

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav inženýrských staveb, tvorby a ochrany krajiny



PROTIEROZNÍ OCHRANA SVAHŮ ZA VYUŽITÍ VYBRANÝCH GEOSYNTETIK

Disertační práce

Studijní program:	Krajinné inženýrství
Studijní obor:	Tvorba a ochrana krajiny 3914V014
Školitel:	prof. Dr. Ing. Miloslav Šlezinger

2014

Ing. Pavla Pilařová

Zadávací list

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma: Protierozní ochrana svahů za využití vybraných geosyntetik vypracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité prameny. Souhlasím, aby moje disertační práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a byla uložena v knihovně Mendelovy univerzity v Brně, zpřístupněna ke studijním účelům ve shodě s platnou Vyhláškou rektora MENDELU o archivaci elektronické podoby závěrečných prací.

Autorka disertační práce se dále zavazuje, že před sepsáním licenční smlouvy o využití autorských práv díla s jinou osobou (subjektem) si vyžádá písemné stanovisko univerzity o tom, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuje se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla dle řádné kalkulace.

V Brně, dne 18. 9. 2014

.....
Ing. Pavla Pilařová

Na tomto místě bych chtěla poděkovat prof. Dr. Ing. Miloslavu Šlezingrovi za odborné vedení disertační práce a svým kolegům z Ústavu inženýrských staveb, tvorby a ochrany krajiny a firmy ATELIER FONTES, s.r.o. za pomoc při provádění terénních experimentů. Doc. RNDr. Miroslavu Kouckému, CSc., doc. PhDr. Ing. Ladislavu Koutnému, CSc. Ph.D., doc. Ing. Radomíru Řepkovi, Ph.D., doc. Ing. Stanislavu Hejdukovi, Ph.D. a doc. Ing. Klaudiu Kasprzakovi, CSc. za čas, ochotu a cenné rady. Dále bych ráda poděkovala firmě Geosyntetika, s.r.o., GEOMAT s.r.o., DLF-TRIFOLIUM Hladké Životice, s.r.o. a Agrostis Trávníky, s.r.o. za poskytnutí materiálních prostředků pro laboratorní i terénní experimenty. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat celé své rodině a blízkým za aktivní, psychickou a materiální pomoc při psaní disertační práce.

Autor: Ing. Pavla Pilařová

Název disertační práce: Protierozní ochrana svahů za využití vybraných geosyntetik

Abstrakt

Vzhledem k neustálému rozvoji lidské společnosti, s kterým je neodmyslitelně spojen rozmach stavebních prací, těžby a rekultivačních činností, hraje protierozní ochrana nově budovaných svahů zemních těles a zemních konstrukcí velice důležitou roli. Úvodní část práce je zaměřena na teoretický rozbor problematiky eroze půdy a její důsledky na degradaci půdy, vodní hospodářství a materiální škody. Dále je v práci stručně charakterizována role vegetace a protierozních přírodních i syntetických výrobků v protierozní ochraně svahů. Hlavním cílem práce je prohloubení vědeckých poznatků v oblasti využití trvalých protierozních georochoží (GMA) a jejich spolupůsobení s travním porostem v rámci protierozní ochrany svahů.

Provedený výzkum zahrnoval jak laboratorní, tak terénní experimenty. V rámci laboratorního experimentu byly u odebraných vzorků vyklíčených rostlin zjišťovány parametry (délka, povrch, průměr a objem) kořenů. Naměřená data byla následně podrobena statistické analýze. Výsledky laboratorního experimentu přináší potvrzení zvolené hypotézy, že přítomnost vybraných GMA v půdním profilu nemá statisticky významný (na hladině 0,05) vliv na růst a vývoj zvolených travních odrůd. Na založených terénních plochách byly aplikovány celkem čtyři typy protierozní ochrany (tři typy PEO s GMA a jeden typ PEO bez GMA). Protierozní účinek jednotlivých typů PEO byl vyhodnocován na základě množství erozního smyvu vzniklého působením přirozených srážek a dle množství erozního smyvu a objemu povrchového odtoku v rámci simulace povrchového odtoku ronem vody. Z výsledků terénního experimentu vyplývá, že instalací GMA do půdního profilu nedošlo k očekávanému zvýšenému protieroznímu účinku typů PEO s GMA oproti typu PEO bez GMA, ale hlavní roli v protierozní ochraně založených pokusných ploch měla vzrůstající vysetá protierozní travní směs.

Klíčová slova

eroze půdy, nebezpečné deště, protierozní opatření, přírodní a geosyntetické protierozní výrobky, protierozní travní směs

Author: Ing. Pavla Pilařová

Title of thesis: Selected geosynthetic erosion control products for hillslope surface protection

Abstract

Perpetual development of mankind inevitably goes hand in hand with growing number of construction projects, mining and recultivation activities. Erosion control of newly established hillslopes and constructions is therefore essential. The thesis is focused on theoretical characterization of soil erosion and its impact on soil degradation, water management and potency of material damage. Furthermore the thesis describes the role of vegetation and erosion control products (both natural and synthetic) which are used for erosion protection of hillslopes. The main aim of the thesis is to deepen the expert data in the area of usage of permanent geomats (GMA) and their collaboration with grass cover in the range of erosion protection of hillslopes.

The thesis includes laboratory and field experiments. The grass roots parameters (length, surface area, diameter, volume) were measured during the laboratory experiment and collected data were used for statistical analysis. The results of the laboratory experiment led to the acceptance of the hypothesis, that the presence of selected GMA in the soil profile does not have any impact on the growth and development of the root system of selected grass species (at a level of significance of $\alpha = 0,05$). Four types of erosion control systems (ECS) were used for the field experiment plots (three ECS with GMA and one ECS without GMA). Soil erosion rates from each ECS were statistically compared. The results of the field experiments indicate, that the installation of the GMA into the soil profile does not improve the erosion control effect as expected and the main agent in the erosion control of newly established experimental plots was developing erosion control grass mixture.

Keywords

soil erosion, high intensity rainfalls, erosion control systems, natural and geosynthetical erosion control products, erosion control grass seed mixture

OBSAH

1 Úvod	12
2 Cíl práce.....	14
3 Literární přehled.....	16
3.1 Půda.....	16
3.2 Degradace půdy.....	16
3.3 Eroze půdy	17
3.3.1 Erozní činitelé (faktory)	18
3.3.2 Druhy eroze	19
3.3.3 Erozní proces.....	20
3.3.4 Dešťové srážky.....	26
3.3.5 Důsledky vodní eroze.....	28
3.4 Protierozní opatření.....	31
3.4.1 Role vegetace	33
3.4.2 Protierozní výrobky a materiály	39
4 Materiál a metody	44
4.1 Použité materiály.....	44
4.2 Laboratorní experiment.....	46
4.2.1 Založení pokusných ploch.....	47
4.2.2 Postup odběru vzorků a jejich analýza.....	48
4.2.3 Postup zpracování naměřených dat	49
4.3 Terénní experiment	50
4.3.1 Založení pokusných ploch.....	51
4.3.2 Postup odběru vzorků a jejich analýza.....	55
4.3.3 Postup zpracování a analýza získaných dat.....	57
5 Dosažené výsledky.....	59
5.1 Laboratorní experiment.....	59
5.1.1 Jílek vytrvalý (<i>Lolium perenne L.</i>) odrůda HANDICAP	59
5.1.2 Lipnice luční (<i>Poa pratensis L.</i>) odrůda HARMONIE	63
5.1.3 Kostřava rákosovitá (<i>Festuca arundinacea Schreb.</i>) odrůda KORA.....	67
5.2 Terénní experiment	70
5.2.1 Působení přirozených srážek.....	70
5.2.2 Působení simulace povrchového odtoku ronem vody.....	86
6 Diskuze	89
6.1 Laboratorní experiment.....	89
6.2 Terénní experiment	93
6.2.1 Působení přirozených srážek.....	93
6.2.2 Simulace povrchového odtoku ronem vody.....	99
7 Závěr	102
8 Summary.....	105
9 Literatura	108
10 Přílohy práce	118

Seznam vybraných použitých zkratk a veličin

Vybrané použité zkratky

apod.	a podobně
atd.	a tak dále
AF	Agronomická fakulta
ANOVA	jednofaktorová analýza rozptylu
BVK	Brněnské vodovody a kanalizace, a.s.
BZA	Botanická zahrada a arboretum
Ca	vápník
č.	číslo (použito při citaci zákonů)
čl.	článek (použito při citaci zákonů)
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
ES	Evropská směrnice (použito při citaci směrnic Evropského parlamentu a Rady)
E7010	Enkamat 7010/1
E7020	Enkamat 7020/1
FAO	Organizace pro výživu a zemědělství
GBR	geosyntetické izolace
GCE	goebuňky
GCO	geokompozity
GMA	georochože
GNT	geosítě
GTP	výrobky podobné geotextiliím
GTX	gotextílie
char.	charakteristiky
JV	jílek vytrvalý (<i>Lolium perenne L.</i>) odrůda HANDICAP
K	draslík
KR	kostřava rákosovitá (<i>Festuca arundinacea Schreb.</i>) odrůda KORA
LDF	Lesnická a dřevařská fakulta
LL	lipnice luční (<i>Poa pratensis L.</i>) odrůda HARMONIE
LSD	Fisherův test mnohonásobného porování
m n. m.	metrů nad mořem
MENDELU	Mendelova univerzita v Brně
mil.	milión
Mg	hořčík
mld.	miliarda
NECM	přírodní protierozní goesítě
N _{min}	minerální dusík
ND	nebezpečný déšť
OSN	Organizace spojených národů
P	fosfor

PCA	analýza hlavních komponent
PEO	protierozní ochrana
SPORV	simulace povrchového odtoku ronem vody
tj.	to je
TP	travní porost
tzv.	tak zvaný
UV	ultrafialové záření
ÚAPMVR	Ústav agrochemie, půdoznalství, mikrobiologie a výživy rostlin
ÚGP	Ústav geologie a pedologie
ÚTOK	Ústav inženýrských staveb, tvorby a ochrany krajiny
ÚVZP	Ústav výživy zvířat a pícninářství
VÚMOP	Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v. v. i.

Vybrané použité veličiny

CI	--	retardační třídy dle Temple (1982)
D	mm	průměrný průměr kořene
F	%	podíl jemnozrné frakce
G	%	podíl šterkovité frakce
H_s	mm	srážkový úhrn (vyjádřený výškou sloupce vody)
H_sND	mm	srážkový úhrn nebezpečného deště
i_s	mm.min ⁻¹	intenzita srážky (do výpočtu $w_k(i_s)$ v mm.s ⁻¹)
L	cm	celková délka kořene
M	g.m ⁻²	celková hmotnost erozního smyvu
M_D	mm.min ^{-0,5}	mohutnost deště
n	--	Manningův koeficient drsnosti
n_t	--	počet vzorků odebraných v rámci odběru t
P	cm ²	povrch kořene
S_k	cm ²	celkový povrch kořene
S	%	podíl písčité frakce
t_D	min	doba trvání deště (do výpočtu W_K v s)
V_k	cm ³	celkový objem kořene
V	l	celkový objem povrchového odtoku
$w_k(i_s)$	J.s ⁻¹ .m ⁻²	kinetická energie měrné vydatnosti deště
W_K	J.m ⁻²	úhrnná kinetická energie celkové vydatnosti deště
\bar{X}_t	--	výběrový průměr veličiny X pro odběr t
$X_{t,i}$	--	i -tá hodnota vzorku veličiny X v rámci odběru t
φ	l	odtokový koeficient
σ_t^2	--	výběrový rozptyl veličiny X pro odběr t

Seznam obrázků uvedených v textu práce

Obr. 1 Vybrané GMA – Enkamat 7010/1 (vlevo), Enkamat 7020/1 (uprostřed), Trinter (vpravo).....	45
Obr. 2 Postup založení laboratorních pokusných ploch	47
Obr. 3 Ukázka odběru vzorků jílků vytrvalého (<i>Lolium perenne L.</i>) odrůda HANDICAP (cca 3. den po vyklíčení obilky).....	49
Obr. 4 Umístění terénních pokusných ploch.	51
Obr. 5 Svah navážky využitý k umístění pokusných ploch.....	51
Obr. 6 Postup založení pokusných ploch a následná péče.....	53
Obr. 7 Schéma založení pokusných ploch	54
Obr. 8 Umístění žlabu do rýhy nad pokusnou plochou	54
Obr. 9 Odběr půdních vzorků po ukončení terénního experimentu	57
Obr. 10 Graf průběhů Xt měřených veličin L , S_k , D a V_k	60
Obr. 11 Graf průběhů Xt měřených veličin L , S_k , D a V_k	64
Obr. 12 Graf průběhů Xt měřených veličin L , S_k , D a V_k	68
Obr. 13 Graf průběhu erozního smyvu (vlevo) a celkového erozního smyvu za sledované období (vpravo).....	71
Obr. 14 Graf průběhu kumulace erozního smyvu za sledované období.....	72
Obr. 15 Graf vývoje procentuálního zastoupení jemných částic – F a písčité složky – S v erozním smyvu v rámci 9. odběru za sledované období.....	75
Obr. 16 Měsíční úhrny srážek a průměrné měsíční teploty vzduchu během sledovaného období.	76
Obr. 17 Vyklíčené obilky (vlevo) a charakter povrchu pokusných ploch (vpravo) dne 22. 5. 2013	80
Obr. 18 Rostliny týden po vyklíčení (vlevo) a stav povrchu pokusných ploch ke dni 28. 5. 2013 (vpravo).....	81
Obr. 19 Rostliny 20 dní po vyklíčení (vlevo) a stav povrchu pokusných ploch ke dni 10. 6. 2013 (vpravo).....	81
Obr. 20 Charakter travního porostu ke dni 24. 6. 2013 (vlevo) a dne 29. 3. 2014 (vpravo).....	81
Obr. 21 Cattelův indexový graf úpatí vlastních čísel odkrývá 2 první hlavní komponenty.	82
Obr. 22 Graf komponentních vah 1. a 2. hlavní komponenty.	83
Obr. 23 Graf závislosti velikosti erozního smyvu na úhrnné kinetické energii celkové vydatnosti deště W_K pro celé sledované období.....	84
Obr. 24 Graf průběhu Xt měřené veličiny L testovaných travních odrůd (LL, KR a JV) na jednotlivých podkladech (E7010, E7020, Trinter a případu bez GMA).....	89
Obr. 25 Graf průběhu Xt měřené veličiny D testovaných travních odrůd (LL, KR a JV) na jednotlivých podkladech (E7010, E7020, Trinter a případu bez GMA).....	90
Obr. 26 Graf průběhu Xt měřené veličiny S_k testovaných travních odrůd (LL, KR a JV) na jednotlivých podkladech (E7010, E7020, Trinter a případu bez GMA).....	90
Obr. 27 Graf průběhu Xt měřené veličiny V_k testovaných travních odrůd (LL, KR a JV) na jednotlivých podkladech (E7010, E7020, Trinter a případu bez GMA).....	91
Obr. 28 Procentní rozdíly ve velikosti erozního smyvu na jednotlivých typech PEO s GMA vzhledem k velikosti erozního smyvu na typu PEO bez GMA	97

Seznam tabulek uvedených v textu práce

Tab. 1 Schéma pokusných ploch (typ GMA + travní druh) v rámci laboratorního pokusu (JV – jílek vytrvalý, LL – lipnice luční, KR – kostřava rákosovitá).	48
Tab. 2 Schéma zatížení pokusných ploch SPORV během terénního experimentu	56
Tab. 3 Výsledky výpočtů korelací veličin L , S_k , D a V_k na jednotlivých GMA a případu bez GMA.....	61
Tab. 4 Výsledky Fisherova LSD testu mnohonásobného porovnání pro veličiny L , S_k , D , u kterých byly v rámci analýzy rozptylu zamítnuty nulové hypotézy.	62
Tab. 5 Výsledky výpočtů korelací měřených veličin v rámci jednotlivých GMA a případu bez GMA.....	63
Tab. 6 Výsledky výpočtů korelací veličin L , S_k , D a V_k na jednotlivých GMA a případu bez GMA.....	65
Tab. 7 Výsledky výpočtů korelací měřených veličin v rámci jednotlivých GMA a případu bez GMA.....	66
Tab. 8 Výsledky výpočtů korelací veličin L , S_k , D a V_k na jednotlivých GMA a případu bez GMA.....	67
Tab. 9 Výsledky výpočtů korelací měřených veličin v rámci jednotlivých GMA a případu bez GMA.....	69
Tab. 10 Výsledky výpočtů korelací erozního smyvu z jednotlivých typů PEO za celé sledované období.	70
Tab. 11 Výsledky výpočtů korelací erozního smyvu z jednotlivých typů PEO za 1. období.	73
Tab. 12 Výsledky výpočtů korelací erozního smyvu z jednotlivých typů PEO za 2. období.	73
Tab. 13 Výsledky výpočtů korelací zrnitostního charakteru erozního smyvu z jednotlivých typů PEO za celé sledované období.....	74
Tab. 14 Srážkové události, nebezpečné deště (dle Kasprzak (in Hejduk, 2011))......	77
Tab. 15 Výskyt nebezpečných dešťů (ND) během sledovaného období a jejich charakteristiky.....	78
Tab. 16 Stáří travního porostu (TP) od prvního vzejití travního semene, W_K nebezpečných dešťů (ND) a erozní smyv k danému odběru.	79
Tab. 17 Výsledné hodnoty zrnitostního rozboru použité ornice a odebraných vzorků ornice po ukončení pokusu.	85
Tab. 18 Výsledné hodnoty agrochemického rozboru použité ornice a odebraných vzorků ornice po ukončení pokusu.	86
Tab. 19 Množství erozního smyvu (M), podíl jednotlivých zrnitostních frakcí (jemnozrnné – F a písčité – S) a objemu povrchového odtoku (V) v rámci SPORV	87
Tab. 20 Odtokové koeficienty vztažené k celkovému objemu puštěné vody φ_c v rámci SPORV (337,5 l) a odtokové koeficienty vztažené k objemu odtoku vody z typu PEO bez GMA $\varphi_{bez\ GMA}$	100

1 Úvod

Půda je bezesporu jedno z nejcennějších přírodních bohatství na světě. Při pohledu do historie vidíme jak úzce s tímto omezeným a nenahraditelným přírodním zdrojem souvisí dějiny lidské civilizace. Úpadky starověkých civilizací vlivem postupné degradace půdy (například zanášení závlahových kanálů v Mezopotamii, zasolování půdy v Egyptě a mnoho dalších) nám mohou být cenným důkazem a varováním (Lowdermilk, 1953; Hudson, 1981; Olson, 1981; Fulajtár & Jánský, 2001; Lal, 2001; Toy et al., 2002; Kutílek, 2012). Nárůst světové populace během 20. století vedl k vytvoření environmentálního tlaku na půdu, který je způsoben či zhoršován lidskou činností, jako je nevhodná zemědělská a lesnická praxe, průmyslové a stavební činnosti, cestovní ruch, rekreace nebo rozvoj měst, a má za následek drastický vliv na míru degradace půdy. Bohužel ani přelom tisíciletí, současná doba i blízká budoucnost nepřestane tento environmentální tlak vyvíjet, pokud nedojde k zavedení společné strategie ochrany a udržitelného využívání půdy. Není tedy divu, že cílená ochrana půdy jako přírodního bohatství, vedoucí k minimalizaci degradace půdy a podpoře zachování všech půdních funkcí, je celosvětovou snahou. Jako příklad zde můžeme uvést zakotvení ochrany půdy v Úmluvě OSN o boji proti desertifikaci (zkrácená forma názvu), v návrhu směrnice Evropského parlamentu a Rady o zřízení rámce pro ochranu půdy a o změně směrnice 2004/35/ES – 2006/0086 (COD), v samotné Ústavě České republiky (především čl. 7 ústavního zákona č. 1/1993 Sb., Ústava České republiky, ve znění pozdějších ústavních zákonů) a v zákonech České republiky jako jsou například zákon č. 17/1992 Sb., o životním prostředí, ve znění pozdějších předpisů; zákon č. 334/1992 Sb., o ochraně zemědělského půdního fondu, ve znění pozdějších předpisů; zákon č. 289/1995 Sb., o lesích a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů; zákon č. 114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny, ve znění pozdějších předpisů; a v mnoha dalších.

Půda je tedy ohrožována celou řadou faktorů, které vedou k degradaci půdy (omezení nebo až ztráta schopnosti půdy plnit své základní produkční a mimoprodukční funkce). Mezi hlavní faktory, kterými je půda v podmínkách střední Evropy a České republiky ohrožována, můžeme zařadit vodní a větrnou erozi, utužení půd, ztrátu organické hmoty, acidifikaci, kontaminaci půd a zastavování území. Zde je nutné upozornit, že degradace půdy má zásadní vliv na další velmi důležité oblasti společenského zájmu jako je ochrana vody, ochrana lidského zdraví, ochrana přírody a biologické rozmanitosti, změna klimatu a v neposlední řadě bezpečnost a kvalita potravin.

Voda je bezesporu jeden z nejrozšířenějších erozních činitelů v rámci České republiky. Nejvíce je problematika vodní eroze spojena se zemědělským půdním fondem, jehož podíl na celkové rozloze půdního fondu České republiky představuje 53,6 %. Z údajů uvedených v Situační a výhledové zprávě – Půda (2012) a dle Janečka et al. (2012) vyplývá, že vodní erozi je potenciálně ohroženo téměř 50 % zemědělské půdy v České republice. Maximální ztráta půdy v České republice je v současné době vyčíslena na přibližně 21 mil. tun ornice za rok, z hlediska ekonomické ztráty se dostaneme k hodnotě minimálně 4,3 mld. Kč (Situační a výhledová zpráva – Půda, 2012). Pozemky určené k plnění funkcí lesa jsou ohroženy především

interskeletovou erozí (převážně vertikální propadávání a proplavování organických i anorganických půdních částic skeletu do spodin – dutin mezi kameny a balvany na suťových stanovištích). Vodní eroze probíhá podél lesní cestní sítě a při narušení půdního povrchu těžbou a přibližováním dřeva. Další oblasti lidské činnosti, které mají za následek vystavení půdního povrchu vodní erozi, je stavitelství (tvorba zemních těles a zemních konstrukcí), těžební a rekultivační činnost a v neposlední řadě rekreace (pohybové a pobytové aktivity).

Jedním z nejpoužívanějších způsobů protierozní ochrany nově budovaných svahů je založení kvalitního vegetačního krytu (v mnohých případech trvalý travní porost). Svahy jsou po finálních terénních úpravách ohumusovány a osety vhodnou travní směsí. Období mezi osetím svahu a vytvořením kvalitního travního drnu může trvat 1 až 2 vegetační sezóny, během nichž je půdní povrch stále náchylný k erozi. Z tohoto důvodu je nutné věnovat pozornost ochraně erozně ohrožených svahů a podpoře tvorby kvalitního vegetačního krytu. Za tímto účelem mohou být na svahy aplikovány protierozní výrobky z přírodních, syntetických nebo kombinovaných materiálů, které mají poskytnout okamžitou ochranu půdního povrchu, vysetou travní směs ochránit a podpořit její vzcházení a zapojení (Landcaster & Austin, 1994; Allen, 1996; Davies et al., 2006; Bhattacharyya et al., 2010b).

2 Cíl práce

Problematika eroze půdy a její zmírnění souvisí především s ochranou půdy využívané k zemědělským účelům (opatření organizačního, agrotechnického a technického charakteru). S nárůstem světové populace a s tím spojeným silným environmentálním tlakem na půdu nejen v oblasti zemědělské činnosti, vzešla nutnost zabývat se protierozní ochranou nově budovaných svahů, které vznikají během stavebních prací (výstavba bytových a nebytových prostor, nové dopravní a technické infrastruktury, vodohospodářských staveb, staveb pro rekreaci a dalších) a při těžebních a rekultivačních činnostech. V neposlední řadě je důležitá ochrana stávajících svahů, které již byly postiženy erozními procesy a je i nadále nutné zabezpečit jejich funkčnost a bezpečnost.

V oblasti protierozní ochrany výše uvedených svahů se v posledních padesáti až šedesáti letech využívají kromě protierozních přírodních výrobků i protierozní geosyntetické výrobky. Problematikou protierozní ochrany svahů za využití jednotlivých protierozních výrobků a posouzením jejich výhod a nevýhod se zabývají především zahraniční odborníci, například: Henderson, 1982; Ingold & Thomson, 1986; Fifield et al., 1988; Northcutt, 1993; Cazzuffi et al., 1994; Ziegler et al., 1997; Ogdobe et al., 1998; Sutherland, 1998a, b; Rickson et al., 2006; Knapen et al., 2009; Bhattacharyya et al., 2010b a řada dalších (viz podkapitola 3.4.2). V České republice je problematika využití protierozních výrobků jen málo rozvíjena. V rámci svého výzkumu srážkoodtokových a odnosových jevů přirozených i simulovaných dešťových srážek se protierozní ochranou svahů vybranými protierozními výrobky částečně zabýval Kasprzak et al. (1989 a 1990). V současné době se většina výzkumů zabývá využitím trvalých protierozních georohoží v rámci stabilizace břehů vodních nádrží (Míča, 2005; Šlezinger, 2006; Šlezinger, 2007; Úradníček & Šlezinger et al., 2007; Šlezinger & Uhmánová, 2010; Foltýnová, 2011; Šlezinger et al., 2011). Z tohoto důvodu jsou projektanti při návrhu protierozní ochrany svahů odkázáni buď na těžko dostupnou vědeckou zahraniční literaturu, nebo na prospekty firem protierozní výroby distribuující.

Cílem předkládané práce je navázat na předešlé výzkumy na území České republiky, prohloubit získané odborné poznatky a zaměřit se na protierozní ochranu svahů za využití spolupůsobení travního porostu a vybraných trvalých protierozních výrobků (konkrétně trvalých protierozních georohoží), jejichž účinnost a vhodnost v rámci protierozní ochrany svahů je mezi odborníky stále diskutována (vzhledem k jejich výrobě ze syntetických polymerů a možnosti případné náhrady protierozními přírodními výrobky).

Souhrn dílčích cílů práce:

- rozbor problematiky eroze půdy, protierozní ochrany svahů, využití vegetace a protierozních přírodních i geosyntetických výrobků,
- vyhodnocení vlivu přítomnosti trvalých protierozních georohoží v půdním profilu na růst a vývoj kořenového systému trav,

- vyhodnocení efektu protierozní ochrany svahů pomocí trvalých protierozních georochoží ve spolupůsobení s travním porostem.

Splnění výše uvedených dílčích cílů práce by mělo vést k hlubšímu poznání problematiky protierozní ochrany svahů pomocí trvalých protierozních georochoží, a tím přispět do diskutované problematiky ohledně účinnosti a vhodnosti aplikace trvalých protierozních výrobků.

3 Literární přehled

3.1 Půda

Půda tvoří svrchní část zemského povrchu – pedosféru a je jakýmsi rozhraním mezi geologickým povrchem Země a její atmosférou. Jedná se o samostatný přírodní útvar vzniklý z povrchových zvětralin zemské kůry a z organických zbytků za pomoci půdotvorných procesů, které obvykle probíhají zároveň a navzájem se mezi sebou ovlivňují (Tomášek, 2007, Kutílek, 2012). Půda je otevřený dynamický systém, který s jejími neživými i živými složkami lze považovat za komplexní a provázaný ekosystém. Půda podporuje a umožňuje život na pevnině, zajišťuje řadu funkcí a poskytuje služby nezbytné pro lidské činnosti a pro přežití všech přirozených i umělých ekosystémů na jejím povrchu. (Kutílek, 2012)

Klíčové funkce půdy:

- životní prostor pro všechny suchozemské organismy, kotviště pro veškerou vegetaci,
- působí jako prostor pro biodiverzitu (genová rezerva), která je v půdě mnohem větší než u rostlin a živočichů žijících na zemském povrchu,
- produkce biomasy, zejména v oblasti zemědělství a lesnictví,
- globální článek koloběhu vody, uhlíku, dusíku, fosforu a dalších živin (filtrace, akumulace, retence, pufrace, transformace, asanace, transport),
- zdroj pro dobývání surovin (písky, štěrky, hlíny, rašelina apod.),
- zdroj obživy pro živočichy na všech stupních potravního řetězce,
- udržování současného stavu atmosféry,
- platforma pro většinu lidských činností – prostorem pro hospodářské využití, bydlení, infrastrukturu, rekreaci, uložení odpadů,
- má estetickou funkci projevující se v utváření podoby krajiny,
- konzervace geologického a archeologického dědictví.

(Situační a výhledová zpráva - Půda, 2012; Kutílek, 2012, Směrnice pro ochranu půdy 2006/0086 (COD))

3.2 Degradace půdy

Degradace půdy, která je způsobována třemi základními degradačními procesy (fyzikální, chemické a biologické), je navíc zhoršována sociálně-ekonomickými a politickými faktory (Lal, 2001). Vede k omezení nebo až ztrátě schopnosti půdy plnit své základní produkční a mimoprodukční funkce a je velice závažným celosvětovým problémem. Lal (2001) uvádí, že k degradaci půdy jsou náchylné 2 mld. ha světového území (z toho připadá 29,7 % na zemědělské půdy, 34,8 % pastvinám a 35,5 % lesním pozemkům). Vzhledem k tomu, že se jedná poměrně o starý údaj, lze předpokládat, že velikost území náchylných k degradaci půd do současné doby ještě vzrostla.

Tento nepříjemný světový trend vedl k uvědomění si vážnosti celé situace v zacházení s půdním fondem a jako odpověď byla v roce 1972 přijata Evropská charta o půdě, v roce 1981 Světová charta o půdě na 21. konferenci FAO a vše bylo plně zdůrazněno na mezinárodní konferenci OSN v Rio de Janeiru v roce 1992. Během posledních patnácti let bylo na úrovni Evropského společenství přijato nejprve rozhodnutí Evropského parlamentu a Rady č. 1600/2002/ES ze dne 22. července 2002 o šestém akčním programu Společenství pro životní prostředí, které zahrnuje cíl

ochrany přírodních zdrojů a podpory využívání půdy (jeho působnost skončila v roce 2012). Dále dne 22. září 2006 Komise předložila návrh směrnice Evropského parlamentu a Rady o zřízení rámce pro ochranu půdy a o změně směrnice 2004/35/ES, který se zaměřuje na ochranu půdy a zachování schopnosti půdy vykonávat své environmentální, hospodářské, sociální a kulturní funkce. Evropská komise zde určila osm hlavních procesů degradace půdy, jimž čelí státy v rámci Evropské unie – eroze, úbytek organické hmoty, kontaminace, zaselování, utužování, pokles biologické rozmanitosti půdy, zakrytí, sesuvy a záplavy. Dne 13. února 2012 vydala Evropská komise tiskovou zprávu „Životní prostředí: Komise vyzývá k důraznějšímu řešení problému degradace půd.“ V této tiskové zprávě zdůrazňuje nutnost podniknout opatření, která zamezí pokračujícímu zhoršování stavu evropských půd.

Předkládaná práce vzhledem ke svému zaměření a danému rozsahu není schopna pojmut celou problematiku degradace půdy a podrobně analyzovat jednotlivé degradační procesy. Ve výše zmíněném odborném článku Lal (2001) je problematika degradace půdy přiblížena s odkazy na další odbornou literaturu, která se problematikou degradace půd zabývá.

3.3 Eroze půdy

V následujících odstavcích a podkapitolách bude nastíněna eroze půdy vedoucí k nežádoucí degradaci půdy. Do úvodu je ale nutné poznamenat, že samotný proces eroze je spojen s historií naší Země velice úzce a ne vždy v negativním slova smyslu. Je to proces přirozený, často velice pomalý, nevyhnutelný a pozorovatelný jen s odstupem tisíců let a staletí (Jůva & Cáblik, 1954; Hudson, 1981; Lal, 1990, Holý, 1994; Morgan, 2005; Rickson et al., 2006).

V geologických dobách (samozřejmě i v současné době) se přirozená (geologická) eroze podílela na tvorbě tvaru zemského reliéfu, jaký je nám známý dnes. Lal (1990) zmiňuje, že přirozená eroze, která může být urychlována přírodními činiteli (sucho, laviny, povodně, extrémní větrné jevy, škůdci, choroby rostlin a další), měla vliv na tvorbu nejúrodnějších nivních půd světa, díky nimž se mohly vyvíjet starověké civilizace. Teprve ve spojení s lidskými aktivitami docházelo (a především v současné době stále více dochází) k antropogenní zrychlené (akcelerované) erozi, jejímž důsledkem jsou vážné dopady na půdu a životní prostředí (Jůva & Cáblik, 1954; Hudson, 1981; Lal, 1990; Holý, 1994; Lal, 2001; Morgan, 2005). S rozvojem lidské civilizace a nárůstem světové populace za posledních sto až stopadesát let došlo k narušení rovnováhy mezi půdotvorným procesem a přirozenou erozí právě díky akcelerované erozi. Antropogenní zrychlená eroze se tak stala celosvětovým environmentálním problémem a řadí se mezi nejčastější a nejničivější procesy vedoucí k degradaci půdy (Hudson, 1981; Lal, 1990; Holý, 1994; Lal, 2001; Morgan, 2005; Kutílek, 2012). Mezi lidské aktivity, které se nejvíce podílejí na vzniku zrychlené eroze půdy, patří kromě zemědělství a lesnictví především stavebnictví, těžební a rekultivační činnosti a v neposlední řadě rekreace (Hudson, 1981; Ziegrel et al., 1997; Sutherland, 1998a; Morgan, 2005; Rickson et al., 2006).

Slovo eroze pochází z latinského slova *erodere*, jehož základ *rodere* znamená rozhlašovat. Obecně pojem eroze půdy zahrnuje především odnos a ztrátu půdních

částic ze svrchní části půdního profilu za pomoci přírodních nebo antropogenních erozních činitelů.

3.3.1 Erozní činitelé (faktory)

Erozní procesy vznikají interaktivním působením přírodních a antropogenních činitelů, které je vyvolávají a ovlivňují.

Mezi přírodní činitele patří (uvedeno z pohledu vodní eroze):

- geologické a půdní poměry
 - mateční hornina – vlastnosti půdotvorného matečního substrátu ovlivňují důležité vlastnosti půd, zejména strukturu a obsah minerálních látek, a tak působí nepřímo na vznik eroze. Může však na vznik a průběh eroze působit i přímo v případech, kdy je obnažena a vystavena přímému působení klimatickým erozním činitelům;
 - půdní poměry – jsou souhrnem půdních vlastností (rozhodující je struktura a textura půdy, obsah organické hmoty a minerálů v půdě, vlhkost, nasycenost sorpčního komplexu a další), které mají vliv na velikost infiltrace srážkové vody do půdy a na odolnost povrchu půdy vůči destrukčnímu účinku dešťových kapek a povrchově stékající vody. Tyto přirozené vlastnosti půdy jsou především ovlivňovány činností člověka;
- klimatičtí činitelé
 - srážky (množství, intenzita, rozložení) – v rámci vodní eroze půdy jsou rozhodující srážky přívalové, charakterizované vysokou intenzitou, krátkou dobou trvání a omezeným plošným dosahem;
- morfologie území
 - sklonitost – převládající vliv na vznik a průběh erozního procesu. Čím větší je sklonitost erozním procesem dotčeného svahu, tím se zvětšuje rychlost a množství povrchového odtoku. Na rovinném povrchu dopadající kapky odskakují rovnoměrně všemi směry, kdežto na svazích převládá odraz kapek ve směru sklonu svahu;
 - délka – vliv na přechod plošného povrchového odtoku v odtok soustředěný;
 - členitost – členité terény napomáhají soustředění povrchově stékající vody a rychlejšímu odtoku;
 - expozice ke světovým stranám – zrychlené tání sněhu a vysychání půdy na osluněných svazích;
 - tvar území – svahy můžeme rozdělit na konvexní (vypuklé), konkávní (vydutý), přímé a kombinované;
- vegetační kryt půdy – vegetační kryt plní především ochrannou funkci půdního povrchu před negativním působením erozních činitelů. Protierozními účinky vegetace se zabývá podkapitola 3.4.1.

Mezi antropogenní činitele patří člověk díky svému vlivu na využití půdy (land use) a s ním spojené způsoby obdělávání půdy. Antropogenní působení je stále více ovlivňováno ekonomicko-sociologicko-politickými aspekty (vysoký populační tlak –

potřeba potravin, životního prostoru; nízká životní úroveň, negramotnost, politická nestabilita, kulturní zvyklosti a další).

(Jůva & Cáblik, 1954; Smith & Wischmeier, 1962; Holý, 1994; Vrána et al., 1998; Lal, 2001; Toy et al., 2002; Morgan, 2005)

3.3.2 Druhy eroze

Druhy eroze jsou členěny především dle převládajícího erozního činitele, který na vznik a vývoj eroze působí.

Třídění eroze podle činitele:

- vodní¹ – z pohledu skupenství vody, můžeme rozlišit vodní, sněhovou a ledovcovou erozi; z pohledu rozsahu účinků vody na půdní povrch:
 - pluviální (dešťová) eroze – kinetická energie dešťové kapky dopadající na nechráněný půdní povrch způsobuje rozrušení půdního povrchu a následně díky „rozstříku“ dešťové kapky jsou vzduchem transportovány půdní částice (anglicky splash erosion);
 - plošná (mezirýhová) eroze – během trvání deště postupně vzniká plošný povrchový odtok o malé výšce (anglicky overland flow), který transportuje půdní částice uvolněné pluviální erozí a svým působením dále destabilizuje půdní agregáty. Jelikož plošná eroze nastává na ploše mezi rýhami, často se nazývá mezirýhovou erozí (anglicky interrill erosion);
 - rýhová eroze – v oblasti kritické délky svahu a díky heterogenitě reliéfu, vegetačnímu pokryvu či předešlým erozním útvarům plošný povrchový odtok přechází v soustředěný povrchový odtok, který vytváří nejprve mikroskopické kanálky, rýžky, brázdy a následně rýhy (anglicky rill erosion);
 - výmolná a stržová eroze – vznikající především v drahách soustředěného odtoku (anglicky gully erosion), přičemž stržová eroze je často brána jako nejpokročilejší a nejnebezpečnější stádium výmolné eroze. Sanace strží vyžaduje speciální postupy z oblasti hrazenářských úprav;
 - eroze dna a břehů vodních toků – v rámci trvalé hydrografické sítě, někdy též nazývána jako proudová eroze;
- větrná
- antropogenní – způsobena přímým nebo nepřímým působením člověka na erozní procesy:
 - nepřímá antropogenní eroze – díky ničení či odstranění přirozeného vegetačního krytu půdy a jeho (ne)nahrazení vegetací s nízkým ochranným účinkem, zhoršování fyzikálních, chemických i biologických vlastností půdy;

¹ Toy et al. (2002) vysvětluje rozdíl mezi 2 klasifikačními systémy vodní eroze. Starší klasifikační systém, založený na postupném vývoji míry projevu eroze, rozlišuje plošnou a rýhovou erozi (anglicky sheet and rill erosion). V současné době je více užíván systém založený na prostorovém měřítku, kde se erozní procesy odehrávají v rámci dotčeného území (oblast zdroje erozního materiálu) – mezirýhová a rýhová oblast/eroze (anglicky interrill and rill areas/erosion).

- o přímé antropogenní eroze – eroze vlivem způsobu obhospodařování zemědělských pozemků (způsob orby, osevní postupy, těžká zemědělská technika), závlahová eroze, eroze vlivem stavební činnosti (výstavba dopravní a technické infrastruktury, bytových i nebytových prostor), eroze způsobena těžební činností a další.

(Jůva & Cáblik, 1954; Holý, 1994; Gray & Sotir, 1995; Fulajtár & Janský, 2001; Lal, 2001; Toy et al., 2002; Morgan, 2005)

Jednotlivé druhy eroze se mohou vyskytovat samostatně nebo v kombinaci, což způsobuje různou intenzitu erozních procesů. Autoři Hudson (1981), Lal (1990), Holý (1994), Gray & Sotir (1995), Lal (2001), Morgan (2005) a řada dalších se shodují, že nejrozšířenějším druhem eroze, která má vliv na národní ekonomiku, udržitelnost a dlouhodobou konkurenceschopnost státu, je vodní eroze.

Podle analýz Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy, v. v. i. (VÚMOP) lze konstatovat, že během posledních 30 let se degradace půdy vlivem vodní eroze v rámci podmínek České republiky velmi výrazně zrychlila. Svědčí o tom fakt, že více než polovina zemědělské půdy je právě vodní erozí ohrožena. Hlavním důvodem je zejména intenzifikace zemědělství a změna preferencí pěstování některých plodin. (Novotný et al., 2014)

3.3.3 Erozní proces

Půdní eroze má tři základní fáze – uvolnění půdních částic, jejich transport a následně sedimentaci přemísťovaného materiálu vlivem poklesu unášecí rychlosti (Ellison, 1944; Ekern, 1950; McIntyre, 1957; Meyer et al., 1975; Moeyersons et al., 1976; Hudson, 1981; Lal, 1991; Holý, 1994; Gray & Sotir, 1995; Morgan, 2005).

Na uvolnění půdních částic a jejich následný transport se z pohledu vodní eroze podílejí dešťové kapky dopadající na půdní povrch a povrchový plošný i soustředěný odtok (Lal, 2002; Morgan, 2005).

Energie erozních činitelů zodpovědná za erozní proces je kinetická (pohybová) energie (Holý, 1994; Morgan, 2005). Většina kinetické energie je spotřebována třením, které musí erozní činitel překonat při pohybu přes půdní povrch (Morgan, 2005). Pearce (1976) uvádí, že ve výsledku je pouze 3 až 4 % z energie povrchového odtoku a 0,2 % z energie dešťových kapek následně využito na samotný erozní proces. Z výše uvedeného vyplývá, že za neúčinnější erozní činitel je považován soustředěný povrchový odtok (Morgan, 2005).

Váženost eroze závisí především na dvou faktorech – množství sedimentu dostupného pro transport a kapacitě transportních činitelů dostupné sedimenty odnášet (Toy et al. 2002; Morgan, 2005). Můžeme tak rozlišit dva limitní případy mající vliv na celkový objem sedimentů odnesených během eroze půdy:

- transportně limitní případ eroze (anglicky transport-limited) – sedimenty dostupné pro transport svým množstvím přesahují transportní kapacitu transportních činitelů (nastává převážně u nesoudržných zemin),
- tvorbou sedimentů limitní případ eroze (anglicky detachment-limited) – proces oddělování půdních částic nevytváří dostatečné množství sedimentů, které je transportní kapacita transportních činitelů schopna pojmout (nastává převážně u soudržných zemin).

(Toy et al., 2002; Morgan, 2005)

3.3.3.1 Uvolnění půdních částic vlivem účinku dešťových kapek

Základním předpokladem vzniku půdní eroze je uvolnění půdních částic z půdních agregátů vlivem kinetické energie dešťových kapek dopadajících na nechráněný půdní povrch (Ellison, 1944; Ekern, 1950; Meyer et al., 1975; Lal, 1991; Bryan, 2000; Salles et al., 2000; Toy et al., 2002; Van Dijk et al., 2003; Leguédouis & Bissonnais, 2004; Kinnell, 2005; Morgan, 2005; Janeček et al. 2008). Jedná se o velice složitý proces, do kterého vstupuje celá řada faktorů. Na jedné straně charakter dešťových kapek (velikost tvar, rychlost, množství, intenzita, úhel dopadu, prostorové rozložení a další), na straně druhé půdní vlastnosti (druh půdy, půdní textura a struktura, obsah organického materiálu, půdní vlhkost, infiltrační a retenční kapacita a další) a v neposlední řadě i charakter půdního pokryvu (bylinná či dřevinná vegetace, aplikované protierozní materiály).

Dopadem dešťové kapky na půdní agregáty dochází k narušení jejich stability a k uvolňování půdních částic (Ellison, 1944; Ekern, 1950; Le Bissonnais, 1996; Salles & Poesen, 2000; Morgan, 2005). Neuvolňují se pouze samotné půdní částice, ale i zrna a mikroagregáty (viz dále). Proces zhroucení půdních agregátů (anglicky aggregate breakdown) je komplikovaný a závisí na mnoha půdních vlastnostech (půdní struktura a textura, obsah jílových minerálů, obsah organické hmoty, koncentrace kationtů a další) a vlastnostech samotného erozního činitele – dešťové kapky (Ellison, 1944; Ekern, 1950; Meyer et al., 1975; Lal, 1991; Le Bissonnais, 1996; Salles et al., 2000; Toy et al., 2002; Morgan, 2005).

