulfonát vzniká při výrobě papíru. Jeho využití v protierozní ochraně spočívá v umělé tvorbě makrostruktury a posílení povrchové vrstvy půdy. Vytváří se z něj inter-polymerní komplexy (IPC), reakcí s oligo aminem (OA) nebo polymerním aminem (PA). IPC s OA mají oproti PA horší mechanické vlastnosti. Vynikají svými tmelícími schopnostmi, proto se užívají na písčitých půdách, kde vytvoří povrchovou krustu, která chrání před větrnou i vodní erozí. Kondicionéry na bázi ligninu při kontaktu s půdou vytváří odolné agregáty s 25 - ti násobnou hydraulickou vodivostí. Zlepšují tedy infiltraci vody a odolnost vůči odtoku. Velkou výhodou je biodegradace IPC, při které vznikají humusové látky. Inter-polymerní komplexy s PA jsou mnohem odolnější nárazům dešťových kapek. Aplikací půdních kondicionérů na bázi ligninu lze snížit povrchový odtok a ztrátu půdy až o 45% (G. Shulga, 2001)

Han et al. (2002) zkoumal účinek chemických stabilizátorů podél cest v oblasti pouště Taklamakan. K experimentu použil následující čtyři směsi:

- **LVA – polyvinyl-alkoholová emulze**
- **LVP – polyvinyl – acetátová emulze**
- **WBS – směs vodního skla a chloridu vápenatého**
- **STB – směs vodního skla a močoviny**

K zajištění potřebné velikosti kapek těchto stabilizátorů je nutné dodržovat teplotu 10-71°C. Dodržení rozsahu teplot zaručuje, že nedojde ke srážení emulzí. Před samotnou aplikací na testovanou plochu bylo nutné zjistit velikost kapek. Všechny emulze dokázali vytvořit kapičky menší než 5µm, což zaručuje snadné pronikání do pórů v eolických písčích. Důležitým ukazatelem stabilizátorů je jejich viskozita, která ovlivňuje infiltraci vody. Čím viskóznější emulze je, tím tvrdší krustu utvoří na povrchu, ale zároveň omezí schopnost infiltrace. Naopak emulze s nižší viskozitou zaručí lepší infiltrační podmínky, ovšem nedokáže vytvořit potřebnou ochrannou vrstvu. Při zkouškách viskozity a pevnosti nejlépe obstála směs WBS, na druhou stranu, při testech odolnosti slunečnímu záření ztratila přes 40% pevnosti. V polních podmínkách WBS jako jediná vytvořila krustu sice pevnou, avšak velmi křehkou, tudíž se tvořili praskliny. Což bylo ovlivněno vysokou teplotou během aplikace, takže docházelo k rychlému odpařování. Ostatní stabilizátory vytvořily vrstvu natolik pevnou, že vydržela hmotnost pracovníků.

Polyakrylamid (PAM)

Jedná se o polymery s vysokou molekulovou hmotností. Vyskytují se ve formě aniontové a kationtové. Aniontové PAM jsou ve vodě rozpustné látky, skládající se z cca 150 000 monomerů. Aplikace polyakrylamidu se provádí postřikem půdy. Následně se vytvoří porézní vrstva, která chrání substrát před erozními silami. Pozitivní vliv na půdu má tedy především z hlediska stability agregátů, pohlcování kinetické energie deště, zachování drsnosti povrchu, infiltrační rychlosti, pórovitosti, snížení množství oddělených částic a snižování tvorby krusty. To vše díky poklesu elektrostatického potenciálu částic. Molekuly polyakrylamidu nepronikají do agregátu, ale vážou se na jeho povrch, nemění tedy vnitřní strukturu. Na hrubých písčitých půdách snižuje rychlost infiltrace, avšak nedokáže nijak výrazně ovlivnit soudržnost agregátů. Nejvhodnější způsob aplikace PAM je ve formě kapaliny nebo emulze, díky rychlejší interakci s povrchem půdy, oproti aplikaci prášku suchou cestou. Využití polyakrylamidů, ve vodě nerozpustných, spočívá především ve zlepšování retenčních vlastností na hrubých písčitých půdách. Tzv. síťované polymery dokážou do své struktury absorbovat množství vody sto až tisíci násobku jejich suché hmotnosti, čili 1g suchého síťovaného PAM aplikovaného do půdy, v závislosti na půdních vlastnostech, absorbuje 100-1000ml (Blanco a Lal, 2008).

