

**T A**  
**Č R**

**ZÁVĚREČNÁ ODBORNÁ ZPRÁVA Z PROJEKTU  
O POSTUPU PRACÍ A DOSAŽENÝCH VÝSLEDKÁCH  
ZA PROJEKT Č. TH02030428**

**Příloha k závěrečné zprávě za rok 2020**

Číslo projektu: TH02030428

Název projektu: Navrhování technických opatření pro stabilizaci a ochranu svahů před erozí

**Předkládá:**

Autorský kolektiv podílející se na řešení projektu

STRIX Chomutov a.s. - hlavní příjemce; Dušan Dufka - řešitel

ČVUT v Praze - další příjemce; Petr Kavka – další řešitel

GEOSYNTETIKA a.s. – další příjemce; Martin Vaníček – další řešitel

T A

Č R

## Obsah

1	Motivace a úvod do řešení projektu.....	3
2	Kategorizace technických materiálů využívaných pro běžné konstrukce strmých svahů.....	3
3	Experimentální výzkum eroze a odtoku na umělých svazích .....	5
3.1	Erozní proces a povrchový odtok na umělých svazích.....	5
3.2	Měření odtoků a smyvů pomocí umělého zadržování .....	6
3.2.1	Popis zařízení.....	6
3.2.2	Výsledky měření .....	11
3.3	Stanovení povrchových změn a množství eroze pomocí fotogrammetrických metod .....	18
3.3.1	Fotogrammetrické vyhodnocení.....	20
3.3.2	Analýza rozdílových modelů .....	21
3.3.3	Výsledky .....	22
3.4	Změny zrnitostního složení sedimentu .....	23
3.4.1	Postup odebrání půdních vzorků.....	24
3.4.2	Metody měření .....	24
3.4.3	Popis výsledků.....	26
3.4.4	Sumarizace úhor .....	26
3.4.5	Zrnitosti na opatřeních .....	27
3.4.6	Vazba zrnitosti a objem odtoku.....	29
3.5	Měření půdní vlhkosti.....	29
3.5.1	Experimentální plochy Strix Jirkov.....	30
3.5.2	Dešťový simulátor – laboratoř.....	33
3.6	Dlouhodobý monitoring přirozených dešťů.....	34
3.7	Experimentální ověření retence plošných opatření.....	41
3.8	Inovace technologických postupů při protierozní ochraně .....	43
3.9	Validace modelu odtoku na umělých svazích.....	48
4	Stabilizace humózní vrstvy.....	51
4.1	Horní založení – zavazovací zámeček.....	52
4.2	Stabilizační účinek kotvení .....	52
4.3	Ošetření podkladní vrstvy a zdrsnění jejího povrchu.....	53
4.4	Posouzení stability povrchové vrstvy .....	53
4.5	Principy kotvení a přehled stávajících řešení kotvení.....	55
4.6	Základní předpoklady pro systém kotvení.....	64

**T A**

**Č R**

4.7	Postup vývoje systému kotvení geosyntetických protierozních materiálů.....	65
4.8	Inovativní systém kotvení geosyntetických protierozních materiálů .....	71
4.9	Nasazení systému v ověřovací praxi.....	75
4.10	Experimentální ověření stability rozhraní humózní vrstvy a podloží.....	80
5	Aplikace výsledků projektu.....	82
5.1	Stavební inženýrství .....	83
5.1.1	Liniové dopravní stavby.....	83
5.1.2	Skládky.....	85
5.1.3	Výsypky .....	85
5.1.4	Úpravy vodních toků.....	85
5.1.5	Křížení vodních toků a liniových staveb.....	86
5.1.6	Občanská výstavba a krajinné úpravy .....	86
5.2	Kotvicí systém .....	87
5.3	Postupy pro zajištění stability .....	88
5.4	Software pro modelování povrchových procesů svahů.....	88
6	Zhodnocení průběhu řešení ve vazbě na plánované aktivity.....	88
6.1	Experimentální měření – lokality, infrastruktura její vybavení v rámci řešeného projektu....	88
6.2	Získané poznatky z oblasti eroze na umělých svazích a jejich aplikace do software a metodiky	88
6.3	Vývoj kotvicího systému .....	88
6.4	Publikace průběžných výsledků v rámci projektu .....	89
7	Čerpání finančních prostředků v rámci projektu.....	89
7.1	STRIX Chomutov, a.s.....	89
7.2	ČVUT v Praze.....	90
7.3	GEOSYNTETIKA, s.r.o. ....	90
7.4	Informace k vrácení nevyčerpaných prostředků z 2020.....	90
8	Plánované navazující aktivity po ukončení projektu a implementace výsledků.....	91
9	Literatura a ostatní zdroje .....	91
10	Přílohy .....	93