Erozní účinek dopadající dešťové kapky úzce souvisí s výškou vodního sloupce na půdním povrchu. Při hloubce vodního sloupce 0,14 až 0,2 průměru dešťové kapky dochází k největšímu účinku dešťové kapky na rozrušení půdních agregátů a transport erodovaného materiálu (Mutchler & Young, 1975). Při dosažení kritické hloubky vody na půdním povrchu dochází k rozptýlení kinetické energie dopadajících dešťových kapek a Morgan (2005) uvádí, že s následným zvyšováním hloubky vody exponenciálně klesá jejich erozní účinek. Kritická hloubka byla ověřována mnohými laboratorními pokusy (Mutchler & Young, 1975; Moss & Green, 1983; Kinnell, 1990) a bylo zjištěno, že se přibližně pohybuje v rozmezí mezi jedním průměrem dopadající dešťové kapky až po jeho pětinasobek, přičemž toto rozpětí souvisí se zrnitostním složením zeminy (Morgan, 2005).

Půdní agregáty a jejich zhroucení

Le Bissonnais (1996) popisuje 4 hlavní mechanismy způsobující zhroucení půdních agregátů:

- mechanické rozrušení dešťovými kapkami (anglicky breakdown by raindrop impact),
- roztržení vzduchem stlačeným uvnitř agregátů při prudkém ovlhčení (anglicky slaking),
- rozrušení objemovými změnami, ke kterým dochází při ovlhčování a vysoušení (anglicky differential swelling),
- fyzikálně chemická dispergace zmenšením přitažlivých sil mezi koloidními částicemi při ovlhčování (anglicky physico-chemical dispersion).

Při dostatečné kinetické energii dešťových kapek je rozrušování půdních agregátů dešťovými kapkami doprovázeno i ostatními výše uvedenými mechanismy, přičemž

role mechanického rozrušování je dominantní tím více, čím je půda vlhčí (Le Bissonnais, 1996).

Velikost půdního zrna a selektivní eroze

Morgan (2005) uvádí, že pro oddělení půdního zrna s průměrnou velikostí 0,125 mm je zapotřebí vynaložit minimální kinetickou energii dešťové kapky, a proto půdy s průměrným průměrem zrn v rozmezí 0,063 až 0,250 mm jsou k oddělování nejcitlivější. Půdy, které obsahují více hrubozrných částic, jsou tedy odolnější. Stejně tomu je ale i u jemnozrných půd (především pak soudržných zemin), kde dešťové kapky musí nejdříve překonat chemické vazby mezi jílovými částicemi. Z uvedeného vyplývá, že nejvíce náchylné k oddělování půdních částic vlivem kinetické energie dešťových kapek jsou prachové hlíny, hlíny, jemné písky a písčité hlíny (Le Bissonnais et al., 1998; Morgan, 2005).

Snažší oddělování a odnos půdních zrn o určité velikosti vede k selektivní erozi, která může způsobit změnu půdní textury ve směru postupu eroze (Holý, 1994; Morgan, 2005; Novotný et al., 2014) a zanechat za sebou tzv. armovaný půdní povrch (Poesen et al., 1994; Toy et al., 2002). Toy et al. (2002) poznamenává, že oddělování půdních částic u soudržných zemin nemůže být bráno jako selektivní, jelikož po narušení vnitřních vazeb se uvolňují částice všech velikostí, které tyto půdy obsahují. V širším měřítku mezirýhové eroze lze ale o selektivní erozi hovořit, protože pro odnos větších zrn (jako jsou například šterky) je zapotřebí vyvinout větší sílu než je potřeba pro překonání vazeb mezi jílovými částicemi. Selektivní eroze se netýká pouze půdních zrn uvedené velikosti, ale také půdních agregátů (Morgan, 2005).

Samotným působením úlomků hornin o velikosti zrna 2,0 mm a více na vodní erozi půdy se zabývá ve svém výzkumu Poesen et al. (1994). Úlomky hornin v závislosti na své poloze vůči půdnímu povrchu (na půdním povrchu nebo ve svrchní vrstvě půdy) a na velikosti plochy vymezené svým působením (mikro měřítko – plocha vymezena velikostí jednotlivých úlomků hornin, mezo měřítko – plocha vymezena mezirýhovou oblastí, makro měřítko – plocha vymezena mezirýhovou a rýhovou oblastí) ovlivňují vodní erozi půdy přímo i nepřímo (Poesen et al., 1994). Přímé ovlivnění se odehrává pomocí ochrany půdního povrchu před erozním účinkem dešťových kapek a povrchového odtoku nebo v zachycování půdních částic a zrn nesených vzduchem po rozstříku dešťové kapky (Poesen et al., 1994; Morgan, 2005). Nepřímé ovlivnění má dopad na fyzikální degradaci půdy, hydrologické a hydraulické procesy (Poesen et al., 1994).

3.3.3.2 Uvolnění půdních částic vlivem povrchového odtoku

Plošný povrchový odtok

V případě, kdy množství spadlých srážek převyšuje míru půdní infiltrace nebo překročí retenční kapacitu půdy, dochází k hromadění vody na půdním povrchu (ve strukturách mikroreliefu) a postupem času k formování plošného povrchového odtoku (Meyer et al., 1975; Holý, 1994; Morgan, 2005). Dle Holého (1994) a Morgan (2005) plošný povrchový odtok zřídka kdy probíhá v souvislé vrstvě vody o přibližně stejné hloubce, ale často vlivem různých překážek na půdním povrchu (větší

kameny, vegetační pokryv – travní drny, křoviny) dochází k jeho rozptýlení do nezfetelných odtokových drah.

Samotný plošný povrchový odtok, který není ovlivňován účinkem dopadajících dešťových kapek, obvykle nemá dostatečně velkou energii na rozrušování půdních agregátů (Bryan, 2000 a Van Dijk et al., 2003). Proto v mezirýhové oblasti, kde dochází k formování plošného povrchového odtoku, hraje důležitou roli v rozrušování půdních agregátů spolupůsobení plošného povrchového odtoku a do něj dopadajících dešťových kapek, kdy dešťové kapky mění hydraulické charakteristiky plošného povrchového odtoku (Bryan, 2000). Ellison (1945), Ekern (1950), Moss & Green (1983), Kinnell (2005) ve svém výzkumu prokázali, že při vzájemném spolupůsobení těchto dvou erozních činitelů se jejich erozní účinek může až dvakrát zvýšit, než když oba erozní činitele působí samostatně. Velikost účinku souvisí s již zmíněnou kritickou hloubkou vody na půdním povrchu.

Soustředěný povrchový odtok

Za nejúčinnější erozní činitel je považován soustředěný povrchový odtok (Morgan, 2005).

V porovnání s plošným povrchovým odtokem, který působí téměř po celém svahu a je silně ovlivňován účinkem dopadajících dešťových kapek (Bryan, 2000; Morgan, 2005), soustředěný povrchový odtok je koncentrován do dočasné či trvalé hydrografické sítě (Holý, 1994) a nepřímo ovlivňován účinkem dešťových kapek (Bryan, 2000). Dle Morgan (2005) je obecně akceptováno, že formování soustředěného povrchového odtoku a s ním spojené rýhové eroze souvisí s kritickou vzdáleností na svahu, po jejímž dosažení se plošný povrchový odtok začíná koncentrovat do zřetelných odtokových drah. S teorií kritických vzdáleností na svahu, kde na počátku je pás bez eroze (anglicky belt of no erosion), po dosažení první kritické vzdálenosti nastává plošný povrchový odtok a po překročení další kritické vzdálenosti přechází v soustředěný povrchový odtok, přišel ve svém konceptu tvorby odtoku z povodí Horton (1945). Na druhou stranu Bryan (2000) uvádí, že je důležité si uvědomit, že tvorba soustředěného povrchového odtoku je v přirozených podmínkách ovlivňována a způsobována mikrorelieфом, vegetací a především na zemědělských půdách orbou.

Zjištění podmínek ovlivňující přechod plošného povrchového odtoku v odtok soustředěný bylo a stále je předmětem mnoha studií, jelikož formování soustředěného odtoku je spojeno se zvýšenou mírou eroze a změnou terénní morfologie (Bryan, 2000). Byly navrženy různé mechanismy popisující formování rýhové eroze jako například – již uvedená kritická délka svahu, dále prahové smykové napětí, hydraulické vlastnosti povrchového odtoku nebo tvorba a migrace tzv. čel rýhové eroze a mnoho dalších.

Morgan (2005) uvádí, že jakmile dojde k vytvoření erozní rýhy, nastává její posun jak zpětně po svahu, tak směrem dolů. Posun zpětně po svahu nastává díky ústupu čela erozní rýhy, kde míra posunu závisí na kohezi půdy, výšce a sklonu erozního čela, velikosti průtoku a jeho rychlosti (Savat, 1979; Morgan, 2005; Gordon, 2007; Drongová & Sobotková, 2013). Postup erozní rýhy směrem po svahu dolů je kontrolován smykovým napětím povrchového odtoku a smykovou silou půdního povrchu (Savat, 1979; Morgan, 2005).

Se soustředěným povrchovým odtokem souvisí tvorba dočasných a permanentních strží, přičemž s vysokými erozními účinky na zemědělských půdách jsou spojovány hlavně dočasné strže (anglicky ephemeral gullies), pro které se v rámci odborné české terminologie užívá název efemerní rýhy. Poesen (1993) uvádí velikost průřezové plochy $1,0 \text{ m}^2$ (přesněji $0,093 \text{ m}^2$), která se obecně užívá pro rozlišení mezi rýhovou a stržovou erozí. Dle Drongové & Sobotkové (2013) lze na efemerní rýhy pohlížet jako na zvláštní typ rýh. Efemerní rýhy se znovuobjevují na stále stejných místech v tzv. drahách soustředěného povrchového odtoku (Poesen, 1993; Morgan, 2005; Drongová & Sobotková 2013), oproti tomu běžné rýhy se na zemědělském pozemku každoročně objevují v závislosti na zemědělských praktikách.

V rámci České republiky se v současné době problematice efemerních rýh věnují odborníci z Vysokého učení technického v Brně (Dumbrovský et al., 2012; Sobotková, 2012; Drongová & Sobotková, 2013), kde byla vyvinuta speciální metoda pro výpočet objemu rýh, která využívá zaměření profilu erozních rýh přímo v terénu pomocí tzv. erodoměru (Dumbrovský et al., 2012).

3.3.3.3 Transport erodovaného materiálu

V rámci vodní eroze půdy se na odnosu erodovaného materiálu (půdních částic a zrn a mikroagregátů) z místa uvolnění do místa ukládání podílejí dva transportní činitelé, kteří mohou působit jak samostatně, tak ve vzájemné kombinaci. Jedná se o rozstřík dešťové kapky a o povrchový plošný i soustředěný odtok.

(Bryan, 2000; Kinnell, 2005; Morgan, 2005)

Role dešťové kapky na transport erodovaného materiálu

Dešťová kapka, kromě rozrušování půdních agregátů, hraje roli i v následném transportu erodovaného materiálu. Erodovaný materiál je společně s rozstříkem dešťových kapek transportován vzduchem až několik desítek centimetrů (Moss & Green, 1983; Ziegler et al., 1997; Morgan, 2005; Ghahramani et al., 2011). Na rovinném povrchu je dešťová kapka rozstříknuta paprscitě všemi směry a půdní částice, která byla z místa dopadu odnesena rozstříkem kapky, je nahrazena půdní částicí z rozstříku kapky, která dopadla někde poblíž (Kinnell, 2005). Proto transport rozstříkem dešťové kapky na rovinném terénu je vysoce neefektivní (Kinnell, 2000; Morgan, 2005; Bhattacharyya et al., 2010a). Jinak je tomu u sklonitého terénu, kde díky gravitační síle dochází k převaze pohybu rozstříknutých dešťových kapek směrem po svahu dolů (Kinnell, 2005; Morgan, 2005; Bhattacharyya et al., 2010a). Z tohoto důvodu transport erodovaného materiálu pomocí rozstříku dešťové kapky hraje roli především v horní části svahu, kde ještě není formován povrchový odtok, v oblasti mezirýhové eroze, kde ovlivňuje transportní kapacitu plošného povrchového odtoku (Bryan, 2000; Morgan, 2005), a dále pak pod vegetačním krytem (Ghahramani et al., 2011).

Podrobnému rozboru transportu erodovaného materiálu pomocí rozstříku dešťové kapky a povrchového odtoku nebo jejich kombinací se věnuje Kinnell (2005). Uvádí 4 systémy uvolnění a transportu půdních částic (anglicky detachment and transport systems), kde poslední z nich „uvolnění a transport půdních částic povrchovým odtokem“ je charakteristický již pro rýhovou erozi, tedy pro situaci, kdy erozi půdy a její odnos způsobuje soustředěný povrchový odtok bez vlivu dešťových kapek. Ve

vědeckém výstupu Kinnell (2009) doplňuje svůj předchozí výzkum o způsob pohybu půdních částic (valením, saltací, nesením v suspenzi) v závislosti na jejich velikosti a měrné hustotě, délce a sklonu erozí dotčeného svahu.

Role dopadu dešťové kapky na uvolňování půdních částic, na tvorbu sedimentu a na transport půdních částic by neměla být podceňována (Ekern, 1950; Bhattacharyya et al., 2010b). Všeobecně zahraniční i tuzemští autoři uvádějí, že v rámci protierozní ochrany půdy je efektivnější a finančně méně nákladná právě ochrana půdního povrchu před erozním účinkem dopadající dešťové kapky, než ochrana před erozním účinkem soustředěného povrchového odtoku.

Plošný povrchový odtok

Role plošného povrchového odtoku je především v transportu erodovaného materiálu z mezirýhové oblasti do oblasti rýhové (Mutchler & Young, 1975; Toy, 2002; Morgan, 2005), přičemž míra transportu je pozitivně ovlivňována dopadajícími kapkami (Morgan, 2005). Plošný povrchový odtok odnáší sediment, který je uložen například ve výše vysvětleném „radiálním valu“ nebo do něho dopadl společně s roztrásknutými dešťovými kapkami. Morgan (2005) uvádí, že dešťovými kapkami jsou nejlépe oddělovány a transportovány půdní částice s průměrem zrna v rozmezí 0,063 až 0,250 mm a díky energii plošného povrchového odtoku jsou transportovány půdní zrna s průměrem v rozmezí 0,1 až 0,3 mm. Takto dochází již k výše zmíněné selektivní erozi. Na svazích zůstává více písčitého materiálu a oblasti, kde je erodovaný materiál ukládán, jsou obohacovány jemnějším materiálem (Holý, 1994; Morgan, 2005; Novotný et al., 2014).

Soustředěný povrchový odtok

Soustředěný povrchový odtok má značný erozní účinek jak na uvolňování půdních částic, tak na jejich následný transport v závislosti na rozmístění rýh a rozsahu dotčené oblasti (Morgan, 2005). Toy et al. (2002) uvádí, že téměř všechen uvolněný sediment z mezirýhové oblasti je transportován do oblasti rýhové. Transportní kapacita soustředěného povrchového odtoku je ovlivňována tímto přinášeným sedimentem z mezirýhové oblasti, a proto nezávisí pouze na množství uvolněného materiálu v rámci eroze rýhy (Morgan, 2005).

Oproti plošnému povrchovému odtoku působí soustředěný povrchový odtok neselektivně a je schopen nést půdní zrna do velikosti 9,0 cm (Morgan, 2005).

3.3.3.4 Sedimentace unášených půdních částic

Míra sedimentace povrchovým odtokem neseného erodovaného materiálu podle Proffitt et al. (1991) je závislá na aktuální koncentraci neseného sedimentu v povrchovém odtoku a na velikosti sedimentační rychlosti. K transportu erodovaného materiálu dochází do doby, než rychlost proudění povrchového odtoku neklesne pod rychlost sedimentace nesených půdních částic (Proffitt et al., 1991; Morgan, 2005; Dumbrovský, 2013).

Sedimentační rychlost souvisí s velikostí unášených půdních částic, a proto můžeme konstatovat, že i proces sedimentace neseného materiálu je selektivní, jelikož se nejdříve ukládají hrubší zrna a teprve později jemnější zrna (Morgan, 2005). S tímto je spojena

již výše zmíněná změna zrnitosti půd na svazích a v oblastech, kde je erodovaný materiál ukládán (Holý, 1994; Morgan, 2005; Novotný et al., 2014).

Uvolněný materiál může být všechen ukládán v rámci samotného erozí postiženého území a nebo jeho část (především jemnozrnější materiál) může být transportována až do stálé hydrografické sítě, kterou je unášena dále na velké vzdálenosti a vlivem následné sedimentace může působit značné škody daleko od území, které bylo erozí postiženo.

Sedimentace hraje důležitou roli ve vývojovém cyklu strží, pro který je charakteristické postupné střídání fáze eroze a sedimentace. V průběhu erozní fáze dojde ke snížení podélného sklonu strže až na úroveň, která má za následek fázi sedimentace během níž je strž znovu zaplňována, podélný sklon se zvyšuje a jakmile dosáhne kritické hodnoty, dojde ke spuštění nové erozní fáze. Pro strže je charakteristické, že se během jejich délky fáze eroze a sedimentace střídají, a proto mají nerovnoměrný charakter podélného sklonu s řadou zlomových bodů.

(Morgan, 2005)

3.3.4 Dešťové srážky

Děšť je kapalná forma atmosférických srážek, dopadajících na zemský povrch ve tvaru vodních kapek zpravidla větších než 0,5 mm (Kasprzak, 1987a; Krešl, 2001; Hejduk, 2011). Jak již bylo uvedeno výše, v rámci vodní eroze půdy jsou rozhodující srážky přívalové, charakterizované vysokou intenzitou, krátkou dobou trvání a omezeným plošným dosahem (Jůva & Cáblik, 1954; Smith & Wischmeier, 1962; Holý, 1994; Vrána et al., 1998; Lal, 2001; Toy et al., 2002; Morgan, 2005; Hejduk, 2011).

3.3.4.1 Charakteristiky dešťových srážek

Za hlavní charakteristiky deště, které popisují dešť z hlediska jeho kvantity, jsou považovány:

- H_s ... srážkový úhrn (vyjádřený výškou sloupce vody) [mm],
- t_D ... doba trvání deště [min].

Z těchto hlavních charakteristik lze odvodit další důležitou charakteristiku deště a tou je intenzita deště i_s [mm.min⁻¹]:

$$i_s = \frac{H_s}{t_D} \quad (1)$$

Děšť je možné také popsat na základě mechanických vlastností vyplývajících z jeho pohybu, přičemž mohou být rozlišeny mechanické vlastnosti deště jako:

- pohybujícího se nespojitého objektu – spektrum velikosti kapek, tvar padajících kapek, pádová rychlost a jejich pohybová energie,
- přechodu pohybující se vodní hmoty do stavu klidu, tj. po dopadu na povrch půdy – charakteristiky určující nárazovou (brzdnou) sílu kapek dopadajících na půdní povrch, impulz nárazové síly, tlak kapek na místo jejich dopadu a další.

(Kasprzak, 1987a; Hejduk, 2011)

Hejduk (2011) uvádí, že za nejvýznamnější mechanickou charakteristiku deště je považována kinetická (pohybová) energie deště dopadajícího na půdní povrch. Kasprzak (1987b) na základě svých pozorování odvodil empirický vztah pro

měrnou vydatnost kinetické energie deště $w_k(i_s)$, která vyjadřuje závislost měrné vydatnosti kinetické energie deště na intenzitě deště i_s :

$$w_k(i_s) = 500i_s[67,5 - 27,5\exp(-50000i_s)] \quad (2)$$

Úhrnná kinetická energie celkové vydatnosti deště W_K je pak vyjádřena vztahem:

$$W_K = w_k(i_s) \cdot t_D \quad (3)$$

kde je W_K ... úhrnná kinetická energie celkové vydatnosti deště [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$],
 $w_k(i_s)$... kinetická energie měrné vydatnosti deště [$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$],
 i_s ... střední intenzita deště [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
 t_D ... doba trvání deště [s].

Uvedené fyzikální charakteristiky dešťů jsou využívány při posuzování mechanického účinku deště na půdu (Kasprzak, 1987b; Hejduk, 2011).

Přívalové (nebezpečné) deště

Přívalový dešť nebo též užívaný pojem (erozně) nebezpečný dešť nemá jednoznačnou definici (Kolektiv autorů ČHMÚ, 1988; Holý, 1994). Hejduk (2011) uvádí, že snahou řady zahraničních autorů (například Wussow (in Hejduk (2011), Barnett (1958) a Berg (in Holý, 1994)) bylo stanovit kritéria pro přívalové deště na základě znalosti jejich hlavních charakteristik (srážkového úhrnu a době trvání).

Hejduk (2011) uvádí, že na území České republiky na základě porovnání a měření nebezpečných dešťů, které vyvolávaly povrchový odtok a erozi, odvodil Kasprzak nové kritérium pro stanovení nebezpečných dešťů na základě použití hlavních charakteristik deště. Aby bylo možné porovnat jednotlivá kritéria, byla zavedena nová fyzikální charakteristika deště definovaná funkcí intenzity deště i_s a dobou jeho trvání t_D , tzv. mohutnost deště M_D :

$$M_D = i_s\sqrt{t_D} \quad (4)$$

kde je M_D ... mohutnost deště [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-0,5}$],
 i_s ... střední intenzita deště [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$],
 t_D ... doba trvání deště [min].

Byla stanovena hraniční hodnota 1,0, která jednoznačně určuje předěl mezi dešti nebezpečnými a neškodnými:

- $M_D < 1$ – deště neškodné,
- $M_D \geq 1$ – deště nebezpečné.

Kritéria výše zmíněných autorů Wussow, Barnett a Berg byla upravena tak, aby určovala mez, dělicí deště na nebezpečné a neškodné, a následně byla provedena analýza vyhodnocení míry spolehlivosti jednotlivých kritérií (Hejduk, 2011). Míra spolehlivosti posuzovaného kritéria vyšla nejlépe u kritéria zavedeného Kasprzakiem (Hejduk, 2011).

Následně bylo Kasprzakiem na základě provedených pokusů stanoveno, že za významné srážky lze považovat pouze srážky s intenzitou (Hejduk, 2011):

- větší jak $0,1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ (v případě deště dopadajícího na půdu bez vytvořené půdní krusty),

- větší jak $0,05 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ (v případě, kdy je půda vlhká s krustou po dešti, který se vyskytl před méně než třemi dny před odtokotvorným deštěm).

Dle Tomana et al. (1993) a Hejduka (2011) podobný přístup zvolil při hodnocení erozní nebezpečnosti dešťů Pretl (1973), který na základě pozorování objektu pro hodnocení půdní eroze ve Velkých Žernosekách v severních Čechách vyloučil deště s menší intenzitou než $0,05 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, které nevyvolaly erozní smyv.

Hejduk (2011) uvádí, že pro hodnocení parametrů mohutnosti deště byla využita pouze tzv. efektivní část deště. Jedná se o časový interval, ve kterém dosahovala intenzita deště výše uvedených hodnot. Zároveň Hejduk (2011) podotýká, že pokud docházelo během jednoho deště k opakovanému zvyšování a snižování intenzity, byly pro hodnocení použity pouze úseky s intenzitami nad $0,1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, respektive $0,05 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Společně byly hodnoceny dvojité či trojitě deště, které se vyskytly v průběhu 24 hodin².

3.3.5 Důsledky vodní eroze

Jak již bylo několikrát řečeno, eroze půdy je vážným environmentálním problémem, který ovlivňuje nejen životní prostředí, ale i ekonomiky států, a vede k degradaci půdy. Eroze půdy je celosvětově rozšířena na všechny člověkem ovlivněné ekosystémy, především pak na zemědělské a lesní. V neposlední řadě je následkem stavební, těžební, rekultivační a rekreační činnosti člověka.

Důsledky vodní eroze lze dle Vrány et al. (1998) a Novotného et al. (2014) rozdělit do několika skupin:

- vliv na půdu – vodní eroze je hrozbou pro trvale udržitelnou úrodnost půdy,
- vliv na vodní hospodářství – ovlivnění kvantitativních a kvalitativních charakteristik vodních zdrojů,
- materiální škody – ohrožení intravilánů měst a obcí, dopravní a technické infrastruktury a další.

Toy et al. (2002) a Morgan (2005) hodnotí důsledky eroze především z pohledu místa, kde se odehrávají, jestli v rámci erozí dotčeného území (anglicky on-site effects) nebo mimo erozí dotčené území (anglicky off-site effects). Obecně lze říct, že důsledky vodní eroze v rámci erozí dotčeného území mají vliv na půdu a její trvale udržitelnou úrodnost. Důsledky vodní eroze působící mimo erozí dotčené území mají vliv především na vodní hospodářství a materiální škody.

3.3.5.1 Vliv na půdu

Dlouhodobým působením eroze se mění kvantitativní a kvalitativní vlastnosti půd (Vrána et al. (1998); Lal (2001); Toy et al. (2002); Morgan (2005); Novotný et al. (2014).

Jeden z nejzávažnějších efektů vodní eroze je ochuzení půdního profilu o jeho nejúrodnější a živinově nejbohatší část (na zemědělských pozemcích ornice, obecně humusový A horizont), v důsledku narušení půdního povrchu a následného odnosu půdních částic (Toy et al., 2002; Zuazo & Pleguezuelo, 2008; Kutílek, 2012). Ztráta

² Podobný princip hodnocení kratších úseků dešťů využil i Trupl (1958, 1959) při zpracování ombrogramů a výpočtech pravděpodobnosti výskytu přívalových dešťů (Hejduk, 2011).

půdy je trvalá. Jednak z důvodu, že při případném zachycení půdy ve formě sedimentů se zcela výjimečně vrací zpět na své původní místo (Vrána et al., 1998), a dále pak vzhledem k nerovnováze mezi rychlostí půdotvorných procesů a erozí půdy. Kutílek (2012) uvádí, že vytvoření 1 cm půdy v našich podmínkách trvá sto až tisíc let v závislosti na charakteru mateční horniny. Vlivem vodní eroze tedy dochází k zmenšování mocnosti půdního profilu (Holý, 1994; Vrána et al., 1998; Lal, 2001; Toy et al., 2002; Morgan, 2005; Zuazo & Pleguezuelo, 2008; Kutílek, 2012; Novotný et al. (2014).

Odnos půdních částic vlivem eroze postupuje selektivně (příčiny a důsledky byly vysvětleny v kapitole 3.3.3). Společně s jemnou frakcí půdních částic je odplavován organický materiál a vázané živiny. Půda postupně ztrácí schopnost vázat živiny, vyrovnávat pH a snižuje se sorpční kapacita půdy (Kutílek, 2012).

Vlivem výše uvedeného se vodní erozí ovlivněný pozemek stává nehomogenní, obsah živin a humusu, společně s vlhkostními poměry je po svahu nerovnoměrně rozložen a v konečném důsledku je ovlivněna úrodnost půdy. Pro zemědělskou výrobu to znamená, že pěstované plodiny nenajdou na erozí dotčeném pozemku dostatečné množství živin a celková úroda dosahuje nižších objemů.

(Holý, 1994; Vrána et al. (1998); Toy et al. (2002); Morgan (2005); Kutílek, 2012; Novotný et al. (2014)

Dle Novotného et al. (2014) se v rámci zemědělské půdy snižují hektarové výnosy o 15–20 % (na slabě erodovaných půdách), o 40–50 % (na středně erodovaných půdách) a až o 75 % (na silně erodovaných půdách). Eroze půdy má ve výsledku vliv i na snižování cen pozemků. Dle Situační a výhledové zprávy – Půda (2012) se cena půdy poškozené erozí může snížit na některých pozemcích až o 10 Kč/m². V průměru se může jednat o snížení ceny půdy až o 50 % na jednom katastrálním území.

Půdní krusta

Účinek dopadající dešťové kapky na půdní povrch nesouvisí pouze s rozrušováním půdních agregátů a uvolňováním půdních částic, zrn a mikroagregátů, ale také s podílením se na tvorbě půdní krusty (Le Bissonnais, 1996; Morgan, 2005). Dešťová kapka při dopadu na půdní povrch způsobuje jeho uhuštění a ucpávání půdních pórů vlivem stlačování (Morgan, 2005). Zároveň při infiltraci srážkové vody, která je zakalena uvolněnými půdními částicemi a zrny, se hrdla půdních pórů zanášejí (Ellison, 1944; Morgan, 2005; Kutílek, 2012). Zanešení povrchových půdních pórů vede ke snížení infiltrace vody do půdy, k vytvoření půdní krusty a ke zvýšení povrchového odtoku, což následně ovlivňuje samotnou erozi půdy (Ellison & Slater, 1945; McIntyre, 1957; Moss, 1991; Le Bissonnais, 1996; Legout et al., 2005; Morgan, 2005; Zuazo & Pleguezuelo, 2008; Kutílek, 2012). Náchylnost k tvorbě půdní krusty se snižuje při zvyšujícím se obsahu jílových částic a organické hmoty, které půdě dodávají vyšší pevnost (Le Bissonnais, 1996; Morgan, 2005). Z tohoto důvodu jsou k tvorbě půdní krusty nejvíce náchylné hlinité a písčitohlinité půdy (Morgan, 2005). Kromě výše uvedeného způsobu tvorby půdní krusty, která se anglicky nazývá structural crust, se na půdním povrchu může tvořit půdní krusta vlivem selektivní eroze a především vlivem selektivní sedimentace (vysvětleno v kapitole 3.3.3) unášeného erodovaného materiálu anglicky nazývaná depositional crust (Le Bissonnais, 1996; Morgan, 2005).

3.3.5.2 Vliv na vodní hospodářství

Určitý podíl erodovaného materiálu ze zemědělských nebo jiných pozemků je zachycen ještě dříve, než se dostane do trvalé hydrografické sítě a vodních nádrží (Holý, 1994; Vrána et al., 1998; Morgan, 2005). Vlivem zvýšené drsnosti půdního povrchu v rámci krajinných prvků (ale i samotných erozních útvarů jak bylo uvedeno v kapitole 3.3.3), jako jsou například meze, remízky, zatravněné údolnice, travní pásy, apod., dochází k retardaci povrchového odtoku z erozně ohrožených ploch, jeho infiltraci a následné sedimentaci transportovaného materiálu. Bohužel, je nutné podotknout, že vlivem intenzifikace zemědělské výroby v minulosti byly právě tyto krajinné prvky rozorávány a zemědělské pozemky byly scelovány do velkých půdních celků (dle Nováka et al. (2014) máme v rámci České republiky největší půdní bloky v Evropě), z kterých se téměř veškerý nesený erozní materiál dostává do trvalé hydrografické sítě a vodních nádrží.

Erozní materiál, který se dostává do vodotečí, je vodou dále transportován a postupně sedimentuje v závislosti na své velikosti a charakteru proudění vody v korytě vodního toku. Hlavním problémem je zanášení průtočného profilu sedimenty a s tím související postupný vzestup nivelety dna. Zvýšená úroveň nivelety dna může mít za následek snižování kapacity průtočného profilu (a tím možné četnější vybřežování vodního toku), zvyšování hladiny podzemní vody v okolí vodního toku a ohrožení zaústění trubních i otevřených přítoků. Zanášeny jsou také jezové zdrže, což s sebou nese celou řadu negativních důsledků, jako například zhoršení kvality vody, komplikace plavby, ztížení manipulace s uzávěry na pohyblivých jezích a další. Společně s půdními částicemi je odnášeno i velké množství živin a řada toxických látek, které negativně ovlivňují kvalitu vody. Výše uvedené problémy vyvolávají častější údržbu a čištění koryt vodních toků, což je jednak nákladné a jednak má negativní vliv na stabilitu a ekologickou funkci koryta.

(Zachar, 1982; Holý, 1994; Vrána et al., 1998, Fulajtár & Janský, 2001; Toy et al., 2002; Morgan, 2005; Janeček et al., 2012; Novák et al. 2014)

Erozní materiál se také dostává do vodních nádrží. Děje se tak buď přímo smyvem z erozně ohrožených pozemků, anebo transportem hydrografickou sítí (ohroženy jsou především průtočné nádrže). Nesený materiál se ukládá nejvíce na vtoku do nádrže vlivem poklesu rychlosti a unášecí síly. Zde snižuje hloubku vody a umožňuje růst vodních rostlin, které uložený materiál stabilizují, zvyšují drsnost, a tím se ještě více zrychlí další zazemňování nádrže. S jemnozrnným sedimentem je do nádrží transportováno i velké množství živin společně s dalšími chemickými látkami různého druhu a různého stupně toxicity (průmyslová hnojiva, pesticidy, těžké kovy, atd.), tím je ovlivňována kvalita vody v nádržích a při případné těžbě sedimentů je často nutné s odtěženým materiálem zacházet jako s nebezpečným odpadem. Kvalita vody v nádržích může být ovlivněna rozkladem vegetace, která rychle bujně roste na obnažených sedimentech při poklesu úrovně hladiny vody v nádrži. Při opětovném zatopení se rozkládá a do vody uvolňuje velké množství živin, organické hmoty a dalších látek. Může dojít až ke kyslíkové havárii a v rámci anaerobních podmínek dochází k uvolnění dosud pevně vázaného fosforu ze sedimentu zpět do vody.

(Zachar, 1982; Holý, 1994; Vrána et al., 1998, Fulajtár & Janský, 2001; Toy et al., 2002; Morgan, 2005; Janeček et al., 2012; Novák et al. 2014)

Šlezinger (2011) uvádí, že na vodních nádržích zároveň dochází k břehové abrazi, která je způsobena pohybem vody (vlněním). Tento fenomén však není součástí řešení dané tematiky.

3.3.5.3 Materiální škody

Z hlediska zemědělství a lesnictví dochází vlivem zrychlené vodní eroze půdy ke ztrátám osiv, hnojiv a přípravků na ochranu rostlin, k nižší klíčivosti osiva, k vymílání sadby a kořenů, k zanesení níže rostoucích plodin vrstvou sedimentů, k poškození zemědělských plodin a k dalším materiálními škodám. Narušení a odnos půdních částic vede ke ztrátě svrchní vrstvy půdního profilu (jedná se o nejurodnější část půdy, a při extrémních formách eroze (například hluboké efemérní rýhy a strže) na mnoha místech dochází až k ohrožení stability postiženého území, je znesnadněn pohyb techniky a snižuje se estetická hodnota krajiny. Povrchový odtok spolu s neseným sedimentem ohrožuje a způsobuje škody v intravilánech měst a obcí, na dopravní a technické infrastruktuře a dalších stavbách v krajině (zanesení a znečištění sedimentem, zatopení vodou, porušení stability apod.).

(Holý, 1994; Vrána et al., 1998; Janeček et al., 2012; Morgan, 2005; Novák et al. 2014)

3.4 Protierozní opatření

Eroze je zcela přirozený a nevyhnutelný proces (Hudson, 1981; Zachar, 1982; Lal, 1990, Theisen, 1992; Holý, 1994, Fulajtár & Janský, 2001; Morgan, 2005; Janeček et al., 2008). Snažit se mu zamezit je nemožné a především ekonomicky nevýhodné i nereálné (Henderson, 1982; Coppin & Richards, 1990; Theisen, 1992; Landcaster & Austin, 1994; Bhattacharyya et al., 2010b).

Cílem protierozních opatření je eliminace vzniku samotného erozního procesu díky snížení vlivu přírodních i antropogenních činitelů erozní proces vyvolávající. Za nejučinnější se považují opatření, která snižují účinek dopadajících dešťových kapek (Morgan, 2005). Rustom & Weggel (1993) citují Borst & Woodburn (1942), kteří uvádí, že snižování erozního účinku dešťových kapek je efektivnější z pohledu redukce ztrát půdy, než snižování rychlosti povrchového odtoku. Dále by protierozní opatření měly podporovat vsak vody do půdy, omezovat unášecí síly povrchového odtoku a zpomalovat, zachycovat a bezpečně odvádět povrchový odtok (Coppin & Richards, 1990; Morgan, 2005; Janeček et al., 2008; Novotný et al. 2014). Henderson (1982) a Bhattacharyya et al. (2010b) uvádí, že protierozní ochrana je vždy lepší strategie než následné odstraňování důsledků erozního procesu a při porovnání s finančními náklady například na odtěžení sedimentů je provedení protierozních opatření o 1/5 až 1/15 levnější.

Nauka o erozi půdy, která zkoumá příčiny jejího vzniku, následky a způsoby protierozní ochrany, se v rámci České republiky nazývá erodologie (Janeček et al. 2008). Celosvětově je za zakladatele erodologie považován americký vědec Hugh Hammond Bennet, který v roce 1939 publikoval dílo *Soil conservation* (Zachar, 1982; Morga, 2005; Janeček, 2008).

Na území našeho státu se protierozní ochranou půdy zabývají odborníci již řadu let. Například v roce 1954 prof. Dr. Ing. Karel Jůva a doc. Dr. Ing. Jan Cáblik vydali publikaci *Protierozní ochrana půdy*, v které přinesli ucelený pohled na protierozní

proces, doporučení a postupy při provádění protierozní ochrany půdy, při zajišťování výmolů, strží a sesuvů a popsali způsoby provádění hrazení bystřin. Z výše uvedeného je zřejmé, že problematika protierozní ochrany půdy je velice obsáhlá a zasahuje nejen do oblasti zemědělství, ale i lesnictví a vodního hospodářství.

Jelikož zemědělská půda v České republice dosahuje nadpoloviční většiny rozlohy státu, je důležitým výrobním faktorem a je nejvíce postihována působením erozních činitelů (Holý, 1994; Janeček et al. 2012; Novotný, 2014), bylo a je problematice protierozní ochrany zemědělské půdy právem věnována velká pozornost. Aby bylo dosaženo výše uvedených cílů v rámci protierozní ochrany půdy, je nutné k řešení problematice přistupovat komplexně a realizovat protierozní opatření jako souborný a nedílný celek. Na tuto nutnost upozorňuje již Jůva & Cáblik (1954), kteří uvádí, že i sebelepší ochranný zásah, provedený osamoceně, nezaručuje úspěšný výsledek. Vrána et al. (1998), Morgan (2005), Podhrázská & Dufková (2005), Janeček et al. (2008), Janeček et al. (2012) potřebu komplexního přístupu ještě více zdůrazňují a uvádí, že se jedná o komplex organizačních, agrotechnických a technických opatření, na něž se protierozní opatření na zemědělské půdě dle svého charakteru v současné době dělí. Významným nástrojem pro realizaci protierozních opatření jsou pozemkové úpravy, zejména pak komplexní pozemkové úpravy skrze plán společných zařízení (Dumbrovský, 1995; Janeček et al., 2012; Dumbrovský, 2013).

Předkládaná práce, vzhledem k svému zaměření na protierozní ochranu stávajících a nově budovaných svahů, nemůže pojmout celou šíři problematiky protierozních opatření na zemědělské půdě, proto je zde alespoň uvedena literatura, která se problematice podrobně věnuje:

- Jůva & Cáblik (1954), Holý (1994), Fulajtár & Janský (2001), Toy et al. (2002), Morgan (2005), Podhrázská & Dufková (2005), Janeček et al. (2008), Janeček et al. (2012) a řada dalších.

S nárůstem světové populace, kromě samozřejmé protierozní ochrany zemědělské a lesní půdy, souvisí potřeba protierozní ochrany půdy nezemědělské, jelikož společenský rozvoj je spojen s rozmachem stavebních prací, těžby, rekultivačních činností a rekreačních aktivit člověka, které se často odehrávají právě na nezemědělských půdách³ (Sutherland, 1998a; Rickson et al., 2006; Sutherland & Ziegler, 2006; Norris et al., 2008; Bhattacharyya et al., 2010a,b). Řada autorů uvádí, že právě stavební, těžební a rekultivační práce svým zásahem do životního prostředí mohou značně přispívat k zrychlené erozi půdy (Morgan & Rickson, 1995; Sutherland et al., 1998a; Greenwood et al., 2004; Janeček et al., 2008; Norris et al., 2008). Díky výstavbě (dopravní a technické infrastruktury, bytových a nebytových prostor, vodohospodářských staveb, staveb pro rekreaci a řady dalších staveb), těžbě a rekultivačním činnostem jsou stávající svahy radikálně upravovány nebo vznikají svahy nové v rámci budování zemních těles a zemních konstrukcí. Ať už se jedná o úpravu stávajících svahů nebo o vybudování svahů nových, téměř vždy jsou výsledkem svahy náchylné k erozi půdy, na které je nutné aplikovat protierozní ochranu

³ V rámci práce je jako nezemědělská půda myšlena půda mimo zemědělský půdní fond a pozemky určené k plnění funkcí lesa, i když si autorka práce plně uvědomuje, že tento pojem může být vzhledem k platné legislativě zavádějící.

(Morga & Rickson, 1995; Janeček et al., 2008; Norris et al., 2008). V neposlední řadě je nutné věnovat pozornost i stávajícím svahům, které již byly postiženy erozními procesy, a zabezpečit jejich další funkčnost a bezpečnost.

3.4.1 Role vegetace

Jedním z nejpoužívanějších způsobů protierozní ochrany nově budovaných či již erozí poškozených svahů je založení kvalitního vegetačního krytu, především travního porostu (Theisen, 1992; Morgan & Rickson, 1995; Gyssels et al., 2005; Morgan, 2005; Morgan, 2007; Janeček et al., 2008). Za tímto účelem jsou svahy po finálních terénních úpravách ohumusovány a osety stanovištně vhodnou travní směsí. Zvolená travní směs by měla obsahovat především rychle vzrůstající travní druhy zajišťující včasnou a účinnou ochranu svahu (Morgan & Rickson, 1995; Morgan, 2005; Uradníček & Šlezinger, 2007; Janeček et al., 2008; Norris et al., 2008).

V následujících podkapitolách je uvedena role vegetace v rámci protierozní ochrany svahů. Vegetace se však nepodílí pouze na protierozní ochraně svahů, ale zároveň svou přítomností může významně ovlivňovat jejich stabilitu. Z tohoto důvodu je v následujících podkapitolách nastíněna i role vegetace v rámci stability svahu.

Vegetace se významně podílí na protierozní ochraně a stabilizaci svahu svými mechanickými a hydrologickými účinky, přičemž její efekt může být jak pozitivní, tak i negativní v závislosti na tom, jak za daných podmínek ovlivňuje erozní proces.

(Coppin & Richards, 1990; Gray & Sotir, 1995; Gyssels & Poesen, 2003; Gyssels et al., 2005; Morgan, 2005; van Beek et al., 2005; Bischetti et al., 2005; De Beats et al., 2006; Pollen, 2007; Reubens et al., 2007; Ali et al., 2012; Vandromme & Desramaut, 2013)

3.4.1.1 Mechanické účinky vegetace na stabilitu svahu

Role podzemní biomasy

Z mechanického hlediska půda méně odolává tahu než tlaku, zatímco kořeny rostlin jsou schopné více odolávat naopak tahu než tlaku (Gyssels et al., 2005; Simon & Pollen, 2006; Pollen, 2007; Zuazo & Pleguezuelo, 2008; Osman et al., 2011). Proto jejich vzájemné spolupůsobení zvyšuje stabilitu svahu (Coppin & Richards, 1990; Gray & Sotir, 1995; Gyssels & Poesen, 2003; Gyssels et al., 2005; Morgan, 2005; Bischetti et al., 2005; Pollen, 2007; Norris et al., 2008; Reubens et al., 2007; De Beats et al., 2006; Ali et al., 2012; Vandromme & Desramaut, 2013). Morgan (2005) a Reubens et al. (2007) uvádí, že jemné kořeny s průměrem 1 až 20 mm společně s půdou vytváří kompozitní materiál, kde kořeny představují vyztužovací vlákna o relativně vysoké tahové síle, a díky adhezi půdních částice ke kořenovým vláknům roste celková koheze půdního profilu. Již při nízké hustotě kořenového systému v půdách s malou smykovou pevností kořeny významně přispívají ke zvýšení koheze půdy (Morgan, 2005). Přídavná koheze, díky přítomnosti kořenového systému v půdním profilu, navyšuje výslednou smykovou pevnost svahu (Waldron, 1977; Gray & Leiser, 1982; Wu & Watson, 1998; Gyssels et al., 2005; Van Beek et al., 2005; Norris et al., 2008).