Prats et al. (2013) prováděl výzkum na lesních svazích zasažených požárem. Porovnával snížení povrchového odtoku ze svahu na plochách ošetřených PAM s plochami, na nichž byl aplikován mulč. Nejúčinnější ochranu tvořil mulč, při pokryvnosti 80 % snížil odtok o 52 % a celkovou ztrátu půdy o 93 % oproti kontrolní ploše bez jakékoliv úpravy. Naopak hodnoty na

plochách ošetřených PAM se nijak nelišily od kontrolních. Což bylo přičteno nižšímu obsahu organického materiálu v půdě a také nedávnému požáru.

Množství dávky závisí na sklonu svahu. Součástí experimentu (Sepaskhah, 2006) byl efekt sklonu a množství PAM v $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ na ztrátu půdy a celkový odtok. Na svahy 5-7,5 % měla největší vliv dávka $4,0 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Nižší dávkování se nijak výrazně neprojevilo. Dopad PAM na ztrátu půdy byl mnohem zřetelnější, než na snížení objemu odtoku. Obecně platí pravidlo přímé úměry, čím prudší svah, tím větší množství aplikovaného polyakrylamidu.



Obrázek 12 srovnání vzorku půdy bez aplikace PAM (vlevo) a vzorku po aplikaci aniontové formy PAM (vpravo), (Rabiee et al. 2013).

Anorganické sloučeniny

Slouží především ke snížení prašnosti na nezpevněných cestách. Většinou se jedná o soli, nebo hygroskopické látky, které po nanesení na plochu proniknou do substrátu a začnou na sebe vázat vzdušnou vlhkost. Díky čemuž jemné částice nejsou tak snadno odděleny a agregované částice drží lépe pohromadě. Účinek těchto látek závisí na teplotě, relativní vlhkosti a způsobu využití plochy.

- **Chlorid vápenatý CaCl_2**

Absorpce vzdušné vlhkosti začíná při relativní vlhkosti vzduchu 29 %. Hlavním účinkem je více než trojnásobné snížení evaporace. Během vysychání umocňuje hutnicí efekt na částice půdy (Birst a Hough, 1999). Většinu vlhkosti, která se během dne odpařila, znovu absorbuje během noci. Oproti ostatním přípravkům ke snižování prašnosti má omezenou životnost, zhruba 6 až 12 měsíců. Během aplikace je vysoce korozivní, ničí tedy dávkovací zařízení. Po nanesení CaCl_2 chvíli trvá, než se vytvoří potřebná krusta. Pokud tedy během procesu zaprší, je vysoká pravděpodobnost, že látka odeteče spolu s dešťovou vodou. Během suchých období může vykristalizovat těsně u povrchu (Han, 1992). CaCl_2 lze aplikovat jak ve formě roztoku, tak i v pevném skupenství ve formě vloček. Při využití vloček je vhodné látku zapravit do substrátu a poté ztuhnout (Althouse,

2001). Chlorid vápenatý spolu s uhličitanem sodným lze využít k hydrolýze aniontových polymerů na bázi akrylamidu. Vápenaté ionty tvoří spojovací článek mezi půdními částicemi a makromolekulami polymerů (např. PAM), čímž dojde k zefektivnění aplikace polymerů do půdy (Rabiee et al. 2013).