T A

Č R

## 1 Motivace a úvod do řešení projektu

Zemní tělesa dopravních staveb, výsyvky, skládky, ale i úpravy vodních toků jsou specifickou skupinou konstrukcí, kde je možné se setkat s negativními účinky srážek. Ať už jde o erozní ohrožení povrchu na straně jedné anebo specifikum stability celé humózní vrstvy, která slouží k ozelenění těchto umělých svahů. Dalším specifikem jsou relativně velké sklony těchto konstrukcí, na rozdíl od zemědělské půdy, která je s negativními účinky eroze nejčastěji spojována. Erozní škody způsobené na konstrukcích mají negativní dopad nejen na vlastní konstrukci, ale také na okolí stavby, především z hlediska možného zanášení odvodňovacích systémů vodních toků a nádrží. Cílem řešeného projektu je doplnit a aktualizovat možnosti ochrany těchto staveb před nepříznivými účinky vodní eroze a vhodnějšího zajištění stability svahu. Pro takto specifické konstrukce se využívá většinou celoplošné ochrany pomocí umělých anebo přírodních materiálů, která jsou kotveny k podkladní vrstvě. Mají jak protierozní funkci, tak díky kotvení k podkladu také zajišťují stabilitu povrchové vrstvy.

Tato závěrečná zpráva ze čtyřletého projektu přináší sumarizaci výsledků za celé období řešení. Některé části byly detailněji rozpracovány v předchozích každoročních dílčích zprávách. Tato závěrečná zpráva je členěna do hlavních kapitol popisujících současný stav a popis hlavních typů využívaných konstrukčních řešení a dále hlavní metody výzkumu, jejichž základem jsou umělé zadržovací experimenty s navazující kapitolou popisující výsledky výzkumu. Experimentální výzkum byl zaměřen především na sledování a vyhodnocování erozních procesů na povrchu uměle vytvářených svazích zemních těles a na výzkum stability rozhraní mezi humózní vrstvou a podkladem.

Z těchto výsledků jsou pak uvedena doporučení, jak využít výsledků výzkumu v praxi. V rámci řešení projektu vznikly tři hlavní výstupy.

Metodika, která je návodem, jak navrhovat protierozní ochranu na umělých strmých svazích. Doplňuje tak TP 53 – „Protierozní opatření na svazích pozemních komunikací“ z roku 2003. Erozní problematika je v TP řešena pouze obecnými pojmy a její kvantifikace chybí.

Dále je pak výsledkem projektu prototyp kotvicího systému, který posunuje technologii kotvení, tak aby bylo zajištěno kotvení materiálů s co možná nejmenším dopadem na půdní povrch a zároveň zvýšili efektivitu pracovníků.

Posledním výsledkem jen softwarový nástroj SMODERP Line. Jedná se o fyzikálně orientovaný model, který na základě hydrologické bilance a výpočtu proudění povrchového odtoku určuje míru erozního ohrožení.

## 2 Kategorizace technických materiálů využívaných pro běžné konstrukce strmých svahů

Jak z estetického, tak funkčního pohledu je cílovým stavem ozeleněný svah se zapojeným kořenovým systémem. Stabilní a dlouhodobou ochranu svahů před účinky přívalových dešťů zajišťuje vhodné ozelenění. Podle charakteru humózní vrstvy, roční doby realizace a zvoleného osetí je třeba zajistit dočasnou ochranu povrchu do plného zapojení ozelenění. Typy ozelenění (osetí, hydroosev) a vhodnost příslušných směsí travin je popsáno ve stávající TP 53, případně u konkrétních výrobců travních směsí. Detailněji byla řešena materiálu a výběru vhodných reprezentativních zástupců uvedených kategorií věnována první část projektu.

T A

Č R

Způsoby ochrany je možné rozdělit z několika hledisek:

- plošné opatření a liniové opatření,
- dočasné a trvalé,
- podle typu a struktury materiálu.