Základním předpokladem pro zvýšení stability svahu pomocí kořenového systému rostlin je přítomnost kořenů v oblasti případné smykové plochy (Waldron, 1977;

Greenwood et al., 2004; Van Beek et al., 2005; Greenwood, 2006; Reubens et al., 2007; Norris et al., 2008; Genet et al., 2010). Kořeny přetínající smykovou plochu působí jako půdní kotvy, které během svahového sesuvu díky vlastní tahové pevnosti aktivují svůj odpor proti vytažení/vytržení (Gray & Leiser, 1982; Coppin & Richards, 1990; Gray et al., 1991; Ennos & Fitter, 1992; Gray & Sotir, 1995; Bischetti et al., 2005; Míča, 2005; Reubens et al., 2007; Úradníček & Šlezinger et al., 2007; Norris et al., 2008; Genet et al., 2010; Tvrzníková, 2010).

Z výše uvedeného vyplývá, že důležité parametry pro vytvoření vyztuženého půdního profilu s adekvátní stabilizační funkcí jsou hustota kořenového systému, délka kořenů (zároveň i hloubka zakořenění), rozvětvení, úhel (pod kterým protínají potenciální smykovou plochu), prostorové rozložení a pevnost kořenů v tahu (Wu et al., 1979; Gyssels & Poesen, 2003; Gyssels et al., 2005; Pollen, 2007; Reubens et al., 2007; Zuazo & Pleguezuelo, 2008; Vandromme & Desramaut, 2013). Tyto charakteristiky závisí na prostředí (lokální klima), půdních poměrech a dále na druhových vlastnostech jednotlivých rostlin a na rázu celého společenstva (Schenk & Jackson, 2002; Gyssels et al., 2005; Norris & Greenwood, 2006; Reubens et al., 2007; Úradníček & Šlezinger, 2007; Tvrzníková, 2010). Pozitivní účinek vegetace na stabilitu svahu byl ověřován celou řadou výzkumů, kde spolupůsobení kořenů rostlin a půdy bylo ověřováno laboratorními smykovými zkouškami prokořeněných vzorků (Waldron, 1977), zkouškami, kde kořeny rostlin byly nahrazeny materiály s mechanickými vlastnostmi podobným reálným kořenům (Abe & Ziemer, 1991; Wu & Watson, 1998; Mickowski et al., 2007 a 2009) nebo byly prováděny zkoušky přímo v *in situ* na vegetací vyztužených zemních profilech (Wu & Watson, 1998; Greenwood et al., 2004; van Beek et al., 2005).

Je důležité si uvědomit, že vegetační kryt svým kořenovým systémem může ovlivnit pouze mělké svahové sesuvy (Gray & Sotir, 1995; Morgan, 2005; Norris & Greenwood, 2006; Reubens et al., 2007; Úradníček & Šlezinger, 2007; Genet et al., 2010; Vandromme & Desramaut, 2013), jelikož vegetace stromovitého vzrůstu svými kořeny, které jsou schopné ovlivnit stabilitu svahu, dosahuje do hloubky převážně okolo (1)2,0 až 3,5 m (výjimečně více), keře a trávo-bylinná vegetace zakořeňuje do hloubky 0,75 až 1,0 m (Gray & Sotir, 1995; Morgan, 2005; Pollen & Simon, 2005; Norris & Greenwood, 2006; Úradníček & Šlezinger, 2007).

Role nadzemní biomasy

Výše uvedené mechanické vlastnosti kořenů představují pozitivní účinky kořenového systému na stabilitu svahu. Na straně druhé i přes tyto pozitivní účinky, může přítomnost vegetace stromovitého vzrůstu na svahu působit nepříznivě na jeho stabilitu. Jedná se především o zvýšení normálového napětí na smykové ploše díky vlastní tíze vegetace (De Ploey, 1981; Coppin & Richards, 1990; Gray & Sotir, 1995; Norris & Greenwood, 2006; Pollen, 2007; Norris et al., 2008; Genet et al., 2010; Vandromme & Desramaut, 2013). Coppin & Richards (1990), Greenwood (2004), Morgan (2005), Norris & Greenwood (2006), Norris et al. (2008), Genet et al. (2010), Ali et al. (2012) a Vandromme & Desramaut (2013) uvádí, že k přetěžování smykové plochy, a tím k snižování stability svahu dochází nejvíce v případě, kdy je vegetace situována v horní části svahu (v okolí svahové hrany), oproti tomu vegetace

rostoucí v okolí paty svahu může svou tíhou svah přitěžovat ve prospěch vyšší stability svahu.

Brown & Sheu (1975), O'Loughlin & Ziemer (1982), Greenwood et al. (2004), Norris & Greenwood (2006) Norris et al. (2008) a Vandromme & Desramaut (2013) zmiňují, že přetěžovací efekt vegetace stromovitého vzrůstu může být relativně nedůležitý, v porovnání samotné váhy vegetace s váhou půdní masy. Jestli tíha vegetace bude mít negativní vliv na stabilitu svahu, záleží na typu sesuvu, jakým je svah ohrožen (Nilaweera & Nutalaya, 1999). U mělkých svahových sesuvů, kde potenciální smyková plocha leží reaktivně nízko pod terénem, může přetěžovací účinek vegetace hrát důležitou roli.

Dalším negativním efektem na stabilitu svahu, opět především dřevinné vegetace stromovitého vzrůstu, může být přenos účinku působení síly větru na stromy do svahu a hrozící vývraty stromů (Gray & Leiser, 1982; Gray & Sotir, 1995; Norris et al., 2008). Gray (2009) uvádí, že nepříznivý vliv větru závisí hlavně na velikosti a výšce korunového patra, zakmenění a směru větru (zdali převládá směr větru po svahu dolů nebo proti svahu). Dále negativní vliv větru může sehrát důležitou roli ve stabilitě spíše u soliterních stromů než u souvislého porostu, kde jsou stromy uvnitř porostu chráněny stromy podél okraje porostu (Greenwood et al., 2004; Norris & Greenwood, 2006; Norris et al., 2008).

3.4.1.2 Mechanický účinek vegetace na protierozní ochranu svahu

Role podzemní biomasy

Kořenovému systému vegetace je přiřknuta hlavní role v podílení se na stabilitě svahů (podrobněji viz výše). Ale stejně tak jak se kořenový systém vegetace mechanicky podílí na stabilizaci svahu, podílí se i na protierozní ochraně půdního povrchu (Gyssels & Poesen, 2003; Morgan, 2005; Reubens et al., 2007). Nejdůležitější význam zde mají jemné kořeny s průměrem do 3,0 mm (Coppin & Richards, 1990; Mickowski et al., 2007; Reubens et al., 2007; Genet et al., 2010). Ve svrchní části půdního profilu vytváří hustou propletenou prostorovou síť, která zeminu vyztužuje, pokrývá a dodává přídatnou kohezi (Coppin & Richards, 1990; Morgan & Rickson, 1995; Gyssels & Poesen, 2003; Genet et al., 2010).

Významnost protierozního účinku kořenového systému roste v případě, kdy je nadzemní biomasa odstraněna a v ranných růstových fázích vegetace, kdy nadzemní biomasa ještě není z hlediska protierozní ochrany dostatečně vyvinuta (Gyssels & Poesen, 2003; Gyssels et al., 2005; De Beats et al., 2006; Reubens et al., 2007; Zuáno & Pleguezuelo, 2008).

3.4.1.3 Hydrologické účinky vegetace na protierozní ochranu

Nadzemní i podzemní biomasa vegetačního krytu se pomocí transpirace podílí na evapotranspiraci. V důsledku transpirace je snižována půdní vlhkost, a tím redukována hmotnost půdní masy, která může přetěžovat smykovou plochu. V konečném důsledku tak může dojít k pozitivnímu posílení stability svahu.

(Coppin & Richards, 1990; Gray & Sotir, 1995; Morgan, 2005; Reubens et al., 2007; Stokes et al., 2009; Ali et al., 2012)

Avšak při porovnání celkové tíhy vegetačního pokryvu a půdní masy svahu, která působí na smykovou rovinu, s případným snížením půdní hmotnosti v rámci transpirace vegetace, je zřejmé, že pozitivní efekt transpirace vegetačního pokryvu stabilitu svahu zásadně neovlivňuje (Gray, 2009).

Role podzemní biomasy v rámci protierozní ochrany

Coppin & Richards (1990), Morgan & Rickson (1995), Gyssels et al. (2005), De Beats et al. (2006) a Reubens et al. (2007) uvádí, že z hydrologického hlediska kořenový systém, nacházející se v bezprostřední blízkosti půdního povrchu, se podílí na celkové drsnosti půdního povrchu a je také zodpovědný (společně s půdní makrofaunou) za tvorbu půdních makropórů, které zvyšují míru infiltrace. Na zvýšení míry infiltrace má dále vliv transpirace, na které se společně s nadzemní biomasou podílí i kořenový systém snižováním půdní vlhkosti (Morgan & Rickson, 1995; Gyssels et al., 2005; Beats et al., 2006; Reubens et al., 2007). Zvýšená míra infiltrace může na jedné straně pozitivně ovlivnit protierozní ochranu půdy zamezením tvorby povrchové odtoku (Morgan & Rickson, 1995; Gyssels et al., 2005; De Beats et al., 2006; Reubens et al., 2007; Úradníček & Šlezinger et al., 2007; Tvrzníková, 2010), na straně druhé náhlé změny vlhkostních parametrů v půdním profilu mohou vést k zvýšenému riziku svahových sesuvů, a tedy negativně ovlivnit stabilitu svahu (De Ploey, 1981; Morgan & Rickson, 1995; Nyssen et al., 2002; Cammeraat et al., 2005; Morgan, 2005; Reubens et al., 2007). Úradníček & Šlezinger (2007) a Tvrzníková (2010) dále uvádí, že následkem snižování půdní vlhkosti profilu může docházet až k tvorbě trhlin, které mají nepříznivý dopad jak na samotnou protierozní ochranu svahu, tak na jeho stabilitu.

Kořeny vylučují látky, které se podílejí na stmelování půdních agregátů, a svou přítomností zvyšují obsah organického materiálu v půdě, jenž tvoří potravu pro půdní organismy, které se podílejí na dalším zpevnování půdních agregátů (Reid & Goss, 1981; Morgan & Rickson, 1995; Gyssels & Poesen, 2003; Gyssels et al., 2005; Kutílek, 2012). V dlouhodobém časovém horizontu se tak může ještě více zvyšovat stabilita půdních agregátů, která má vliv na snížení erodibility půdy.

I přesto, že se kořeny podílejí na zvyšování stability půdních agregátů, role kořenového systému na snížení účinku dopadajících dešťových kapek je malá (Bui & Box, 1993; Gyssels et al., 2005; Reubens et al., 2007). Reubens et al. (2007) uvádí, že účinek kořenového systému na ochranu před mezirýhovou erozí není v rámci doposud provedených výzkumů jasně popsán. Kdežto ochranný účinek před tvorbou rýhové i výmolné eroze je přinejmenším stejný jako je účinek nadzemní biomasy (Gyssels et al., 2005; De Beats et al., 2006; Reubens et al., 2007; Zuáno & Pleguezuelo, 2008).

Role nadzemní biomasy v rámci protierozní ochrany

Jak již bylo uvedeno, vegetační kryt se transpirací podílí na celkové evapotranspiraci, která z pohledu protierozní ochrany svahu může mít pozitivní i negativní vliv.

(Morgan & Rickson, 1995; De Beats et al., 2006; Reubens et al., 2007; Úradníček & Šlezinger et al., 2007; Tvrzníková, 2010)

V rámci protierozní ochrany půdy hraje důležitou roli zadržování dešťových kapek intercepací, která snižuje celkové množství dopadajících dešťových kapek na půdní

povrch. Vegetace charakterem své nadzemní biomasy může ovlivnit velikost, rychlost a prostorové rozložení dešťových kapek, čímž v důsledku tlumí nebo zvyšuje jejich kinetickou energii, a tedy i erozi půdy. Dále svou přítomností ovlivňuje drsnost půdního povrchu, která má vliv na tvorbu a rychlost povrchového odtoku.

(Coppin & Richards, 1990; Morgan & Rickson, 1995; Gyssels et al., 2005; Morgan, 2005; De Beats et al., 2006; Rickson et al., 2006; Norris et al., 2008; Zuáno & Pleguezuelo, 2008)

Nejúčinněji tlumí kinetickou energii dešťových kapek vegetační pokryv, který je přímo v kontaktu s půdním povrchem (Morgan, 2005). Na základě tohoto poznatku byly v zemědělství rozpracovány půdoochranné technologie pěstování plodin využívající ochranný efekt ponechaných posklizňových zbytků či strniště (Gyssels et al., 2005; Janeček et al., 2008). Následně pak byl ochranný efekt posklizňových zbytků využit při vývoji protierozních výrobků, které jsou používány jak v zemědělství, tak především v protierozní ochraně svahů budovaných zemních těles a zemních konstrukcí (Theisen, 1992; Landcaster & Austin, 1994; Sutherland, 1998a; Bhattacharyya et al., 2010a,b; Bhattacharyya et al., 2011).

V naprosté většině případů nadzemní biomasa vegetačního pokryvu vykazuje prostorovou (vertikální i horizontální) členitost, která pozitivně či negativně působí na protierozní ochranu půdního povrchu prostorovou a velikostní redistribucí dešťových kapek (Coppin & Richards, 1990; Morgan & Rickson, 1995; Foot & Morgan, 2005; Norris et al., 2008). Při dopadu dešťové kapky na povrch vegetace dochází k rozstříku dešťové kapky, anebo k jejímu zachycení (intercepci), akumulaci a následnému skápnutí či stečení po stonku nebo kmenu (Coppin & Richards, 1990; Morgan & Rickson, 1995; Foot & Morgan, 2005; Morgan, 2005; Norris et al., 2008). Zároveň se část zadržené vody na vegetaci zpětně odpařuje do atmosféry (Coppin & Richards, 1990; Morgan & Rickson, 1995; Morgan, 2005; Norris et al., 2008).

Coppin & Richards (1990), Morgan & Rickson (1995) a Morgan (2005) uvádí, že díky efektu vegetačního pokryvu na redistribuci dešťových kapek má velikostní rozložení dešťových kapek pod vegetačním krytem dva vrcholy. Jeden vrchol tvoří kapky s průměrem pod 2,0 mm (z rozstříku dešťových kapek) a druhý s průměrem nad 4,8 mm (z akumulace a následného skapávání dešťových kapek). Redistribuce velikosti dešťových kapek se ve výsledku odráží ve změně kinetické energie dešťových kapek, čímž je ovlivněn pozitivní či negativní efekt vegetačního krytu.

Vegetační kryt se kromě redistribuce velikosti dešťových kapek podílí na změně jejich prostorového rozložení (De Ploey, 1982; Coppin & Richards, 1990; Morgan & Rickson, 1995; Morgan, 2005; Rickson et al., 2006; Norris et al., 2008). V tomto ohledu hraje důležitou roli výška úrovně vegetačního zápoje nad půdním povrchem, jeho kontinuita (vertikální i horizontální) a hustota (Morgan & Rickson, 1995; Foot & Morgan, 2005; Morgan, 2005). S rostoucí výškou úrovně zápoje nad půdním povrchem (zvyšování rychlosti dešťových kapek) a s nízkou (přímý propad dešťových kapek mezerami) nebo naopak vysokou (šindelový efekt) hustotou zápoje roste negativní vliv na půdní erozi (Coppin & Richards, 1990; Morgan & Rickson, 1995; Foot & Morgan, 2005; Morgan, 2005). Skapávání kapek z vegetačního pokryvu nebo stékání vody po stoncích a kmenech může vést ke koncentrování velmi vysoké dešťové intenzity na malou část půdního povrchu, k překročení kapacity infiltrace a k následné tvorbě povrchového odtoku

(Coppin & Richards, 1990; Morgan & Rickson, 1995; Morgan, 2005; Norris et al., 2008). Coppin & Richards (1990), Morgan & Rickson (1995), Morgan (2005) a Morgan (2010) uvádí, že u vegetačního pokryvu vyššího než 1,0 m je pravděpodobné, že kapky dopadající na půdní povrch z listoví budou způsobovat větší narušení půdních částic než kapky, které by na půdní povrch dopadly přímo.

Nadzemní biomasa svou přítomností ovlivňuje drsnost půdního povrchu, která má vliv na tvorbu a rychlost povrchového odtoku (Temple, 1982; Coppin & Richards, 1990; Morgan, 2005; Rickson et al., 2006; Morgan, 2010), a tedy i na sedimentaci transportovaného materiálu (Coppin & Richards, 1990; Morgan & Rickson, 1995; Morgan, 2007). Temple (1982) vyjádřil schopnost vegetace snižovat rychlost povrchového odtoku pomocí retardační třídy *CI*, která se odvíjí od hustoty a výšky stonků vegetačního pokryvu⁴. Morgan (1985) uvádí přepočtení mezi Manningovým koeficientem drsnosti *n* a retardační třídou *CI*. Stonky rostlin dělí povrchový odtok mezi sebe a vytváří tak drobné odtokové cesty, a tím mění hydraulický rádius povrchového odtoku (Morgan, 2007). Z uvedeného vyplývá, že kromě hustoty stonků hraje důležitou roli i jejich rozmístění na půdním povrchu. Morgan (2007) uvádí, že při měnění se hustotě stonků a výskytu ploch s hustotou stonků menší jak 500 stonků.m⁻² se bude povrchový odtok koncentrovat do míst s menší hustotou stonků a jeho erozní účinek se zvýší. U dřevinné vegetace kromě výše uvedených parametrů hraje důležitou roli tloušťka, šířka a ohebnost stonků, které mohou zapříčinit tvorbu lokálních vírů kolem báze stonků (Coppin & Richards, 1990; Morgan, 2005; Morgan, 2007).

Z výše uvedeného vyplývá, že výška a hustota vegetace ovlivňuje protierozní ochranu půdního povrchu a bude tedy rozdíl mezi protierozní účinností travních, keřovitých a stromovitých porostů (Morgan, 2005).

3.4.1.4 Závěr k roli vegetace na svazích

Z výše uvedeného vyplývá, že role vegetace v rámci stabilizace a protierozní ochrany svahů je velice komplikovaná problematika, jelikož se zde projevuje prostorová i časová heterogenita účinků vegetace (pozitivních i negativních) na působení erozních činitelů (Morgan, 2007).

Jak již bylo uvedeno, v rámci protierozní ochrany svahů je nejčastěji využíván a za adekvátní protierozní ochranu považován travní porost (Gray & Sotir, 1995; Sutherland et al., 1998a; Gysels et al., 2005; Morgan, 2005; Rickson et al., 2006; Morgan, 2005; Morgan, 2007; Norris et al., 2008). Aby měl dostatečnou protierozní funkci, musí být hustý (doporučená hustota je 10 000 stonků.m⁻²) s pravidelným rozmístěním stonků (Morgan, 2007). Trávy používané pro travní směsi k protierozní ochraně svahů by měly vynikat:

- dostatečně rychlým vzcházením a počátečním růstem,
- dobrým odnožováním,
- odolností vůči extrémním stanovištním podmínkám (často stanoviště chudé na živiny, s různou mírou půdní vlhkosti),

⁴ Retardační třídy *CI* byly stanoveny pro travní porost. Problematika vlivu přítomnosti dřevinné vegetace na drsnost půdního povrchu v Temple (1982) nebyla řešena. Morgan (2007) uvádí možnost využití i pro dřevinnou vegetaci.

- nenáročností na intenzitu ošetřování,
- vytrvalostí na stanovišti.

(Gray & Sotir, 1995; Morgan, 2005; Janeček et al., 2008)

Janeček et al. (2008) uvádí, že by protierozní travní směsi měly být tvořeny:

- základními druhy trav (40-60 %) – kostřava červená (*Festuca rubra*), která je velmi vytrvalá a adaptabilní v různých stanovištních podmínkách, nenáročná na živiny a poměrně hluboko kořenící. Norris et al. (2008) zároveň jako velice vhodnou uvádí kostřavu rákosovitou (*Festuca arundinacea*);
- doplňkovými druhy trav (10-30 %) – lipnice luční (*Poa pratensis*), jílek vytrvalý (*Lulium perenne*), kostřava luční (*Festuca ovina*) a jiné;
- speciálními druhy trav (5-20 %) – v závislosti na stanovištních podmínkách.

3.4.2 Protierozní výrobky a materiály

Kritickým obdobím pro vytvoření kvalitního travního porostu na svazích je doba mezi osetím svahu, vzejitím travního semene a vytvořením travního drnu. Již po 3 měsících od vzejití travního semene je travní porost schopen poskytnout částečnou protierozní ochranu půdnímu povrchu (Kasprzak et al., 1980; Hrábě et al., 1990; Knot et al., 2010; Šlezinger & Uhmánová, 2010), avšak k vytvoření kvalitního travního porostu s adekvátní protierozní ochranou dochází po 1. až 2. vegetační sezóně (Kasprzak et al., 1980; Rickson et al., 2006; Morgan, 2007; Bhattacharyya et al., 2009).

V tomto období je povrch svahu stále vystaven působení erozních činitelů, které kromě nežádoucí eroze půdy mohou ohrozit vzházení travního semene, a tedy i vývoj kvalitního travního porostu. Pro zabezpečení protierozní ochrany svahu v tomto kritickém období mohou být na upravené svahy aplikovány protierozní výrobky (z přírodních, syntetických nebo kombinovaných materiálů), jejichž funkcí je poskytnout okamžitou ochranu půdního povrchu před působením erozních činitelů, ochránit vysetou travní směs, podpořit její vzházení a tvorbu kvalitního travního porostu (Theisen, 1992; Rustom & Weggel, 1993; Landcaster & Austin, 1994; Allen, 1996; Gray & Sotir, 1995; Ziegler & Sutherland, 1998; Mitchell et al., 2003; Davies, et al., 2006; Rickson et al., 2006; Sutherland & Ziegler, 2006; Bhattacharyya et al., 2009; Bhattacharyya et al., 2010a,b).

3.4.2.1 Vývoj protierozních materiálů (výrobků) a jejich základní dělení

Vývoj protierozních materiálů, využívaných v protierozní ochraně svahů zemních těles a zemních konstrukcí, souvisí s poznatkem účinku mulčování a ponechání posklizňových zbytků v rámci protierozní ochrany zemědělské půdy (Sutherland, 1998a). Mulčovací techniky vzhledem k jejich aplikační náročnosti, krátké životnosti a extrémním stanovištním podmínkám vždy nezaručují požadovanou protierozní ochranu svahů, a proto během 60. let 20. století došlo k rozvoji výroby protierozních produktů z přírodních, syntetických či kombinovaných materiálů (Theisen, 1992; Lancaster & Austin, 1994; Sutherland, 1998a).

Základní dělení protierozních výrobků může být provedeno z pohledu použitého materiálu při výrobě (přírodní, syntetické nebo jejich kombinace (kompozit)) nebo podle délky trvání jejich protierozního účinku (dočasné a trvalé).

Dočasné protierozní výrobky můžeme dále rozdělit dle způsobu degradace použitého materiálu na:

- biodegradovatelné – veškeré využívané přírodní materiály (seno, sláma, bavlna, len, jutová, kokosová a palmová vlákna a další),
- fotodegradovatelné – Theisen (1992) a Řejha (2011) uvádí, že některé syntetické materiály, které nejsou stabilizovány proti UV záření, se díky fotodegradaci rozpadají na stále menší částice, jež jsou následně činností půdních mikroorganismů přetvořeny na oxidy uhlíku.

Trvalé protierozní výrobky jsou vyrobeny především z UV stabilizovaných syntetických polymerů.

Geosyntetické protierozní výrobky spadají do oblasti geosyntetických výrobků, jejichž termíny a definice upravuje ČSN EN ISO 10318: Geosyntetika – termíny a definice, 2006. Předpona „geo“ značí, že je výrobek používán ve styku se zemínou a/nebo jinými materiály při zemních a stavebních pracích a kořen slova „syntetika“ značí, že alespoň na jednu složku výrobku byl použit syntetický nebo přírodní polymer (ČSN EN ISO 10318). ČSN EN ISO 10318 člení geosyntetické výrobky na geotextilie (GTX), výrobky podobné geotextiliím (GTP), geosyntetické izolace (GBR) a geokompozity (GCO). Přičemž v rámci protierozní ochrany svahů se využívají především geosyntetické výrobky náležící do skupiny:

- výrobky podobné geotextiliím (GTP) – tato skupina geosyntetik obsahuje celou řadu produktů, přičemž v rámci protierozní ochrany svahů se používají:
 - geosítě (GNT) – geosyntetika sestávající z rovnoběžných soustav žeber uložených přes sebe a pevně spojených obdobnými soustavami v různých úhlech,
 - georohože (GMA) – trojrozměrná propustná konstrukce vyrobená z polymerních nekonečných vláken a/nebo jiných prvků (syntetických nebo přírodních), pojená mechanicky a/nebo tepelně a/nebo chemicky a/nebo jinak,
 - geobuňky (GCE) – trojrozměrná propustná polymerní (syntetická nebo přírodní) voštinová nebo podobná bunečná konstrukce vyrobená ze vzájemně propojených proužků geosyntetik,
- geokompozit (GCO) – sdružený materiál obsahující mezi svými složkami nejméně jeden geosyntetický výrobek.

(ČSN EN ISO 10318)

Z výše uvedeného vyplývá, že terminologie geosyntetických protierozních výrobků je díky normě ČSN EN ISO 10318 přehledná a jasná. O trochu horší je to s přírodními protierozními výrobky, jejichž terminologie není upravena žádnou normou. Ale i zde můžeme využít výše uvedené termíny z normy ČSN EN ISO 10318, pak hovoříme o přírodních protierozních geosítích (NECM) případně georohožích (jedná-li se o trojrozměrnou konstrukci).

3.4.2.2 Protierozní přírodní versus geosyntetické výrobky

Využití geosyntetických a přírodních výrobků v rámci protierozní ochrany je stále diskutovaným tématem. Byla provedena řada výzkumů, které vyzdvihují využití především protierozních přírodních výrobků a protierozní geosyntetické výrobky

označují za nevhodné (Langford & Coleman, 1996; Ogdobe et al., 1998; Sutherland, 1998a,b; Davies et al., 2006; Bhattacharyya et al., 2009; Bhattacharyya et al., 2010b; Bhattacharyya et al., 2013). Základní argument proti protierozním geosyntetickým výrobkům je, že po vzejití kvalitního travního porostu pozbývá smysl přítomnosti protierozního výrobku, jelikož travní drn je schopný odolávat účinku erozních činitelů (Ingold & Thomson, 1986; Bhattacharyya et al., 2010a,b). Hudson (1995) a Morgan (2005) uvádí, že v závislosti na zemině a zapojení travního porostu je travní drn po druhém vegetačním období schopen odolat rychlostem 0,75 až 2,5 m.s⁻¹, podobné hodnoty v závislosti na zapojení travního porostu uvádí ve svých tabulkách Zástěra (1982). Jako další přednosti přírodních protierozních materiálů jsou uváděny 100 % biodegradabilita během 2 až 5 let, lepší přilnavost k půdnímu povrchu na základě nasákavosti přírodního materiálu, lepší podmínky pro vzcházení travního osiva (udržováním půdní vlhkosti a zmírněním teplotních výkyvů půdy), zvýšení míry infiltrace, dodání organického materiálu do půdy po rozložení přírodního materiálu, jednoduchá a levná výroba nezatěžující životní prostředí (Langford & Coleman, 1996; Sutherland, 1998a,b; Davies et al., 2006; Bhattacharyya et al., 2009; Bhattacharyya et al., 2010a,b; Bhattacharyya et al., 2013). Z uvedeného výčtu předností přírodních protierozních materiálů by se zdálo, že je zbytečné se vývojem protierozních geosyntetických materiálů zabývat a jejich aplikace v rámci protierozní ochrany svahů postrádají smysl.

Je důležité upozornit, že ve výzkumech Ingold & Thomson (1986), Fifield et al. (1988), Northcutt (1993), Cazzuffi et al. (1994), Ziegler et al. (1997), Ogdobe et al. (1998), Sutherland (1998b), Sutherland et al. (1998a,b), Ziegler & Sutherland (1998), Rickson et al. (2006), Sutherland & Ziegler (2006) a Bhattacharyya et al. (2010b), které porovnávaly efekt protierozních geosyntetických a přírodních výrobků vůči holému půdnímu povrchu, bylo prokázáno, že všechny použité protierozní materiály (přírodní i geosyntetické) vždy lépe chránily půdní povrch před účinkem erozních činitelů, než když byl povrch ponechán bez protierozní ochrany. Efekt protierozních geosyntetických výrobků byl srovnatelný s účinkem protierozních přírodních výrobků, v některých případech byl jejich protierozní účinek dokonce vyšší, jak dokládají následující závěry z některých výzkumů:

- nejlepší dosažené výsledky objemu odnosu sedimentů z ploch chráněných protierozními geosyntetickými výrobky byly srovnatelné s výsledky z ploch chráněných protierozními přírodními výrobky (Sutherland, 1998b),
- nejnižší objem odtoku měly protierozní geosyntetické výrobky, v tomto případě trvalé georochože Enkamat 7010/1 a Tensarmat (Rickson et al., 2006). Rickson et al. (2006) jako vysvětlení uvádí, že díky zasypání georochože je půdní povrch méně konzolidován, a tudíž je zde větší předpoklad zvýšené míry infiltrace vody do půdy, a tedy i následné snížení objemu odtoku.

Zároveň některé závěry studií poukazují na možné nevýhody přírodních protierozních výrobků, které mohou vést ke zhoršení jejich protierozního účinku:

- Knappen et al. (2009) uvádí, že testované protierozní přírodní materiály (v tomto případě palmové geosítě) mají relativně pevnou a silnou strukturu, která vede:

- ke zvýšení lokálních turbulencí v povrchovém odtoku v místě „ok“ palmových geosít, a tím k většímu narušení půdního povrchu v daném místě,
- k nedokonalému přilnutí k půdnímu povrchu (problém, který mohou vykazovat i jiné protierozní přírodní výrobky vlivem špatného ukotvení k půdnímu povrchu), které má za následek podtékání a narušování půdního povrchu,
- Theisen (1992) konstatuje, že otevřená struktura přírodních geosít v závislosti na velikosti „ok“ může vést:
 - při velké velikosti „ok“ – k vystavení půdního povrchu účinku působení erozních činitelů, a tedy k nedostatečné protierozní ochraně,
 - při malé velikosti „ok“ – k špatnému prorůstání vegetace (negativní dopad na tvorbu kvalitního travního porostu) nebo k nadzvedávání přírodní geosít (snížení jejího ochranného účinku),
- Fifield et al. (1988) a Morgan & Ricskon (1995) zmiňují, že pozitivní efekt protierozních přírodních materiálů na vzházení travního osiva (příznivý vlhkostní i teplotní režim půdy a půdního povrchu) může vést k bujnému růstu trav a při výskytu delších sušších období k jejich následnému úhynu,
- Bhattacharyya (2011) uvádí, že během výzkumu protierozního účinku palmových geosít v Maďarské republice, byl zaznamenán zvýšený výskyt napadení vzrůstajících trav houbovými chorobami, v důsledku vyšší vlhkosti a teploty půdního povrchu. Z tohoto důvodu nejsou palmové geosítě doporučeny pro středoevropské klima;
- Theisen (1992) a Morgan & Rickson (1995) upozorňují, že protierozní přírodní výrobky jsou značně hořlavé a mohou být konzumovány zvěří.

Zomberg (2007) uvádí, že v současné době používané trvalé protierozní georochože (GMA) v rámci protierozní ochrany svahů zemních těles a zemních konstrukcí, díky svým vlastnostem (vysoká pevnost v tahu, trojrozměrná struktura, zachování až 90 % volného prostoru při poměrně velkém objemu GMA) zvyšují stabilitu svahu, umožňují efektivní zajištění zeminy a prorůstání kořenového systému travního porostu. Takto se vytváří armovaná zemní konstrukce, která spojuje stabilizační a protierozní efekty vegetačního pokryvu a GMA dohromady, a zajišťuje trvalou protierozní ochranu svahu po celou dobu životnosti konstrukce (Coppin & Richards, 1990; Morgan, 2005; Úradníček & Šlezinger, 2007; Řejha, 2011). Vyztužená zemní konstrukce zároveň zvyšuje odolnost půdního povrchu vůči vyšším rychlostem povrchového odtoku než je tomu u půdního povrchu, který je chráněn pouze samotnou vegetací (Nguyen, 2000; Morgan, 2005). Morgan (2005) uvádí následující rychlosti povrchového odtoku, kterým je půdní povrch díky účinku GMA schopen odolat (rychlosti nezávisí na zemině)⁵:

- 1,5 m.s⁻¹ – samotná GMA bez přítomnosti travního porostu,

⁵ Nguyen (2000) uvádí, že vyztužená zemní konstrukce (georochoží Enkammat) se vzejitou travní směsí (v době pokusu 14 dní od vysetí) odolala rychlostem 4,2 m.s⁻¹ po dobu dvou dní při pokusu v hydraulickém žlabu na ČVUT v Praze. Někteří výrobci trvalých GMA uvádí rychlosti 2,0 m.s⁻¹ (GMA bez přítomnosti vegetace) až do 6,0 m.s⁻¹ (GMA s vegetací), přičemž tyto hodnoty byly dosaženy při testování v hydraulických žlabech v certifikovaných hydraulických laboratořích.

- 2,5 až 3,5 m.s⁻¹ – GMA společně s vegetací.

3.4.2.3 Závěr k protierozním výrobkům

V současné době je na trhu celá řada protierozních výrobků, stávající produkty jsou neustále inovovány a nové nadále vyvíjeny. Široká škála dostupných protierozních výrobků, která je zkombinována s vhodným vegetačním krytem, umožňuje kvalitní protierozní ochranu většiny nově budovaných svahů anebo stávajících svahů, které byly erozní činnostmi již poškozeny.

Ať již je na předmětné svahy aplikován jakýkoliv protierozní výrobek, je ve všech případech nutné věnovat značnou pozornost dodržení technologického postupu pokládky (směr pokládky, dostatečné překlady jednotlivých pásů, řádné ukotvení, řádné vyplnění zeminou) a výsevu vhodné travní směsi (popřípadě doplnění dřevinnou vegetací), jelikož jedině tak může být zaručena následná kvalitní protierozní ochrana svahu.

4 Materiál a metody

V této kapitole bude představen veškerý materiál a analytické metody, které byly v rámci disertační práce použity. Výzkum v sobě zahrnoval jak laboratorní, tak terénní experimenty. Pro převážnou část laboratorních experimentů byla využita laboratoř Ústavu inženýrských staveb, tvorby a ochrany krajiny (ÚTOK) na Lesnické a dřevařské fakultě (LDF) Mendelovi univerzity v Brně (MENDELU), další laboratorní analýzy byly prováděny v laboratoři Ústavu geologie a pedologie (ÚGP) na LDF MENDELU, Ústavu výživy zvířat a pícninářství (ÚVZP) na Agronomické fakultě (AF) MENDELU a v laboratoři na Ústavu agrochemie, půdoznalství, mikrobiologie a výživy rostlin (ÚAPMVR) AF MENDELU. Pro založení terénních experimentálních ploch byly využity prostory Botanické zahrady a arboreta (BZA) MENDELU.

4.1 Použité materiály

V rámci laboratorních i terénních pokusů byly použity celkem 3 druhy trvalých protierozních georochoží, 3 travní druhy a 1 protierozní travní směs.

Trvalé protierozní georochože

Snahou předkládané práce bylo navázat na předešlé výzkumy realizované na území České republiky, které se zaměřily na spolupůsobení kořenového systému dřevin a GMA v rámci stabilizace břehů vodních nádrží (Míča, 2005; Šlezinger, 2006; Šlezinger, 2007; Úradníček & Šlezinger et al., 2007) a na předpěstování travních koberců s jejich následnou aplikací na svahy Údolní nádrže Brno v oblasti Rokle (Šlezinger & Uhmánová, 2010; Foltýnová, 2011; Šlezinger et al., 2011).

Výběr použitých GMA byl proto proveden na základě doporučení plynoucích z výsledků výše uvedených výzkumů a zároveň byl zkontrolován se zástupci firmy Geosyntetika, s.r.o. (Ing. Jiří Vaníček) a GEOMAT s.r.o. (Ing. Martin Kašpar a Mgr. Martin Remeš), kteří mají s aplikací GMA bohaté zkušenosti. Obě firmy následně projevily zájem o prohloubení výzkumu v oblasti využití GMA k protierozní ochraně svahů. Konečný výběr obsahoval následující tři GMA (obr. 1), které jsou v současné době na území České republiky v rámci protierozní ochrany svahů často využívány:

- Enkamat[®] – výrobcem je firma Colbond, která je jednou z vedoucích světových firem výrobců netkaných geosyntetických materiálů a jejich zkušenosti sahají až do roku 1950. Jedná se o flexibilní prostorové matrace s rozptýlenými polyamidovými vlákny, které jsou tepelně propojeny a tvoří tuhou otevřenou strukturu s více než 95 % volného prostoru. Pro pokusy v rámci předkládané práce byly použity 2 výrobky z produktové řada Enkamat[®]:
 - Enkamat 7010/1 (dále také používané označení E7010) – otevřená matrace z obou stran (tzn. struktura matrace je stejná z obou stran), s tloušťkou 10 mm, plošnou hmotností 0,26 kg/m² a pevností v tahu 2,0 kN/m,
 - Enkamat 7020/1 (dále také používané označení E7020) – otevřená matrace z obou stran, ale s tloušťkou 20 mm, plošnou hmotností 0,40 kg/m² a pevností v tahu 2,2 kN/m,

- Trinter – jedná se o trojrozměrnou protierozní georochož vyrobenou z polypropylenu a vysokohustotního polyethylenu tepelně spojených do zvlněné struktury, jež je produktem firmy Geosynthetics Limited. Tloušťka je 25 mm (v místě zvlnění horní sítě), plošná hmotnost je 0,32 kg/m² a pevnost v tahu 3,5 kN/m.

(propagační materiál firem Colbond, Geosyntetika, s.r.o., Geosynthetics Limited a GEOMAT s.r.o.)



Obr. 1 Vybrané GMA – Enkamat 7010/1 (vlevo), Enkamat 7020/1 (uprostřed), Trinter (vpravo)

Travní druhy pro laboratorní experiment

Volba výběru jednotlivých travních druhů pro laboratorní část výzkumu, která měla za cíl zjistit vliv přítomnosti geosyntetického protierozního materiálu v půdním profilu na růst a vývoj kořenového systému, byla zkontrolována s Ing. Ivanem Houdkem odborníkem z firmy DLF-TRIFOLIUM Hladké Životice, s.r.o. Firma DLF-TRIFOLIUM Hladké Životice, s.r.o. se specializuje na šlechtění travníkových i píceňích odrůd a sestavování travních směsí. Byly vybrány celkem tři travní druhy, které jsou nejčastěji obsaženy v protierozních travních směsích. Vybrané travní druhy byly zároveň od firmy DLF-TRIFOLIUM Hladké Životice, s.r.o. odebrány, aby byla zaručena kvalita použitého osiva (vzhledem k účelu experimentu především čistota a klíčivost osiva).

Vybrané travní druhy (respektive jejich odrůdy):

- jílek vytrvalý (*Lolium perenne* L.) odrůda HANDICAP (dále také JV) – osivo s rokem sklizně 2007, čistotou 99,80 % a klíčivostí 88,00 %,

- kostřava rákosovitá (*Festuca arundinacea Schreb.*) odrůda KORA (dále také KK) – osivo s rokem sklizně 2011, čistotou 99,70 % a klíčivostí 92,00 %.
- lipnice luční (*Poa pratensis L.*) odrůda HARMONIE (dále také LL) – osivo s rokem sklizně 2008, čistotou 94,30 % a klíčivostí 81,00 %.

Protierozní travní směs a startovací hnojivo pro terénní experiment

Volba protierozní travní směsi k výsevu na terénní experimentální plochy byla zkontrolována se zástupci firmy Agrostis Trávníky, s.r.o. (Ing. Josefem Strakou, Ph.D. a Ing. Marií Strakovou, Ph.D), která kromě profesionálních produktů v oblasti trávníků nabízí odborné poradenství a znaleckou činnost na základě aktivní dlouholeté výzkumné činnosti.

Byla vybrána VV-18/2 Protierozní směs, která slouží pro rychlé ozelenění rekultivovaných ploch a pozemků. Složení travní směsi:

- jílek mnohokvětý italský (*Lolium multiflorum italicum*) odrůda Prolog – 10 %,
- jílek vytrvalý (*Lolium perenne*) odrůda Jakub – 20 %,
- jílek vytrvalý (*Lolium perenne*) odrůda Lonar 4n – 20 %,
- kostřava červená dlouze výběžkatá (*Festuca rubra rubra*) odrůda Barustic – 20 %,
- kostřava ovčí (*Festuca ovina*) odrůda Hardtop – 5 %,
- kostřava rákosovitá (*Festuca arundinacea*) odrůda Barcesar – 20 %,
- lipnice luční (*Poa pratensis*) odrůda Slezanka – 5 %.

Zároveň s výsevem protierozní travní směsi bylo aplikováno startovací hnojivo s následujícím obsahem živin:

- dusík – 12 %, fosfor – 3,5 %, draslík – 13,3 %, mangan – 1,8 %, síra – 10 %, bróm – 0,02 %, železo – 0,06 % a zinek – 0,1 %.

Meteorologická data

Pro potřeby terénního experimentu byla zajištěna meteorologická data z automatické meteorologické stanice Ústavu agrosystémů a bioklimatologie AF MENDELU, která je umístěna v areálu BZA MENDELU. Ze stanice byly poskytnuty srážkové a teplotní údaje. Teplota vzduchu je na meteorologické stanici měřena ve výšce 2,0 m nad zemí pomocí kombinovaného čidla Vaisala Humicap 45C, srážky jsou měřeny srážkoměrem Yoing 52202 As, který je vybaven elektrickým vyhříváním a umožňuje tak bezproblémovou činnost stanice i v průběhu zimních měsíců. Pro upřesnění srážkových dat, jelikož data z výše uvedené meteorologické stanice jsou zaznamenávána v 15 minutových intervalech, byla dále využita data v minutových intervalech ze srážkoměru, který je umístěn na střeše jedné z budov MENDELU. Jedná se o člunkový nevytápěný srážkoměr MR2 s minimálním detekovaným množstvím 0,2 mm na jedno překlopení od firmy Meteoservis v.o.s., který obsluhuje firma Brněnské vodovody a kanalizace, a.s. (BVK).

4.2 Laboratorní experiment

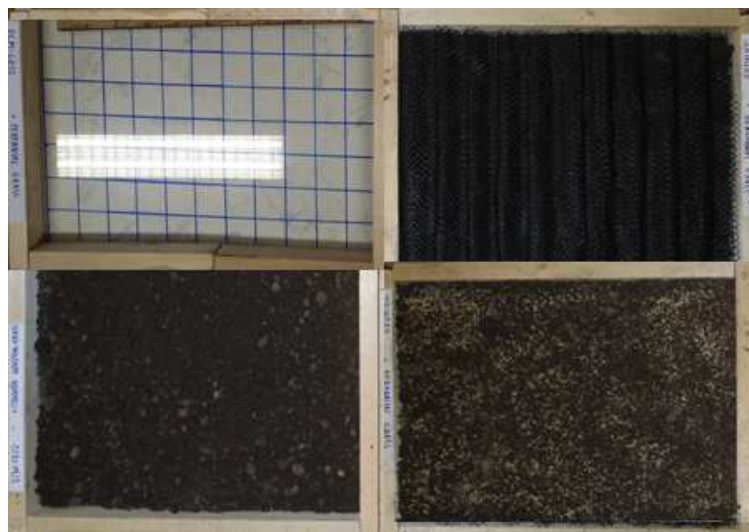
Hypotézou laboratorního experimentu bylo, že přítomnost použitých typů GMA v půdním profilu nemá významný vliv na růst a vývoj kořenového systému u zvolených travních odrůd. Hypotéza vycházela z výsledků výzkumu Šlezingra et al. (2011), kde je

uvedeno, že přítomnost použitých geosítí v půdním profilu neovlivnila zakořenění a růst zvolených travních směsí.

Laboratorní experiment byl založen v laboratoři ÚTOK na LDF MENDELU a probíhal v březnu roku 2013. Umístěním pokusných ploch do laboratorního prostředí bylo dosaženo homogenních podmínek (teplota, vlhkost, oslunění a startovací substrát) na úrovni vstupních parametrů pro vzcházení travního semene, a tudíž mohl být vyhodnocován pouze vliv přítomnosti GMA v půdním profilu na růst a vývoj kořenového systému zvolených travních odrůd.