- **Chlorid hořečnatý $MgCl_2$**

Účinek a použití chloridu hořečnatého je totožný s chloridem vápenatým. Absorbce vzdušné vlhkosti začíná při relativní vlhkosti 32 %. Oproti chloridu vápenatému, tvoří tvrdší povrch, ale průměrná dávka je o 18% vyšší. Pokud je nutné dodávat potřebnou vlhkost uměle, třeba kropicím vozem, je nutné kontrolovat objem vody, jinak hrozí vyplavení chloridů, vzhledem k jejich dobré rozpustnosti ve vodě (Bolton, 2011).

- **Chlorid sodný $NaCl$**

Oproti předchozím sloučeninám je nejméně účinný, což omezuje jeho použití. Proto se míchá s chloridem vápenatým, kde $NaCl$ stabilizuje povrch a $CaCl_2$ omezuje prašnost. Vzdušnou vlhkost na sebe váže až při 76 % relativní vlhkosti. $NaCl$ redukuje odpařování pouze 1,3 krát. Během procesu ředění nebo vyluhování dochází ke smršťování, čímž jsou jílovité částice náchylnější k transportnímu účinku větru (Birst a Hough, 1999).

Aplikaci chloridů ve formě roztoku by měla předcházet úprava povrchu postřikem vodou, alespoň do hloubky 50 mm, aby se zajistilo rovnoměrné penetraci. Postřik je vhodné rozdělit do více dávek, aby nedošlo ke zbytečným ztrátám odtokem. Všechny chloridy použít i v pevném skupenství, buď ve formě pelet, nebo vloček. Po rozmetání pelet nebo vloček je potřeba povrch kropit vodou, aby se rychleji rozpustily (Jones et al. 2013).

Abood et al. (2007) porovnával aplikaci výše uvedených chloridů na jílovitých půdách mimo jiné z hlediska smykové pevnosti, kde nejlepší hodnoty vykazovala aplikace chloridu vápenatého, naopak nejnižších hodnot dosáhly vzorky s $NaCl$. Obsah všech solí zvýšil pevnost v tlaku.

- **Vodní sklo**

Vodním sklem se rozumí vodný roztok křemičitanu sodného Na_2SiO_3 , nebo draselného. Užívá se ke zpevnění struktury povrchu, čímž dochází k omezení prašnosti vlivem erozních činitelů. Wu (2000) zkoumal penetrační schopnosti vodního skla a chloridu sodného metodou in situ. Výsledky ukázaly, že pokud je první aplikována dávka vodního skla a teprve poté je nanesen chlorid vápenatý, zvětší se tím hloubka penetrace. Po přidání povrchově aktivních látek, jako dodecyl alkohol, dodecyl

sulfonát sodný, se doba nutná k řádné penetraci zkrátila až o 62%. Což potvrzuje jeho hypotézu o nutnosti aplikace smáčedla ke snížení povrchového napětí vody pro lepší penetrační schopnost.

4 Závěr

Od poloviny minulého století bylo zavedeno do praxe mnoho protierozních opatření. Od biologických postupů, přes technické, agrotechnické, až po chemické. Z předešlých výzkumů vyplývá, že ne každé protierozní opatření je univerzální z hlediska typu půdy nebo sklonu svahu. Chemická stabilizace půdy je vhodnější pro roviny a mírné svahy. Navíc je nutné ji brát jen jako dočasné opatření, než se vytvoří vegetační kryt. Při aplikacích na prudkých svazích není účinná. K ověření účinnosti chloridů, silikátů a vodního skla na erozi svahů by bylo potřeba provést vlastní výzkum, neboť doposud se experimenty týkaly snižování prašnosti na silnicích, nezpevněných komunikací, nebo ke snížení mobility písku na silnicích v oblasti pouště. Při srovnání účinku polyakrylamidu a rostlinného mulče na jednom svahu, bylo zcela zřetelné, že aplikace mulče je daleko efektivnější. Ztráta půdy klesla o 93% a celkový objem odtoku o více než polovinu, kdežto výsledky polyakrylamidu se příliš nelišily od kontrolní holé parcely (Prats et al. (2013).