Detailně jsou jednotlivé technické materiály rozčleněny:

- přírodní materiály – výrobky zejména z kokosu, juty, slámy a jejich kombinací:
  - síťové materiály (například K400, K700 a K900, J 500),
  - plošné materiály (například Biomac CC),
  - liniové materiály (například slámové válce),
- umělé materiály – výrobky zejména z Polyamidu, Polypropylénu a dalších:
  - geomříže ploché,
  - geomatrace / georochože – výrobky s vláknitou 3D strukturou (například Enkamat, Macmat),
  - geomříže a geotextilie s vlnami (například Fortrac 3D),
  - netkané geotextilie.

Liniová opatření fungují na principu vytváření pásových překážek, které přerušují dráhy soustředěného odtoku a zároveň zachytávají případný erodovaný materiál. Jsou tak přirozeně a samovolně vytvářeny sedimentační lavice. Jde například o filtrační bariéry z biodegradabilních materiálů, zápleťové plůtky nebo pleteniny.

Filtrační bariéry jsou zpravidla nízké cca 20–50 cm vysoké a dle potřeby dlouhé válce z geomříže, pytliviny, či jiného vhodného materiálu, které jsou naplněny senem, slámou nebo zbytky kokosových vláken. Takové bariéry propouští vodu, ale unášený materiál zachycují a v průběhu času vytvářejí „kaskády“, jenž svah stabilizují.

Mezi další plošná opatření pak patří klejonáž a mulčování. Při použití těchto metod je výhodou využití místních často náletových dřevin, které jsou odklizeny například během stavby. Speciálním plošným způsobem ochrany je tzv. hydroosev. Jedná se o způsob ochrany povrchů spojený s jejich osetím, při kterém se směs hydraulicky rovnoměrně nanáší postřikem. Směs tvoří osivo, voda, umělé hnojivo, organické hmoty (rašelina, řezanka, kaly, sláma), stabilizující a protierozní pomocné přísady. Pro navrhování z hlediska protierozní ochrany platí stejné principy posouzení jako pro jiné způsoby plošné ochrany uvedených dále.

Z výše vypsáního výčtu materiálů byly v rámci projektu testovány nejčastěji výrobky s celoplošným ochranným opatřením povrchu. Dále pak méně často využívané způsoby jako je mulč a klejonáž a jeden zástupce liniových přerušení. Technologicky nebylo možné ověřit funkčnost hydroosevu. Přehled testovaných materiálů je uveden v tabulce 1. V případě, že se jedná o zasypaný materiál, tak byl materiál zasypaný po horní okraj výrobku. Pokud byl proveden experiment na zasypaném materiálu, tak stejný materiál byl testován i v nezasypané variantě.

Tabulka 1: Přehled testovaných opatření v lokalitě Jirkov

Označení	Název	Kategorie
biom	Biomac-c	přírodní plošný materiál

en71	Enkamat 7010	umělá geomatrace s 3D strukturou
en72	Enkamat 7020	umělá geomatrace s 3D strukturou
e72z	Enkamat 7020 zasypaný	umělá geomatrace s 3D strukturou
fo3D	Fortrac 3D	umělá geomříž s vlnami
f3Dz	Fortrac 3D zasypaný	umělá geomříž s vlnami
juta	Jutová síť 500g	přírodní síťový materiál
klej	Klejonáž	přírodní plošný materiál
k400	Kokosová síť K400	přírodní síťový materiál
k700	Kokosová síť K700	přírodní síťový materiál
mulc	Mulč	přírodní plošný materiál
ma18	Macmat 18.1	umělá geomatrace s 3D strukturou
m18z	Macmat 18.1 zasypaný	umělá geomatrace s 3D strukturou
ma08	Macmat 8.1	umělá geomatrace s 3D strukturou
ntex	Netkaná geotextílie	umělý plochý materiál
seno	Seno	přírodní plošný materiál
troj	3D stabilizační rohož	umělý netkaný materiál
val1	Válec 1x	přírodní liniový materiál
val2	Válec 2x	přírodní liniový materiál
zm08	Macmat 8.1 zasypaný	umělá geomatrace s 3D strukturou

### 3 Experimentální výzkum eroze a odtoku na umělých svazích

Experimentální část výzkumu navazovala jak na rešeršní část problematiky, tak na zkušenosti členů řešitelského kolektivu. Z hlediska výzkumu erozních procesů jsou základem zadešťovací experimenty, při kterých je pomocí uměle generovaného deště vytvářen povrchový odtok a simulován tak erozní proces. K tomuto účelu byl využit laboratorní dešťový simulátor ČVUT v Praze, který byl pro potřeby projektu upraven. Dále pak venkovní experimentální laboratoř v Jirkově, kde bylo instalováno pět experimentálních ploch. Tři byly uměle zadešťovány a dvě byly využity pro dlouhodobý monitoring a experimenty stability humózní vrstvy a tahové zkoušky při testování kotvícího systému. Další doplňkové experimenty jsou popsány v příslušných kapitolách. Lokality jsou detailněji popsány dále v této zprávě.