4.2.1 Založení pokusných ploch

Pokusné plochy měly rozměr 30 x 40 cm a byly pevně ohraničeny dřevěným rámem. Do každé plochy byla rozprostřena vrstva zeminy (hlinito-písčitého charakteru) o mocnosti 3,0 cm, která byla následně překryta příslušným typem GMA. Každá GMA byla vyplněna a poté přesypána vrstvou zeminy o mocnosti 2,0 cm, na kterou bylo rovnoměrně vyseto travní semeno vždy tak, aby daný druh použitého travního semene byl aplikován na každý typ použité GMA. Vyseté travní semeno bylo lehce zapracováno do podkladu, překryto tenkou vrstvou zeminy a povrch byl mírně uhuťněn. Stejným způsobem, ovšem bez použití GMA, byly založeny porovnávací pokusné plochy. Z výše uvedeného vyplývá, že bylo založeno celkem 12 pokusných ploch (tab. 1 na str. 48).



Obr. 2 Postup založení laboratorních pokusných ploch – ohraničená plocha (levý horní roh), rozprostřená vrstva zeminy o mocnosti 3,0 cm (levý dolní roh), překrytí GMA (pravý horní roh), převrstvení zeminou o mocnosti 2,0 cm a osetí travním semenem (pravý dolní roh).

Tab. 1 Schéma pokusných ploch (typ GMA + travní druh) v rámci laboratorního pokusu (JV – jílek vytrvalý, LL – lipnice luční, KR – kostřava rákosovitá).

Trinter + JV	E7010 + JV	Trinter + LL	E7010 + LL	Trinter + KR	E7010 + KR
E7020 + JV	bez GMA + JV	E7020 + LL	bez GMA + LL	E7020 + KR	bez GMA + KR

4.2.2 Postup odběru vzorků a jejich analýza

Po založení pokusných ploch byla prováděna pravidelná záливka a byl sledován okamžik prvního vyklíčení travního semene. Po vyklíčení byly zahájeny odběry vyklíčených rostlin v pravidelných intervalech shodných pro všechny pokusné plochy a to:

- každý den po dobu 7 dnů od vyklíčení travního semene,
- následně pak každý druhý den po dobu 14 dnů, poté byl pokus ukončen.

Odběry byly prováděny ručně, jelikož vzhledem k přítomnosti GMA nebylo možné použít zařízení pro odběr kořenové fytohmoty. Po odběru byly vzorky rostlin ihned vloženy do vodní lázně, aby nedošlo k zaschnutí a znehodnocení kořenového systému. Následně byly vzorky přeneseny do laboratoře ÚVZP na AF MENDELU, kde byla částečně odstraněna nadzemní biomasa a kořenový systém byl lehce promyt vodou, aby byl co nejvíce zbaven půdních částic a jiných nečistot. Promyté vzorky byly naskenovány na 3D skeneru značky EPSON typ Epson Perfection V700 Photo Scanner a získané snímky byly podrobeny obrazové analýze v programu WinRHIZO. Pomocí obrazové analýzy byly zjišťovány morfologické charakteristiky kořenového systému u jednotlivých odebraných vzorků. Výstupem pro každý odebraný vzorek byly údaje o:

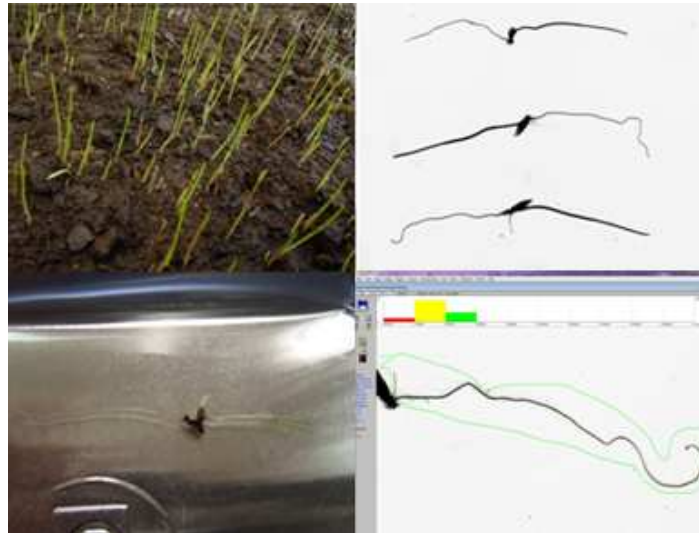
- L ... celková délka kořene [cm],
- S_k ... celkový povrch kořene [cm²],
- D ... průměrný průměr kořene [mm],
- V_k ... celkový objem kořene [cm³],
- P ... povrch kořene [cm²]⁶.

Kromě hlavních charakteristik měřených veličin (L, S_k , D, V_k a P) obsahuje výstup z programu WinRHIZO informace o rozdělení veličin L, S_k , V_k a P do 21 třídních intervalů vztažených k veličině D⁷.

⁶ Veličina P udává velikost povrchu kořene, který je dán promítnutím kořene do půdorysu (nejedná se tedy o celkový povrch kořene), a proto veličina P nebyla pro výsledné analýzy předkládané práce použita. Skutečný celkový povrch kořene reprezentuje naměřená veličina S_k .

⁷ Program WinRHIZO umožňuje libovolné nastavení velikosti 21 intervalů veličiny D. Vzhledem ke sledování vývoje kořenů vyklíčených rostlin, bylo 21 intervalů veličiny D rozděleno po 0,05 mm s tím, že 21. interval zahrnoval hodnoty větší jak 1,0 mm. V rámci celého laboratorního experimentu bylo 21. intervalu dosaženo pouze jednou u jílku vytrvalého (*Lolium perenne L.*) odrůdy HANDICAP a dvakrát u kostřavy rákosovité (*Festuca arundinacea Schreb.*) odrůdy KORA s celkovým podílem ze všech intervalů do 0,5 %. Z tohoto důvodu byl pro hodnoty nad 1,0 mm veličiny D ponechán právě pouze jeden interval (21.).

Mimo obrazové analýzy kořenů, ze které byly získány morfologické charakteristiky kořenů, bylo původním záměrem mechanicky měřit denní přírůst kořenů posuvným měřítkem, tak jak to uvádí Šlezinger et al. (2011). Za tímto účelem byla pod každou z pokusných ploch umístěna skleněná deska s načrnutou pravidelnou mřížkou (označenou podobně jako šachovnice – sloupce 1-8 a řádky A-K). Během realizace laboratorního experimentu bylo od mechanického měření opuštěno. Úskalí, která vedla k ukončení mechanického měření, jsou stručně popsána v závěru podkapitoly 6.1.



Obr. 3 Ukázka odběru vzorků jílku vytrvalého (*Lolium perenne* L.) odrůda HANDICAP (cca 3. den po vyklíčení obilek) – před odběrem (levý horní roh), odebraný vzorek ve vodní lázni (levý dolní roh), podkladový obrázek pro obrazovou analýzu v programu WinRHIZO (pravý horní roh), prostředí software WinRHIZO s analýzou odebraného vzorku (pravý dolní roh).

4.2.3 Postup zpracování naměřených dat

Pro vyhodnocení vlivu přítomnosti GMA v půdním profilu na růst a vývoj kořenového systému zvolených travních odrůd byly použity vybrané metody matematické statistiky, zejména v oblasti analýzy časových řad (analýza vývoje měřených veličin kořenového systému v čase) a korelační analýzy (vyhodnocení vztahu mezi naměřenými veličinami kořenového systému u jednotlivých travních odrůd a dané GMA či případu bez GMA). Vlastní výpočty byly provedeny v programu STATISTICA Cz 12 a Microsoft Office Excel 2007.

Pro potřeby vlastní analýzy získaných dat byla originální data z programu WinRHIZO předzpracována – pro jednotlivé odběry byla každá z pěti měřených veličin (L , S_k , D , V_k , P) nahrazena výběrovým průměrem a výběrovým rozptylem počítaným z hodnot dané veličiny naměřených v rámci daného odběru dle vztahů:

$$\bar{X}_t = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} X_{t,i} \quad (5)$$

kde je \bar{X}_t ... výběrový průměr veličiny X pro odběr t (celkem 13 odběrů – charakterizovány datem odběru),
 n_t ... počet vzorků odebraných v rámci odběru t ,

$X_{t,i}$... i -tá hodnota vzorku veličiny X v rámci odběru t .

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{n_t-1} \sum_{i=1}^{n_t} (X_{t,i} - \bar{X}_t)^2 \quad (6)$$

kde je σ_t^2 ... výběrový rozptyl veličiny X pro odběr t .

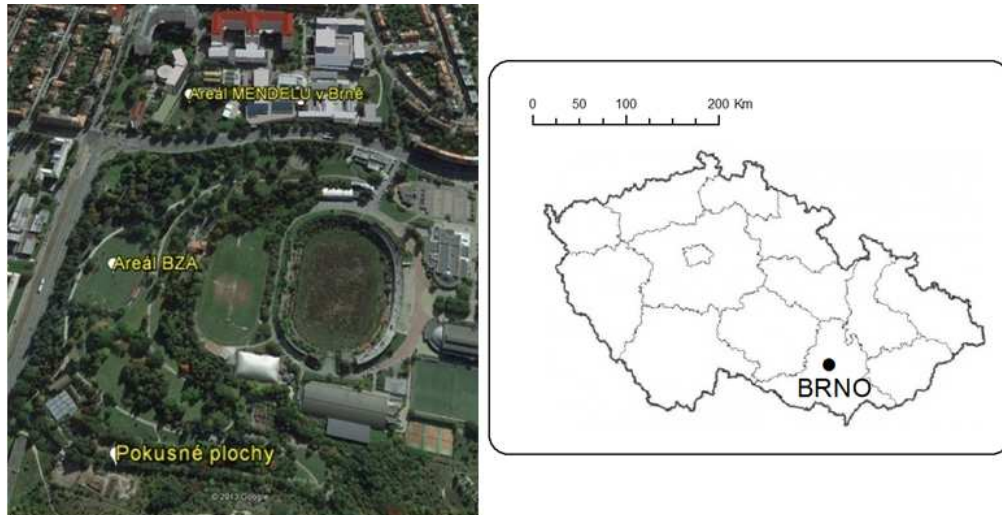
Takto předzpracovaná vstupní data tvoří záznamy, které reprezentují každý odběr z daného podkladu pomocí výše uvedených veličin \bar{X}_t a σ_t^2 . Předzpracovaná vstupní data jsou uvedena v přílohách 1 až 3, kde pro každou testovanou travní odrůdu jsou uvedeny celkem 4 tabulky (reprezentující hodnoty pro případy s GMA – E7010, E7020, Trinter; a hodnoty pro případ bez GMA), řádky odpovídají odběrům a sloupce výběrovým průměrům a směrodatným odchylkám sledovaných veličin.

4.3 Terénní experiment

Cílem terénního experimentu bylo vyhodnotit protierozní účinek zvolených typů protierozní ochrany (PEO) na ochranu vybudovaného svahu v době jeho největší náchylnosti k vodní erozi, tedy v období po jeho finální terénní úpravě a osetí travní směsí, po vzejití travní směsi a vytvoření travního drnu. Přičemž hypotézou bylo, že typy PEO s GMA (E7010, E7020, Trinter) a vysetou protierozní travní směsí budou mít lepší protierozní účinek než typ PEO bez GMA pouze s vysetou protierozní travní směsí. Hypotéza terénního experimentu vycházela z výsledků výzkumů autorů Ingold & Thomson (1986), Fifield (1988), Northcutt (1993), Cazzuffi et al. (1994), Sutherland (1998a, b), Ziegler & Sutherland (1998), Rickson et al. (2006) a Bhattacharyya et al. (2010a,b), kteří uvádějí, že aplikací protierozních výrobků, ať už z přírodních či syntetických materiálů, bylo dosaženo lepší protierozní ochrany svahů, než když protierozní výrobky aplikovány nebyly.

Dle Kasprzaka et al. (1980), Rickson et al. (2006), Morgan (2007) a Bhattacharyya et al. (2009) dojde k vytvoření kvalitního travního porostu s adekvátní protierozní ochranou po 1. až 2. vegetační sezóně, a proto v rámci terénního experimentu byl sledován protierozní účinek zvolených typů PEO po dobu 1 roku od založení pokusných ploch (od 16. 5. 2013 do 6. 5. 2014).

Pro umístění terénních pokusných ploch byl využit prostor BZA MENDELU (obr. 4 na str. 51). BZA MENDELU se nachází severně od samotného areálu MENDELU, leží v nadmořské výšce 220 až 250 m n. m., v oblasti s průměrným úhrnem srážek 547 mm.rok⁻¹ a průměrnou roční teplotou 8,4 °C. Geologicky je území BZA tvořeno šedými vápnitými jíly neogenního stáří (geology.cz). Pokusné plochy byly situovány mimo samotný oplocený areál BZA do prostoru, který slouží k ukládání vytěženého materiálu ze zemních prací na území BZA a ke kompostování. Díky ukládání vytěženého materiálu zde vznikla navážka, na jejíž svahy byly pokusné plochy umístěny (obr. 5 na str. 51).



Obr. 4 Umístění terénních pokusných ploch – areál MENDELU a BZA MENDELU (vlevo), poloha města brna v rámci ČR (vpravo).



Obr. 5 Svah navážky využitý k umístění pokusných ploch.

4.3.1 Založení pokusných ploch

Velikost terénních experimentálních ploch používaných pro vyhodnocení účinku protierozních výrobků se v rámci zahraničních výzkumů značně liší. Například Thomson & Ingold (1986) prováděli pokusy na plochách o velikosti $0,9 \text{ m}^2$ se sklonem 1:2, Armstrong (1991) na plochách o velikosti $1,5 \text{ m}^2$ se sklonem 1:2, Northcut (1993) na plochách o velikosti $41,85 \text{ m}^2$ se sklonem 1:3 a 1:2 a Godfrey & Curry (1995) na plochách o velikosti $91,14 \text{ m}^2$ se sklonem 1:2 a 1:3. Založení pokusných ploch bylo limitováno především parametry navážky, na kterou byl terénní experiment situován. Bylo založeno celkem 16 pokusných ploch o rozměrech $1,0 \times 2,0 \text{ m}$ (šířka x délka), které byly vysvahovány ve sklonu 1:2. Pod každou z pokusných ploch byla zároveň umístěna sedimentační nádrž o objemu 200 l, pro zachycení erozního smyvu z příslušné pokusné plochy.

Stručný popis založení pokusných ploch a následná péče (obr. 6 na str. 53):

- instalace sedimentačních nádrží o objemu 200 l do paty svahu navážky a urovnání svahu navážky do sklonu 1:2,
- ohumusování ornice o tloušťce 0,2 m,
- pokládka GMA (upevnění v dolní části k sedimentačním nádržím, ve svahu kotevními kolíky, v horní části ukotvení kotevními kolíky do příkopu, který byl následně zasypán),
- prosypání GMA potřebným množstvím ornice (cca 2,0 až 3,0 cm),
- výsev protierozní travní směsi VV-18/2 (30 g.m^{-2}) společně se startovacím hnojivem (30 g.m^{-2}), jemné zapracování travní směsi a následné uválcování svahu (množství výsevu a startovacího hnojiva bylo zkontrolováno s odborníky z firmy Agrostis Trávníky, s.r.o.),
- pravidelná zálivka v období vzcházení travního semene (cca po dobu 1 měsíce od výsevu, poté již bez zálivky),
- kosení ploch – vždy týden před pokusem simulovaného povrchového odtoku rohem vody (4x za dobu trvání pokusu).

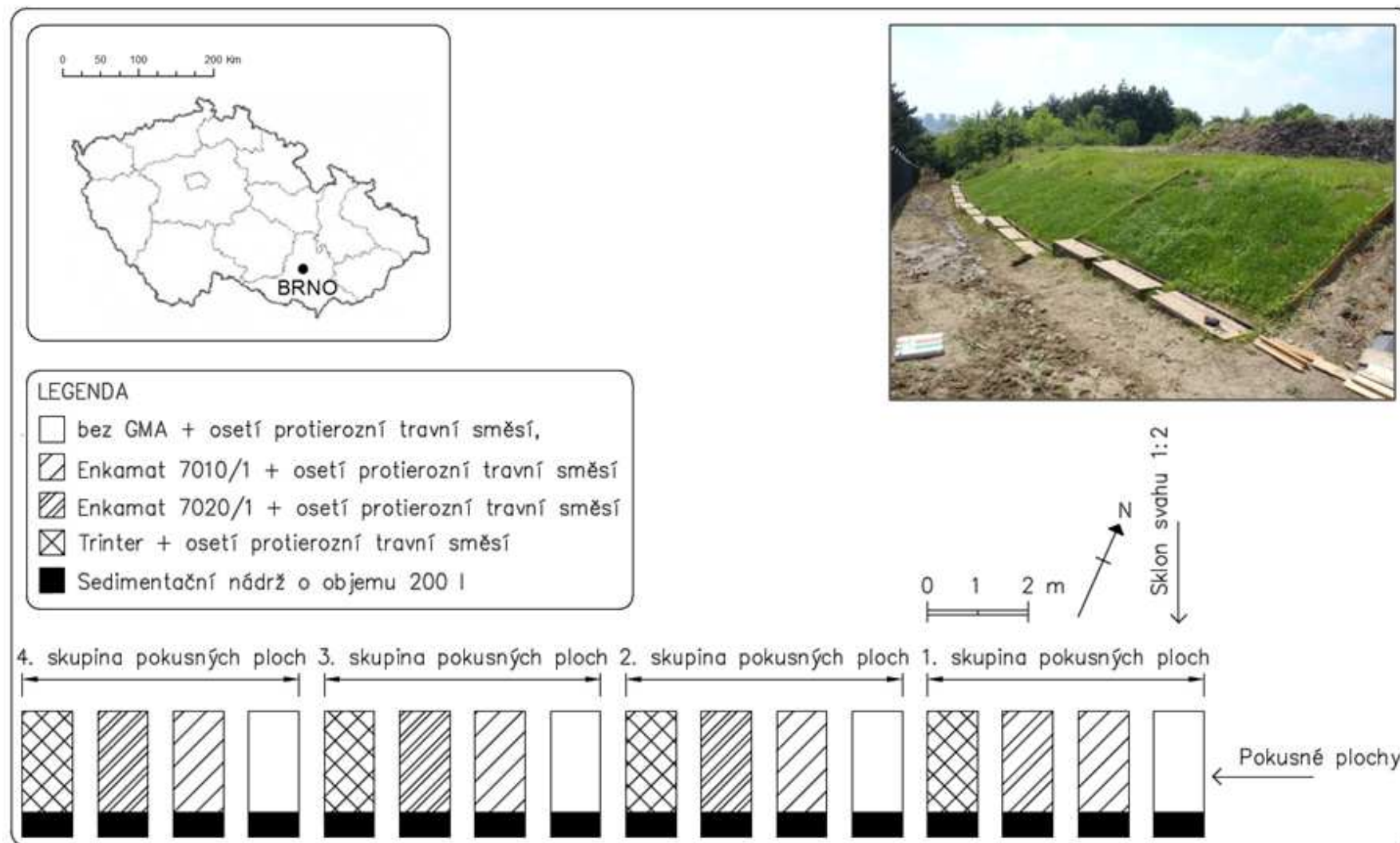
Ve výsledku byly na svahy aplikovány 4 typy PEO, přičemž každý typ měl 4 opakování (tedy celkem 16 pokusných ploch ve 4 skupinách), aby bylo možné provést následné vyhodnocení výsledků. Bhattacharyya et al. (2011) uvádí, že je vhodné použít alespoň 3 opakování (v rámci výzkumu použili pouze 2 opakování pro každý použitý typ PEO). Pořadí jednotlivých pokusných ploch bylo realizováno vždy ve stejném pořadí (obr. 7 na str. 54):

- bez GMA + osetí travní směsí,
- Enkamat 7010/1 + osetí travní směsí,
- Enkamat 7020/1 + osetí travní směsí,
- Trinter + osetí travní směsí.

Materiál navážky, na kterou byly umístěny pokusné plochy, se skládal především z jílovité zeminy vytěžené v rámci výkopových prací v areálu BZA s příměsí stavební suti. Ornice použitá pro ohumusování urovnaných svahů navážky měla charakter prachovité hlíny (dle trojúhelníkového diagramu zrnitosti půd). I přesto, že použitá ornice měla vyhovující obsah fosforu, draslíku a hořčíku dle vyhlášky č. 275/1998 Sb., o agrochemickém zkoušení zemědělských půd a zjišťování půdních vlastností lesních pozemků, bylo vzhledem k předpokládaným extrémním podmínkám společně s výsevem protierozní travní směsi aplikováno startovací hnojivo na základě doporučení odborníků z firmy Agrostis Trávníky, s.r.o.



Obr. 6 Postup založení pokusných ploch a následná péče – instalované sedimentační nádrže a vysvahované plochy (levý horní roh), ohumusování ornící (vlevo uprostřed), položené GMA a následné prosypání (levý dolní roh), oseté a zaválcované pokusné plochy (pravý horní roh), pravidelná zálivka (vpravo uprostřed), kosení ploch (pravý dolní roh).



Obr. 7 Schéma založení pokusných ploch

4.3.2 Postup odběru vzorků a jejich analýza

Terénní pokusné plochy byly ponechány působení přirozených srážek a ve stanovených termínech byly podrobeny simulovanému povrchovému odtoku ronem vody (SPORV) ze žlabu umístěného nad pokusnými plochami.

Před zahájením a po ukončení terénního experimentu byl proveden zrnitostní rozbor a analýza agrochemických vlastností použité ornice.

Působení přirozených srážek

Efektivnost jednotlivých typů PEO vůči účinku přirozených srážek byla sledována pouze na základě analýzy erozního smyvu (množství zachyceného materiálu v sedimentačních nádržích), jelikož údaje o objemu odtoku z pokusných ploch nebyly z technických důvodů zaznamenávány (často neměřitelný objem nebo vypařování zadržené vody).

Sedimentační nádrže byly pravidelně sledovány a při zachycení erozního smyvu byl sediment vybírán (obvykle po vydatnějších srážkách nebo po delším časovém období s menším množstvím srážek). Jednotlivé odebrané vzorky sedimentu byly přeneseny do laboratoře ÚTOK na LDF MENDELU, kde byly nejprve zbaveny případné zachycené fauny a flory (přeplavením přes síto o průměru oka 4,0 mm), vysušeny (na 105 °C po dobu 12 h) a zváženy. Následně byl proveden zrnitostní rozbor zvážených vysušených vzorků sadou sít o velikosti ok 0,063; 0,125; 0,250; 0,500; 1,000 a 2,000 mm.

Výstupem pro každý odebraný vzorek sedimentu byly údaje o:

- M ... celková hmotnost erozního smyvu [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$],
- F ... podíl jemnozrné frakce [%],
- S ... podíl písčité frakce [%],
- G ... podíl šterkovité frakce [%].

Obdobný postup použili pro výzkum Bhattacharyya et al. (2011). Jednotlivé údaje zaznamenávali především v dvoutýdenních až měsíčních intervalech dle velikosti naměřeného srážkového úhrnu.

Simulace povrchového odtoku ronem vody

Kromě působení přirozených dešťových srážek byly pokusné plochy podrobeny účinku povrchového odtoku, který byl simulován ronem vody ze žlabu (s délkou přelivné hrany 1,0 m) umístěného vždy nad testovanou pokusnou plochu (obr. 8 na str. 56).

Z tohoto žlabu byl na pokusné plochy pouštěn ron vody o průtoku $Q = 0,225 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ po dobu 25 minut (celkem 337,5 l). Velikost průtoku simulovaného ronem vody byla zkontrolována s prof. Dr. Ing. Miloslavem Šlezingrem (ÚTOK LDF MENDELU) a odzkoušena na svazích navážky mimo založené pokusné plochy. Snahou bylo zvolit takovou velikost Q ronem vody, která by měla erozní účinek na založené pokusné plochy, ale zároveň by neměla působit natolik destruktivně, aby dlouhodobé sledování erozního účinku dešťových srážek a SPORV nebylo ohroženo.

SPORV byla během terénního experimentu realizována celkem čtyřikrát:

- 1,5 měsíce po založení pokusných ploch (2. 7. 2013),
- 3 měsíce po založení pokusných ploch (15. 8. 2013),
- 5,5 měsíce po založení pokusných ploch (28. 10. 2013),

- 1 rok po založení pokusných ploch (6. 5. 2014).



Obr. 8 Umístění žlabu do rýhy nad pokusnou plochou

Nejprve byla ronem vody během první realizace pokusu zatížena pouze 1. skupina pokusných ploch. S každou další realizací pokusu byla přibírána další skupina pokusných ploch. Ve výsledku tedy byla 1. skupina pokusných ploch zatížena celkem čtyřikrát, oproti tomu 4. skupina pokusných ploch pouze jedenkrát (tab. 2). Snahou bylo zjistit, jestli zvolená frekvence zatěžování SPORV bude mít vliv na množství erozního smyvu a objem povrchového odtoku.

Tab. 2 Schéma zatížení pokusných ploch SPORV během terénního experimentu

bez GMA	E7010	E7020	Trinter	bez GMA	E7010	E7020	Trinter	bez GMA	E7010	E7020	Trinter	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
1. skupina pokusných ploch				2. skupina pokusných ploch				3. skupina pokusných ploch				4. skupina pokusných ploch			
2. 7. 2013				--				--				--			
15. 8. 2013				15. 8. 2013				--				--			
28. 10. 2013				28. 10. 2013				28. 10. 2013				--			
6. 5. 2014				6. 5. 2014				6. 5. 2014				6. 5. 2014			

Po ukončení pokusu SPORV na dané ploše byl změřen objem vody zadrženy v sedimentační nádrži. V případě, kdy došlo zároveň k eroznímu smyvu, byl sediment vybrán (po usazení většiny sedimentu). Vzorky odebraného sedimentu byly zpracovány opět v laboratoři ÚTOK na LDF MENDELU stejným způsobem jako vzorky sedimentu získané z erozního smyvu v rámci působení přirozeného deště.

Pro každou pokusnou plochu byl jako výstup zaznamenán vždy údaj o:

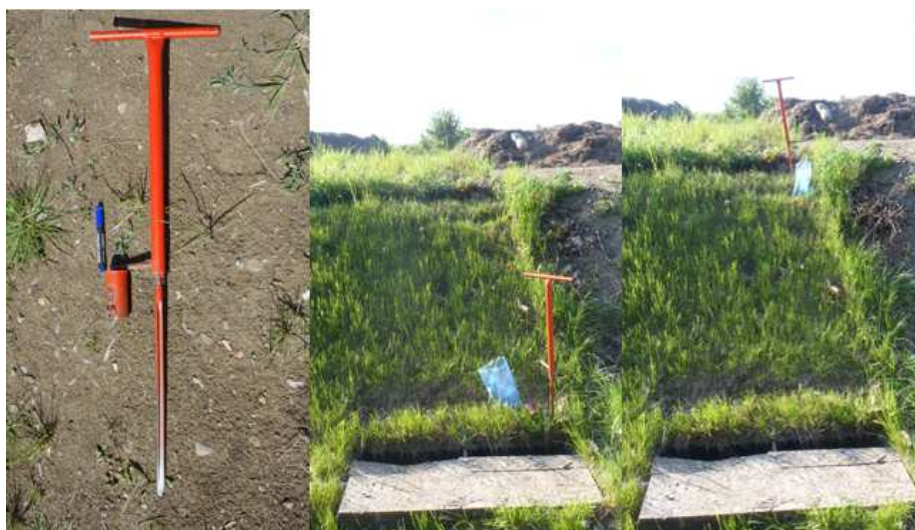
- V ... celkový objem povrchového odtoku [l].

V případě, kdy došlo zároveň k eroznímu smyvu, byly dále výstupem údaje o:

- M ... celková hmotnost erozního smyvu [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$],
- F ... podíl jemnozrné frakce [%],
- S ... podíl písčité frakce [%],
- G ... podíl šterkovité frakce [%].

Zrnitostní složení a agrochemické vlastnosti ornice

Při zakládání terénního experimentu byly odebrány vzorky použité ornice na zrnitostní rozbor. Po ukončení terénního experimentu dne 6. 5. 2014 byl zrnitostní rozbor zopakován pro svrchní vrstvu ornice (0 až 10 cm) v horní a dolní části každé pokusné plochy. Vzorky ornice byly odebrány půdní sondýrkou a každý směsný vzorek se skládal z 20 vpichů (obr. 9). Snahou bylo porovnat případné změny v zrnitostním složení svrchní vrstvy použité ornice mezi horní a dolní částí pokusné plochy. Zrnitostní složení bylo určeno na základě zrnitostní analýzy a pipetovací metody v laboratoři ÚGP a ÚTOK na LDF MENDELU dle Zbírala (2004).



Obr. 9 Odběr půdních vzorků po ukončení terénního experimentu – nášlapná půdní sondýrka (vlevo), poloha odběru v dolní části (uprostřed) a v horní části (vpravo) pokusné plochy.

Z odebraných půdních vzorků před i po ukončení terénního experimentu byly dále stanoveny agrochemické vlastnosti půdy (pH a obsah P, K, Mg, Ca a N_{\min}) v laboratoři ÚAPMVR na AF MENDELU dle Zbírala (2002, 2004).

Výstupem jsou údaje o zrnitostním složení (podrobné zrnitostní složení členěné na podíl jílu, prachových částic, písku a šterku) a agrochemických vlastnostech (pH a obsah P, K, Mg, Ca a N_{\min}) ornice před zahájením pokusu a po ukončení pokusu pro svrchní vrstvu ornice z horní a dolní části každé založené pokusné plochy.

4.3.3 Postup zpracování a analýza získaných dat

V rámci vyhodnocení protierozního účinku aplikovaných typů PEO na pokusných plochách byly, obdobně jako v případě laboratorního experimentu, použity vybrané metody matematické statistiky, zejména z oblasti analýzy časových řad a korelační

analýzy. Vlastní výpočty byly provedeny v programu STATISTICA Cz 12 a Microsoft Office Excel 2007.

Působení přirozených srážek

Pro vyhodnocení jednotlivých typů PEO z daného odběru erozního smyvu byla použita přímo naměřená data. V rámci analýzy vývoje erozního smyvu během sledovaného období byla naměřená data pro jednotlivé typy PEO nahrazena výběrovým průměrem a výběrovým rozptylem počítaným z hodnot získaných v rámci daného odběru dle vztahů (5) a (6). Předzpracovaná vstupní data jsou uvedena v tabulkách v příloze 4. Jedná se celkem o 4 tabulky (každá reprezentuje daný typ PEO – E7010, E7020, Trinter a případ bez GMA), řádky odpovídají odběrům a sloupce výběrovým průměrům a směrodatným odchylkám sledovaných veličin.

Pro vyhodnocení erozního smyvu v souvislosti s výskytem nebezpečných dešťů byla využita poskytnutá data z meteorologické stanice v BZA MENDELU a ze srážkoměru na jedné z budov MENDELU, kterou obsluhují BVK, a. s. Srážkové úhrny z obou srážkoměrů byly porovnány a v případě, kdy se naměřené údaje lišily, byl pro potřebu předkládané práce použit vyšší údaj. Výběr nebezpečných dešťů (viz podkapitola 3.3.4.1) byl proveden na základě výpočtu mohutnosti deště M_D dle vztahu (4), přičemž pro hodnocení parametrů mohutnosti deště byla využita pouze tzv. efektivní část deště dle kritérií, která zavedl Kasprzak (in Hejduk, 2011) a následně ve svém výzkumu použil Hejduk (2011):

- intenzita deště větší jak $0,1 \text{ mm.min}^{-1}$ (v případě deště dopadajícího na půdu bez vytvořené půdní krusty),
- intenzita deště větší jak $0,05 \text{ mm.min}^{-1}$ (v případě, kdy je půda vlhká s krustou po dešti, který se vyskytl před méně než třemi dny před odtokotvorným deštěm),
- $M_D < 1$ – deště neškodné,
- $M_D \geq 1$ – deště nebezpečné.

V podkapitole 5.2.1.2 jsou uvedeny pouze souhrnné informace o výskytu srážkových událostí během sledovaného období a charakteristiky vybraných nebezpečných dešťů, jelikož vstupní data ze srážkoměrů nelze, díky frekvenci zápisu dat 1 minuta, uvést v plném rozsahu v přílohách předkládané práce.

Simulace povrchového odtoku ronem vody

Pro vyhodnocení SPORV byly využity přímo naměřené hodnoty pro jednotlivé typy PEO. Vstupní data jsou uvedena v tab. 19 na str. 87 v rámci podkapitoly 5.2.2.

Zrnitostní složení a agrochemické vlastnosti ornice

Pro vyhodnocení rozdílu v zrnitostním složení svrchní vrstvy ornice mezi horní a dolní částí pokusných ploch byla naměřená data pro jednotlivé typy PEO nahrazena výběrovým průměrem a výběrovým rozptylem počítaným z přímo naměřených hodnot pro daný typ PEO. Předzpracovaná vstupní data jsou uvedena v příloze 5.

Stejným způsobem byla předzpracována data naměřených hodnot agrochemických vlastností svrchní vrstvy ornice pro horní a dolní část pokusných ploch v rámci jednotlivých typů PEO. Předzpracovaná vstupní data jsou uvedena v příloze 6.

5 Dosažené výsledky

5.1 Laboratorní experiment

Laboratorní experiment byl založen dne 4. 3. 2013. První odběr vyklíčených obilky jílku vytrvalého (*Lolium perenne* L.) odrůdy HANDICAP (dále také JV) a kostřavy rákosovité (*Festuca arundinacea* Schreb.) odrůdy KORA (dále také KR) byl proveden dne 9. 3. 2013. Poslední odběr byl učiněn dne 27. 3. 2013. Obilky lipnice luční (*Poa pratensis* L.) odrůdy HARMONIE (dále také LL) vyklíčily o jeden den později (tedy dne 10. 3. 2013), a proto poslední odběr byl realizován dne 28. 3. 2013.

Laboratorní experiment si kladl za cíl zjistit, zdali přítomnost GMA v půdním profilu ovlivňuje růst a vývoj kořenového systému zvolených travních odrůd. Za tímto účelem byly provedeny analýzy korelací měřených veličin mezi jednotlivými GMA a případu bez GMA. Pro otestování, jestli průběhy měřených veličin nejsou na jednotlivých GMA a případu bez GMA vzájemně „posunuté“, byla zvolena jednofaktorová analýza rozptylu (ANOVA), kde třídícím faktorem byla daná GMA či případ bez GMA. Tímto způsobem byla testována nulová hypotéza:

$$H_0: \mu_{\text{bez GMA}} = \mu_{E7010} = \mu_{E7020} = \mu_{\text{Trinter}}$$

tj. střední hodnoty měřených veličin se na jednotlivých GMA a případu bez GMA neliší proti alternativě, kde alespoň jedna dvojice středních hodnot se statisticky významně liší.

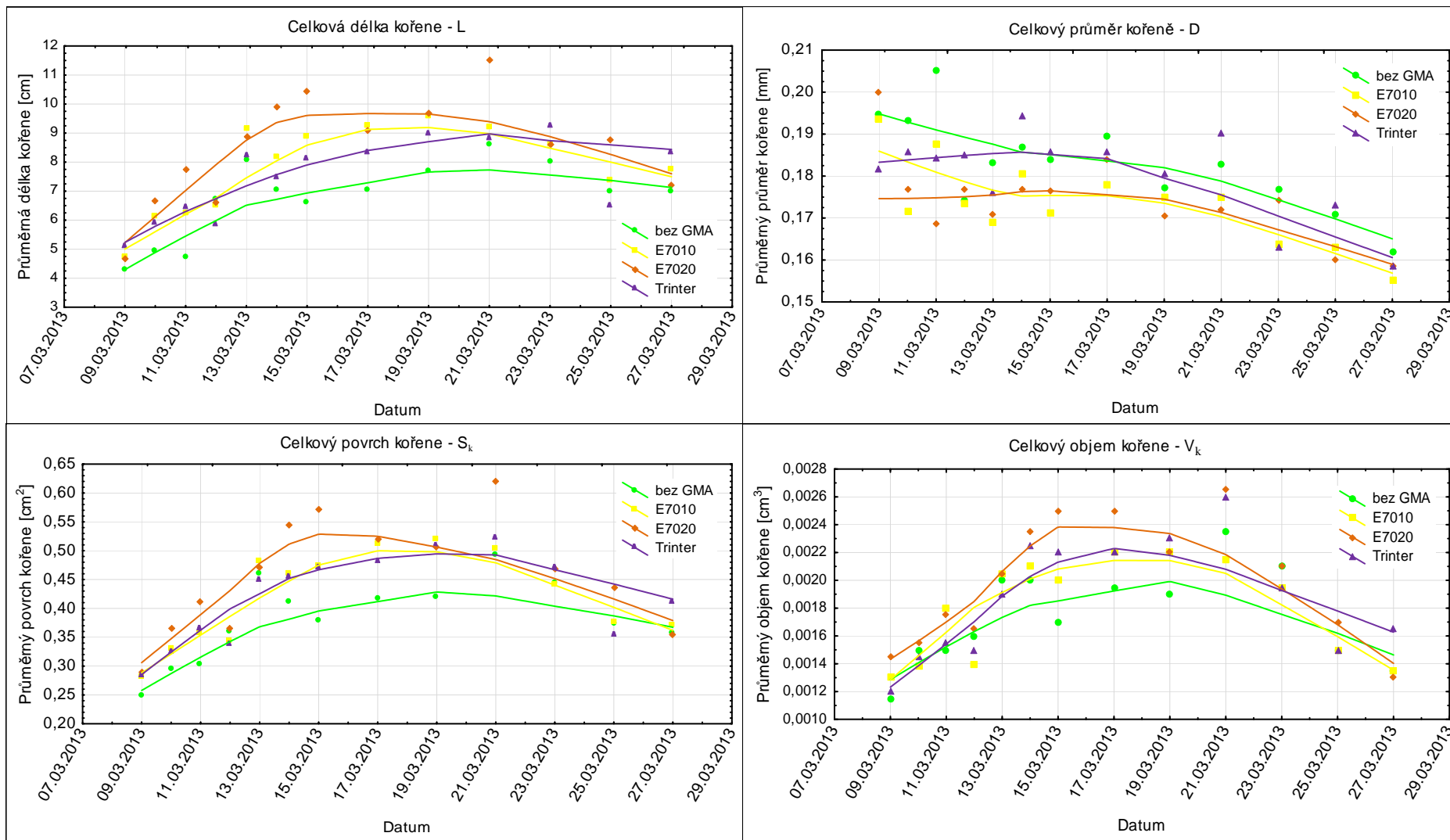
Dále byl ověřován vztah mezi naměřenými veličinami na dané GMA a případu bez GMA pomocí korelační analýzy s cílem ověřit, zdali je pro vyhodnocení vlivu přítomnosti GMA na růst a vývoj kořenového systému skutečně nutné sledovat všechny měřené veličiny (L , S_k , D , V_k).

Pro potřeby výše uvedených analýz byly využity pouze časové řady \bar{X}_t průměrů jednotlivých měřených veličin kořenového systému zvolených travních odrůd (L , S_k , D , V_k), které lze považovat za nejdůležitější (data uvedena v přílohách 1 až 3).

Následující podkapitoly uvádějí výsledky pro jednotlivé travní odrůdy a porovnání jednotlivých travních odrůd. Celkový komentář k laboratornímu experimentu je uveden následně v rámci kapitoly 6 v podkapitole 6.1.

5.1.1 Jílek vytrvalý (*Lolium perenne* L.) odrůda HANDICAP

Následující grafy na obr. 10 zobrazují průběhy \bar{X}_t pro jednotlivé GMA a pro případ bez GMA, každý graf odpovídá průběhu právě jedné z veličin (L , S_k , D a V_k). Ke každé měřené veličině byl proveden výpočet korelací mezi průběhem dané veličiny na jednotlivých GMA a případu bez GMA. Současně byl na hladině 0,05 proveden test významností jednotlivých korelací (tab. 3 na str. 61).



Obr. 10 Graf průběhu \bar{X}_t měřených veličin L, S_k, D a V_k.

Průběhy \bar{X}_t měřených veličin L, S_k, D a V_k byly v programu STATISTICA Cz 12 proloženy funkcí Lowess Smoothing. Jedná se o metodu vyhlazování dat, která je také někdy označována jako robustní místně vážená regrese. Místní regresní model vyrovnává rozdíly mezi danou hodnotou a dvěma sousedními. Výsledné proložení poskytuje jasnější představu o celkovém tvaru vztahu mezi proměnnými x a y.

Z výsledných proložení průběhů \bar{X}_t měřených veličin L, S_k, D a V_k uvedených v grafech na obr. 10 je zřejmý nejprve zvýšený růst kořenového systému, který se s časem zpomaloval, až mírně stagnoval. Obdobný vývoj kořenového systému byl zaznamenán i u dalších dvou testovaných travních odrůd (viz dále), a proto možné příčiny zpomalování až mírné stagnace růstu jsou souhrnně rozebrány v podkapitole 6.1.

Tab. 3 Výsledky výpočtů korelací veličin L, S_k, D a V_k na jednotlivých GMA a případu bez GMA. Červeně označené korelace jsou statisticky významné na hladině 0,05.

L				
	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA	1,000000	0,870299	0,733863	0,831906
E7010	0,870299	1,000000	0,861694	0,924938
E7020	0,733863	0,861694	1,000000	0,747775
Trinter	0,831906	0,924938	0,747775	1,000000
S_k				
	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA	1,000000	0,865020	0,797960	0,872911
E7010	0,865020	1,000000	0,896692	0,964191
E7020	0,797960	0,896692	1,000000	0,883528
Trinter	0,872911	0,964191	0,883528	1,000000
D				
	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA	1,000000	0,830697	0,557806	0,615645
E7010	0,830697	1,000000	0,732849	0,681114
E7020	0,557806	0,732849	1,000000	0,454443
Trinter	0,615645	0,681114	0,454443	1,000000
V_k				
	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA	1,000000	0,851920	0,846302	0,869768
E7010	0,851920	1,000000	0,917789	0,898658
E7020	0,846302	0,917789	1,000000	0,918500
Trinter	0,869768	0,898658	0,918500	1,000000

Z výše provedené korelační analýzy vyplynulo, že jednotlivé naměřené veličiny jsou na uvažovaných GMA a případu bez GMA statisticky významně korelované (pouze u veličiny D nebyla prokázána korelace mezi E7020 a Trinter).

Pro celkové posouzení vlivu přítomnosti GMA v půdním profilu na rozvoj parametrů kořenového systému JV bylo nutné provést celkem 4 jednofaktorové analýzy rozptylu postupně pro měřené veličiny L, S_k, D a V_k.

Nulová hypotéza nebyla zamítnuta pouze pro veličinu V_k, u veličin L, S_k a D byla nulová hypotéza zamítnuta. Pro zjištění, mezi kterými GMA či případu bez GMA se

střední hodnoty měřených veličin (L, S_k a D) statisticky významně na hladině 0,05 liší, byl proveden Fisherův LSD test mnohonásobného porovnání (tab. 4).

Tab. 4 Výsledky Fisherova LSD testu mnohonásobného porovnání pro veličiny L, S_k , D, u kterých byly v rámci analýzy rozptylu zamítnuty nulové hypotézy. Červeně označené hodnoty značí statisticky významné výsledky na hladině 0,05.

L	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA		0,082608	0,006679	0,214937
E7010	0,082608		0,293246	0,608169
E7020	0,006679	0,293246		0,120961
Trinter	0,214937	0,608169	0,120961	
S_k	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA		0,240991	0,024197	0,252945
E7010	0,240991		0,259778	0,976136
E7020	0,024197	0,259778		0,247591
Trinter	0,252945	0,976136	0,247591	
D	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA		0,026722	0,039962	0,517877
E7010	0,026722		0,862356	0,108722
E7020	0,039962	0,862356		0,150786
Trinter	0,517877	0,108722	0,150786	

Z výsledků ANOVA a Fisherova LSD testů lze rozdíly mezi použitými GMA považovat na hladině 0,05 za statisticky nevýznamné. Pouze mezi E7020 (u veličiny D i mezi E7010) a případem bez GMA vyšel rozdíl v naměřených veličinách L, S_k a D jako statisticky významný (opět na hladině 0,05). Hodnoty veličin L a S_k dosahovaly na E7020 vyšších hodnot oproti případu bez GMA. Z hlediska vývoje kořenového systému a s tím související tvorby armované zemní konstrukce jsou vyšší hodnoty veličin L a S_k žádoucí. Hodnoty veličiny D dosahovaly na E7020 i E7010 nižších hodnot oproti případu bez GMA, což souviselo s tvorbou nových jemnějších kořenů (viz podkapitola 6.1).