Při srovnání všech typů protierozních opatření, vychází nejlépe vegetační úpravy a užití různých typů geomateriálů, které tvoří potřebnou povrchovou ochranu před kinetickou energií deště a dokážou zpomalit povrchový odtok. Navíc při užití přírodních materiálů dochází během rozkladu k obohacení půdy o živiny. Před konečným rozhodnutím ve výběru konkrétního preventivního opatření je nutné zhodnotit lokální klimatické, půdní a vegetační podmínky.

5 Seznam literatury

Abood, T. T., Kasa, A. B., Chik, Z. B. 2007. Stabilization of silty clay soil using chloride compounds. *Journal of Engineering Science and Technology*. Vol. 2. p. 102-110.

Althouse, J. Dust, Washboards, and Deep Stabilization. *Erosion Control*. vol. 8, issue 2. [online]. 2001. [cit. 2014-04-04]. Dostupné z: <<http://www.erosioncontrol.com/EC/Articles/4802.aspx>>.

Álvarez-Mozos, J., Eguzki, A., Giménez, R., Campo, M. A., Goñi, M., Arive, M., Casali, J., Díez, J., Diego, I. 2014. Evaluation of erosion control geotextiles on steep slopes. Part 1: Effects on runoff and soil loss, *CATENA*, Volume 118, p. 168-178.

Bakr, N., Weindorf, D. C., Zhu, Y., Arceneaux, A. E., Selim, H. M. 2012. Evaluation of compost/mulch as highway embankment erosion control in Louisiana at the plot-scale. *Journal of Hydrology*. Volumes 468–469, 25. p. 257-267.

Bergsma, E. 1996. Terminology for Soil Erosion and Conservation. ISSS. Wageningen. 313 p. ISBN: 90-71556-15-8.

Birst, S., Hough, J. Chemical additive usage on unpaved roads in the Mountain Plains States. [online]. 1999. Upper Great Plains Transportation Institute. North Dakota University. [cit. 2014-04-4]. Dostupné z: <<http://www.ugpti.org/pubs/pdf/DP130.pdf>>.

Blanco, H. Lal, R. 2008. Principles of soil conservation an management. Springer. 617 p. ISBN: 978-140-2087-097.

Cairns, I., Handyside, B., Harris, M., Lambreschsten, N., Ngapo, N. 2001. Soil Conservation Technical Handbook. New Zealand Association of Resource Management. Wellington. ISBN: 0-478-24033-3.

Cao, C. S., Chen, L., Gao, W., Chen, Y., Yan, M. Impact of planting grass on terrene roads to avoid soil erosion. *Landscape and Urban Planning*. 2006, vol. 78, issue. 3, p 205-216. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204605000988>>.

Cerdà, A.. Soil water erosion on road embankments in eastern Spain. *Science of The Environment*. [online]. 2007 [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969707000757>>.

Chutachindakate, Ch., Sumi, T. Sediment yield and transportation analysis: case study on Managawa river basin. Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE [online]. 2008. Vol. 52 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <<http://ecohyd.dpri.kyoto-u.ac.jp/data/sumi/2008/200802.pdf>>.

Fay, L., Akin, M., Xianming, S. 2012. Cost-effective and sustainable road slope stabilization and erosion control. Washington, D. C.: Transportation Research Board,. Synthesis of highway practice, 430. 70 p. ISBN 03-092-2362-8.

Flanagan D. C., Nearing M. A. 1995. USDA-Water Erosion Prediction project: Hillslope profile and watershed model documentation. Rep. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.

Flanagan, D. C., Ascough, J. C. Soil erosion research for the 21st century: proceedings of the international symposium, 3-5 January, 2001, Honolulu, Hawaii, USA. St. Joseph, Mich.: American Society of Agricultural Engineers. 2001. ISBN 18-927-6916-6. Dostupné z: <<http://www.fws.gov/fire/ifcc/esr/library/IECA%20ECPSpaper.pdf>>.