#### 3.1 Erozní proces a povrchový odtok na umělých svazích

Vodní eroze je přirozený proces, při kterém je v důsledku kinetické energie dešťových kapek a proudění povrchové vody narušován půdní povrch a půda je transportována vodou ve směru proudění. Dočasně odhalené a vegetací nechráněné velmi strmé svahy umělých konstrukcí jsou nezanedbatelnou oblastí, kde k erozi dochází. Principy eroze jsou velmi podobné jako na zemědělské půdě. V základu existují tři formy eroze, (a) eroze deštěm, při které jsou půdní zrna (agregáty) uvolňovány kinetickou energií dopadajících kapek. (b) plošná (selektivní) eroze, při které jsou zrna transportována při vzniku plošného povrchového odtoku. (c) rýhová – která vzniká při překročení soudržných sil vlivem energie

T A

Č R

vody dochází ke vzniku erozních rýh. Příčina vzniku této eroze není jen energie dešťových kapek, ale také sil proudící vody. Jednotlivé procesy je těžké od sebe zcela oddělit. Vznik eroze (plošné i rýhové), její intenzita atp. je podmíněn mnoha faktory, které jsou vzájemně provázané.

Základem výzkumu je změření dostatečně velkého souboru pokusů, na základě, kterého bude možné výsledky výzkumu aplikovat do návrhu vhodného opatření. Tento soubor dat byl získáván pomocí dešťových simulátorů, které jsou popsány dále. Kapitola je dále členěna nejen na samotné vyhodnocení smyvů a eroze včetně analýzy zrnitosti sedimentu, ale i na bezkontaktní metody k určení množství eroze, dále také na další důležité parametry ovlivňující erozní proces. Zejména pak zrnitostní složení erodovaného materiálu a vlhkostní režim v půdě během experimentů a dlouhodobý monitoring eroze na umělých svazích pomocí fotogrammetrických metod. Tato měření jsou pak podkladem pro matematický popis procesů, což v konečném cíli pro praktické využití znamená mít možnost pomocí SW navržené řešení posoudit.

### **3.2 Měření odtoků a smyvů pomocí umělého zadešťování**

Základem měření je pomocí umělého zadeštění vyvolat srážku a v kontrolovaných podmínkách sledovat erozní procesy. Dešťové simulátory jsou také zárukou získání dostatečně velkého souboru měření, nezávislého na nejistotě přirozených dešťů.

#### **3.2.1 Popis zařízení**

Jak již bylo zmíněno v úvodu, tak pro měření vlivu technických opatření na umělých svazích byla zvolena jako základní experimentální metoda vyvolání erozního procesu pomocí umělého zadeštění. K těmto účelům se využívají dešťové simulátory, v případě tohoto projektu byly využity dva, každý s jiným účelem.

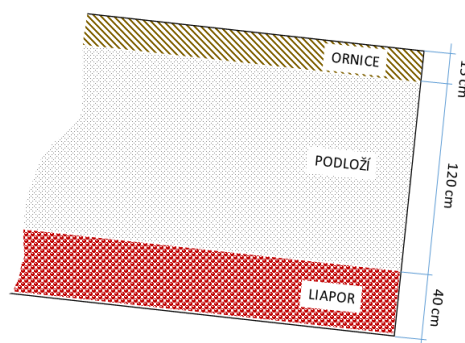
##### **3.2.1.1 Venkovní dešťový simulátor – Jirkov**