Na základě těchto výsledků je možné usuzovat, že přítomnost GMA v půdním profilu při porovnání s případem bez GMA neměla negativní vliv na růst a vývoj kořenového systému JV. Naopak výsledky měřených veličin L, S_k a D na E7020 poukazují na lepší růst a vývoj kořenového systému JV oproti případu bez GMA (vzhledem k statisticky nevýznamnému rozdílu veličin L a S_k na E7010 oproti případu bez GMA nebylo ovlivnění růstu a vývoje označeno za zlepšující).

Dále byl ověřován vztah mezi naměřenými veličinami na daných GMA a případu bez GMA pomocí korelační analýzy (tab. 5 na str. 63) s cílem ověřit, zdali je pro vyhodnocení vlivu přítomnosti GMA na růst a vývoj kořenového systému JV skutečně nutné sledovat všechny měřené veličiny (L, S_k , D, V_k).

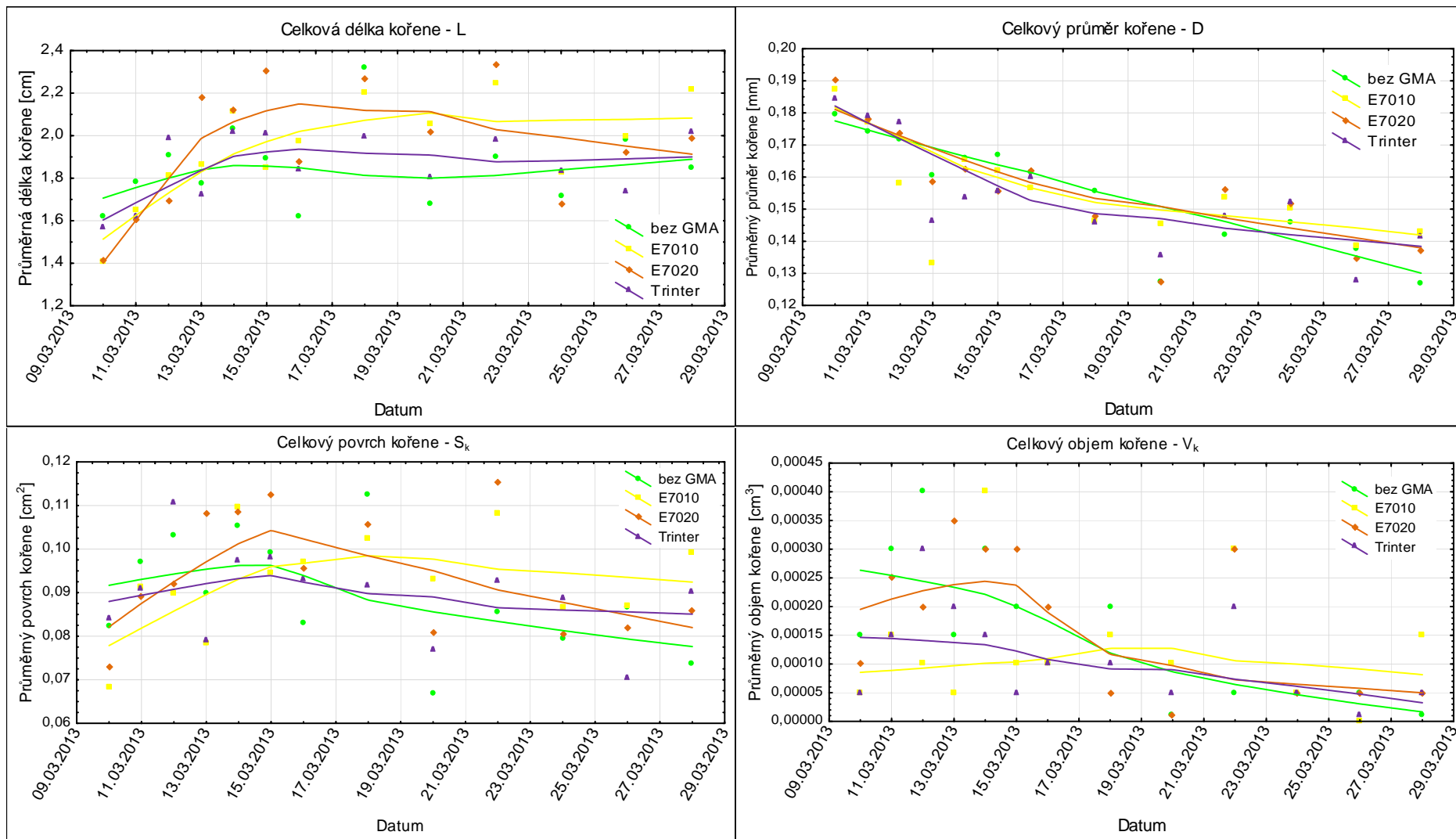
Tab. 5 Výsledky výpočtů korelací měřených veličin v rámci jednotlivých GMA a případu bez GMA. Červeně označené korelace jsou statisticky významné na hladině 0,05.

bez GMA	L	S _k	D	V _k
L	1,000000	0,964026	-0,615572	0,809200
S _k	0,964026	1,000000	-0,387763	0,925304
D	-0,615572	-0,387763	1,000000	-0,071188
V _k	0,809200	0,925304	-0,071188	1,000000
E7010	L	S _k	D	V _k
L	1,000000	0,968175	-0,427101	0,842544
S _k	0,968175	1,000000	-0,193050	0,939868
D	-0,427101	-0,193050	1,000000	0,085875
V _k	0,842544	0,939868	0,085875	1,000000
E7020	L	S _k	D	V _k
L	1,000000	0,976659	-0,375433	0,875568
S _k	0,976659	1,000000	-0,176986	0,955910
D	-0,375433	-0,176986	1,000000	0,090088
V _k	0,875568	0,955910	0,090088	1,000000
Trinter	L	S _k	D	V _k
L	1,000000	0,942349	-0,275292	0,817509
S _k	0,942349	1,000000	0,054302	0,958716
D	-0,275292	0,054302	1,000000	0,308804
V _k	0,817509	0,958716	0,308804	1,000000

Měřené veličiny L, S_k a V_k byly na všech podkladech statisticky významně korelované. Pokud k tomu nejsou další relevantní důvody, mělo by stačit pro hodnocení vlivu přítomnosti GMA v půdním profilu na růst a vývoj kořenového systému JV sledovat pouze jednu z nich. Veličina D je korelována pouze s veličinou L u případu bez GMA, je proto vhodné ji sledovat (spolu s jednou z výše uvedených).

5.1.2 Lipnice luční (*Poa pratensis L.*) odrůda HARMONIE

Následující grafy na obr. 11 zobrazují průběhy \bar{X}_t pro jednotlivé GMA a pro případ bez GMA, každý graf odpovídá průběhu právě jedné z veličin (L, S_k, D a V_k). Ke každé měřené veličině byl proveden výpočet korelací mezi průběhem dané veličiny na jednotlivých GMA a případu bez GMA. Současně byl na hladině 0,05 proveden test významnosti jednotlivých korelací (tab. 6 na str. 65).



Obr. 11 Graf průběhu \bar{X}_t měřených veličin L, S_k, D a V_k.

Průběhy \bar{X}_t měřených veličin L, S_k , D a V_k byly stejně jako u předchozí travní odrůdy proloženy funkcí Lowess Smoothing v programu STATISTICA Cz 12, aby byla poskytnuta jasnější představa o celkovém tvaru vztahu mezi proměnnými x a y.

Z výsledných proložení průběhů \bar{X}_t měřených veličin L, S_k , D a V_k uvedených v grafech na obr. 11 je možné sledovat obdobný průběh vývoje měřených veličin L, S_k a D u LL jako tomu byl u JV. Vývoj veličiny V_k vykazoval klesající charakter, což je velice úzce spojeno s průběhem vývoje ostatních veličin, kde docházelo k minimálnímu nárůstu veličin L a S_k a k poklesu veličiny D (viz podkapitola 6.1).

Tab. 6 Výsledky výpočtů korelací veličin L, S_k , D a V_k na jednotlivých GMA a případu bez GMA. Červeně označené korelace jsou statisticky významné na hladině 0,05.

L	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA	1,000000	0,545273	0,553061	0,570233
E7010	0,545273	1,000000	0,767606	0,743521
E7020	0,553061	0,767606	1,000000	0,650463
Trinter	0,570233	0,743521	0,650463	1,000000
S_k	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA	1,000000	0,282049	0,568005	0,544602
E7010	0,282049	1,000000	0,596365	0,405448
E7020	0,568005	0,596365	1,000000	0,394299
Trinter	0,544602	0,405448	0,394299	1,000000
D	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA	1,000000	0,716817	0,912146	0,847112
E7010	0,716817	1,000000	0,805831	0,847433
E7020	0,912146	0,805831	1,000000	0,943482
Trinter	0,847112	0,847433	0,943482	1,000000
V_k	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA	1,000000	0,261456	0,485231	0,646657
E7010	0,261456	1,000000	0,434383	0,357715
E7020	0,485231	0,434383	1,000000	0,614753
Trinter	0,646657	0,357715	0,614753	1,000000

Z výše provedené analýzy vyplynulo, že veličiny L a D jsou na uvažovaných GMA a případu bez GMA statisticky významně korelované (pouze vývoj veličiny L nekoreluje mezi E7010 a případem bez GMA). Veličiny S_k a V_k nejsou na uvažovaných GMA a případu bez GMA statisticky významně korelované (až na vývoj veličiny S_k mezi E7020 a E7010 s případem bez GMA a vývoj veličiny V_k mezi Trinter a E7020 a případem bez GMA). Vzhledem k výsledkům níže provedených analýz rozptylu (shoda středních hodnot nebyla zamítnuta) lze tvrdit, že nebyl prokázán rozdíl mezi veličinami L, S_k , D a V_k na uvažovaných GMA a případu bez GMA s tím, že vývoj veličin L a D byl na uvažovaných GMA i případu bez GMA korelován (tj. i průběh vývoje byl podobný).

Pro celkové posouzení vlivu přítomnosti GMA v půdním profilu na rozvoj parametrů kořenového systému LL byly provedeny celkem 4 jednofaktorové analýzy rozptylu, postupně pro měřené veličiny L, S_k, D a V_k, kde třídící faktor tvořila daná GMA či případ bez GMA.

Nulová hypotéza nebyla zamítnuta pro žádnou z měřených veličin L, S_k, D a V_k (tj. nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl v hodnotách měřených veličin na jednotlivých GMA a případu bez GMA). Na základě těchto výsledků je možné usuzovat, že přítomnost GMA v půdním profilu při porovnání s případem bez GMA neměla negativní vliv na růst a vývoj kořenového systému LL. Ale jak již bylo uvedeno výše, analýza korelací naznačuje, že vývoj některých veličin neprobíhal na jednotlivých podkladech (GMA i případu bez GMA) zcela stejně (např. vývoj veličin S_k a D).

Dále byl ověřován vztah mezi naměřenými veličinami na daných GMA a případu bez GMA pomocí korelační analýzy (tab. 7) s cílem ověřit, zdali je pro vyhodnocení vlivu přítomnosti GMA na růst a vývoj kořenového systému LL skutečně nutné sledovat všechny měřené veličiny (L, S_k, D, V_k).

Tab. 7 Výsledky výpočtů korelací měřených veličin v rámci jednotlivých GMA a případu bez GMA. Červeně označené korelace jsou statisticky významné na hladině 0,05.

bez GMA	L	S _k	D	V _k
L	1,000000	0,726350	-0,051833	1,000000
S _k	0,726350	1,000000	0,618100	0,726350
D	-0,051833	0,618100	1,000000	-0,051833
V _k	0,304334	0,812231	0,795730	0,304334
E7010	L	S _k	D	V _k
L	1,000000	0,827480	-0,644845	0,499036
S _k	0,827480	1,000000	-0,178030	0,787355
D	-0,644845	-0,178030	1,000000	0,214654
V _k	0,499036	0,787355	0,214654	1,000000
E7020	L	S _k	D	V _k
L	1,000000	0,822804	-0,533232	0,334715
S _k	0,822804	1,000000	0,000762	0,745320
D	-0,533232	0,000762	1,000000	0,466330
V _k	0,334715	0,745320	0,466330	1,000000
Trinter	L	S _k	D	V _k
L	1,000000	0,594184	-0,322080	0,216611
S _k	0,594184	1,000000	0,551134	0,597195
D	-0,322080	0,551134	1,000000	0,398053
V _k	0,216611	0,597195	0,398053	1,000000

Korelace sledovaných veličin se v rámci jednotlivých GMA a případu bez GMA lišila, a proto je vhodné pro hodnocení vlivu přítomnosti GMA v půdním profilu na růst a vývoj kořenového systému LL i nadále sledovat všechny výše uvedené veličiny.

5.1.3 Kostřava rákosovitá (*Festuca arundinacea* Schreb.) odrůda KORA

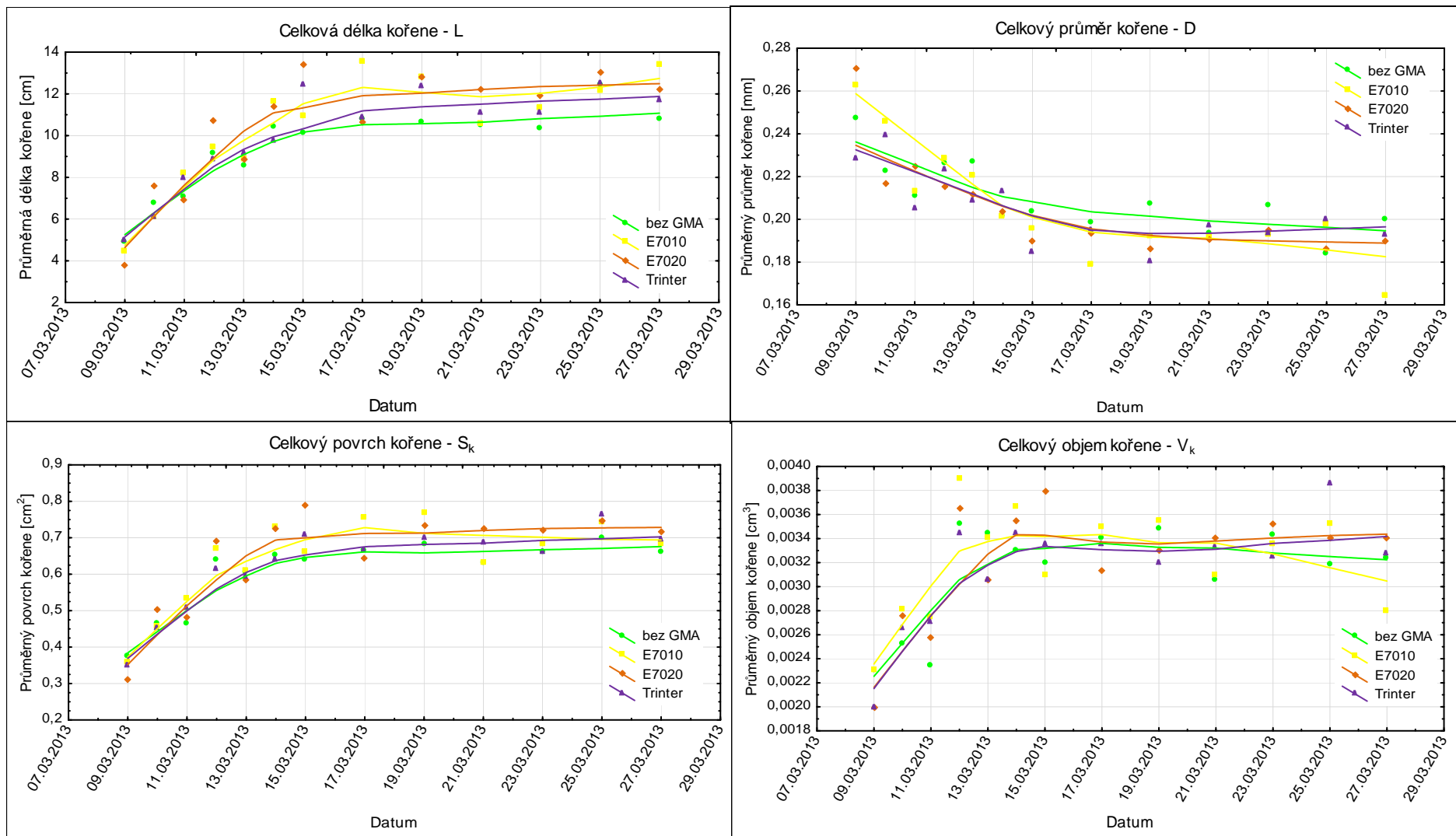
Následující grafy na obr. 12 zobrazují průběhy \bar{X}_t pro jednotlivé GMA a pro případ bez GMA, každý graf odpovídá průběhu právě jedné z veličin (L, S_k , D a V_k). Průběhy \bar{X}_t měřených veličin L, S_k , D a V_k byly taktéž proloženy funkcí Lowess Smoothing v programu STATISTICA Cz 12, aby byla poskytnuta jasnější představa o celkovém tvaru vztahu mezi proměnnými x a y. Z výsledných proložení průběhů \bar{X}_t měřených veličin je možné sledovat celkově rostoucí průběh měřených veličin (L, S_k a V_k) a s tím spojený klesající vývoj veličiny D (viz podkapitola 6.1).

Ke každé měřené veličině byl proveden výpočet korelací mezi průběhem dané veličiny na jednotlivých GMA a případu bez GMA. Současně byl na hladině 0,05 proveden test významnosti jednotlivých korelací (tab. 8).

Tab. 8 Výsledky výpočtů korelací veličin L, S_k , D a V_k na jednotlivých GMA a případu bez GMA. Červeně označené korelace jsou statisticky významné na hladině 0,05.

L	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA	1,000000	0,932739	0,941533	0,936423
E7010	0,932739	1,000000	0,868285	0,909922
E7020	0,941533	0,868285	1,000000	0,946428
Trinter	0,936423	0,909922	0,946428	1,000000
S_k	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA	1,000000	0,964562	0,938564	0,959334
E7010	0,964562	1,000000	0,884235	0,922007
E7020	0,938564	0,884235	1,000000	0,952684
Trinter	0,959334	0,922007	0,952684	1,000000
D	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA	1,000000	0,839013	0,862825	0,659065
E7010	0,839013	1,000000	0,858882	0,845116
E7020	0,862825	0,858882	1,000000	0,723371
Trinter	0,659065	0,845116	0,723371	1,000000
V_k	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA	1,000000	0,844915	0,815154	0,783640
E7010	0,844915	1,000000	0,726630	0,793300
E7020	0,815154	0,726630	1,000000	0,892650
Trinter	0,783640	0,793300	0,892650	1,000000

Z výše provedené analýzy vyplývá, že vývoj měřených veličin byl na uvažovaných GMA a případu bez GMA statisticky významně korelovan.



Obr. 12 Graf průběhů \bar{X}_t měřených veličin L, S_k, D a V_k.

Pro celkové posouzení vlivu přítomnosti GMA v půdním profilu na rozvoj parametrů kořenového systému KR byly provedeny celkem 4 jednofaktorové analýzy rozptylu postupně pro měřené veličiny L, S_k, D a V_k.

Výsledkem u všech 4 provedených jednofaktorových analýz rozptylu bylo nezamítnutí nulové hypotézy (tj. střední hodnoty měřených veličin se na jednotlivých GMA a případu bez GMA nelišily).

Dále byl ověřován vztah mezi naměřenými veličinami na daných GMA a případu bez GMA pomocí korelační analýzy s cílem ověřit, zdali je pro vyhodnocení vlivu přítomnosti GMA na růst a vývoj kořenového systému KR skutečně nutné sledovat všechny měřené veličiny (L, S_k, D, V_k).

Tab. 9 Výsledky výpočtů korelací měřených veličin v rámci jednotlivých GMA a případu bez GMA. Červeně označené korelace jsou statisticky významné na hladině 0,05.

bez GMA	L	S _k	D	V _k
L	1,000000	0,964978	-0,871709	0,777258
S _k	0,964978	1,000000	-0,731977	0,911970
D	-0,871709	-0,731977	1,000000	-0,402105
V _k	0,777258	0,911970	-0,402105	1,000000
E7010	L	S _k	D	V _k
L	1,000000	0,949216	-0,944911	0,591655
S _k	0,949216	1,000000	-0,818128	0,806175
D	-0,944911	-0,818128	1,000000	-0,355796
V _k	0,591655	0,806175	-0,355796	1,000000
E7020	L	S _k	D	V _k
L	1,000000	0,990777	-0,941920	0,929913
S _k	0,990777	1,000000	-0,920150	0,967811
D	-0,941920	-0,920150	1,000000	-0,832128
V _k	0,929913	0,967811	-0,832128	1,000000
Trinter	L	S _k	D	V _k
L	1,000000	0,976284	-0,887780	0,839965
S _k	0,976284	1,000000	-0,780656	0,933856
D	-0,887780	-0,780656	1,000000	-0,529460
V _k	0,839965	0,933856	-0,529460	1,000000

Z výše uvedené tabulky plyne, že všechny měřené veličiny byly na každé GMA a případu bez GMA statisticky významně korelované (až na případ veličiny D a V_k na E7010, Trinter a případu bez GMA), Z tohoto pohledu by mělo pro hodnocení vlivu přítomnosti GMA v půdním profilu na růst a vývoj kořenového systému KR postačovat sledovat pouze jednu z veličin (maximálně ty dvě nekorelované).

5.2 Terénní experiment

Snahou terénního experimentu bylo porovnat protierozní účinek zvolených typů PEO a zjistit, zdali typy PEO, které kombinovaly účinek GMA (E7010, E7020 a Trinter) s vysetou protierozní travní směsí, prokazují lepší protierozní účinek než typ PEO, kde byla vyseta pouze protierozní travní směs. Protierozní účinek byl vyhodnocován na základě množství erozního smyvu vzniklého působením přirozených srážek a dle množství erozního smyvu a objemu povrchového odtoku v rámci SPORV.

V následujících podkapitolách jsou uvedeny dosažené výsledky obou částí terénního experimentu. Výsledky jsou následně podrobněji okomentovány v podkapitole 6.2.

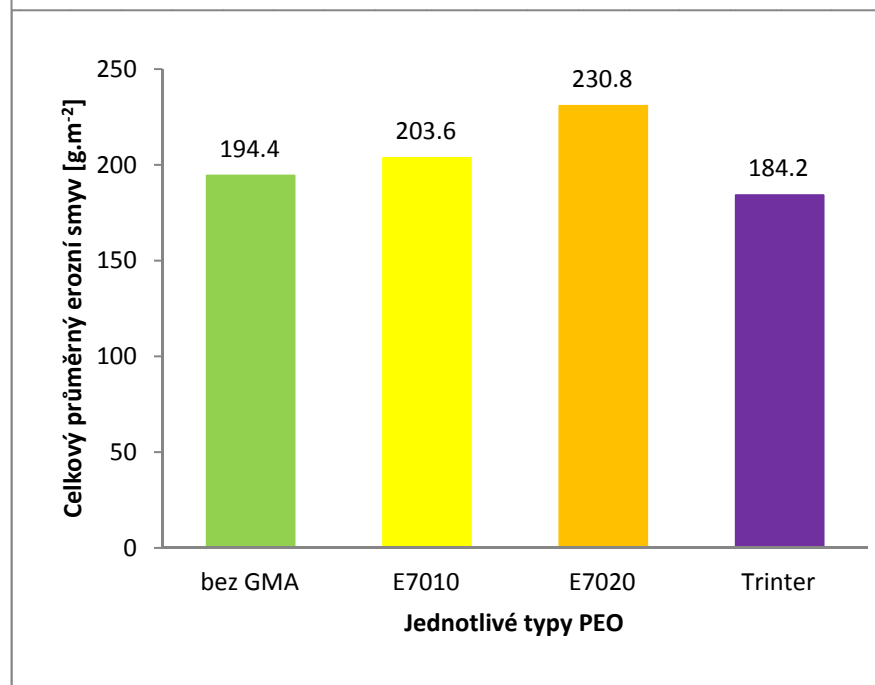
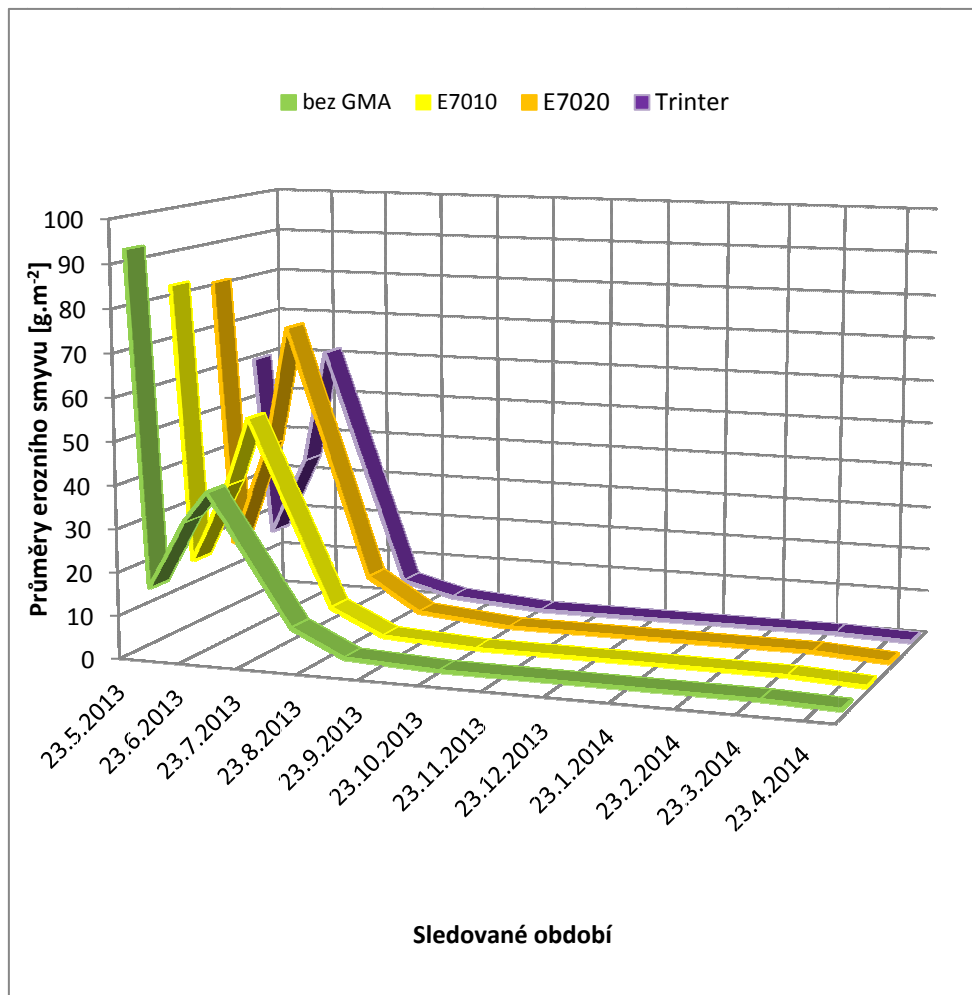
5.2.1 Působení přirozených srážek

5.2.1.1 Erozní smyv

Nejprve byl vyhodnocen samotný erozní smyv a to z pohledu celého sledovaného období, následně pak vzhledem k dvěma zvoleným časovým úsekům (viz dále). Za tímto účelem byly naměřené hodnoty pro daný aplikovaný typ PEO v rámci každého odběru nahrazeny výběrovým průměrem \bar{X}_t a výběrovým rozptylem σ_t^2 (příloha 4). Průběhy průměrného erozního smyvu z jednotlivých typů PEO a jeho výsledná průměrná velikost za celé sledované období je znázorněna na obr. 13 na str. 71. Z obr. 13 je zřejmé, že průběh erozního smyvu na všech aplikovaných typech PEO má velice podobný charakter, což také potvrdila i analýza korelací erozního smyvu mezi jednotlivými typy PEO za celé sledované období (tab. 10).

Tab. 10 Výsledky výpočtů korelací erozního smyvu z jednotlivých typů PEO za celé sledované období. Červeně označené korelace jsou statisticky významné na hladině 0,05.

Erozní smyv	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA	1,000000	0,978483	0,923745	0,875899
E7010	0,978483	1,000000	0,982134	0,956295
E7020	0,923745	0,982134	1,000000	0,992538
Trinter	0,875899	0,956295	0,992538	1,000000



Obr. 13 Graf průběhu erozního smyvu (vlevo) a celkového erozního smyvu za sledované období (vpravo).

Pro celkové posouzení vlivu jednotlivých typů PEO na erozní smyv byla zvolena jednofaktorová ANOVA, kde třídícím faktorem byl daný typ PEO. Tímto způsobem byla testována nulová hypotéza:

$$H_0: \mu_{E7010} = \mu_{E7020} = \mu_{Trinter} = \mu_{bez\ GMA}$$

tj. střední hodnoty erozního smyvu se na jednotlivých typech PEO neliší proti alternativě, kde alespoň jedna dvojice středních hodnot se statisticky významně liší.

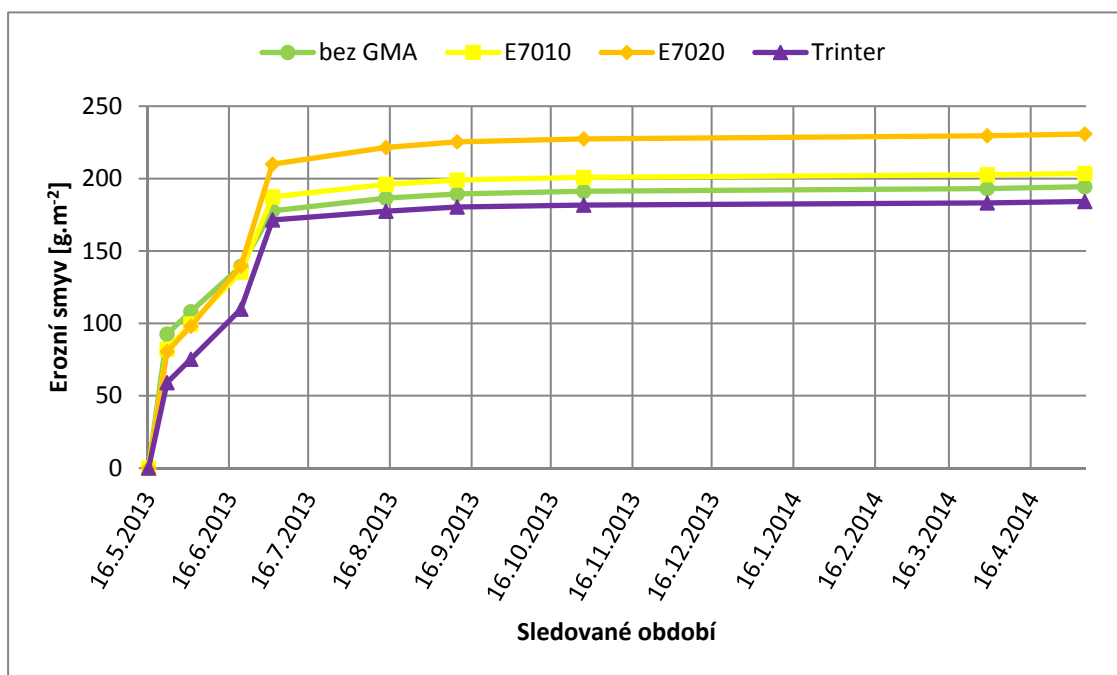
Nulová hypotéza nebyla zamítnuta, a proto může být konstatováno, že provedený terénní experiment neprokázal statisticky významný rozdíl mezi jednotlivými použitými typy PEO vzhledem k celému sledovanému období. Nicméně je důležité si uvědomit, že hodnoty erozního smyvu na všech typech PEO za celé sledované období mají značný rozptyl (od jednotek gramů po vyšší desítky gramů), a tím 95% intervaly spolehlivosti v rámci provedené analýzy rozptylu jsou značně široké, překrývají se, a proto se nulová hypotéza nezamítá.

Z důvodu podrobnější analýzy účinku jednotlivých typů PEO bylo sledované období rozděleno na dva časové úseky, které byly zvoleny na základě zřetelného poklesu kumulace erozního smyvu po čtvrtém odběru, který byl realizován dne 2. 7. 2013 (obr. 14):

- 1. období od založení pokusných ploch po 4. odběr erozního smyvu dne 2. 7. 2013 (včetně),
- 2. období od 5. odběru erozního smyvu po poslední 9. odběr dne 6. 5. 2014.

Jako možné důvody poklesu erozního smyvu byly uvažovány:

- změny v charakteru dešťových srážek – absence nebezpečných dešťů nebo jejich menší mohutnost (viz podkapitola 5.2.1.2 a 6.2.1),
- zvyšující se protierozní účinek vysetého travního porostu (viz podkapitola 5.2.1.2 a 6.2.1).



Obr. 14 Graf průběhu kumulace erozního smyvu za sledované období.

Vyhodnocení 1. období

První období zahrnuje celkem 4 odběry (23. 5. 2013, 1. 6. 2013, 20. 6. 2013 a 2. 7. 2013). Během tohoto období činil erozní smyv 91 až 93 % z celkového objemu erozního smyvu za celé sledované období. Pro porovnání průběhu erozního smyvu v rámci 1. období mezi jednotlivými typy PEO byla provedena analýza korelací erozního smyvu (tab. 11).

Tab. 11 Výsledky výpočtů korelací erozního smyvu z jednotlivých typů PEO za 1. období. Červeně označené korelace jsou statisticky významné na hladině 0,05.

Erozní smyv	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA	1,000000	0,966717	0,834861	0,713357
E7010	0,966717	1,000000	0,947905	0,868740
E7020	0,834861	0,947905	1,000000	0,981053
Trinter	0,713357	0,868740	0,981053	1,000000

Z uvedených výsledků korelační analýzy je zřejmé, že průběh erozního smyvu není na daných typech PEO statisticky významně korelován (až na korelaci E7020 s Trinter a E7010 s případem bez GMA). Pro celkové posouzení vlivu jednotlivých typů PEO na erozní smyv byla opět zvolena jednofaktorová ANOVA, jejímž výsledkem bylo nezamítnutí nulové hypotézy, tj. střední hodnoty erozního smyvu se na jednotlivých typech PEO neliší.

Lze tedy tvrdit, že stejně tak jako u vyhodnocení erozního smyvu za celé sledované období i v rámci 1. období nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl v erozním smyvu mezi jednotlivými typy PEO. Oproti celému sledovanému období ale není průběh erozního smyvu mezi jednotlivými typy PEO statisticky významně korelován (až na korelaci E7020 s Trinter a E7010 s případem bez GMA).

Vyhodnocení 2. období

Druhé období zahrnuje celkem 5 odběrů (14. 8. 2013, 10. 9. 2013, 28. 10. 2013, 30. 3. 2014 a 6. 5. 2014). Během tohoto období činil erozní smyv pouze 7 až 9 % z celkového objemu erozního smyvu za celé sledované období a průměrný erozní smyv se pohyboval v nižších jednotkách gramů. Opět byla provedena analýza korelací erozního smyvu (tab. 12) za účelem porovnat průběh erozního smyvu mezi jednotlivými typy PEO v rámci 2. období.

Tab. 12 Výsledky výpočtů korelací erozního smyvu z jednotlivých typů PEO za 2. období. Červeně označené korelace jsou statisticky významné na hladině 0,05.

Erozní smyv	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA	1,000000	0,998747	0,998741	0,981804
E7010	0,998747	1,000000	0,999306	0,986390
E7020	0,998741	0,999306	1,000000	0,989870
Trinter	0,981804	0,986390	0,989870	1,000000

Z uvedených výsledků korelační analýzy je zřejmé, že průběh erozního smyvu je na daných typech PEO statisticky významně korelován. Zároveň z provedené jednofaktorové analýzy rozptylu vyplynulo, že střední hodnoty erozního smyvu se na jednotlivých typech PEO neliší (nezamítnutí nulové hypotézy).

Lze tedy tvrdit, že stejně tak jako u vyhodnocení erozního smyvu za celé sledované období i u 2. období nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl v erozním smyvu mezi jednotlivými typy PEO a průběh erozního smyvu je na všech typech PEO statisticky významně korelován.

Zrnitostní charakter erozního smyvu

Pro každý odběr erozního smyvu v rámci jednotlivých typů PEO byl proveden zrnitostní rozbor odebraných vzorků, aby bylo možné určit poměr smyvu jednotlivých frakcí souhrnně rozčleněných na jemné částice – F (pod 0,063 mm), písčitou složku S – (0,063 až 2,0 mm) a šterkovitou složku – G (nad 2,0 mm), přičemž smyv šterkovité složky nebyl u žádného vzorku zaznamenán. Souhrnná tabulka zrnitostního rozboru odebraných vzorků erozního smyvu je uvedena v příloze 5, grafické zobrazení je uvedeno na obr. 15 na str. 75.

Z výběrových průměrů \bar{X}_t , kterými byly naměřené hodnoty v rámci daného odběru nahrazeny, byla provedena analýza korelací vývoje procentuálního smyvu jemných částic – F (tab. 13). Pro písčitou složku – S nebylo nutné analýzu korelací provádět, jelikož se jedná o procentuální doplněk do 100 %, tzn. při korelaci vývoje procentuálního smyvu jemných částic – F, bude korelovat i vývoj procentuálního smyvu písčité složky – S.

Tab. 13 Výsledky výpočtů korelací zrnitostního charakteru erozního smyvu z jednotlivých typů PEO za celé sledované období. Červeně označené korelace jsou statisticky významné na hladině 0,05.

F	bez GMA	E7010	E7020	Trinter
bez GMA	1,000000	0,942290	0,905207	0,881402
E7010	0,942290	1,000000	0,928328	0,855192
E7020	0,905207	0,928328	1,000000	0,806741
Trinter	0,881402	0,855192	0,806741	1,000000

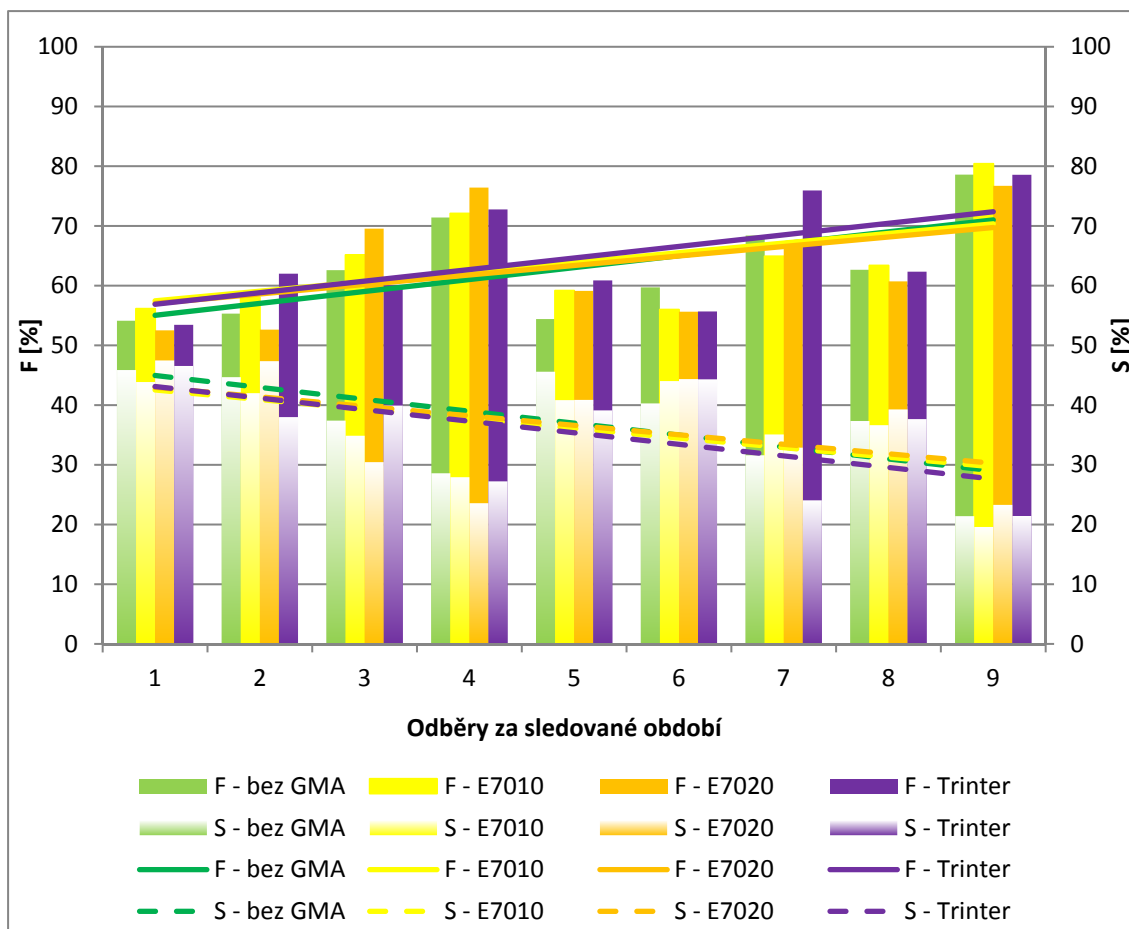
Z výše provedené korelační analýzy vyplývá, že vývoj zrnitostního charakteru erozního smyvu je na daných typech PEO statisticky významně korelován.

Pro celkové posouzení vlivu jednotlivých typů PEO na zrnitostní charakter erozního smyvu byla zvolena jednofaktorová ANOVA, kde třídícím faktorem byl daný typ PEO. Tímto způsobem byla testována nulová hypotéza:

$$H_0: \mu_{E7010} = \mu_{E7020} = \mu_{Trinter} = \mu_{bez\ GMA}$$

tj. střední hodnoty procentuálního zastoupení zrnitostních frakcí erozního smyvu se na jednotlivých typech PEO neliší proti alternativě, kde alespoň jedna dvojice středních hodnot se statisticky významně liší.

Výsledkem bylo nezamítnutí nulové hypotézy. Zrnitostní charakter erozního smyvu se mezi použitými typy PEO na hladině 0,05 statisticky významně neliší.



Obr. 15 Graf vývoje procentuálního zastoupení jemných částic – F a písčité složky – S v erozním smyvu v rámci 9. odběru za sledované období.

Z uvedeného grafu na obr. 15 je zřejmé, že podíl jemných částic – F v erozním smyvu má s postupem realizovaných odběrů stoupající charakter, a tedy podíl písčité složky – S v erozním smyvu má charakter klesající.

5.2.1.2 Účinek přirozených dešťových srážek a vyšetého travního porostu

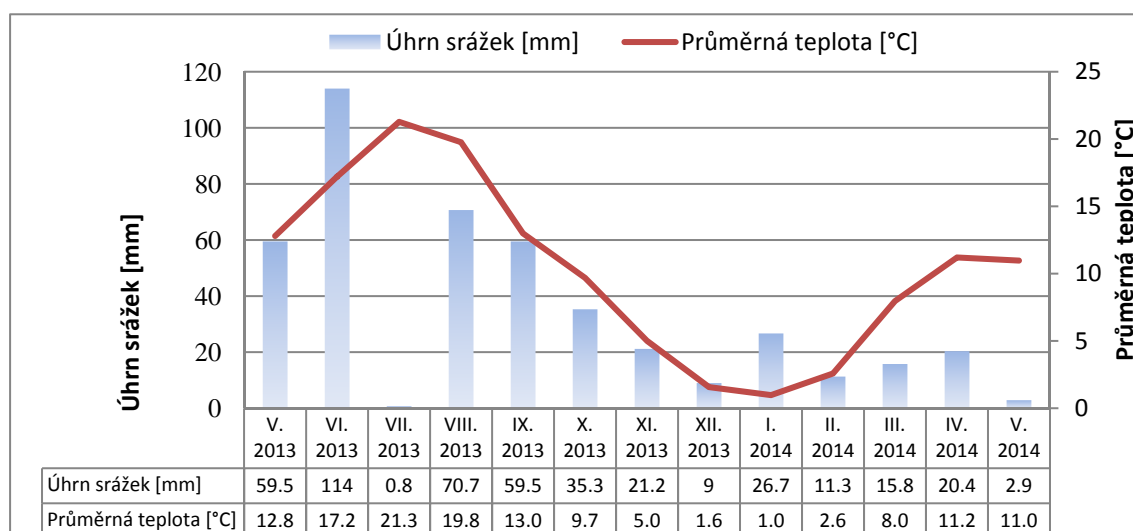
Porovnání jednotlivých typů PEO na základě velikosti erozního smyvu potvrdilo, že mezi použitými typy PEO není statisticky významný rozdíl ve velikosti průměrného erozního smyvu, tj. použité typy PEO s GMA nezhoršily, ale ani nezlepšily protierozní ochranu svahů pokusných ploch v porovnání s typem PEO bez GMA. Pro celkové vyhodnocení použitých typů PEO je důležitý vztah mezi velikostí erozního smyvu přirozenými dešťovými srážkami a založeným travním porostem.