Fu, B., Newham, L., Ramos-Scharrón, C. E. A review of surface erosion and sediment delivery models for unsealed roads. Environmental Modelling & software. [online]. 2010. [cit. 2014-03-13]. Dostupné z <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815209001832>>.

García-Palacios, P., Soliveres, S., Maestre, F. T., Escudero, A., Castillo-Monroy, A. P., Valladares, F. 2010. Dominant plant species modulate responses to hydroseeding, irrigation and fertilization during the restoration of semiarid motorway slopes, Ecological Engineering. Volume 36. Issue 10. p. 1290-1298.

Grismer, Mark. Standards vary in studies using rainfall simulators to evaluate erosion. California Agriculture [online]. 2012, vol. 66, issue 3, p. 102-107 [cit. 2014-03-23]. Dostupné z: <<http://californiaagriculture.ucanr.org/landingpage.cfm?article=ca.v066n03p102&fulltext=yes>>.

Han, Ch. Dust Control On Unpaved Roads. Minnesota Local Road Research Board. Minnesota. Department of Transportation.; Braun Intertec Pavement. [online]. 1992. [cit. 2014-03-09]. Dostupné z: <<http://www.dot.state.mn.us/research/pdf/1992-07.pdf>>.

- Holý, M. 1994. Eroze a životní prostředí. Vydavatelství ČVUT. Praha. 383 s. ISBN: 80-01-01078-3.
- Howell, J. 1999. Roadside bio-engineering. Kathmandu: Dept. of Roads, His Majesty's Govt. of Nepal. ISBN 18-619-2170-5
- Hudson, N. 1993. Field measurement of soil erosion and runoff. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 139 p. ISBN 92-510-3406-0.
- Iserloh, T. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. CATENA. [online]. 2013. vol.110. p. 100-112. Dostupné z <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816213001252>>.
- Janeček, M. 2002. Ochrana zemědělské půdy před erozí. ISV nakladatelství. Praha. 201 s. ISBN: 85866-85-8.
- Janeček, M. 2007. Ochrana zemědělské půdy před erozí, Metodika. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy v. v. i. Praha. 76 s. ISBN 978-80-254-0973-2.
- Jones, D., Kociolek, A., Surdahl, R., Bolander, P., Drewes, P., Duran M., Fay, L., Huntington, G., James, D., Milne, C., Nahra, M., Scott, A., Vitele, B., Willieams, B. Unpaved Road Dust Management, A Successful, Practitioner's Handbook. Western Transportation Institute. [online]. 2013. [cit. 2014-04-04]. Dostupné z: <<http://www.cflhd.gov/programs/techDevelopment/materials/Handbook/documents/UnpavedRoadDustManagementASuccessfulPractitionersHandbook.pdf>>.
- Jozefaciuk, G, Czachor, H. Impact of organic matter, iron oxides, alumina, silica and drying on mechanical and water stability of artificial soil aggregates. Assessment of new method to study water stability. Geoderma. Vol. 221-222, p. 1-10. [online]. 2014. [cit. 2014-04-01]. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.020>>.
- Luo, H., Zhao, T., Dong, M., Gao, J., Peng, X., Guo, Y., Wang, Z., Chao, L. 2013. Field studies on the effects of three geotextiles on runoff and erosion of road slope in Beijing, China. CATENA. vol. 109, p. 150-156. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816213000854>>.