Venkovní experimentální laboratoř byla vytvořena v provozním areálu hlavního řešitele projektu STRIX Chomutov. V rámci předchozích aktivit byla v rámci areálu vyčleněna a připravena plocha pro výzkum, kde bylo umístěno pět experimentálních ploch, každá s rozměry 4 m x 2,2 m. Tři z těchto ploch jsou vybaveny jednoduchým dešťovým simulátorem a je možné tyto plochy skrápět umělým deštěm. V rámci tohoto řešeného projektu byly tyto plochy upraveny pro potřeby tohoto projektu. Charakteristiky zadešťovacího zařízení vycházejí z mobilního dešťového simulátoru ČVUT v Praze (Kavka, 2018). Charakteristiky deště (velikost kapek, jejich kinetická energie a rovnoměrnost postřiku) jsou dané tvarem trysky a tlakem odpovídají přirozeným dešťům. Sklony jednotlivých ploch byly upraveny tak, aby odpovídaly sklonům pro konstrukce násypů a zářezů (1:1,5, 1:1,75 a 1:2,5) viz vzorové listy (pjk.cz, 1995). Schéma umístění ploch je zobrazeno na obrázku.1.



**Obrázek 1: Pohled na umístění jednotlivých ploch včetně jejich sklonu. Na třech prostředních kontejnerech jsou umístěny konstrukce dešťového simulátoru.**

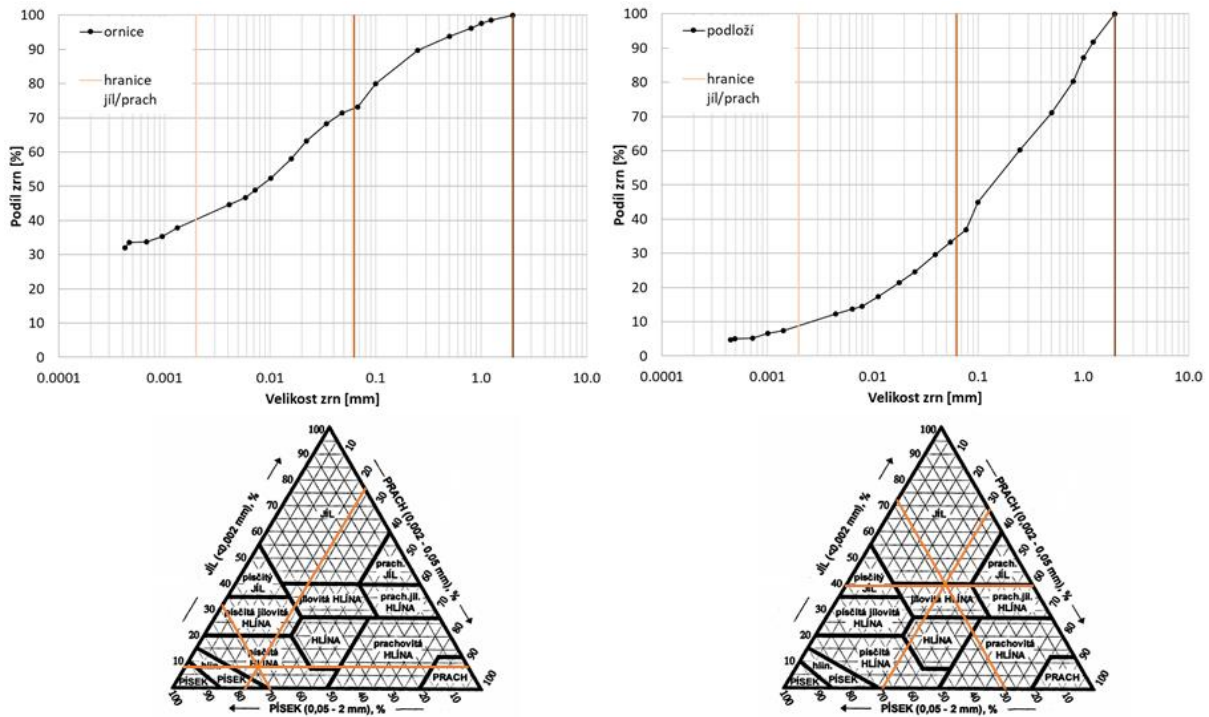
Základem konstrukce experimentálních ploch jsou ocelové kontejnery. Hloubka kontejneru je 1,6 m. Před instalací ploch do patřičného sklonu, byly kontejnery vyplněny ve spodní části v tloušťce  $\frac{1}{4}$  výšky kontejneru (cca 40 cm) Liaporem, aby byla zajištěna vertikální propustnost profilu a byly tak simulovány přírodní podmínky. Střední částí profilu byla vyplněna cca 4 x 30 cm vrstvami zeminy. Po nasypání každé vrstvy tl. max. 30 cm byla vrstva přehutněna hutnicí deskou. Tento materiál se standardně využívá při tvorbě násypů a zároveň reprezentuje odhalené kompaktní zářezy. Vrstva byla zhutněna a srovnána do roviny. Tento postup odpovídá běžně využívaným postupům v inženýrské praxi. Svrchní část pak byla ohumusována 15 cm vrstvou ze skrývky ornice provedené firmou STRIX v prvním roce řešení projektu, také postupem odpovídající zavedené praxi. Přiměřené a konstantní hutnění bylo zajištěno ručním válcem. Schematicky je skladba půdního profilu demonstrována na obrázku 2.