Vyhodnocení meteorologických údajů

Pro vyhodnocení erozního smyvu z hlediska účinku přirozených dešťových srážek, které se vyskytly během sledovaného období, byla podrobněji zpracována získaná meteorologická data.

Průběh měsíčních srážkových úhrnů a průměrných měsíčních teplot vzduchu za celé sledované období (od 16. 5. 2013 do 6. 5. 2014) je uveden na obr. 16 na str. 76. Během sledovaného období došlo celkem k 106 srážkovým událostem (tab. 14

na str. 77), přičemž jako jeden dešť byla brána srážka ohraničená 6h úsekem bez naměřených srážek. Následně byl proveden výběr efektivní části dešťů dle kritérií (intenzita deště $0,1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, respektive $0,05 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$), která zavedl Kasprzak (in Hejduk, 2011) a v navazujícím výzkumu použil Hejduk (2011). Vzhledem k charakteru zimního období během realizace terénního experimentu (výskyt sněhových srážek byl zaznamenán pouze ve dnech 7. a 8. 12. 2013, 22. až 25. 1. 2014, 28. a 29. 1. 2014), byly do hodnocení efektivní části dešťů brány všechny naměřené hodnoty, kromě výše uvedených dnů, kdy se vyskytly srážky sněhové. Výsledný počet efektivních částí dešťů vyhovujících zvoleným kritériím byl 26 (tab. 14). Pro všechny efektivní části dešťů byly spočteny nejprve kinetické energie měrné vydatnosti deště $w_k(i_s)$ dle vztahu (2) a následně pak úhrnné kinetické energie celkové vydatnosti deště W_K dle vztahu (3). Zároveň byly pro všechny nebezpečné deště spočteny mohutnosti M_D dle vztahu (4) a při hodnotách $M_D \geq 1$ byl dešť označen jako nebezpečný. Za sledované období se vyskytlo celkem 11 nebezpečných dešťů (tab. 14).



Obr. 16 Měsíční úhrny srážek a průměrné měsíční teploty vzduchu během sledovaného období.

Sledované období⁸ se výrazně lišilo měsíčními úhrny srážek vůči dlouhodobému srážkovému normálu za období 1961 až 1990 (údaje získány z infomet.cz) především v měsících červen a září (o 45 až 52 % více) a v měsících červenec, listopad, prosinec, únor a březen (o 50 až 95 % méně). Co se týče průměrných měsíčních teplot vzduchu, tak celé sledované období bylo charakteristické nadprůměrnými teplotami vzduchu (o 0,6 až 4,6 °C) oproti dlouhodobému normálu teploty vzduchu za období 1961 až 1990, kromě měsíce září, který byl o 0,9 °C pod dlouhodobým normálem.

⁸ S dlouhodobým normálem za období 1961 až 1990 nebyly porovnávány srážkové úhrny a teploty vzduchu za měsíc květen 2013 a 2014, jelikož uvedené hodnoty nereprezentují celý měsíc, ale pouze dny, během nichž byl realizován terénní experiment. Data k porovnání byla získána z portal.chmi.cz.

Tab. 14 Srážkové události, nebezpečné deště (dle Kasprzak (in Hejduk, 2011)).

Rok	2013								2014					Σ
Měsíc	V ⁹	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V ¹⁰	
Všechny srážkové události	10	15	1	7	10	15	5	6	12	9	6	9	1	106
Srážkové události s efektivní částí deště	6	5	0	5	4	1	0	0	0	0	1	4	0	26
Nebezpečné deště ($M_D > 1$)	3	3	0	3	1	0	0	0	0	0	1	0	0	11
% výskytu nebezpečných dešťů	27,3	27,3	0	27,3	9,05	0	0	0	0	0	9,05	0	0	100

K jednotlivým nebezpečným dešťům (dále také ND) byly přiřazeny charakteristiky (H_{sND} , t_D , i_s , W_K a M_D) a podíl ND na celkovém úhrnu (% z H_s) za období vztažené k danému odběru erozního smyvu (tab. 15 na str. 78).

Rozdělení ND je v průběhu roku nerovnoměrné s tím, že se váže téměř výhradně na teplou polovinu roku (Hejduk, 2011; Doležalová¹¹, 2014). Zároveň Knozová¹² (2014) uvádí, že přívalové srážky se nevyskytují pravidelně každý rok a jejich počet kolísá.

Hejduk (2011) uvádí, že deště, které vyvolaly povrchový odtok z výzkumných ploch ve Vatíně za období 2004 až 2010, se nejvíce vyskytovaly v měsících květen, červen a červenec, nejméně v měsíci září. Během realizace terénního experimentu bylo zaznamenáno největší zastoupení ND v měsících květen, červen a srpen 2013. Oproti výsledkům Hejduka (2011) v měsíci červenec 2013 nebyl zaznamenán žádný výskyt ND a naopak v měsíci březen 2014 se vyskytl jeden ND. Uvedené výsledky vyhodnocení výskytu ND potvrzují, že převážná většina ND se vyskytuje v teplé polovině roku.

⁹ Zahrnuty srážkové události až od založení vekovního pokusu dne 15. 5. 2013.

¹⁰ Zahrnuty srážkové události do ukončení terénního pokusu 6. 5. 2014.

¹¹ Uvedené autorky používají pro vyhodnocení nebezpečných (přívalových) srážek metodiku dle Wussova (metodika, podle které přívalové deště na území ČR hodnotí ČHMÚ). Pro potřeby porovnání rozložení výskytu ND rozdílná metodika není závadou.

Tab. 15 Výskyt nebezpečných dešťů (ND) během sledovaného období a jejich charakteristiky.

Odběr erozního smyvu	Úhrn srážek	Datum ND		Charakteristiky ND						
		H _s [mm]	od	do	H _{sND} [mm]	% H _s [%]	t _d [min]	i _s [mm.min ⁻¹]	W _K [J.m ⁻²]	M _D [mm.min ⁻¹]
			19. 5. 2013		6,6		21	0,31	221,4	1,44
			21. 5. 2013		12,8		142	0,10	494	1,24
23. 5. 2013	31				Σ 19,4	62,6			Σ 715,4	Σ 2,68
			28. 5. 2013		3,4		8	0,43	114,2	1,2
1. 6. 2013	28,5				Σ 3,4	11,9			Σ 114,2	Σ 1,2
			10. 6. 2013		9,8		30	0,33	328,8	1,79
20. 6. 2013	47,8				Σ 9,8	20,5			Σ 328,8	Σ 1,79
			21. 6. 2013	22. 6. 2013	20,0		67	0,30	670,6	2,44
			24. 6. 2013	25. 6. 2013	34,2		577	0,06	1139,7	1,42
2. 7. 2013	66,2				Σ 54,2	81,9			Σ 1810,3	Σ 3,86
			4. 8. 2013		12,0		99	0,13	434,2	1,31
			9. 8. 2013		7,0		10	0,7	235,7	2,21
14. 8. 2013	30,3				Σ 19,0	62,7			Σ 669,9	Σ 3,52
			19. 8. 2013		24,8		131	0,19	829,6	2,17
10. 9. 2013	50,1				Σ 24,8	49,5			Σ 829,6	Σ 2,17
			10. 9. 2013		8,8		41	0,21	294,6	1,37
28. 10. 2013	84,9				Σ 8,8	10,4			Σ 294,6	Σ 1,37
			4. 3. 2014		5,8		20	0,23	194,2	1,18
30. 3. 2014	81,7				Σ 5,8	7,1			Σ 194,2	Σ 1,18
6. 5. 2014	23,3				Σ --	--			Σ --	Σ --

Tab. 16 Stáří travního porostu (TP) od prvního vzejití travního semene, W_K nebezpečných dešťů (ND) a erozní smyv k danému odběru.

	Odběr erozního smyvu	Odběr erozního smyvu	Stáří TP	Datum ND		Char. ND W_K [J.m ⁻²]	Průměrný erozní smyv					
				od	do		bez GMA	E7010	E7020	Trinter		
							[g.m ⁻²]	[g.m ⁻²]	[g.m ⁻²]	[g.m ⁻²]		
Celé sledované období	1. období	1.	23. 5. 2013	1	19. 5. 2013		221,4					
					21. 5. 2013		494					
		2.	1. 6. 2013	10	28. 5. 2013		114,2					
					Σ 114,2	15,47	17,48	17,46	16,19			
		3.	20. 6. 2013	29	10. 6. 2013		328,8					
					Σ 328,8	31,29	35,85	41,65	34,59			
	4.	2. 7. 2013	41	21. 6. 2013	22. 6. 2013	670,6						
				24. 6. 2013	25. 6. 2013	1139,7						
	2. období	5.	14. 8. 2013	84	74	4. 8. 2013	434,2					
					79	9. 8. 2013	235,7					
		6.	10. 9. 2013	111	89	19. 8. 2013	829,6					
					Σ 829,6	2,89	2,96	3,91	2,94			
		7.	28. 10. 2013	159	111	10. 9. 2013	294,6					
					Σ 294,6	1,89	1,86	2,05	1,33			
		8.	30. 3. 2014	312	286	4. 3. 2014	194,2					
					Σ 194,2	1,83	1,79	2,15	1,50			
		9.	6. 5. 2014	349			Σ --	1,29	0,94	1,19	0,98	

Z tabulek 15 a 16 je zřejmé, že se vždy v obdobích mezi jednotlivými realizovanými odběry erozního smyvu vyskytl alespoň jeden ND (kromě období mezi předposledním a posledním odběrem, kdy se během měsíce duben 2014 a začátkem května 2014 nevyskytl ani jeden ND). V případech, kdy se mezi odběry vyskytly dva ND, byla pro další analýzy použita suma W_K těchto dvou ND (zkonzultováno s doc. Ing. Klaudiem Kasprzakiem, CSc. – dlouholetý výzkumný a akademický pracovník na VUT v Brně). Dále je z tab. 16 možné zjistit, že v 1. období i v 2. období byly zastoupené ND s vysokými W_K .

K prvnímu odběru dosahovala suma W_K třetí nejvyšší hodnoty za sledované období. Nejmenší erozní smyv byl zaznamenán na typu PEO s Trinter, naopak nejvyšší erozní smyv byl na typu PEO bez GMA. Zajímavé jsou hodnoty erozního smyvu v rámci čtvrtého odběru, kdy v období mezi třetím a čtvrtým odběrem se vyskytly dva erozní deště o nejvyšší sumě W_K za celé sledované období. Všechny typy PEO vykazovaly nárůst erozního smyvu oproti druhému a třetímu odběru, nicméně pouze erozní smyv na typu PEO s Trinter přesáhl svou velikostí i erozní smyv v rámci prvního odběru. Pátý a šestý odběr (již 2. období) byly charakteristické poklesem velikosti erozního smyvu i přesto, že se zde vyskytly ND s druhým a čtvrtým nejvyšším W_K .

První obilky vyseté protierozní travní směsi začaly vzcházet 6 dní po výsevu dne 22. 5. 2013 (obr. 17). V době, kdy se vyskytly dva ND o nejvyšší sumě W_K za celé sledované období, měly již nejstarší vzejití rostliny stáří cca 2 měsíce a povrch pokusných ploch byl cca z 80 % pokrytý travním porostem (obr. 20 na str. 81). Při průchodu dvou dalších nebezpečných dešťů dne 4. a 9. 8. 2013 se stáří travního porostu pohybovalo mezi 10 a 11 týdny a povrch pokusných ploch byl již téměř pokryt travním porostem.



Obr. 17 Vyklíčené obilky (vlevo) a charakter povrchu pokusných ploch (vpravo) dne 22. 5. 2013



Obr. 18 Rostliny týden po vyklíčení (vlevo) a stav povrchu pokusných ploch ke dni 28. 5. 2013 (vpravo).



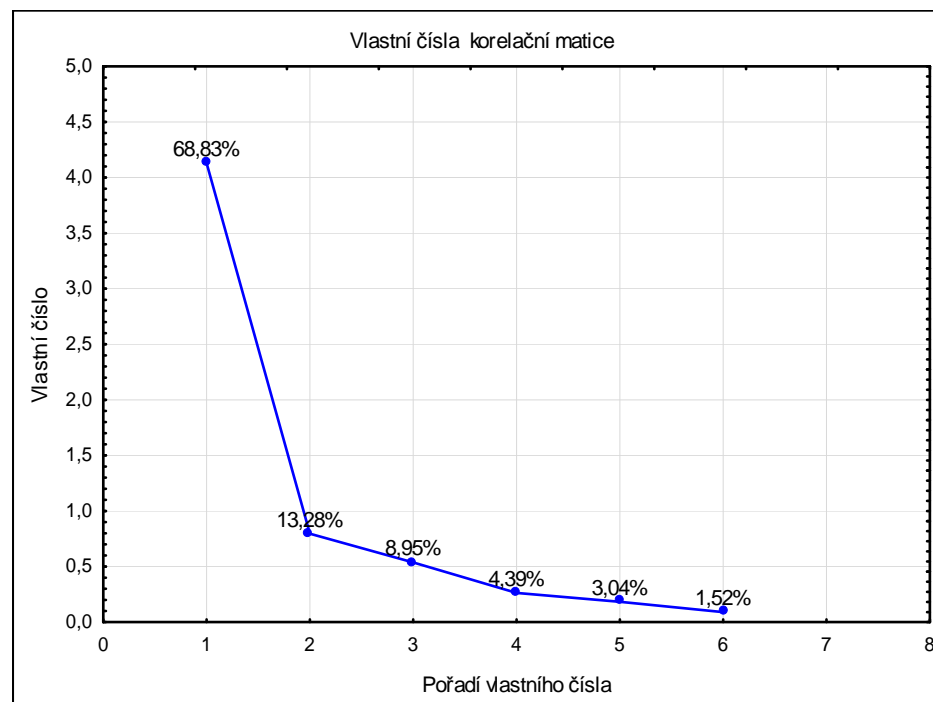
Obr. 19 Rostliny 20 dní po vyklíčení (vlevo) a stav povrchu pokusných ploch ke dni 10. 6. 2013 (vpravo).



Obr. 20 Charakter travního porostu ke dni 24. 6. 2013 (vlevo) a dne 29. 3. 2014 (vpravo).

Z uvedeného vyplývá, že na velikosti erozního smyvu se podílely nebezpečné deště svými W_K , přičemž vzrůstající travní porost měl v průběhu sledovaného období stále větší protierozní účinek. Erozní účinek W_K a ochranný účinek travního porostu se mírně lišil dle použitého typu PEO (rozdílné hodnoty velikosti erozního smyvu z jednotlivých typů PEO). Pro zjištění vlivu W_K nebezpečných dešťů a stáří vyšetého travního porostu na erozní smyv dle typu PEO byla použita analýza hlavních komponent (PCA) v programu STATISTICA Cz 12. Meloun & Militký (2004) uvádějí, že se jedná o jednu z nejstarších a nejpoužívanějších metod vícerozměrné analýzy dat. Cílem analýzy hlavních komponent je zjednodušení popisu lineárně závislých tj. korelovaných znaků a to rozkladem matice dat do matice strukturní a do matice šumové (Meloun & Militký, 2004). Původní znaky jsou lineárně transformovány na nové, nekorelované proměnné, které se nazývají hlavní komponenty, jejichž základní charakteristikou je míra variability čili rozptyl. Zdrojová matice dat pro analýzu hlavních komponent byla tvořena znaky – stáří vyšetého travního porostu, W_K a erozní smyv na jednotlivých typech PEO a objekty – hodnoty pro dané znaky v rámci realizovaných odběrů.

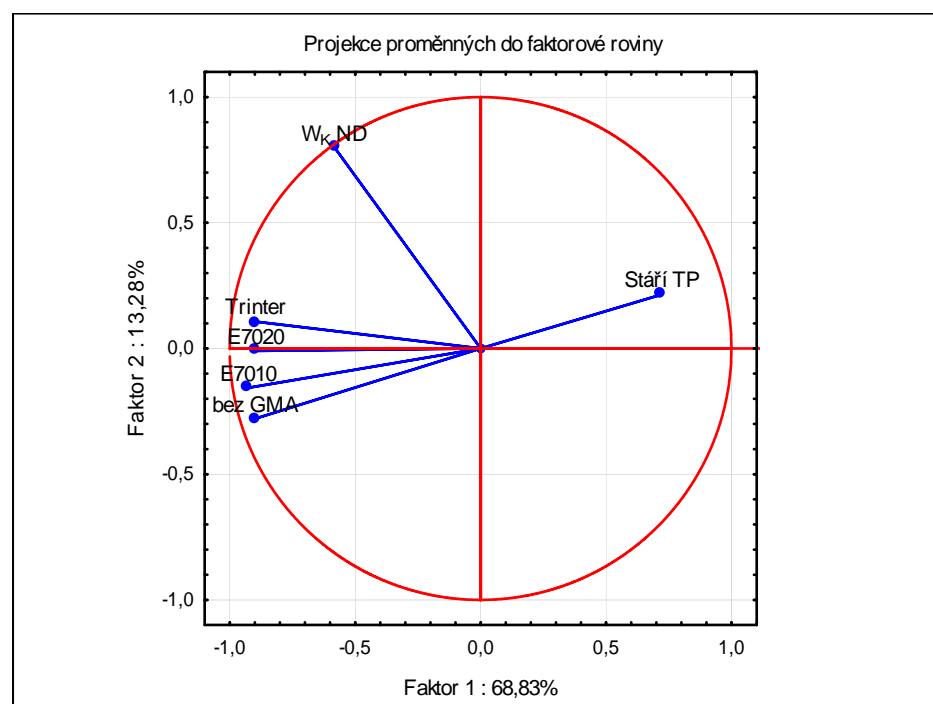
Nejprve byl sestaven Cattellův indexový graf úpatí vlastních čísel (obr. 21), který znázorňuje počet „užitečných“ hlavních komponent. Dle grafu na obr. 21 je zřejmé, že první hlavní komponenta popisuje 68,83 % proměnlivosti původních dat a druhá hlavní komponenta pak 13,28 %. Dohromady popisují přes 80 % proměnlivosti původních dat, což je dle Melouna & Militkého (2004) v přírodních vědách dostačující, a proto první dvě hlavní komponenty byly vybrány jako nejdůležitější.



Obr. 21 Cattellův indexový graf úpatí vlastních čísel odкрývá 2 první hlavní komponenty.

Následně byla provedena projekce proměnných do faktorové roviny grafem komponentních vah (obr. 22 na str. 83), který ukazuje, jakou měrou přispívají jednotlivé původní proměnné do hlavních komponent. Jsou-li proměnné blízko sebe anebo

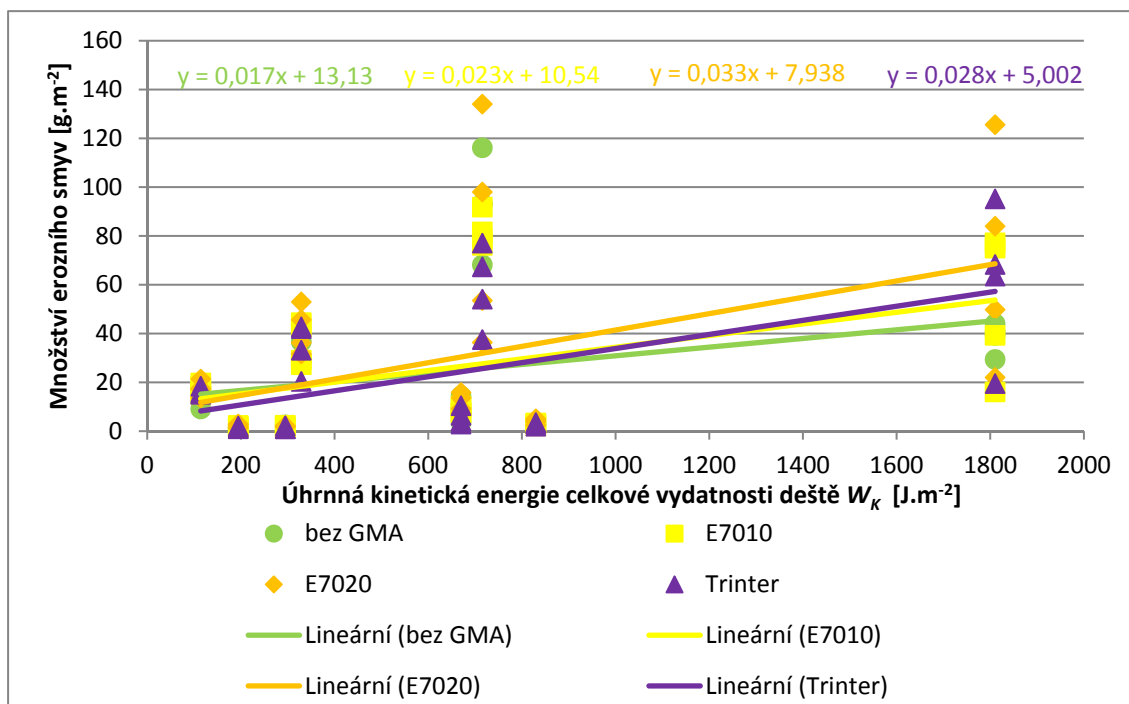
s malým úhlem mezi průvodiči mají vysokou kladnou korelaci. Při velké vzdálenosti mezi proměnnými anebo velikém úhlu mezi průvodiči se jedná o negativní korelaci. Z grafu na obr. 22 je zřejmé, že mezi stářím travního porostu (TP) a erozním smyvem na jednotlivých typech PEO se jedná o negativní korelaci. Naopak mezi W_K nebezpečného deště a erozním smyvem na jednotlivých typech PEO se jedná o pozitivní korelaci. Nejvíce je s účinkem W_K nebezpečného deště pozitivně korelován typ PEO s Trinter a s E7020, naopak méně, ale stále pozitivně typ PEO s E7010 a bez GMA. Nejsilnější negativní korelaci se stářím TP má typ PEO bez GMA a s E7010. Naopak slabší, ale stále negativní korelaci prokazuje typ PEO s E7020 a s Trinter. Nicméně, úhel mezi průvodiči u jednotlivých typů PEO je malý, a tak se jedná o silnou korelaci mezi jednotlivými typy PEO, která potvrzuje výsledky uvedené v podkapitole 5.2.1.1.



Obr. 22 Graf komponentních vah 1. a 2. hlavní komponenty.

Kasprzak (1988) uvádí, že mezi úhrnnou kinetickou energií celkové vydatnosti deště W_K a velikostí erozního smyvu je přibližně lineární závislost. Holý (1964) zmiňuje lineární závislost mezi intenzitou přívalových srážek a velikostí půdního smyvu. Braun et al. (1996) došli k lineární závislosti mezi erozním smyvem a mohutností deště při různých růstových stádiích vojtěšky. K obdobným výsledkům ve svém výzkumu dospěli i Bhattacharyya et al. (2011), kteří uvádějí lineární vztah mezi erozním smyvem a úhrnem dešťových srážek, přičemž jako typy PEO byly použity protierozní přírodní výrobky či travní porost. V rámci analýzy výsledků terénního experimentu byly taktéž ověřovány závislosti erozního smyvu na výše uvedených charakteristikách deště. Ve všech případech byla potvrzena lineární závislost erozního smyvu na uvedených charakteristikách nebezpečných dešťů, jako příklad je uvedena závislost velikosti erozního smyvu na W_K (obr. 23 na str. 84). Je důležité upozornit, že i když se během sledovaného období vyskytlo poměrně velké množství nebezpečných dešťů, nevyjadřují

uvedené rovnice funkční závislosti, z kterých by se dala odvodit hodnota erozního smyvu v závislosti na velikosti dané charakteristiky, v tomto případě W_K .



Obr. 23 Graf závislosti velikosti erozního smyvu na úhrnné kinetické energii celkové vydatnosti deště W_K pro celé sledované období.

5.2.1.3 Změna zrnitosti svrchní vrstvy ornice

Ornice použitá pro založení pokusných ploch obsahovala vysoké procento jemných částic - F, především pak prachovité složky (67,67 %) – tab. 17 na str. 85. Na základě poměru jílovité, prachovité a písčité složky dle trojúhelníkového diagramu zrnitosti půd byla použitá ornice zaříděna mezi prachovité hlíny. Jůva & Cáblik (1954), Le Bissonnais et al. (1998) a Morgan (2005) označují prachovité hlíny za velice náchylné k oddělování půdních částic vlivem kinetické energie dešťových kapek, a tedy i za značně náchylné k vodní erozi.

Vlivem odnosu jemných částic dochází na svazích k změně půdní zrnitosti ve směru postupu eroze (Holý, 1994; Morgan, 2005; Novotný et al., 2014). Pro zjištění, zdali došlo na založených pokusných plochách ke změně zrnitosti, byl na všech pokusných plochách po ukončení odběrů erozního smyvu proveden odběr vzorků svrchní vrstvy ornice (0 až 10 cm) pomocí půdní sondýrky a to vždy z horní a dolní části pokusné plochy. Výsledky zrnitostního rozboru jsou uvedeny v tab. 17. Z tab. 17 je zřejmé, že na všech typech PEO došlo ke smyvu jemných částic – F z horní části ploch, čímž se zde zvýšil podíl především písčité částic – S. Při podrobnějším rozboru jemných částic – F, bylo zjištěno, že na všech typech PEO v horní části ploch došlo ke smyvu především prachovité složky, jejíž podíl klesl přibližně o 4 až 5,5 % oproti výchozímu stavu. Smyvu naopak odolávala jílovitá složka, jejíž podíl se v horních částech ploch oproti výchozímu stavu zvýšil. Z celkového podílu jemných částic – F v dolních částech ploch je zřejmé, že na typech PEO bez GMA a Trinter došlo k velice mírné sedimentaci (0,16 a 0,3 %) a na typech PEO E7010 a E7020 k mírnému odnosu (0,15 a 0,09 %)

jemných částic – F. Změna v poměru jílovité, prachovité a písčité složky se projevila i v zatřídění dle trojúhelníkového diagramu zrnitosti půd – prachovitá jílovitá hlína.

Tab. 17 Výsledné hodnoty zrnitostního rozboru použité ornice a odebraných vzorků ornice po ukončení pokusu. Podbarvené hodnoty značí vyšší hodnoty v rámci daného typu PEO

Typ PEO	Část pokusné plochy	Jemné částice	Hrubé částice		Jílovitá složka	Prachovitá složka	Písčitá složka	Štěrkovitá složka
		F	S	G	< 0,002	0,002 - 0,05	0,05 - 2,0	2,0 - 63,0
bez GMA	horní	92,90	6,79	0,31	30,26	62,64	6,79	0,31
	dolní	93,43	6,33	0,24	28,93	64,50	6,33	0,24
E7010	horní	92,59	7,10	0,32	29,34	63,25	7,10	0,32
	dolní	93,12	6,66	0,22	29,36	63,76	6,66	0,22
E7020	horní	91,83	7,93	0,24	29,92	61,92	7,93	0,23
	dolní	93,18	6,61	0,20	29,09	64,09	6,61	0,20
Trinter	horní	92,86	6,88	0,26	29,19	63,67	6,88	0,26
	dolní	93,57	6,24	0,19	29,96	63,62	6,24	0,19
Ornice		93,27	6,44	0,29	25,60	67,67	6,44	0,29

5.2.1.4 Změna živin ve svrchní vrstvě ornice

Z odebraných vzorků pro rozbor zrnitostního složení svrchní vrstvy ornice v horní a dolní části pokusných ploch byly zároveň provedeny rozborů agrochemických vlastností (tab. 18 na str. 86). Použitá ornice na založení pokusných ploch podle vyhlášky č. 275/1998 Sb., o agrochemickém zkoušení zemědělských půd a zjišťování půdních vlastností lesních pozemků měla vyhovující obsah P, dobrý obsah K a velmi vysoký obsah Mg. Z výsledných rozborů agrochemických vlastností odebraných vzorků je zřejmé, že téměř u většiny stanovovaných živin bylo zaznamenáno jejich snížení. Výsledek je ve shodě s Morgan (2005) a Janečkem et al. (2008), kteří uvádějí, že společně s jemnou frakcí půdních částic dochází k odnosu organické hmoty, humusu a minerálních živin. Vzhledem k charakteru dat lze jen těžko vyvozovat podrobnější závěry o vlivu působení eroze na odnos živin z pokusných ploch. Janeček et al. (2008) uvádí, že vlivem selektivního vymývání bazických živin (K, Ca a Mg) dochází k zvyšování kyselosti půd ovlivněných erozí. Toto tvrzení lze částečně akceptovat na zemědělských půdách, kde vlivem odnosu vrstvy ornice se obnažuje a přiorává kyselejší podorničí. Na svazích, které se primárně chrání před působením erozních činitelů, se však orba nepředpokládá. Proto by zde nemělo docházet ani k zásadním změnám v pH, jak výsledky rozborů potvrzují.

Tab. 18 Výsledné hodnoty agrochemického rozboru použité ornice a odebraných vzorků ornice po ukončení pokusu. Podbarvené hodnoty značí vyšší hodnoty v rámci daného typu PEO

Typ PEO	Část pokusné plochy	pH	P	K	Mg	Ca	N _{min}
bez GMA	horní	7,42	45,30	193,53	428,40	6493,70	3,72
	dolní	7,47	42,80	212,40	420,00	6621,00	4,78
E7010	horní	7,47	43,70	192,15	443,90	6974,50	4,85
	dolní	7,45	46,38	217,40	420,20	6701,75	4,61
E7020	horní	7,47	45,49	185,28	406,23	6713,50	3,93
	dolní	7,48	46,39	235,03	429,90	6902,70	4,09
Trinter	horní	7,44	45,71	197,30	426,28	6414,50	4,18
	dolní	7,40	42,80	214,83	417,75	6550,50	4,25
Ornice		7,46	45,12	238,40	429,60	6754,00	6,38

5.2.2 Působení simulace povrchového odtoku ronem vody

Během realizace terénního experimentu byla na pokusných plochách provedena SPORV ze žlabu umístěného nad pokusnými plochami. Frekvence zatěžování pokusných ploch byla na jednotlivých skupinách pokusných ploch (celkem 4 skupiny) zvolena dle schématu uvedeného v tab. 2 na str. 56. Snahou bylo zjistit, jaký bude mít zvolená frekvence zatěžování pokusných ploch SPORV vliv na množství erozního smyvu a objem povrchového odtoku. Výsledné hodnoty množství erozního smyvu (včetně podílu jednotlivých zrnitostních frakcí) a objemu povrchového odtoku jsou uvedeny v tab. 19 na str. 87.

Erozní smyv

Během první realizace SPORV dne 2. 7. 2013 na 1. skupině pokusných ploch byl nejnižší erozní smyv zaznamenán na typu PEO s E7010. Zastoupení jednotlivých zrnitostních frakcí v odebraných vzorcích erozního smyvu byly u všech typů PEO velice podobné s převahou jemnozrnné frakce – F. Při druhé realizaci SPORV dne 15. 8. 2013 došlo v rámci 1. skupiny pokusných ploch k snížení množství erozního smyvu na všech typech PEO, přičemž v porovnání s první realizací SPORV došlo k největšímu snížení množství erozního smyvu na typu PEO s Trinter (o 97 %), zatímco na typu PEO s E7020 došlo k nejmenšímu snížení (o 52 %). Při porovnání vlivu frekvence zatěžování na množství erozního smyvu je zřejmé, že na 2. skupině pokusných ploch, která byla zatížena až druhou realizací SPORV, došlo k výrazně nižšímu eroznímu smyvu na všech typech PEO než v případě první realizace SPORV na 1. skupině pokusných ploch. Nejvýznamnější vliv frekvence zatěžování na velikost erozního smyvu se projevil u typu PEO s E7020 (o 94 %). V rámci druhé realizace SPORV odebrané vzorky erozního smyvu obsahovaly na obou skupinách ploch vysoké procento jemnozrnné frakce – F, kromě typu PEO s E7020 z 1. skupiny pokusných ploch, jehož erozní smyv měl obdobné zastoupení zrnitostních frakcí jako v případě první realizace SPORV. Třetí realizace (dne 28. 10. 2013) a čtvrtá realizace (dne 6. 5. 2014) SPORV nezpůsobily ani na jednom z typů PEO erozní smyv.

Tab. 19 Množství erozního smyvu (M), podíl jednotlivých zrnitostních frakcí¹² (jemnozrné – F a písčité – S) a objemu povrchového odtoku (V) v rámci SPORV

Datum simulace povrchového odtoku		2. 7. 2013				15. 8. 2013				28. 10. 2013		6. 5. 2014	
Měřené hodnoty		M	F	S	V	M	F	S	V	M	V	M	V
		[g.m ⁻²]	[%]	[%]	[l]	[g.m ⁻²]	[%]	[%]	[l]	[g.m ⁻²]	[l]	[g.m ⁻²]	[l]
1. skupina pokusných ploch	bez GMA	117,8	66,6	33,4	144,0	10,2	93,9	6,1	130,0	0,0	12,0	0,0	38,0
	E7010	83,6	69,8	30,2	140,0	8,7	95,3	4,7	128,0	0,0	0,0	0,0	36,0
	E7020	439,1	67,7	32,3	152,0	209,9	60,9	39,1	146,0	0,0	0,0	0,0	40,0
	Trinter	258,8	65,0	35,0	148,0	7,9	92,9	7,1	138,0	0,0	0,0	0,0	30,0
2. skupina pokusných ploch	bez GMA					7,3	90,7	9,3	126,0	0,0	10,0	0,0	36,0
	E7010	--	--	--	--	6,9	89,5	10,5	124,0	0,0	0,0	0,0	30,0
	E7020					12,2	87,0	13,0	140,0	0,0	0,0	0,0	36,0
	Trinter					4,7	91,5	8,5	130,0	0,0	0,0	0,0	26,0
3. skupina pokusných ploch	bez GMA									0,0	12,0	0,0	32,0
	E7010									0,0	0,0	0,0	32,0
	E7020	--	--	--	--	--	--	--	--	0,0	0,0	0,0	36,0
	Trinter									0,0	0,0	0,0	34,0
4. skupina pokusných ploch	bez GMA											0,0	34,0
	E7010											0,0	30,0
	E7020	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,0	32,0
	Trinter											0,0	30,0

¹² Štěrkovitá frakce (G) nebyla zastoupena v žádném vzorku odebraného erozního smyvu.

Vzhledem k omezenému počtu pokusných ploch nemohly být získané výsledky vyšetřeny statistickými postupy, a proto nelze spolehlivě konstatovat, zdali některý z typů PEO má lepší protierozní účinek vůči působení SPORV, i když se typ PEO s E7010 jeví jako nejlepší.

Možné příčiny poklesu erozního smyvu během realizace SPORV a důvody rozdílů mezi jednotlivými typy PEO jsou uvedeny v podkapitole 6.2.2.

Povrchový odtok

Nejnižší množství objemu povrchového odtoku v průběhu první realizace SPORV dne 2. 7. 2013 měl typ PEO s E7010, naopak největší objem povrchového odtoku byl zaznamenán u typu PEO s E7020. Objem povrchového odtoku se při druhé realizaci SPORV dne 15. 8. 2013 na 1. skupině pokusných ploch snížil pouze o jednotky až nižší desítky litrů oproti první realizaci SPORV, přičemž největší objem povrchového odtoku stále vykazoval typ PEO s E7020. Frekvence zatěžování se u 1. a 2. skupiny pokusných ploch při druhé realizaci SPORV projevila jen minimálně (v nižších jednotkách litrů). Během třetí realizace SPORV dne 28. 10. 2013 došlo k povrchovému odtoku z pokusných ploch pouze u typu PEO bez GMA (10 až 12 litrů). Během čtvrté realizace SPORV dne 6. 5. 2014 došlo k povrchovému odtoku vody z pokusných ploch do sedimentačních nádrží u všech typů PEO v rámci každé skupiny ploch. Objem povrchového odtoku se pohyboval v nižších desítkách litrů (26 až 40 litrů). Rozdíl mezi jednotlivými typy PEO a zároveň vliv frekvence zatěžování pokusných ploch nebyl výrazný.

Jak již bylo uvedeno výše, vzhledem k omezenému počtu pokusných ploch nebylo možné získané výsledky vyšetřit statistickými postupy, a proto žádný z typů PEO nebyl označen za lepší či horší z hlediska efektu na snížení objemu povrchového odtoku z pokusných ploch.

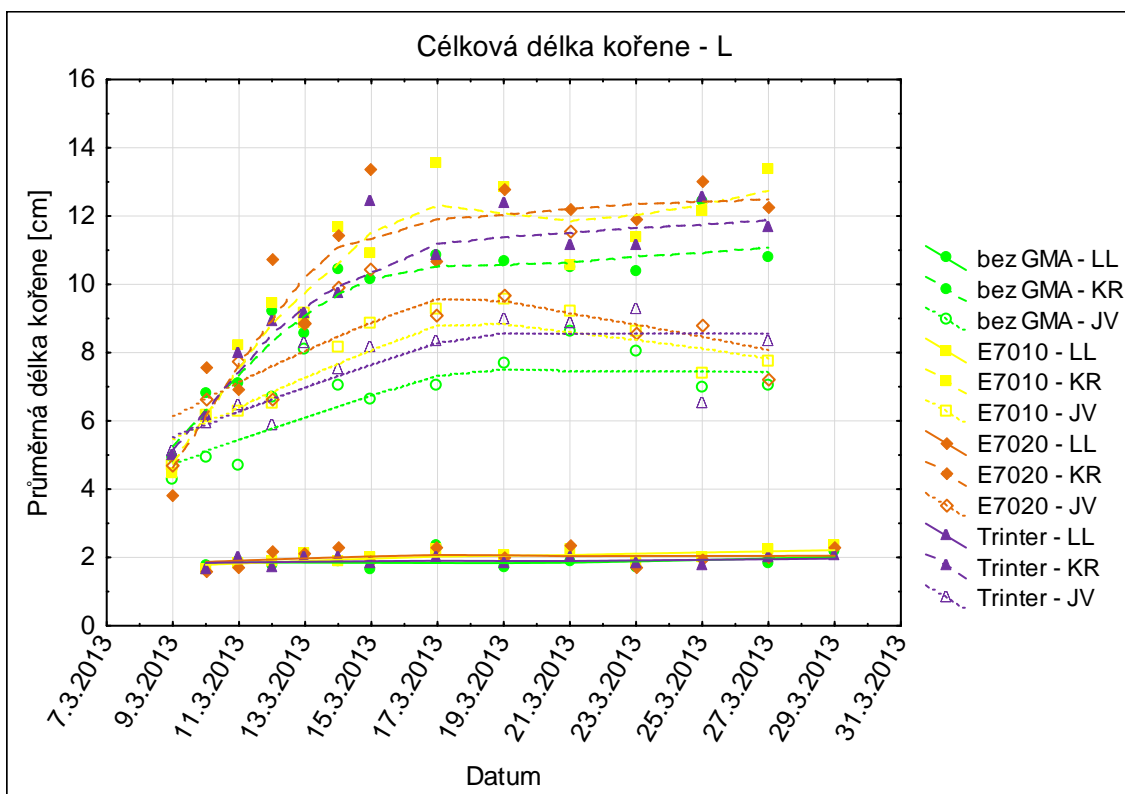
Možné příčiny změny objemů povrchového odtoku během realizace SPORV a důvody rozdílů mezi jednotlivými typy PEO jsou uvedeny v podkapitole 6.2.2.

6 Diskuze

6.1 Laboratorní experiment

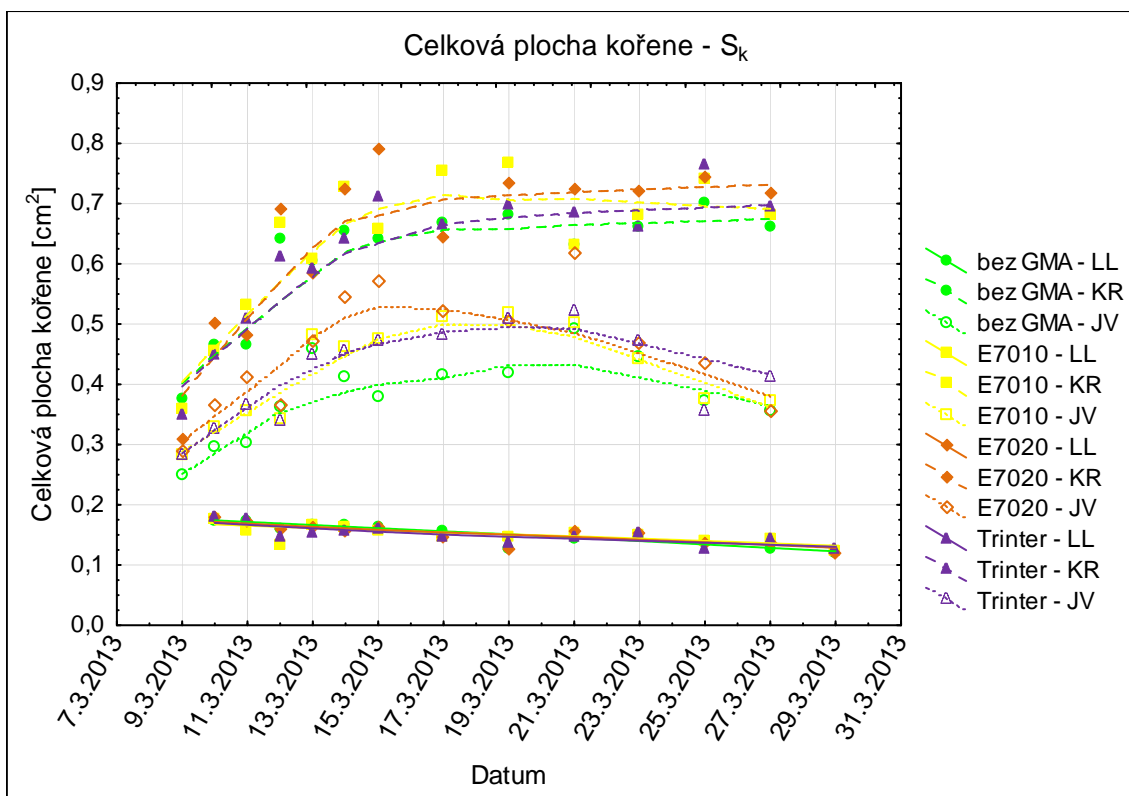
Z laboratorního experimentu vyplynulo, že přítomnost GMA v půdním profilu negativně neovlivnila růst a vývoj kořenového systému zvolených travních odrůd. Naopak na pokusných plochách s GMA dosahovaly naměřené hodnoty sledovaných veličin vyšších (ale statisticky na hladině 0,05 nevýznamných) hodnot u všech testovaných travních odrůd (obr. 24, 25, 26 a 27¹³). Statisticky významný rozdíl oproti případu bez GMA byl prokázán pouze u kombinace E7020 s JV (tab. 4 na str. 62). Provedený laboratorní experiment tak na základě podrobnějšího sledování růstu a vývoje kořenového systému potvrdil výsledky předešlého výzkumu uvedené v publikaci Šlezinger et al. (2011).

LL v rámci laboratorního pokusu vyklíčila o den později než KR a JV a zároveň u LL měřené veličiny dosahovaly nejnižších hodnot (obr. 24, 25, 26 a 27). Tento fakt se shoduje s obecně charakteristickým vývojem travního druhu lipnice luční (*Poa pratensis* L.), který vzchází později a má pomalý vývin (Peeters, 2004; Hrábě et al., 2009). Oproti tomu měřené veličiny u KR dosahovaly vyšších hodnot než u JV, přičemž dle Peeters (2004) a Hráběho et al. (2009) je pro travní druh jílek vytrvalý (*Lolium perenne* L.) charakterističtější rychlejší vzházení a vývoj než u travního druhu kostřava rákosovitá (*Festuca arundinacea* Schreb.) (obr. 24, 25, 26 a 27).