- Morgan, R. P. C., Quinton, J. N., Smith, R. E., Govers, G., Poesen, J. W. A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M. E., Folly, A. J. V. 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): documentation and user guide. Silsoe College, Silsoe.
- Morgan, R. P. C. 2005. Soil erosion and conservation. Blackwell Publishing. Oxford. 316 p. ISBN: 978-1-4051-1781-4.
- Oña, J., Osorio, F., Garcia, P. A. Assessing the effects of using compost–sludge mixtures to reduce erosion in road embankments. *Journal of Hazardous Materials*. [online]. 2009. [cit. 2014-03-12]. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389408013733>>.
- Pavlík, F.; Uhrová, J. 2011. Přímé měření objemu vodní eroze v povodí. In *Sborník anotací Juniorstav*. Brno: CERM, 2011. s. 1-6. ISBN: 978-80-214-4232- 0.
- Prats, S. A., Martins, M. A. S., Malvar, M. C., Ben-Hur, M., Keizer, J. J. 2014. Polyacrylamide application versus forest residue mulching for reducing post-fire runoff and soil erosion, *Science of The Total Environment*. Vol. 468–469, 15 p. 464-474.
- Rabiee, A., Gilani, M., Jamshidi, M., Baharvand, H. Synthesis and characterization of a calcium- and sodium-containing acrylamide-based polymer and its effect on soil strength. *Journal of Vinyl and Additive Technology*. 2013, vol. 19, issue 2, s. 140-146. Dostupné z: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/vnl.21310>./pdf>.
- Renard, K., G., Foster, G., R., Weesies, G., A., Porter, J., P. 1991. RUSLE, Revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*. vol. 46, 1. Dostupné z: <<http://www.tucson.ars.ag.gov/unit/publications/PDFfiles/775.pdf>>.
- Sepaskhah, A. R., Bazrafshan-Jahromi, A. R. 2006. Controlling Runoff and Erosion in Sloping Land with Polyacrylamide under a Rainfall Simulator. *Biosystems Engineering*. vol. 93, issue 4. p. 469-474.
- Shao, Q., Gu, W., Dai, Q., Makoto, S., Liu, Y. 2013. Effectiveness of geotextile mulches for slope restoration in semi-arid northern China. *Catena*. vol. 116.
- Shulga, G., Rekner, F., Varslavan, J. 2001. Lignin-based Interpolymer Complexes as a Novel Adhesive for Protection against Erosion of Sandy Soil. *SW—Soil and Water*. vol. 78, issue 3.

Stone, R. P., Hilborn, D., Universal Soil Loss Equation (USLE). Ontario ministri of agriculture and food. [online]. 2012. [cit. 2014-03-16]. Dostupné z: <<http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/12-051.pdf>>.

WU, Chao. Development of an in situ soil binding agent. Waste Management. [online]. 2000, vol. 20. p. 527-535. [cit. 2014-03-12]. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X00000222>>.

Wischmeier, W. H., Mannering, V. J. 1969. Relation of Soil Properties to its Erodibility. [online]. 1969 [cit. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://www.portal.ufra.edu.br/attachments/991_Aula%203%20Relation%20of%20Soil%20Properties.pdf>.

Wischmeier, W. H., Smith, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. USDA Agricultural Research Service, Handbook 537. U. S. Gov Print Office, Washington, DC.

Zachar, D. 1982. Soil Erosion (Development in Soil Science 10). VEDA. Bratislava 548 s. ISBN: 0-444-99725-3.

ČSN 83 9031. Technologie vegetačních úprav v krajině - Trávníky a jejich zakládání. Praha: Český normalizační institut, 2006

Technické podmínky 53 – Protierozní opatření na svazích pozemních komunikací. Ministerstvo dopravy, odbor pozemních komunikací. Brno. 2003

Technické podmínky 99 – Vysazování a ošetřování silniční vegetace. Ministerstvo dopravy. Brno. 1997

Technické kvalitativní podmínky 13 – Vegetační úpravy. Ministerstvo dopravy, odbor pozemních komunikací. Praha. 2006

Internetové zdroje

SMODERP. Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, ČVUT. [online]. 2014 [cit. 2014-03-26]. Dostupné z: <<http://storm.fsv.cvut.cz/smoderp/>>.