**Obrázek 2: Skladba půdního profilu na venkovních testovacích erozních plochách v Jirkově**

Pro budoucí fyzikální modelování byl proveden zrnitostní rozbor ornice a podloží, charakteristiky jsou uvedeny na obrázku 3 a v tabulce 2.





Obrázek 3: Zrnitostní rozbor a zatřídění dle klasifikace USDA ornice (vlevo) a podloží (vpravo)

Tabulka 2: Zrnitostní složení půdních vrstev

vrstva	Objemová hmotnost (g/cm <sup>3</sup> )	Pórovitost (%)	Textura	Jíl (%)	Prach (%)	Písek (%)
Použitá skrývka ornice	0,98	61,9	Jílovitá hlína	39,5	32,2	28,3
podloží	neměřeno		Písčitá hlína	8,3	23,8	67,9

Tři plochy každá s odlišným sklonem (1:1,5; 1:1, 75 a 1:2,5) viz obrázek 1 jsou uměle zadešťovány. Každá plocha je podélně rozdělena na dvě stejné experimentální plochy o šířce 1,1m. Jedna polovina je bez opatření a na druhé polovině jsou střídána jednotlivá technická opatření. Z každé dílčí plochy je na spodní straně svahu instalován sběrný žlab pro odběr vzorků sedimentu a měření odtoku. Metodika odběrů byla určena v prvním roce řešení. V první fázi projektu byly na lokalitě Jirkov prováděny párové testy, kdy na jedné polovině plochy bylo vždy instalováno ochranné opatření a druhá polovina byla upravena do podoby holé půdy bez opatření. Tato holá polovina byla uválcována, tak aby byla simulována úprava svahů na staveništi. Metodika byla upravena pro poslední dva roky řešení, tak že na obou polovinách bylo vždy instalováno různé opatření.

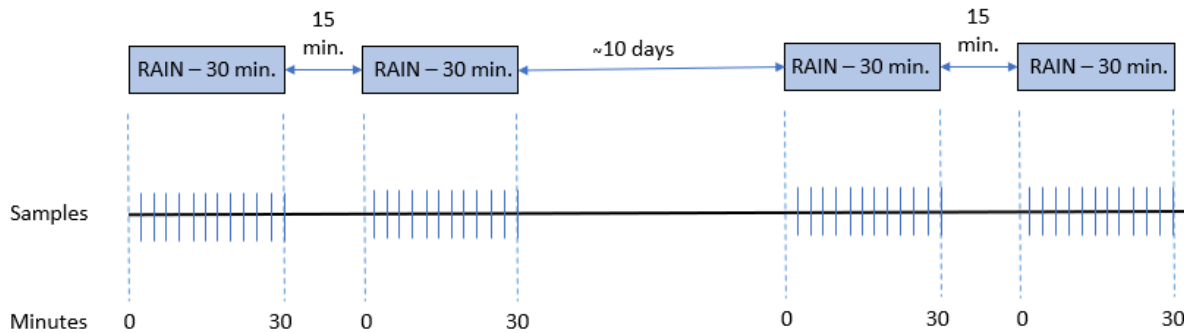
V rámci aktivit v roce 2017 bylo jedním z cílů stanovit metodiku měření na těchto plochách. Tento metodický návod je vložen formou přílohy.

Experimentální lokalita v Jirkově byla v průběhu roku instrumentována pro kontinuální monitorování srážek, vlhkostního a teplotního režimu zeminy v erozních plochách. Lokalita je nově vybavena standardizovaným překlopným člunkovým srážkoměrem se záznamem srážkových úhrnů v minutovém kroku.