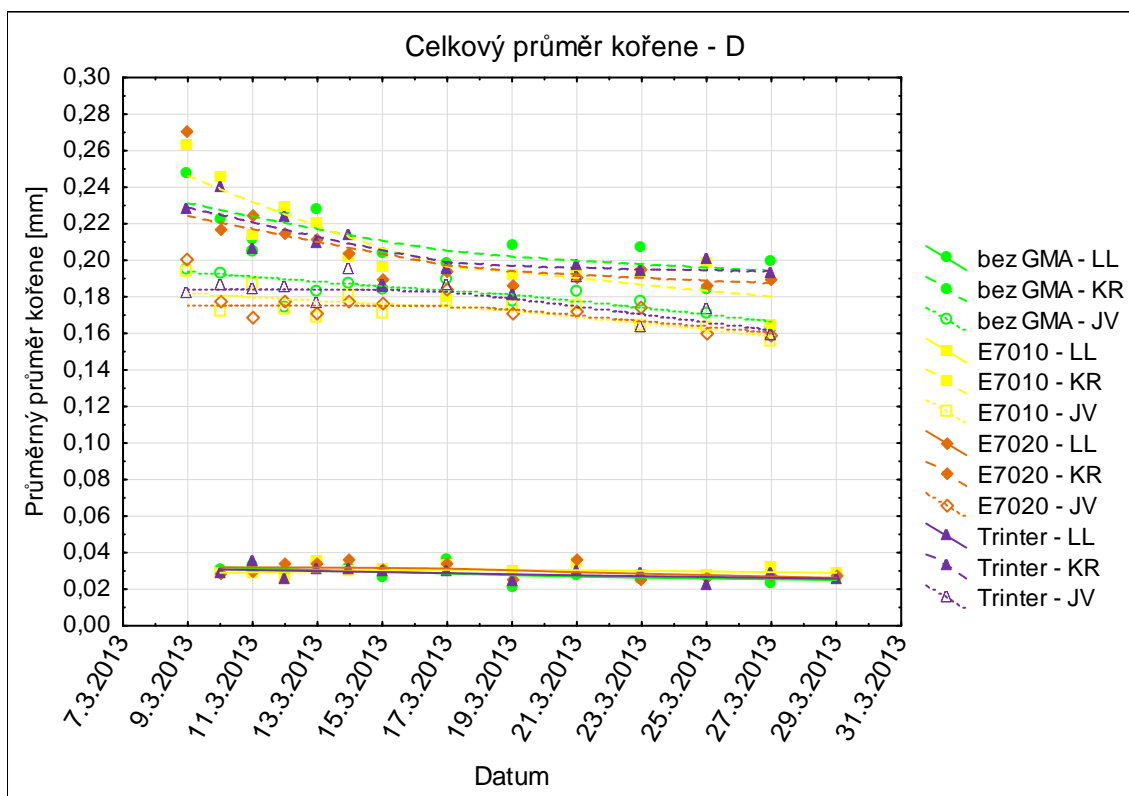


Obr. 24 Graf průběhu \bar{X}_t měřené veličiny L testovaných travních odrůd (LL, KR a JV) na jednotlivých podkladech (E7010, E7020, Trinter a případu bez GMA).

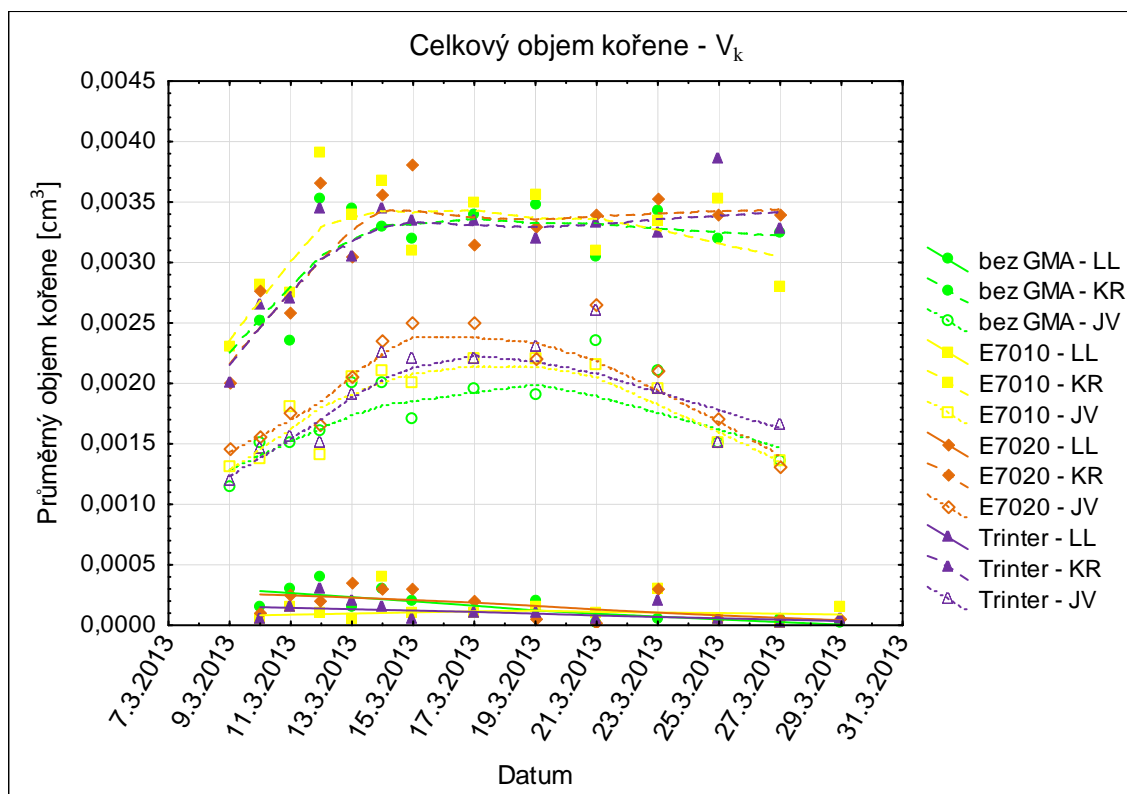
¹³ Pro proložení dat u všech grafů na obrázcích byla opět použita funkce Lowess Smoothing v programu STATISTICA Cz 12.



Obr. 26 Graf průběhu \bar{X}_t měřené veličiny S_k testovaných travních odrůd (LL, KR a JV) na jednotlivých podkladech (E7010, E7020, Trinter a případu bez GMA).



Obr. 25 Graf průběhu \bar{X}_t měřené veličiny D testovaných travních odrůd (LL, KR a JV) na jednotlivých podkladech (E7010, E7020, Trinter a případu bez GMA).



Obr. 27 Graf průběhu \bar{X}_t měřené veličiny V_k testovaných travních odrůd (LL, KR a JV) na jednotlivých podkladech (E7010, E7020, Trinter a případu bez GMA).

Pro porovnání růstu a vývoje kořenového systému použitých travních odrůd mezi sebou v rámci jednotlivých podkladů byla použita dvoufaktorová analýza rozptylu s interakcemi, kde kategorií nezávislých proměnných (faktorů) byly testované travní odrůdy a typy podkladů (případy s GMA a bez GMA). Z výsledků vyplynulo, že naměřené hodnoty sledovaných veličin se mezi jednotlivými travními odrůdami statisticky významně liší (na hladině 0,05) na všech typech podkladů. Analýzou byly potvrzeny již výše zmíněné poznatky, že největší růst a vývoj kořenového systému na všech typech podkladů měla KR a nejnižší LL.

Vývoj měřených veličin u všech testovaných travních odrůd měl podobný charakter. Během prvních sedmi odběrů po vyklíčení obilek docházelo k nárůstu měřených veličin L , S_k a V_k , přičemž veličina D (průměrný průměr kořene) vykazovala klesající charakter. Na základě podrobnější analýzy rozdělení naměřených veličin do 21 intervalů vztažených k veličině D bylo zjištěno, že s časem přibývalo kořenů s nižším průměrem, což bylo spojeno s tvorbou nových jemnějších kořenů, a proto docházelo k poklesu průměrného průměru kořene (D). V následujících šesti odběrech docházelo k pomalejšímu růstu až k mírné stagnaci vývoje kořenového systému.

Pomalejší až mírně stagnující růst kořenového systému byl způsoben zřejmě důsledkem vzájemného spolupůsobení několika faktorů – světlo, množství zásobních látek a mocnost použité zeminy. Obilka trav se stává autotrofní po vyvinutí prvního lístku a vyčerpání zásobních látek endospermu (Míka et al., 2002). Tehdy začíná být klíčící rostlina fotosynteticky aktivní (Whalley et al., 1966 in Smart et al., 2003)

a jedním z důležitých faktorů ve tvorbě asimilátů je světlo. Laboratorní experiment byl realizován v březnu roku 2013, který vykazoval silně nadprůměrné pokrytí oblohy oblačností a sluneční svit představoval pouze 88,5 % dlouhodobého normálu (infomet.cz). Z tohoto důvodu mohlo docházet během dnů se sníženou tvorbou asimilátů k odčerpávání zásobních látek z kořenů, které buď zpomalily svůj růst, anebo odumřely. Následně v případě vyššího slunečního svitu docházelo k tvorbě nových kořenů. Tímto by byla vysvětlena i rozkolísanost hodnot naměřených veličin především po prvních sedmi realizovaných odběrech. Dalším důvodem rozkolísanosti naměřených hodnot po prvním týdnu od vyklíčení obilek mohla být zvyšující se kompetice mezi jedinci (u JV a KR) důsledkem omezené mocnosti (5 cm) použité zeminy na pokusných plochách. Fiala (1993) a Míka et al. (2002) uvádějí, že více než 90 % podzemní biomasy je v prvních 0 až 15 cm půdního profilu, přičemž 60 až 70 % se nachází ve vrstvě 0 až 5 cm. Autoři Troughton (1957), Simon & Collison (2002), Schenk & Jackson (2002), Norris et al. (2008), Hrabě et al. (2009) se shodují, že největší hustota jemných kořenů se nachází ve svrchních 0 až 20 cm půdy. Z výše uvedeného vyplývá, že pro dlouhodobější sledování ovlivnění růstu a vývoje kořenového systému přítomností GMA v půdním profilu by bylo vhodné zvolit vyšší mocnost použité zeminy, alespoň 15 cm jak uvádí Kasprzak et al. (1980). Výše zmíněné možné příčiny zjištěného vývoje měřených veličin u sledovaných travních odrůd byly zkontrolovány s doc. Ing. Stanislavem Hejdukem, Ph.D. (ÚVZP AF MENDELU).

Při provádění odběru vzorků rostlin pro obrazovou analýzu byl zaznamenán rozdíl v náročnosti odběru z jednotlivých GMA a případu bez GMA. Obecně u všech zvolených travních odrůd byl odběr ze všech GMA náročnější (porušení kořenů přetržením¹⁴ především v pozdější fázi experimentu) než u případu bez GMA. Možnou příčinou problematičtějšího odběru vzorků z jednotlivých GMA oproti případu bez GMA mohla být propletenost kořenového systému do struktury GMA, která by měla vést k tvorbě již zmíněné žádoucí armované zemní konstrukce. V rámci odběrů z GMA byl snadnější odběr vzorků rostlin z Trinter než z E7010 či E7020 (mezi E7010 a E7020 znatelný rozdíl nebyl). Důvodem jednoduššího odběru vzorků z Trinter může být rozdílná struktura GMA oproti E7010 či E7020. Struktura Trinter (obr. 1 na str. 45) má třívrstvý zvlněný charakter – spodní síť (víceméně s čtvercovými oky), střední síť (natočena o 45° vůči spodní síti, čtvercová oka) a trojrozměrná (zvlněná) horní síť (se stejným charakterem a natočením ok jako spodní síť). Oproti tomu struktura E7010 i E7020 je tvořena rozptýlenými polyamidovými vlákny v trojrozměrné struktuře (obr. 1). Z tohoto důvodu při vertikálním prorůstání kořenového systému skrze GMA lze předpokládat, že kořenový systém během prorůstání E7010 či E7020 narazí na některé z nepravidelně rozptýlených vláken. Oproti tomu u Trinter je větší předpoklad, že kořenový systém proroste volně oky jednotlivých sítí.

¹⁴ Kontrola přetržení kořenového systému byla prováděna již během samotného odběru rostlin. Další kontrola byla prováděna v programu WinRHIZO. Vzorky rostlin s poškozeným kořenovým systémem byly vyřazeny. Díky provedeným kontrolám je možné předpokládat, že poškozené kořeny vlivem odběru nebyly příčinou rozkolísanosti hodnot měřených veličin.

Program WinRHIZO použitý k obrazové analýze kořenů ve svém výstupu standardně poskytuje informace o celkové délce (L), povrchu (S_k) a objemu kořenů (V_k) vztažených k intervalům průměru kořene (D), jejichž velikost může být uživatelem libovolně nastavena. Z provedených výpočtů korelací měřených veličin (L , S_k , D a V_k) vyplynulo, že u JV a KR není nutné všechny veličiny sledovat. Naopak u LL je vhodné veličiny sledovat všechny. Vzhledem k tomu, že informace o výše uvedených veličinách jsou standardním výstupem z programu WinRHIZO a z důvodu ucelené představy o tom, jak přítomnost GMA v půdním profilu celkově ovlivňuje růst a vývoj kořenového systému jednotlivých travních odrůd, je vhodné i nadále vyhodnocovat všechny uvedené veličiny.

V rámci laboratorního experimentu, kromě obrazové analýzy kořenů odebraných vzorků rostlin, bylo snahou měřit přírůst kořenového systému mechanicky posuvným měřítkem, jak uvádí Šlezinger et al. (2011). Od mechanického měření bylo během laboratorního experimentu opuštěno z následujících důvodů:

- některé kořeny po dosažení podkladního skla se opět stočily zpět do půdního profilu – zhoršení přesného změření přírůstu kořene,
- postupné splétání jednotlivých kořenů na podkladním skle – znemožnění přesné identifikace jednotlivých měřených kořenů,
- úhyn některých označených kořenů – pokles velikosti výběrového souboru,
- kořenový systém LL po celou dobu experimentu nedosáhl podkladního skla – srovnání přírůstu pouze mezi JV a KR.

I přes tato úskalí mechanického měření přírůstu kořenů, lze ze získaných výsledků konstatovat, že kořenový systém JV a KR přirůstal obdobně a kořeny dosáhly podkladního skla za stejný časový úsek od vyklíčení travního semene.

6.2 Terénní experiment

6.2.1 Působení přirozených srážek

Travní porost je schopen poskytnout adekvátní protierozní ochranu půdnímu povrchu před působením erozních činitelů, a proto je v rámci PEO svahů často využíván (Coppin & Richards, 1990; Theisen, 1992; Morgan & Rickson, 1995; Gyssels et al., 2005; Morgan, 2005; Morgan, 2007; Janeček et al., 2008; Norris et al., 2008). Kasprzak et al. (1980), Rickson et al. (2006), Morgan (2007) a Bhattacharyya et al. (2009) se shodují, že náležitou protierozní ochranu je travní porost schopen plnit až po první či druhé vegetační sezoně od vysetí. Avšak částečnou protierozní ochranu je travní porost schopen poskytovat již tři měsíce od svého vzejití (Kasprzak et al., 1980; Kasprzak et al., 1980; Halva et al., 1984; Hrábě et al., 1990; Knot et al., 2010; Šlezinger & Uhmánová, 2010). Z výše uvedeného vyplývá, že i přes poměrně rychlou schopnost travního porostu poskytnout alespoň částečnou protierozní ochranu, je nechráněný půdní povrch minimálně tři měsíce vystaven působení erozních činitelů. Během tohoto kritického období může dojít k nežádoucí erozi půdy, která ohrožuje samotné vzcházení travního semene, a tedy i celý vývoj kvalitního travního porostu. Aplikace protierozních výrobků má zabezpečit okamžitou ochranu půdního povrchu, ochraňovat vysetou travní směs a podporovat vzcházení a tvorbu kvalitního travního porostu (Theisen, 1992; Rustom & Weggel, 1993; Landcaster & Austin, 1994;

Allen, 1996; Gray & Sotir, 1995; Ziegler & Sutherland, 1998; Mitchell et al., 2003; Davies, et al., 2006; Rickson et al., 2006; Sutherland & Ziegler, 2006; Bhattacharyya, 2009; Bhattacharyya et al., 2010a,b).

Zlepšující účinek protierozních výrobků vůči holému půdnímu povrchu

Výsledky laboratorních i terénních experimentů autorů Ingold & Thomson (1986), Fifield (1988), Cazzuffi et al. (1994) a Ziegler & Sutherland (1998) potvrzují, že díky aplikaci protierozních výrobků (z přírodních i syntetických materiálů) je půdní povrch méně náchylný k erozi, než když je ponechán bez ochrany. Rickson et al. (2006) však poukazuje, že použité typy trvalých protierozních georohoží (Enkamat 7010/1 a Tensarmat), které byly prosypány a přesypány tenkou vrstvou zeminy přinesly při testování účinku dešťových kapek v některých případech horší výsledky než holý půdní povrch. Z hlediska objemu povrchového odtoku naopak totožné GMA při stejném postupu aplikace do půdního profilu vykazovaly nejmenší hodnoty ze všech testovaných protierozních výrobků. Rickson et al. (2006) jako vysvětlení uvádí, že zemina ve struktuře GMA je nakypřená a méně konzolidovaná, a proto lze předpokládat zvýšenou míru infiltrace vody do půdy, a tedy i následný nižší objem povrchového odtoku.

V rámci terénního experimentu bylo možné porovnat účinek použitých GMA vůči holému půdnímu povrchu pouze z prvního odběru erozního smyvu, jelikož první obilky vyseté protierozní travní směsí začaly vzcházet dne 22. 5. 2013 (tedy 6 dní po výsevu a 1 den před realizací prvního odběru). Velikost erozního smyvu na všech typech PEO s GMA dosahovala nižších hodnot než na typu PEO bez GMA. Pro otestování, jestli se střední hodnoty erozního smyvu na hladině 0,05 statisticky významně neliší, byla zvolena jednofaktorová ANOVA, kde třídícím faktorem byla daná GMA či případ bez GMA. Výsledkem bylo zamítnutí nulové hypotézy, tj, alespoň jedna dvojice středních hodnot erozního smyvu se statisticky významně liší. Na základě provedeného Fisherova LSD testu mnohonásobného porovnání vyplynulo, že statisticky významný rozdíl středních hodnot erozního smyvu je mezi typem PEO s Trinter a typem PEO bez GMA.

Výsledky analýzy erozního smyvu v rámci prvního odběru potvrdily závěry Ingold & Thomson (1986), Fifield (1988) a Ziegler & Sutherland (1998). Všechny typy PEO s GMA měly menší erozní smyv než typ PEO bez GMA a v případě typu PEO s Trinter byl erozní smyv statisticky významně nižší. Upozornění z výsledků Rickson et al. (2006) na možnou vyšší náchylnost k eroznímu účinku dešťových kapek v případě GMA aplikovaných do půdního profilu se nepotvrdila. Nicméně je důležité upozornit, že Rickson et al. (2006) testoval pouze samotný erozní účinek dešťových kapek bez vlivu povrchového odtoku (pomocí tzv. splash cup technique) na pokusných plochách s nulovým sklonem.

Spolupůsobení protierozních výrobků a travního porostu

Godfrey et al. (1993) a Northcutt (1993) ve svých výzkumech dospěli k závěru, že ochrana svahů, která využívá kombinaci protierozních výrobků (z přírodních i syntetických materiálů) s travním porostem, má vyšší protierozní účinek než samotný travní porost. Zároveň travní porost na protierozních výrobcích dle Godfrey et al. (1993) vykazoval lepší parametry v průběhu růstu (vyšší hustotu) než na plochách bez protierozních výrobků.

V rámci terénního experimentu by se tedy dalo předpokládat, že dle výsledku, který přinesla statistická analýza prvního odběru a podle závěrů výzkumů Godfrey et al. (1993) a Northcutt (1993), budou typy PEO s GMA vykazovat stále vyšší protierozní účinek. Erozní smyv z typů PEO s GMA by tedy měl být i nadále nižší než z typu PEO bez GMA, kde protierozní ochranu plnil pouze rostoucí travní porost.

Výsledky provedených statistických analýz erozního smyvu jak za celé sledované období, tak za 1. a 2. období zvlášť, však tento předpoklad nepotvrdily a rozdíl ve velikosti erozního smyvu mezi jednotlivými typy PEO nebyl na hladině 0,05 statisticky významný. Velikost erozního smyvu za celé sledované období byla dokonce vyšší na typu PEO s E7010 (o 9 g.m²) a s E7020 (o 36 g.m²) než na typu PEO bez GMA. Pouze na typu PEO s Trinter byl celkový erozní smyv nižší (o 10 g.m²), ale na hladině 0,05 statisticky nevýznamný, než na typu PEO bez GMA.

Z grafu průběhu kumulace erozního smyvu za sledované období na obr. 14 na str. 72 vyplynulo, že s postupem času se velikost kumulovaného erozního smyvu na jednotlivých typech PEO vyrovnávala, po čtvrtém odběru se pořadí mezi jednotlivými typy PEO přestalo měnit, v kumulaci erozního smyvu došlo k znatelnému poklesu a následný průběh kumulace erozního smyvu na všech typech PEO měl až do ukončení terénního experimentu obdobný vývoj. Jako možné příčiny poklesu velikostí erozního smyvu byly uvažovány změny v charakteru nebezpečných dešťů – ND (pokles úhrnné kinetické energie celkové vydatnosti deště W_K či absence ND) a zvyšující se protierozní účinek vysetého travního porostu. Vyhodnocení průběhu ND prokázalo, že ND se vyskytovaly téměř mezi všemi provedenými odběry (pouze mezi předposledním a posledním odběrem nebyl ND zaznamenán) a ND s vysokými W_K se vyskytly v období před i po čtvrtém odběru erozního smyvu, a proto vliv případné změny charakteristik ND na pokles erozního smyvu byl zamítnut. Naopak možnost, že příčinou poklesu erozního smyvu je zvyšující se účinek vysetého travního porostu, byla ve shodě s literaturou přijata. Jak již bylo uvedeno, autoři Kasprzak et al. (1980), Halva et al. (1984), Hrábě et al. (1990), Knot et al. (2010) a Šlezinger & Uhmánová (2010) zmiňují, že travní porost po 3 měsících od vzejití je již schopen plnit částečně svou protierozní funkci. Vysetý travní porost na pokusných plochách v době výskytu ND v období mezi čtvrtým a pátým odběrem erozního smyvu měl stáří přibližně 2,5 měsíce. Velikost sumy W_K těchto dvou ND dosahovala čtvrté nejvyšší hodnoty ze všech hodnot W_K za sledované období, přičemž v množství erozního smyvu byl zaznamenán pokles na všech typech PEO. Stáří travního porostu v době výskytu ND v období mezi pátým a šestým odběrem, který měl druhou největší hodnotu W_K za sledované období, bylo téměř 3,5 měsíce a velikost erozního smyvu opět poklesla. Z uvedeného vyplývá, že vysetý travní porost začal skutečně mít od třetího měsíce po vzejití znatelný zvyšující se protierozní účinek.

Analýza hlavních faktorů (PCA) potvrdila (graf na obr. 22 na str. 83), že stáří travního porostu negativně a velikost W_K ND pozitivně korelují s hodnotami erozního smyvu na všech typech PEO. Přičemž nejsilnější pozitivní korelace mezi W_K ND a erozním smyvem se projevila u typu PEO s Trinter a s E7020, zároveň u těchto dvou typů PEO docházelo k nejslabší negativní korelaci mezi stářím travního porostu a erozním smyvem. Jelikož velikost erozního smyvu za celé sledované období a téměř v každém realizovaném odběru byla u typu PEO s E7020 největší, výsledek analýzy hlavních faktorů se dal předpokládat. Analýza naopak přinesla zajímavé výsledky

z pohledu typu PEO s Trinter, u kterého byl zaznamenán nejnižší erozní smyv za celé sledované období ze všech typů PEO a mohl by být považován za nejlepší aplikovaný typ PEO. Avšak při podrobném rozboru hodnot erozních smyvů za 1. období (tab. 16 na str. 79) je zřejmé, že u všech typů PEO docházelo ke snížení velikosti erozního smyvu se zvyšujícím se stářím vyšetěho travního porostu, ale pouze u typu PEO s Trinter byl erozní smyv u čtvrtého odběru vyšší než v případě prvního odběru. Z uvedeného lze tedy usuzovat, že i přes celkově nejnižší velikost erozního smyvu za celé sledované období typ PEO s Trinter do čtvrtého odběru (tedy během kritického období z hlediska protierozní ochrany půdního povrchu, kdy vyšetý travní porost ještě neplnil protierozní účinek) prokazoval nejvíce rozkolísanou protierozní ochranu ze všech aplikovaných typů PEO. Další veličiny, které lze ze vztahu velikosti erozního smyvu a W_K ND nebo stáří vyšetěho travního porostu odvodit (indexy erozního smyvu) rozkolísaný vývoj protierozní ochrany typu PEO s Trinter a zároveň i typu PEO s E7020 během 1. období taktéž potvrdily.

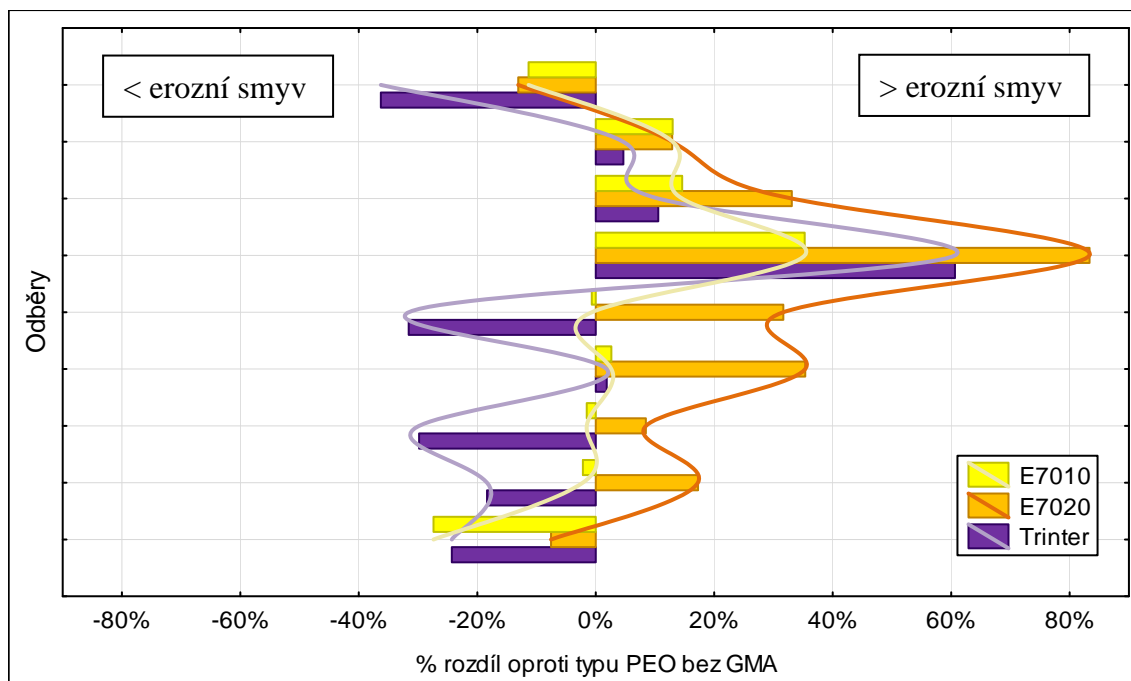
Vliv struktury GMA na protierozní ochranu pokusných ploch

Z provedených analýz vlivu W_K ND a stáří vyšetěho travního porostu vyplynulo, že zvyšujícím se stářím travního porostu se vliv hodnoty W_K ND na velikosti erozních smyvů na všech typech PEO snižoval. Vyhodnocení prvního odběru erozního smyvu naznačovalo, že typy PEO s GMA budou plnit lepší protierozní ochranu než typ PEO bez GMA a díky zvyšujícímu se ochrannému účinku vzrůstajícího travního porostu se bude jejich protierozní ochrana zlepšovat. Další odběry erozních smyvů během 1. období však byly na všech typech PEO s GMA vyšší než na typu PEO bez GMA. Vzhledem k shodnému technologickému postupu při zakládání všech pokusných ploch (použití stejné ornice i protierozní travní směsi) z uvedeného vyplynulo, že právě přítomnost GMA v půdním profilu a charakter jejich struktury byly možnou příčinou rozdílného smyvu oproti typu PEO bez GMA.

Pokusné plochy pro typ PEO bez GMA měly pouze jednu homogenní vrstvu ornice. Na pokusných plochách s GMA bylo možné vylíšit vrstvy dvě – ve spodu urovnanou homogenní vrstvu ornice, nad kterou se nacházela nakypřená vrstva, která vznikla prosypáním struktury GMA ornici. Morgan & Rickson (1995) uvádějí, že prosypáním zeminy skrz GMA se rozbíjí původní struktura zeminy a vytváří se hrudky půdy, které se vlivem erozního působení dešťových kapek rychleji rozpadávají. Nakypřená vrstva dle výsledků Rickson et al. (2006) má vyšší schopnost infiltrace, a tím může docházet k nižšímu objemu povrchového odtoku. Nicméně vlivem přítomnosti nenakypřené vrstvy pod svrchní nakypřenou vrstvou se infiltrace vody zpomaluje, dochází k přesycování svrchní nakypřené vrstvy a k její zvýšené erozi (Morgan & Rickson, 1995). Zároveň se na rozhraní mezi vrstvami může vytvořit koncentrovaný podpovrchový odtok (Morgan & Rickson, 1995).

Morgan & Rickson (1995) uvádějí, že postupem času dochází ke konzolidaci nakypřené vrstvy – samotným působením dešťových kapek a kolmatací půdními částicemi, které jsou erozním působením dešťových kapek uvolňovány. Po zkonzolidování vrstvy zeminy ve struktuře GMA a vlivem prorůstání travního porostu se následně začínají projevovat pozitivní účinky armované zemní konstrukce (Coppin & Richards, 1990). V rámci terénního experimentu při porovnání velikosti erozních smyvů z typů PEO s GMA s typem PEO bez GMA, který postrádal nakypřenou svrchní

vrstvu, byl nejmenší rozdíl ve vývoji erozního smyvu vůči typu PEO bez GMA za sledované období zaznamenán na typu PEO s E7010 (obr. 28).



Obr. 28 Procentní rozdíly ve velikosti erozního smyvu na jednotlivých typech PEO s GMA vzhledem k velikosti erozního smyvu na typu PEO bez GMA. Pouze pro lepší vykreslení vývoje průběhu rozdílů velikostí erozních smyvů mezi jednotlivými typy PEO s GMA vůči typu PEO bez GMA bylo použito proložení pomocí funkce Spline v programu STATISTICA Cz 12.

Z grafu na obr. 28 je zřejmé, že k nejmenším výkyvům ve vývoji erozního smyvu oproti typu PEO bez GMA má typ PEO s E7010. Lze tedy předpokládat, že v případě typu PEO s E7010 došlo nejrychleji ke konzolidaci nakypřené vrstvy. Typ PEO s E7020 měl nejhorší průběh vývoje erozního smyvu oproti typu PEO bez GMA téměř po celou dobu sledovaného období. Vývoj erozního smyvu na typu PEO s Trinter byl v 1. období mezi typem PEO s E7010 a s E7020, zatímco v 2. období je možné pozorovat výrazně nižší velikosti erozního smyvu oproti typu PEO bez GMA.

Struktura E7010 a E7020 je obdobná, pouze E7020 je tlustší (20 mm) než E7010 (10 mm). Z vývoje erozního smyvu na typu PEO s E7010 a s E7020 by bylo možné usuzovat, že mocnější nakypřená vrstva v případě E7020 byla příčinou pomalejší konzolidace. Trinter má oproti E7010 a E7020 strukturu zvlněnou (obr. 1 na str. 45). Tloušťka Trinter je 25 mm v místech zvlnění horní sítě. V oblasti, kde jsou všechny 3 sítě spojeny, je tloušťka minimální (cca 3 mm). Díky zvlněné struktuře lze předpokládat i odlišný charakter nakypřené vrstvy na Trinter než na E7010 a E7020. Ve zvlněných částech by nakypření mělo být obdobné jako u E7010 a E7020, naopak v oblastech, kde se nachází spoj jednotlivých sítí, by se vrstva ornice dala označit za nenakypřenou a téměř homogenní s vrstvou ornice pod GMA. Při odhadu celkového objemu nakypřené vrstvy u Trinter se proto předpokládalo, že se pohyboval přibližně mezi objemem nakypřené vrstvy na E7010 a na E7020. Z tohoto důvodu byla i rychlost konzolidace brána v rozmezí mezi těmito typy GMA. Z grafu na obr. 28 by bylo možné

usuzovat, že po čtvrtém odběru erozního smyvu došlo na všech typech GMA ke konzolidaci nakypřené vrstvy (především na typu PEO s Trinter a s E7010). Postupnou konzolidací nakypřené vrstvy vlivem působení ND a homogenizací vrstev prokořeněním vyseté travní směsi se zároveň zvyšovalo pozitivní spolupůsobení vytvářejících se armovaných zemních konstrukcí.

Možné vysvětlení otázky, proč byl v rámci prvního odběru erozního smyvu zaznamenán na všech typech PEO s GMA nižší erozní smyv než v případě typu PEO bez GMA a proč během následujícího druhého až čtvrtého odběru byl erozní smyv větší, nelze z provedeného terénního experimentu spolehlivě určit. Jako případná možná vysvětlení lze uvést:

- při průchodu prvními dvěma ND, které se vyskytly 3. a 5. den po založení pokusných ploch, byla nakypřená vrstva na typech PEO s GMA bez půdní krusty, a proto by bylo možné předpokládat, že i když docházelo k rozpadu půdních hrudek, převládala infiltrace srážkové vody. U typu PEO bez GMA byl půdní povrch při průchodu prvními dvěma ND taktéž bez půdní krusty, nicméně použitá vrstva ornice byla homogenní bez nakypření. Lze předpokládat, že infiltrace srážek nebyla tak vysoká jako u typů PEO s GMA a docházelo k vyššímu odnosu půdních částic;
- při průchodu 3. a 4. ND byla zřejmě na všech typech PEO vytvořena půdní krusta. Při narušení půdní krusty po průchodu ND byla na typech PEO s GMA odkryta nížeji ležící nakypřená vrstva, která snadněji podléhá erozi, a i když zároveň mohla odkrytím nakypřené vrstvy stoupnout infiltrace vody, převažovala eroze odkryté nakypřené půdy. Na typu PEO bez GMA při narušení půdní krusty však snadněji erodovatelná nakypřená vrstva odkryta nebyla a celková eroze byla nižší;
- během průchodu 5. a 6. ND mělo působení ND na jednotlivé typy PEO obdobný účinek jako u 3. a 4. ND, přičemž mezi 5. a 6. ND byl pouze 1 den bez dešťových srážek a 6. ND trval několik hodin. Na typech PEO s GMA mohlo dojít k situaci, kterou popisuje Rickson & Morgan (1995) a to k přesycení nakypřené vrstvy a k její zvýšené erozi;
- během dalších ND se na všech typech PEO projevil rostoucí ochranný účinek travního porostu. Na typech PEO s GMA se zároveň projevila homogenizace vrstev ornice a zvyšující se protierozní efekt armované zemní konstrukce.

Z doplňujících analýz zrnitostního složení jednotlivých erozních smyvů na daných typech PEO a z výsledků zrnitostního složení svrchní vrstvy ornice v horních a dolních částech pokusných ploch po ukončení terénního experimentu je zřejmé, že vývoj charakteru erozního smyvu vlivem působení ND byl na všech použitých typech PEO obdobný. Na všech typech PEO docházelo k smyvu jemných částic – F, především pak prachovité složky, což je ve shodě s Bissonnais et al. (1998) a Morgan (2005), kteří uvádějí, že prachovité částice jsou snadno uvolnitelné a transportovatelné.

Z analýzy agrochemických vlastností svrchní vrstvy ornice v horních a dolních částech pokusných ploch lze usuzovat, že použité typy PEO zásadně neovlivnily půdní chemismus a vlivem působení ND došlo k obdobným změnám ve vybraných agrochemických vlastnostech na všech typech PEO.

Náročnost pokládky jednotlivých typů GMA

Rozvinutí a ukotvení všech použitých typů GMA bylo velice snadné a rychlé. U Trinter bylo zaznamenáno, že při zarážení železných kotevních trnů se struktura GMA lehce prorazí. Zároveň během nutného pohybu¹⁵ po GMA při zarážení trnů bylo zjištěno, že zvlněná struktura v případě Trinter se snadno deformuje (smačkává se) a jen pozvolna se vrací zpět do původního zvlněného tvaru.

Za velice časově náročné a značně pracné se ukázalo řádné prosypání struktury GMA. Především pak vyplnění pozměněné struktury Trinter vlivem smáčknutí i přesto, že použitá ornice byla na pokusné plochy rozhrnována ručně. V místech zdeformovaného zvlnění mohly v nakypřené vrstvě zůstat větší neprosypané dutinky, které následně mohly ovlivnit konzolidaci nakypřené vrstvy.

6.2.2 Simulace povrchového odtoku ronem vody

První SPORV byla provedena dne 2. 7. 2013 tedy téměř po 7 týdnech od založení pokusných ploch a zhruba po 1,5 měsíci od vyklíčení vyseté protierozní travní směsi. Nejnižší erozní smyv byl zaznamenán u typu PEO s E7010 (83,6 g.m²) a typu PEO bez GMA (117,8 g.m²). Oproti tomu velikost erozního smyvu z typu PEO s Trinter (258,8 g.m²) a s E7020 (439,1 g.m²) byl značně vyšší. Rozdíly mezi jednotlivými typy PEO v objemu povrchového odtoku nebyly výrazné a při přepočtu na odtokový koeficient φ_c (tab. 20 na str. 100) vztažený k celkovému objemu vody puštěné na pokusné plochy (337,5 l) se φ_c pohybovaly v rozmezí 0,41 až 0,45. Nejnižší φ_c byl na typu PEO s E7010 společně s nejnižším odtokovým koeficientem $\varphi_{bez\ GMA}$ ze všech typů PEO s GMA, který byl vztažen k celkovému objemu odtoku z typu PEO bez GMA (tab. 20).

Při porovnání výsledků z první realizace SPORV a ze 4. odběru erozního smyvu v rámci působení přirozených dešťových srážek zde mohou být nalezeny jisté souvislosti. Typ PEO bez GMA měl sice nejmenší erozní smyv při 4. odběru, ale při první SPORV měl erozní smyv vyšší než v případě typu PEO s E7010. Jak již bylo uvedeno v podkapitole 6.2.1, možným důvodem vyššího erozního smyvu vlivem působení přirozených dešťových srážek z typů PEO s GMA mohlo být poměrně krátké časové období mezi 5. a 6. ND a několika hodinové trvání 6. ND, které mohlo vést k přesycení nakypřené vrstvy půdy ve struktuře GMA, a tím k vyšší erozi. Erozní působení přirozených srážek však zároveň vedlo ke konzolidaci nakypřené půdy ve struktuře jednotlivých GMA, která na základě výsledků působení přirozených dešťových srážek probíhala nejrychleji na E7010. Díky tomuto zjištění lze předpokládat, že při realizaci první SPORV 6 dní po průchodu 6. ND (během nichž se nevyskytly žádné dešťové srážky) byla nakypřená vrstva půdy v E7010 již zkonzolidována a vytvářející se armovaná zemní konstrukce dosahovala vyšší protierozní ochrany než typ PEO bez GMA.

¹⁵ Pohyb po jednotlivých typech GMA byl vzhledem k šířce pokusných ploch 1,0 m minimální v porovnání s podkládkou na reálné svahy, kde se pohybu po pokládaných GMA nelze vyhnout.

Tab. 20 Odtokové koeficienty vztažené k celkovému objemu puštěné vody φ_c v rámci SPORV (337,5 l) a odtokové koeficienty vztažené k objemu odtoku vody z typu PEO bez GMA $\varphi_{bez\ GMA}$

Odtokové koeficienty		φ_c				$\varphi_{bez\ GMA}$			
		2. 7. 2013	15. 8. 2013	28. 10. 2013	6. 5. 2014	2. 7. 2013	15. 8. 2013	28. 10. 2013	6. 5. 2014
1. skupina pokusných ploch	bez GMA	0,43	0,39	0,04	0,11	1,00	1,00	1,00	1,00
	E7010	0,41	0,38	0,00	0,11	0,97	0,98	0,00	0,95
	E7020	0,45	0,43	0,00	0,12	1,06	1,12	0,00	1,05
	Trinter	0,44	0,41	0,00	0,09	1,03	1,06	0,00	0,79
2. skupina pokusných ploch	bez GMA	--	0,37	0,03	0,11	--	1,00	1,00	1,00
	E7010		0,37	0,00	0,09		0,98	0,00	0,83
	E7020		0,41	0,00	0,11		1,11	0,00	1,00
	Trinter		0,39	0,00	0,08		1,03	0,00	0,72
3. skupina pokusných ploch	bez GMA	--	--	0,04	0,09	--	--	1,00	1,00
	E7010			0,00	0,09			0,00	1,00
	E7020			0,00	0,11			0,00	1,13
	Trinter			0,00	0,10			0,00	1,06
4. skupina pokusných ploch	bez GMA	--	--	--	0,10	--	--	--	1,00
	E7010				0,09				0,88
	E7020				0,09				0,94
	Trinter				0,09				0,88

Na základě výsledků druhé SPORV ze dne 15. 8. 2013, kdy velikost erozního smyvu z typů PEO s GMA (kromě E7020) byla nižší než z typu PEO bez GMA, může být výše uvedená teorie o postupné konzolidaci nakypřené půdy ve struktuře GMA přijata. Zároveň, jelikož se velikost erozního smyvu z jednotlivých typů PEO (kromě E7020) u 1. i 2. skupiny pokusných ploch výrazně nelišila, je možné konstatovat, že frekvence zatěžování pokusných ploch povrchovým odtokem neovlivnila míru erozního smyvu a hlavní roli v konzolidaci nakypřené půdy ve struktuře GMA mělo působení dešťových srážek. Z typu PEO s E7020 byl jak v případě 1. tak 2. skupiny pokusných ploch zaznamenán nejvyšší erozní smyv, což odpovídá nejpomalejšímu postupu konzolidace nakypřené půdy ve struktuře E7020.

Erozní smyv v průběhu třetí a čtvrté realizace SPORV se již nevyskytoval a velikost erozního smyvu vlivem působení přirozených dešťových srážek byla na všech typech PEO v řádech nižších jednotek gramů. Všechny aplikované typy PEO vykazovaly tedy stejnou protierozní ochranu vůči působení SPORV.

Z naměřených objemů povrchových odtoků a vypočítaných koeficientů odtoku (φ_c i $\varphi_{bez\ GMA}$) na jednotlivých typech PEO během všech SPORV lze usuzovat, že vliv typu PEO měl na objem povrchového odtoku minimální vliv. Jako možné příčiny rozdílných objemů povrchových odtoků během realizovaných SPORV byly uvažovány:

- uplynulá doba od vybudování pokusných ploch,
- stáří vysetého protierozního travního porostu,
- průběh a výskyt dešťových srážek a vlhkost půdy.

Vzhledem k nedostatku potřebných dat nebylo možné provést například analýzu hlavních komponent (PCA) či jinou statistickou analýzu, která by objasnila váhu jednotlivých uvažovaných znaků (komponent) a vysvětlila jejich vzájemný vztah. Braun et al. (1996), Morgan (2005) a Koutný et al. (2014) uvádějí, že významnou roli v průběhu infiltrace vody do půdy, a tedy i ve velikosti objemu případného povrchového odtoku hraje především vlhkost půdy. Vlhkost půdy během terénního experimentu z technických důvodů nemohla být měřena. Přesto na základě analýzy průběhu dešťových srážek před realizací jednotlivých SPORV (dešťové srážky se vyskytly 6 dní před 1. SPORV, 5 dní před 2. SPORV, 1 den před 3. SPORV a 3 dny před 4. SPORV) a z následných objemů povrchových odtoků (povrchový odtok byl zaznamenán u všech SPORV kromě 3. realizace) byla ve shodě s uvedenou literaturou označena za hlavní faktor ovlivňující povrchový odtok.