Kontejnery se zeminou jsou vybaveny čidly pro kontinuální záznam objemové vlhkosti, půdního sacího tlaku a teploty půdy ve dvou horizontech (ornice a podloží). Rozmístění jednotlivých čidel je znázorněno na obrázku 22 v kapitole 3.5.1. Pro analýzu průběhu experimentů je, i s ohledem na budoucí numerické modelování transportních procesů, klíčové sledovat vývoj objemové vlhkosti ve vertikálním směru v ploše s i bez instalované geotextilie.

Na lokalitě v Jirkově bylo provedeno celkem 144 experimentů párových testů a 96 experimentů, kdy na obou stranách byly aplikovány rozdílná opatření. Jako experiment se zde rozumí jedna třicetiminutová srážka (30 minut od počátku povrchového odtoku). Princip časového provádění experimentů je znázorněn na obrázku 4. Celkem jsou na obrázku znázorněny 4 jednotlivé experimenty tak, jak byly metodicky prováděny. Vždy byly provedeny experimenty na (a) suché upravené ploše, (b) po patnácti minutové pauze na předem nasycené ploše, (c) po přibližně deseti dnech na vyschlé ploše s erozními rýhami po předchozím experimentu a (d) po patnácti minutové pauze na předem nasycené ploše s erozními rýhami. Během každého experimentu byly odebírány vzorky na objem povrchového odtoku každé 2,5 minuty, celkem tedy 12 vzorků za každý experiment, které byly následně zváženy na určení objemu odtoku a následně byl každý vzorek přefiltrován a vysušen pro určení ztráty půdy.

Mimo povrchového odtoku byl na plochách sledován vlhkostní režim v půdě, detailněji je to uvedeno v kapitole 3.5.



Obrázek 4: Znárodnění způsobu provádění experimentů v lokalitě Jirkov. Během každého experimentu je znázorněno odebrání vzorků na určení objemu povrchového odtoku a množství ztráty půdy.

### 3.2.1.2 Halový dešťový simulátor ČVUT v Praze (MN)

Jako druhé zařízení pro provádění experimentů s umělým deštěm pro sledování erozního procesu a vlivu geotechnických opatření na umělých svazích byl použit laboratorní simulátor Fsv ČVUT v Praze. Toto zařízení se používá na fakultě již od roku 2001. V roce 2018 byla provedena zásadní rekonstrukce, tak aby zařízení umožňovalo provádět experimenty až do sklonu 30° s teplotním rozsahem půdy -15 - +40 °C (chlazení je instalováno v půdním profilu). Na laboratorním simulátoru lze jednoduše a v chráněných laboratorních podmínkách provádět experimenty i za nepříznivého počasí, ovšem vždy jen na porušeném vzorku půdy. Simulátor je vybaven dvěma nejčastěji využívanými systémy pro tvorbu srážky (pulzní a kyvný) a umožňuje provádět experimenty s intenzitou srážky v rozsahu 20–160 mm/h. V půdním profilu jsou instalována čidla na průběžné měření půdní vlhkosti a voda která proteče půdním profilem do hlubších vrstev je odváděna (perkolace) a automaticky je měřeno její množství. Vedle plochy je nainstalován srážkoměr a 6 totalizátorů pro kontrolu skutečné intenzity srážky během experimentu. Motivace pro takto zásadní rekonstrukci byla dána i řešením tohoto projektu. Investiční část rekonstrukce byla hrazena z jiných zdrojů. Část provozních a podinvestičních prostředků byla hrazena z tohoto projektu.

Pro účely tohoto projektu byly použity dva typy půd. Jedna půda je totožná jako půda použita na experimentálních plochách v Jirkově, jedná se tedy o skrývku ornice, která se k těmto účelům běžně používá. Charakteristika půdy je uvedena v předchozí kapitole v tabulce 2. Druhá půda byla vybrána umělá zemina z kompostárny. Jakožto zástupce specifické skupiny zemin využívaných pro povrchovou vrstvu. Z důvodů dopravní dostupnosti byla zvolena běžná směs pod obchodním názvem “směs trávnicková” z kompostárny JENA v Úholičkách nedaleko Prahy. Základní vlastnosti půd jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Vlastnosti půdy “směs travníková”