7 Závěr

Na základě celkových výsledků laboratorního pokusu byla zvolená hypotéza, že přítomnost použitých typů GMA v půdním profilu nemá na růst a vývoj kořenového systému daných travních odrůd statisticky významný vliv, přijata. Přijetím hypotézy byly i potvrzeny závěry výzkumu Šlezingra et al. (2011). Zároveň z výsledků laboratorního experimentu vyplynulo, že kombinace E7020 s JV dosahuje statisticky významně (na hladině 0,05) lepšího růstu a vývoje kořenového systému oproti kombinaci případu bez GMA s JV. Růst a vývin kořenového systému LL byl ze všech testovaných travních odrůd nejpomalejší, což se shoduje s obecnými předpoklady růstu travního druhu lipnice luční (*Poa pratensis* L.) dle Peeters (2004). Zároveň Peeters (2004) uvádí, že vývoj travního druhu jílek vytrvalý (*Lolium perenne* L.) by měl být rychlejší než u travního druhu kostřava rákosovitá (*Festuca arundinace Schreb.*). V rámci laboratorního experimentu však rychlejší vývoj prokazovala kostřava rákosovitá (*Festuca arundinace Schreb.*) odrůda KORA.

Možnými příčinami rozkolísanosti hodnot měřených veličin a celkového zpomalení až mírné stagnace růstu kořenového systému u všech testovaných travních odrůd po sedmém odběru rostlin mohly být zhoršené podmínky pro fotosyntézu během března 2013 (sluneční svit pod dlouhodobým průměrem) a s tím spojené čerpání zásobních látek z kořenového systému rostlin. Dalším důvodem mohla být vzrůstající kompetice mezi kořenovým systémem jednotlivých rostlin (netýká se LL, jejíž kořenový systém po celou dobu pokusu neprorostl profilem použité zeminy) při prokořenění 5 cm mocného profilu použité zeminy.

Z provedeného laboratorního experimentu vyplynuly doporučení pro případné další pokusy v oblasti sledování spolupůsobení kořenového systému trav a GMA:

- směřovat pokusy do měsíců s vyšším slunečním svitem či případně zvážit možnost regulace světelného režimu osvětlováním pokusných ploch,
- zvýšit mocnost zeminy v rámci pokusných ploch (minimálně 10 cm, lépe 15 až 20 cm dle možnosti laboratorních podmínek),
- celkově zvážit možnost založení terénních pokusných ploch (dle Kasprzak et al., 1980).

Při odběru vzorků rostlin bylo zjištěno, že s postupem času roste náročnost odběru neporušených vzorků kořenového systému rostlin z ploch s GMA. Za možnou příčinu bylo označeno zvyšující se propletení kořenového systému do struktury GMA, které by dle Coppin & Richards (1990), Morgan (2005) a Úradníčka & Šlezingra (2007) mělo vést k vyššímu protieroznímu účinku vytvářející se armované zemní konstrukce. Pro potvrzení předpokladu, že kořenový systém propletený do struktury GMA zvyšuje odolnost rostlin vůči vytažení či vytržení, by však bylo zapotřebí provést další samostatná měření.

Z celkových výsledků terénního experimentu za celé sledované období nebyla zvolená hypotéza, že typy PEO s GMA (E7010, E7020, Trinter) v kombinaci s vysetou protierozní travní směsí mají lepší protierozní účinek než typ PEO bez GMA pouze s vysetou protierozní travní směsí, potvrzena. Aplikací GMA do půdního profilu nebylo dosaženo statisticky významně (na hladině 0,05) lepší protierozní ochrany pokusných

ploch, ale zároveň ani přítomnost GMA v půdním povrchu statisticky významně (na hladině 0,05) protierozní ochranu nezhoršovala.

Dosažené výsledky v rámci terénního experimentu naznačily, že během prvních 3 nejkritičtějších měsíců po založení pokusných ploch a vzejití travního porostu byly typy PEO s GMA náchylnější k erozi půdy (statisticky nevýznamně na hladině 0,05 vyšší erozní smyv) oproti typu PEO bez GMA. Na základě průběhu vývoje erozního smyvu na jednotlivých typech PEO a z výsledků výzkumů uvedených v Ingold & Thomson (1986), Morgan & Rickson (1995) a Rickson et al. (2006) byla důvodem vyššího erozního smyvu z typů PEO s GMA označena přítomnost nakypřené půdy ve struktuře GMA, která vznikla prosypáním použitých GMA ornici. Od mocnosti nakypřené vrstvy ornice, která souvisela s tloušťkou a se strukturou jednotlivých GMA, se odvíjela rychlost její konzolidace. Ze získaných výsledků vyplynulo, že nejrychleji probíhala konzolidace nakypřené vrstvy ornice ve struktuře E7010, kde nakypřená vrstva dosahovala nejmenší mocnosti. Naopak nejpomaleji docházelo ke konzolidaci nakypřené vrstvy ve struktuře E7020, u které byla mocnost nakypřené vrstvy ornice označena za největší.

V průběhu vývoje erozního smyvu na všech aplikovaných typech PEO byl po 4. a 5. odběru zaznamenán pokles v množství erozního smyvu. Hlavní příčinou poklesu množství erozního smyvu byl označen rostoucí protierozní účinek vysetého travního porostu, který v době výskytu nebezpečných dešťů po 4. a 5. odběru měl stáří 2,5 a 3,5 měsíce. Označení travního porostu jako hlavní příčiny v poklesu množství erozního smyvu je ve shodě s výzkumy autorů Kasprzaka et al. (1980), Halvi et al. (1984), Hráběho et al. (1990), Knota et al. (2010) a Šlezingra & Uhmánové (2010), kteří uvádějí, že 3 měsíce starý travní porost byl již schopen plnit částečnou protierozní ochranu. Tvrzení Coppin & Richards (1990), že travní porost, kromě tlumení kinetické energie dešťových kapek nadzemní biomasou, prorůstáním kořenového systému do struktury GMA homogenizuje půdní profil a zvyšuje protierozní účinek vznikající armované zemní konstrukce, nebylo možné z provedeného terénního experimentu potvrdit. Celkové množství erozního smyvu po 4. odběru z typů PEO s GMA (kromě typu PEO s E7020) bylo sice nižší než z typu PEO bez GMA, nicméně rozdíly v množství erozního smyvu byly z jednotlivých typů PEO statisticky nevýznamné na hladině 0,05 a průběh erozního smyvu byl na všech aplikovaných typech PEO statisticky významně korelován.

Závěrem je nutné uvést, že i přestože v rámci terénního experimentu představovaly založené pokusné plochy velice rizikovou skupinu nově budovaných svahů zemních těles a zemních konstrukcí náchylných k vodní erozi (sklon 1:2 a ornice s charakterem prachovité hlíny) nelze dosažené výsledky z hlediska protierozního účinku trvalých protierozních výrobků zevšeobecnit. Z výsledků terénního experimentu vyplynulo, že samotný charakter GMA (tloušťka a struktura) může mít vliv na výsledný protierozní účinek daného typu PEO při použití stejného materiálu k prosypání struktury GMA. Zároveň Ingold & Thomson (1986) uvádějí, že při změně zrnitostního složení materiálu k prosypání struktury GMA se může protierozní účinek dané GMA opět změnit. Proto pro komplexnější výsledky vedoucí k návrhu vhodných typů PEO využívajících GMA a pro vytipování oblastí vhodných k jejich aplikaci by bylo zapotřebí provést další experimenty. Vzhledem k pracnosti a časové náročnosti

provedení terénních pokusů, které zkoumají srážkoodtokové a s nimi související erozní jevy z přirozených dešťových srážek, se pro následující pokusy v oblasti využití přírodních i trvalých protierozních materiálů jeví jako vhodné doporučení použít simulaci přirozených dešťů pomocí tzv. simulátorů deště.

8 Summary

The thesis includes laboratory and field experiment. The results of the laboratory experiment led to the acceptance of the hypothesis, that the presence of selected GMA in the soil profile does not have any impact on the growth and development of the root system of selected grass species. The adoption of the hypothesis stated above confirms results of the research conducted by Šlezinger et al. (2011). The results of the laboratory experiment also signify, that the combination E7020 with JV reaches statistically significant ($\alpha = 0,05$) improvement in growth and development of root system unlike the combination absent of GMA with JV. The species LL showed the most retarded growth and development of root system out of all the tested grass species, which is in accordance with the general presumption for growth of common meadow-grass (*Poa pratensis* L.) at Peeters (2004). Peeters (2004) also states, that development of perennial regrass (*Lolium perenne* L.) should be faster than that of tall fescue (*Festuca arundinace* Schreb.). Counterfactually during the laboratory experiment the later stated species (*Festuca arundinace* Schreb.) subspecies KORA, was progressing faster.

Potential cause of unsteady values of measured factors and general retardation, which led to a stage, that could be classified as stagnation of the growth of the root system of all the tested grass species after seventh round of collection of specimens, could be worsening conditions for photosynthesis during March 2013 (sunshine below long-term average), which is in coherence with absorption of deposited substances from the grass root system. Further reason could be rising competition between root system of each species (excluding LL, where the root system did not grow through the soil profile) when the roots reached the 5 cm thick soil profile.

Laboratory experiment suggests following recommendations for further research in the field of cooperation between grass root system and GMA:

- Schedule experiments into months with stronger sunshine regime or consider usage of experimental plots with regulated light systems.
- Increase the thickness of the soil in the experimental plots (minimum of 10 cm, where possible increase up to 15-20 cm).
- Reconsider establishment of outside experimental plots in general (according to Kasprzak et al., 1980).

During the collection of specimens, it was discovered, that the later the stage of specimens at the time of collection, the more difficult it is to select specimens of root system from the plots with GMA without any damage. The increase in entanglement of the roots into the GMA structure was identified as possible cause. Increased entanglement of the root system into the GMA structure should lead according to Coppin & Richards (1990), Morgan (2005) and Úradníček & Šlezinger (2007) to higher erosion control effect of developing reinforced soil profile. To state with certainty, that root system tangled into GMA structure increases resistance of plants against pull out or extraction, needs a conduction of further measurements with focus on this particular problem.

The results of the field experiment led to denial of the hypothesis, that types of erosion control system (ECS) with GMA (E7010, E7020, Trinter) combined with erosion control grass mixture improve erosion control effect more than that of ECS with erosion control grass mixture, but without GMA. The installation of GMA into the soil

profile did not show statistically significant ($\alpha = 0,05$) improvement in erosion control of the experimental plots, on the other hand the presence of GMA did not worsen the erosion protection (at a level of significance of $\alpha = 0,05$).

The results from the field experiment indicate, that during first three most critical months after establishment of the experimental plots and developing growth of the grass cover, the types of ECS with GMA were prone to soil erosion (statistically not significant at a level of significance of $\alpha = 0,05$) in comparison with the type of ECS without GMA. The development of soil erosion rates on the particular types of ECS together with the results of research stated in Ingold & Thomson (1986), Morgan & Rickson (1995) and Rickson (2006) indicate that the cause of higher soil erosion rates from the types of ECS with GMA is the presence of loosen soil in the GMA structure, which had developed from pouring topsoil into the applied GMA. The rate of consolidation is related to the thickness of the layer of loosen topsoil, which is coherent with the thickness and structure of the particular GMA. The results indicate that the fastest consolidation was developed in the structure E7010, where the loosen layer of topsoil was the least thick. The slowest consolidation was observed in the structure E7020, which had the thickest layer of loosen topsoil.

All the applied types of ECS showed decrease in soil erosion rates after fourth and fifth round of collection of specimens. Increasing erosion control effect of established grass cover, which at the time of dangerous rains during fourth and fifth round of collection of specimens reached 2,5 and 3,5 months growth, was determined to be the main causation of the decline in the soil erosion rates. The presence of grass cover has been detected as the main reason for declining soil erosion rates, which is in accordance with the research conducted by Kasprzak (1979), Kasprzak et al. (1980), Halva et al. (1984), Hrábě et al. (1990), Knot et al. (2010) and Šlezinger & Uhmánová (2010), who state that 3 months old grass cover has the efficacy to contribute in erosion control. During the field experiment it was not possible to confirm the hypothesis of Coppin & Richards (1990), that not only the grass cover reduces the kinetic energy of the rain drops through the presence of biomass but also thanks to entanglement of the root system into the structure of the GMA homogenizes soil profile and thus improves erosion control effect of developing reinforced structure. Though total soil erosion ratio after fourth round of collection of the specimens from the types of ECS with GMA (ECS with E7020 excluded) was lower than from the type of ECS without GMA, the difference between the soil erosion ratios from each type of ECS were statistically insignificant ($\alpha = 0,05$) and the development of the soil erosion ratios were statistically significantly correlated on all the types of ECS.

In conclusion, it is necessary to state that even though the experimental plots established for the field experiment represented hazardous type of newly built earthen hillslopes and constructions prone to water erosion (inclination 1:2 and topsoil characterised as silty loam), it is not possible to generalize obtained results of the effect of permanent erosion control products in the erosion control of hillslopes. The results of the field experiment indicate, that the type of GMA (thickness, structure) can affect the erosion protection of applied type of ECS provided that the same type of soil was poured into the GMA structure. Ingold & Thomson (1986) state, that the change of granular

ratio of the soil can influence the erosion protection of the GMA. Further experiments with complex results, which would lead to recommendations in the area of usage of appropriate type of ECS with particular GMA and would serve to identify areas where use of such would be suitable, need to be conducted. Field experiments require great effort and are significantly time consuming. Author's recommendation from the point of usage of natural and synthetic erosion control materials for further experiments, which focus on water regime and erosion processes arising from natural rainfall, is to use a simulation of natural rainfall with help of „rainfall simulator“.

9 Literatura

- ABE, K., ZIEMER, R. R., 1991. Effect of tree roots on a shear zone: modeling reinforced shear stress. *Canadian Journal of Forest Research*, 21 (7), pp. 1012-1019.
- ALI, N. et al., 2012. Soil-root interaction and effects on slope stability analysis. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 17, pp. 319-328.
- ALLEN, S.R., 1996. Evaluation and standardization of rolled erosion control products. *Geotextiles and Geomembranes*, 14, pp. 207-221.
- BARNETT, A.P., 1958. How intense rainfall affects runoff and soil erosion. *Agricultural Engineering*, 11, pp. 703-707.
- DE BEATS, S. et al., 2006. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology*, 76 (1-2), pp. 54-67.
- BHATTACHARYYA, R. et al., 2009. Utilizing palm-leaf geotextile mats to conserve loamy sand soil in the United Kingdom. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 130 (1-2), pp. 50-58.
- BHATTACHARYYA, R. et al., 2010a. Use of palm-mat geotextiles for rainsplash erosion control. *Geomorphology*, 119 (1-2), pp. 52-61.
- BHATTACHARYYA, R. et al., 2010b. Effectiveness of geotextiles in reducing runoff and soil loss: A synthesis. *Catena*, 81 (3), pp. 184-195.
- BHATTACHARYYA, R. et al., 2011. Use of palm-mat geotextiles for soil conservation: I. Effects on soil properties. *Catena*, 84 (3), pp. 99-107.
- BHATTACHARYYA, R. et al., 2013. Using palm-mat geotextiles for soil conservation: II. Effects on in situ soil particle size distribution and nutrient concentration. *Catena*, 101, pp. 143-156.
- BISCHETTI, G.B. et al., 2005. Root strength and root area ratio of forest species in lombardy (Northern Italy). In *Plant and Soil*, 278, pp. 11-22.
- BORST, H. L., WOODBURN, R., 1942. The effect of mulching and methods of cultivation on runoff and erosion from Muskingum Silt loam. *Agricultural Engineering*, 23, pp. 19-22.
- BRAUN, B., KASPRZAK, K., KOLÁŘ, I., 1996. Vliv porostu vojtěšky na povrchový odtok a vodní erozi. *Rostlinná výroba*, 42 (8), pp. 375-379.
- BROWN, C.B., SHEU, M.S., 1975. Effects of deforestation on slopes. *Journal Geotechnical Engineering Division (ASCE)*, 101 (2), pp. 147-165.
- BRYAN, R.B., 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, 32 (3-4), pp. 385-415.
- BUI, E.N., BOX, J.E., 1993. Growing corn root effects on interrill soil Erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 57 (4), pp. 1066-1070.
- CAMMERAAT, E., VAN BEEK, R., KOOIJMAN, A., 2005. Vegetation succession and its consequences for slope stability in SE Spain. In *Plant and Soil*, 278, pp. 135-147.
- CAZZUFFI, D. et al., 1994. Experimental evaluation of the erosion on bare and geosynthetically protected slopes. *Conserving soil resources: European perspectives Selected papers from the First International Congress of the European Society for Soil Conservation*, pp. 413-421.
- COPPIN, N.J., RICHARDS, I.G., 1990. *Use of vegetation in civil engineering*. London, CIRIA Publication, Butterworths, 263 p.

- DAVIES, K., FULLEN, M.A., BOOTH, C.A., 2006. A pilot project on the potential contribution of palm-mat geotextiles to soil conservation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31 (5), pp. 561-569.
- DE PLOEY, J., 1981. The ambivalent effects of some factors of erosion. *Mémoires, Institute de Geologie, l'Université de Louvain*, 31, pp. 171-181.
- DE BAETS, S. et al., 2006. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology*, 76 (1-2), pp. 54-67.
- DOLEŽALOVÁ, M., 2014. Nízké a vysoké extrémní srážek v regionu jižní Moravy a Vysočiny v období 1981-2013. In *Extrémní oběhu vody v krajině - Sborník příspěvků z mezinárodní konference*, Ed. Rožnovský, J., Litschmann, T., Středa, T., Středová H., [CD].
- DRONGOVÁ, K., SOBOTKOVÁ, V., 2013. Projevy vodní eroze v drahách soustředěného povrchového odtoku, In *Littera Scripta*, 6 (2), pp. 151-161.
- DUMBROVSKY, M. et al., 1995. Doporučený systém protierozní ochrany v procesu komplexních pozemkových úprav: metodika. Vydání 1. Praha, Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 55 p.
- DUMBROVSKY, M. et al., 2012. Užitečný vzor č. 23499. Zařízení k provádění volumetrické kvantifikace projevů vodní eroze. Úřad průmyslového vlastnictví.
- DUMBROVSKY, M., 2013. Nepříznivé důsledky povrchového odtoku a jejich eliminace v procesu pozemkových úprav: Adverse consequences of surface runoff and its conservation in the land consolidation process : teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru Vodní hospodářství a vodní stavby. Brno: VUTIUM, 34 p.
- EKERN, P.C., 1950. Raindrop impact as a force initiating soil erosion. *Soil Science Society of America Proceedings*, 15, pp. 7-10.
- ELLISON, W.D., 1944. Studies of raindrop erosion. *Agricultural Engineering*, 25, pp. 131-136, 181-182.
- ELLISON, W.D., SLATER, C.S., 1945. Factors that affect surface sealing and infiltration of exposed soil surfaces. *Agricultural Engineering*, 26, pp. 156-157, 162.
- ENNOS, A.R., FITTER, A.H., 1992. Comparative functional morphology of the anchorage systems of annual dicots. *Functional Ecology*, 6, pp. 71-78.
- FIALA, K., 1993. Underground biomass in meadow stands. In *Rychnovská, M. (ed.) Structure and functioning of seminatural meadows*, Academia, Praha, pp. 133-154.
- FIFIELD, J.S. et al., 1988. Field testing erosion control products to control sediment and to establish dryland grasses under arid conditions. *Proceedings of Conference XIX, International Erosion Control Association, Steamboat Springs, Co, Debruary 25-28*.
- FOLTÝNOVÁ, L., 2011. Stabilizace břehů pomocí předpěstovaných travních kobereců. In *JUNIORSTAV 2011*, pp. 1-4.
- FOOT, K., MORGAN, R.P.C., 2005. The role of leaf inclination, leaf orientation and plant canopy architecture in soil particle detachment by raindrops. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30 (12), pp. 1509-1520.
- FULAJTÁR, E., JANSKÝ, L., 2001. Vodná erózia pôdy a protierozná ochrana. VÚPOP, Bratislava, 308 p.
- GENET, M. et al., 2010. The influence of plant diversity on slope stability in a moist evergreen deciduous forest. *Ecological Engineering*, 36 (3), pp. 265-275.
- GHAHRAMANI, A. et al., 2011. Downslope soil detachment-transport on steep slopes via rain splash. *Hydrological Processes*, 25 (15), pp. 2471-2480.

- GODFREY, A.H., CURRY, M.K., 1995. TTI hydraulics and erosion control laboratory research field performance of erosion-control blankets. *Landscape and Urban Planning*, 32, pp. 161-167.
- GODFREY, A.H. et al., 1993. The performance of flexible erosion control materials. Research Report 1914-1, Texas Transportation Institute, 186 p.
- GORDON, L. M. et al., 2007. Simulating ephemeral gully erosion in AnnAGNPS. *Transactions of the ASABE*. Buffalo, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 50 (3), pp. 857-866.
- GRAY, D.H., 2009. Effect of woody vegetation removal on the hydrology and stability of slopes. Literature review, pp. 1-23.
- GRAY, D.H. et al., 1991. The effect of vegetation on the structural integrity of sandy levees. Technical Report No. REMR-EI-5, Department of the Army, Waterways Experimental Station, Corps of Engineers, 109 (9), pp. 335-353.
- GRAY, D.H., LEISER, A., 1982, *Biotechnical slope protection and erosion control*. New York, Van Nostrand Reinhold, 271 p.
- GRAY, D.H., SOTIR, R., 1995. Biotechnical stabilization of steepened slopes. Transportation Research Board Record No. 1474, National Academy Press, National Research Council, pp. 23-38.
- GREENWOOD, J.R., 2006. SLIP4EX – A program for routine slope stability analysis to include the effects of vegetation, reinforcement and hydrological changes. *Geotechnical and Geological Engineering* 01/2006, 24 (3), pp. 449-465.
- GREENWOOD, J.R., NORRIS, J.E., WINT, J., 2004. Assessing the contribution of vegetation to slope stability. *Geotechnical Engineering Special Issue - Geotechnics of Transport Infrastructure*, pp. 1-34.
- GYSSSELS, G., Poesen, J., 2003. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28 (4), pp. 371-384.
- GYSSSELS, G. et al., 2005. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in Physical Geography*, 29 (2), pp. 189-217.
- HALVA, E. et al., 1984. Účinnost nadzemní biomasy a kořenové zóny trav (Poaceae) proti fluvialní erozi na svazích. *Rostlinná výroba*, 30 (3) pp. 273-286.
- HEJDUK, S., 2011. Vliv pícních porostů na vznik povrchových odtoků srážkových vod a náhlých povodní. *Habilitační práce*, MENDELU Brno, 129 p.
- HENDERSON, M.S., 1982. The potential use of a degradable erosion control membrane in the United Kingdom. Technical note, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, London, 15 (3), pp. 233-234.
- HOLÝ, M., 1964. Vztah přívalových srážek a půdního smyvu při selektivní plošné vodní erozi. *Vodní hospodářství*, 5, pp. 191-193.
- HOLÝ, M., 1994. *Eroze a životní prostředí*. Vydání 1, ČVUT Praha, 383 p.
- HORTON, R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins - hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56 (3), pp. 275-370.
- HRÁBĚ, F., BLÍŽKOVSKÝ, P., KUBÍKOVÁ., 1990. Travinné porosty v oblasti Českomoravské vrchoviny a jejich ekologický význam. In *Ekologie a kultury*, Ochrana a ekologický rozvoj kulturních krajín, pp. 122-129.

- HRÁBĚ, F. et al., 2009. Trávníky pro zahradu, krajinu a sport, Vydavatelství Ing. Petr Baštan, Olomouc, 335 p.
- HUDSON, N., 1981. Soil conservation. Second edition, Cornell University Press, Ithaca, New York, 324 p.
- INGOLD T.S., THOMSON, J.C., 1986. Results of current research of synthetic and natural fiber erosion control systems. Erosion control Protecting our future, pp. 65-75.
- JANEČEK, M. et al., 2008. Základy erodologie. 1. vydání, Česká zemědělská univerzita v Praze, 172 p.
- JANEČEK, M. et al., 2012. Ochrana zemědělské půdy před erozí - Metodika. 1. vydání, powerprint, Praha, 113 p.
- JŮVA, K., CABLÍK, J., 1954. Protierosní ochrana půdy: celostátní vysokoškolská učebnice. 1. vydání, Praha, Státní zemědělské nakladatelství, 254 p.
- KASPRZAK, K., 1987a. Emipirické vztahy určující hodnotu mechanického působení deště na půdu. Vodohospodářský časopis, 35 (6), pp. 609-625.
- KASPRZAK, K., 1987b. Vybrané fyzikální charakteristiky deště. Vodohospodářský časopis, 35 (4), pp. 393-407.
- KASPRZAK, K., 1988. Fyzikální simulace srážkoodtokových a odnosových jevů. Vodohospodářský časopis, 36 (6), pp. 590-607.
- KASPRZAK, K. et al., 1980. Protierozní účinnost kořenového systému druhů a odrůd čeledi Poaceae. Acta Universitatis Agriculturae, 28 (3-4), pp. 223-238.
- KASPRZAK, K. et al., 1989. Erodovatelnost hlinitopísčitého silničního svahu při intenzivním dešti a protierozní účinnost vybraných druhů chemických stabilizátorů, travních porostů a geotextilií. Dílčí zpráva úkolu R16314056 - Zpevnění silničních svahů vegetací, VÚT Brno, 60 p.
- KASPRZAK, K. et al., 1990. Erodovatelnost silničních svahů chráněných vybranými druhy biologických, chemických a technických prostředků. Dílčí zpráva úkolu R16314056 - Zpevnění silničních svahů vegetací, VÚT Brno, 45 p.
- KINNELL, P.I.A., 1990. The mechanics of raindrop induced flow transport. Australian Journal of Soil Research, 28, pp. 497-516.
- KINNELL, P.I.A., 2005. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: A review. Hydrological Processes, 19 (14), pp. 2815-2844.
- KNAPEN, A., SMETS, T., POESEN, J., 2009. Flow-retarding effects of vegetation and geotextiles on soil detachment during concentrated flow. Hydrological Processes, 23, pp. 2427-2437.
- KNOT, P. et al., 2010. Trvalé travní porosty – významný ekostabilizační faktor kulturnosti života a krajiny. In *Rekreace a ochrana přírody*, Ediční středisko Mendelovy univerzity v Brně, pp. 151-157.
- KNOZOVÁ, G., 2014. Charakteristika přívalových srážek ve vybraných lokalitách na jižní Moravě v období 2003-2013. In *Extrémy oběhu vody v krajině - Sborník příspěvků z mezinárodní konference*, Ed. Rožnovský, J., Litschmann, T., Středa, T., Středová H., [CD].
- KOLEKTIV AUTORŮ, 1988. Zpracování klimatologických informací, účelová neperiodická publikace ČHMÚ, 167 p.
- KOUTNÝ, L., SKOUPIL, J., VESELÝ, D., 2014. Physical characteristics affecting the infiltration of high intensity rainfall into soil profile. Soil and Water Research, 9, pp. 104-110.

- KUTÍLEK, M., 2012. Půda planety Země. 1. vydání, Dokořán, 200 p.
- LAL, R., 1990. Soil erosion in the tropics - Principles and measurement. 1. title, McGraw Hill, New York, 581 p.
- LAL, R., 2001. Soil degradation by erosion. *Land Degradation and Development*, 12 (6), pp. 519-539.
- LANDCASTER, T., THEISEN, M., 1994. Classifying rolled erosion-control products: a current perspective. *Geotechnical Fabrics Report*, pp. 1-4.
- LANGFORD, R.L., COLEMAN, M.J., 1996. Biodegradable erosion control blankets prove effective on Iowa wildlife refuge. In *International Erosion Control Association Proceedings of Conference XXVII*, Seattle, USA, pp. 13-20.
- LE BISSONNAIS, Y. et al., 1998. Crusting, runoff and sheet erosion on silty loamy soils at various scales and upscaling from m² to small catchments. In *Soil and Tillage Research*, 46, pp. 69-80.
- LE BISSONNAIS, Y., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47, pp. 425-437.
- LEGOUT, C., LEGUÉDOIS, S., LE BISSONNAIS, Y., 2005. Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements. *European Journal of Soil Science*, 56 (2), pp. 225-237.
- LEGUÉDOIS, S., LE BISSONNAIS, Y., 2004. Size fractions resulting from an aggregate stability test, interrill detachment and transport. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29 (9), pp. 1117-1129.
- LOWDERMILK, W.C., 1953. Conquest of the land through seven thousand years, *Agriculture Information Bulletin No. 99*, USDA, S. C. Service, 30 p.
- McINTYRE, D.S., 1957. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. *Soil Science*, 85 (5), pp. 261-266.
- MELOUN, M., MILITKÝ, J., 2004. *Statistická analýza experimentálních dat*. 2. vydání, Praha, Academia, 954 p.
- MEYER, L.D., FOSTER, G.R., ROMKENS, M.J.M., 1975. Source of soil eroded by water from upland slopes. In *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*, 40, pp. 177-189.
- MICKOVSKI, S.B. et al., 2007. Material stiffness, branching pattern and soil matric potential affect the pullout resistance of model root systems. *European Journal of Soil Science*, 58 (6), pp. 1471-1481.
- MICKOVSKI, S.B. et al., 2009. Mechanical Reinforcement of Soil by Willow Roots: Impacts of Root Properties and Root Failure Mechanism. *Soil Science Society of America Journal*, 73 (4), pp. 1276-1285.
- MÍČA, L., 2005. Vliv vegetace a geosyntetického opatření na stabilitu břehu. In *Lidé, stavby a příroda*, Akademické nakladatelství CERM, Brno, pp. 39-44.
- MÍKA, V., et al., 2002. *Morfogeneze trav*. Výzkumný ústav rostlinné výroby, Praha, 200 p.
- MITCHEL, D.J. et al., 2003. Field studies of the effects of jute geotextiles on runoff and erosion in Shropshire, UK. *Soil Use and Management*, 19 (2), pp. 182-184.
- MOEYERSONS, J., DE PLOEY, J., 1976. Quantitative data on splash erosion, simulated on unvegetated slopes. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband 25*, pp. 125-131.

- MORGAN, R.P.C., 1985. Effect of corn and soybean canopy on soil detachment by rainfall. *American Society of Agricultural Engineers*, 28 (4), pp. 1135–1140.
- MORGAN, R.P.C., 2005. *Soil erosion and conservation*. Third edition, Blackwell Publishing Ltd, 304 p.
- MORGAN, R.P.C., 2007. Vegetative-based technologies for erosion control. In *Eco- and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*, *Developments in Plant and Soil Sciences*, 103, pp. 265-272.
- MORGAN, R.P.C., RICKSON, R.J., 1995. *Slope stabilization and erosion control: A bioengineering approach*. First edition, E & FN Spon, New York, 274 p.
- MOSS, A.J., 1991. Rain-impact soil crust. I. Formation on a granite-derived soil. *Australian Journal of Soil Research*, 29 (2), pp. 271-289.
- MOSS, A.J., GREEN, P., 1983. Movement of solids in air and water by raindrop impact. Effects of drop-size and water-depth variations. *Australian Journal of Soil Research*, 21 (3), pp. 257-269.
- MUTCHLER, C., YOUNG, R., 1975. Soil detachment by raindrops. In *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*, 40, pp. 113-117.
- NGUYEN, A.N., 2000. *Application of geosynthetic materials in dam construction: A thesis*. Czech Technical University in Prague, 184 p.
- NILAWEERA, N.S., NUTALAYA, P., 1999. Role of tree roots in slope stabilisation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57 (4), pp. 337-342.
- NORRIS, J., GREENWOOD, J., 2006. Assessing the role of vegetation on soil slopes in urban areas. *IAEG*, paper, 744, pp. 1-12.
- NORRIS, J.E. et al., 2008. *Slope stability and erosion control: Ecotechnological solutions*, Springer Netherlands, 287 p.
- NORTHCUTT, P.E., 1993. Field performance testing of roll-type erosion control blankets through the erosion control field laboratory. In *Preserving our environment: the race is on 24th Conference*, pp. 185-202.
- NOVOTNÝ, I. et al., 2014. *Příručka ochrany proti vodní erozi. 2. aktualizované vydání*, Ministerstvo zemědělství, 73 p.
- NYSSSEN, J. et al., 2002. Impact of road building on gully erosion risk: A case study from the Northern Ethiopian Highlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27 (12), pp. 1267-1283.
- O'LOUGHLIN, C., ZIEMER, R.R., 1982. The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steep-land forests. *Proceedings of I.U.F.R.O. Workshop P.1.07-00 Ecology of Subalpine Ecosystems as a Key to Management*, pp. 70-78.
- OGDOBE, O., ESSIEN, K.S., ADEBAYO, A., 1998. A study of biodegradable geotextiles used for erosion control. *Geosynthetics International*, 5 (5), pp. 545-553.
- OLSON, G.W., 1981. Archaeology: Lesson on future soil use. *Journal of Soil and Water Conservation*, 36 (5), pp. 261-264.
- OSMAN, N., ABDULLAH, M.N., ABDULLAH, CH.H., 2011. Pull-out and tensile strength properties of two selected tropical trees. *Sains Malaysiyan*, 40 (6), pp. 577-585.
- PEARCE, A.J., 1976. Magnitude and frequency of erosion by Hortonian overland flow. *The Journal of Geology*, 84, pp. 66-80.

- PEETERS, A., 2004. Wild and Sown Grasses: Profiles of a temperate species selection: ecology, biodiversity and use. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Blackwell Publishing Ltd, 328 p.
- PODHRÁZSKÁ, J., DUFKOVÁ, J., 2005. Protierozní ochrana půdy. 1. vydání, Brno, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 95 p.
- POESEN, J.W., TORRI, D., BUNTE, K., 1994. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review. *CATENA*, 23 (1-2), pp. 141-166.
- POLLEN, N., 2007. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture. *CATENA*, 69, pp. 197-205.
- POLLEN, N., SIMON, A., 2005. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. *Water Resources Research*, 41 (7), pp. 1-11.
- PRETL, J., 1973. Návrh nového způsobu prognózy velikosti půdního smyvu v podmínkách ČSSR. Kandidátská disertační práce, Stavební fakulta ČVUT, Praha.
- PROFFITT, A.P.B., ROSE, C.W., HAIRSINE, P.B., 1991. Rainfall detachment and deposition: Experiments with low slopes and significant water depths. *Soil Science Society of America Journal*, 55 (2), pp. 325-332.
- REUBENS, B. et al., 2007. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review, *Trees*, 21, pp. 385-402.
- RICKSON, R.J., CLARKE, M.A., OWENS, P.N., 2006. The use of vegetation for erosion control and environmental protection. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31 (5), pp. 533-535.
- REID, J.B., GOSS, M.J., 1981. Effect of living roots of different plant species on the aggregate stability of two arable soils. *Journal of Soil Science*, 32, pp. 521-541.
- RUSTOM R.N., WEGGEL, J.R., 1993. A laboratory investigation of the role of geosynthetics in interrill soil erosion and sediment control. *Geotechnical Fabric Reports*, pp. 16-18, 23-24, 26-28, 30-33.
- ŘEJHA, M., Protierozní zabezpečení svahů zemních těles a svahů zemních konstrukcí. *Inženýrské stavby/Inženýrské stavby*, 04, pp. 1-5.
- SALLES, C., POESEN, J., GOVERS, G., 2000. Statistical and physical analysis of soil detachment by raindrop impact: Rain erosivity indices and threshold energy. *Water Resources Research*, 36 (9), pp. 2721-2729.
- SAVAT, J., 1979. Laboratory experiments on erosion and deposition of loess by laminar sheetflow and turbulent rill flow. *Proceedings of the Seminar Agricultural Soil Erosion in Temperate Non-Mediterranean Climate*, 20-23, pp. 139-143.
- SCHENK, H.J., JACKSON, R.B., 2002. The global biogeography of roots. *Ecological Monographs*, 72 (3), pp. 311-328.
- SIMON, A., COLLISON, A.J.C., 2002. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27 (5), pp. 527-546.
- SIMON, A., POLLEN, N., 2006. A model of streambank stability incorporating hydraulic erosion and the effects of riparian vegetation. In *Proceedings of the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference*, pp. 870-877.
- Situační a výhledová zpráva - Půda. Praha, 2012, Ministerstvo zemědělství ČR, 100 p.

- SMITH, D.D., WISCHMEIER, W.H., 1962. Rainfall erosion. *Advances in Agronomy*, 14, pp. 109-148.
- SOBOTKOVÁ, V., 2012. Volumetrická kvantifikace projevů vodní eroze a jejich vliv na komplex půdních vlastností. Brno. Disertační práce. VUT FAST.
- STOKES, A. et al., 2009. Desirable Plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant and Soil*, 324 (1), pp. 1-30.
- SUTHERLAND, R.A., 1998a. Rolled erosion control systems for hillslope surface protection: A critical review, synthesis and analysis of available data. I. Background and formative years. *Land Degradation and Development*, 9 (6), pp. 465-486.
- SUTHERLAND, R.A., 1998b. Rolled erosion control systems for hillslope surface protection: a critical review, synthesis and analysis of available data. II. The post-1990 period. *Land Degradation & Development*, 9 (6), pp. 487-511.
- SUTHERLAND, R.A. et al., 1998a. The influence of rolled erosion control systems on soil temperature and surface albedo: Part I. A greenhouse experiment. *Land Degradation and Development*, 9 (2), pp. 159-178.
- SUTHERLAND, R.A., MENARD, T., PERRY, J.L., 1998b. The influence of rolled erosion control systems on soil moisture content and biomass production: part II. A greenhouse experiment. *Land Degradation and Development*, 9 (3), pp. 217-231.
- SUTHERLAND, R.A., ZIEGLER, A.D., 2006. Hillslope runoff and erosion as affected by rolled erosion control systems: A field study. *Hydrological Processes*, 20 (13), pp. 2839-2855.
- ŠLEZINGR, M., 2006. Návrh stabilizace břehů "armovanou zemní konstrukcí". *Stavební obzor*, 5, pp. 153-155.
- ŠLEZINGR, M., 2007. Stabilisation of reservoir banks using an armoured earth structure. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 55 (1), 2007, pp. 64-69.
- ŠLEZINGR, M., 2011. Břehová abraze – možnosti stabilizace břehů. 1. vydání Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2011, *Folia Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, č. 7., 172 p.
- ŠLEZINGR, M., FOLTÝNOVÁ, L., PELIKÁN, P., 2011. Vliv geosyntetických sítí na růst travin při založení zemního armovaného stabilizačního koberce. *Stavební obzor*, 6, pp. 180-182.
- ŠLEZINGR, M., UHMANNOVÁ, H., 2010. Stabilization of banks with using geosynthetics, In *People, buildings and environment*, pp. 547-550.
- TEMPLE, D.M., 1982. Flow retardance of submerged grass channel linings. *American Society of Agricultural Engineers*, 25, pp. 1300–1303.
- THEISEN, M.S., 1992. The role of geosynthetics in erosion and sediment control: An overview. *Geotextiles and Geomembranes*, 11, pp. 535-550.
- TOMAN, F., SANETRŇÍK, J., FILIP, J., 1993. Vliv klimatických podmínek na faktor erozní účinnosti přívalových dešťů. In *Agrometeorologická koference 93. Sborník referátů*, ČBkS, pp. 67-69.
- TOMÁŠEK, M., 2007. *Půdy České republiky*. Praha, Česká geologická služba, 68 p.
- TOY, T.J., FOSTER, G.R., RENARD, K.G., 2002. *Soil erosion: processes, prediction, measurement and control*. New York, John Wiley and Sons, 338 p.
- THROUGHTON, A., 1957. *The underground organs of herbage grasses*. First edition, Farnham Royal, Commonwealth Agricultural Bureaux, 1957, 163 p.

- TRUPL, J., 1958. Intenzity krátkodobých dešťů v povodí Labe, Odry a Moravy. VÚV Praha Podbaba, Práce a studie, sešit 97, 50 p.
- TRUPL, J., 1959. Závislost intenzit krátkodobých dešťů na výskytu bouřek. VÚV Praha Podbaba, Práce a studie, sešit 100, 47 p.
- TVRZNIKOVÁ, M., 2010. Vliv vzájemného působení kořenů a zeminy na stabilitu svahu. *Acta universitatis agriculturae et silviculturae Mendelianae Brunensis*, 58 (2), pp. 229-234.
- ÚRADNÍČEK, L., ŠLEZINGR, M. et al., 2007. Stabilizace břehů za využití armované zemní konstrukce s podporou kořenových systémů dřevin. Brno, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 210 p.
- VAN BEEK, L.P.H. et al., 2005. Observation and simulation of root reinforcement on abandoned mediterranean slopes. In *Plant and Soil*, 278, pp. 55-74.
- VAN DIJK, A.I.J.M., BRUIJNZEEL, L.A., EISMA, E.H., 2003. A methodology to study rain splash and wash processes under natural rainfall. *Hydrological Processes*, 17 (1), pp. 153-167.
- VANDROMME, R., DESRAMAUT, N., 2013. A new approach to integrate effects of changes in vegetation cover in slope stability assessment. *Troisièmes Journées Aléas Gravitaires*, France, pp. 1-6.
- VRÁNA, K. et al., 1998. *Krajinné inženýrství*. 1. vydání, Praha, Český svaz stavebních inženýrů, 198 p.
- WALDRON, L.J., 1977. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Science Society of America Journal*, 41 (5), pp. 843-849.
- WHALLEY, R. D. B., McKELL, C. M., GREEN, L. R., 1966. In *SMART, A. J. et al., 2003. Establishment and seedling growth of big bluestem and switchgrass populations divergently selected for seedling tiller number. Crop Science*, 43, pp. 1434-1440.
- WU, T.H., McKINNELL III. W.P., SWATSON, D.N., 1979. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal*, 16, pp. 19-33.
- WU, T.H., WATSON, A., 1998. Erratum: In situ shear tests of soil blocks with roots. *Canadian Geotechnical Journal*, 35 (4), pp. 579-590.
- ZACHAR, D., 1982. Soil erosion. *Developments in Soil Science* 10, Elsevier Science Ltd, 548 p.
- ZÁSTĚRA, Z., 1982. Vyzkoušení vegetačního opevnění z hlediska hydrotechnického. *Vodní hospodářství*, 11, pp. 292-295.
- ZBÍRAL, J., 2002. *Analýza půd I*. Vydání 2., přeprac. a rozš., Brno, Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Laboratorní odbor, 197 p.
- ZBÍRAL, J., 2004. *Analýza půd III*. Vydání 2., přeprac. a rozš., Brno, Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Laboratorní odbor, 199 p.
- ZIEGLER, A.D., SUTHERLAND, R.A., TRAN, L.T., 1997. Influence of rolled erosion control systems on temporal rainsplash response - a laboratory rainfall simulation experiment. *Land Degradation and Development*, 8 (2), pp. 139-157.
- ZIEGLER, A.D., SUTHERLAND, R.A., 1998. Reduction in interrill sediment transport by rolled erosion control systems. *Soil and Tillage Research*, 45 (3-4), pp. 265-278.
- ZORNBERG, J.G., 2007. New concepts in geosynthetic-reinforced soil - keynote lecture. *Proceedings of the Fifth Brazilian Symposium on Geosynthetics, REGEO*, Recife, Brazil, pp. 1-26.

ZUAZO, D. V.H., PLEGUEZUELO, R. C.R., 2008. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28 (1), pp. 65-86.

2006/0086 (COD) - Návrh směrnice Evropského parlamentu a Rady o zřízení rámce pro ochranu půdy a o změně směrnice 2004/35/ES

ČSN EN ISO 10318: Geosyntetika – termíny a definice, 2006

Úmluva OSN o boji proti desertifikaci v zemích postižených velkým suchem a/nebo desertifikací, zvláště v Africe

Ústavní zákon České národní rady č. 1/1993 Sb., Ústava České republiky

Vyhláška č. 275/1998 Sb., o agrochemickém zkoušení zemědělských půd a zjišťování půdních lastností lesních pozemků

Zákon č. 17/1992 Sb., o životním prostředí, ve znění pozdějších předpisů

Zákon č. 114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny, ve znění pozdějších předpisů

Zákon č. 334/1992 Sb., o ochraně zemědělského půdního fondu, ve znění pozdějších předpisů

Zákon č. 289/1995 Sb., o lesích a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů

<http://geology.cz>

<http://infomet.cz>

<http://portal.chmi.cz>