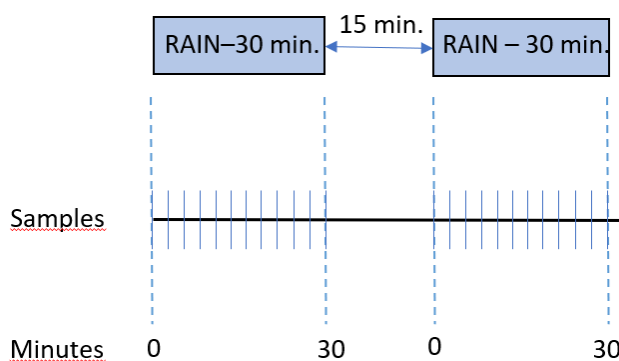
	Objemová hm	Pórovitost	Textura	Jíl (%)	Prach (%)	Písek (%)
Směs travníková	1,28	52,2	Hlína	7,98	45,73	46,29

Pro provádění experimentů bylo využito sklonů 1:2,5 (22°) a 1:1,75 (30°) (stejně jako dvě z experimentálních ploch v Jirkově) a pak ještě mírnějšího sklonu 10°.

Měření v laboratoři byla prováděna jako doplněk k měření v Jirkově. Cílem bylo v laboratorních podmínkách detailněji sledovat erozní procesy. Na rozdíl od ploch v Jirkově byly vzorky zrnitosti odebírány častěji a byla standardně měřena také rychlost odtoku, jakožto důležitého validačního parametru pro odtok. A dále byly testovány inovativní technologické přístupy k zabránění erozních škod, viz Kapitola 3.8.

Provedeno bylo celkem 60 experimentů. V roce 2019 byla laboratoř s dešťovým simulátorem uzavřena kvůli přestavbě celé haly, kde je simulátor umístěn, a proto musely být experimenty na tuto dobu přerušeny.

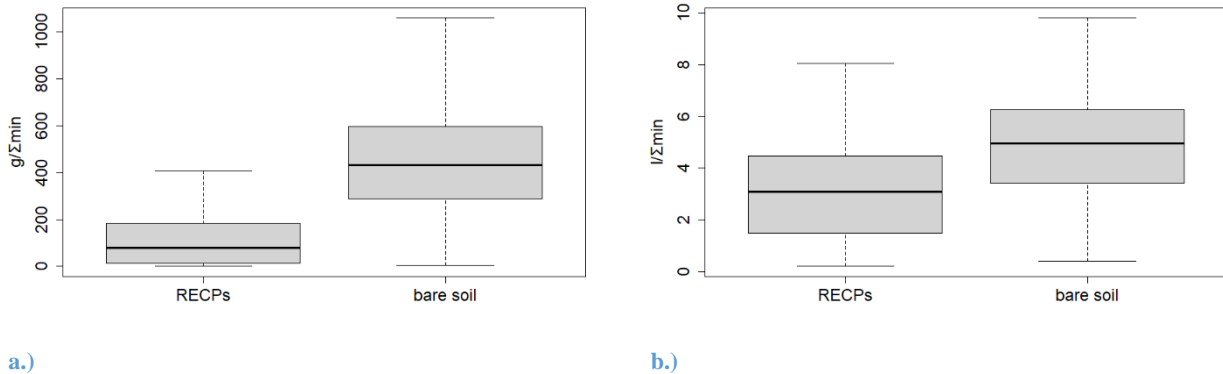
Metodika měření Experimenty byly prováděny ve dvojicích. Byla prováděna dvojice experimentů (a) na suché připravené ploše s délkou 30 minut a po 15ti minutové mezeře (b) na nasyceném povrchu. Způsob provádění experimentů je znázorněna na obrázku 5. Vzorky na určení objemu odtoku a ztráty půdy byly odebírány každé 2,5 minuty. Další experimenty zaměřené na inovativní technologické postupy byly ve speciálním režimu. Tyto experimenty včetně popisu zadeštění jsou popsány v kapitole 3.8



Obrázek 5: Znázornění způsobu provádění experimentů na laboratorním simulátoru. Během každého experimentu je znázorněno odebírání vzorků na určení objemu povrchového odtoku a množství ztráty půdy.

### 3.2.2 Výsledky měření

Výsledky měření prokazují významný vliv technických opatření na režim odtoku vody a sedimentu z testovacích ploch. Souhrnně jsou všechny testy znázorněny na obrázku 6, grafy vyjadřují celkový odtok vody a odnos sedimentu z holé plochy a plochy s opatřením.

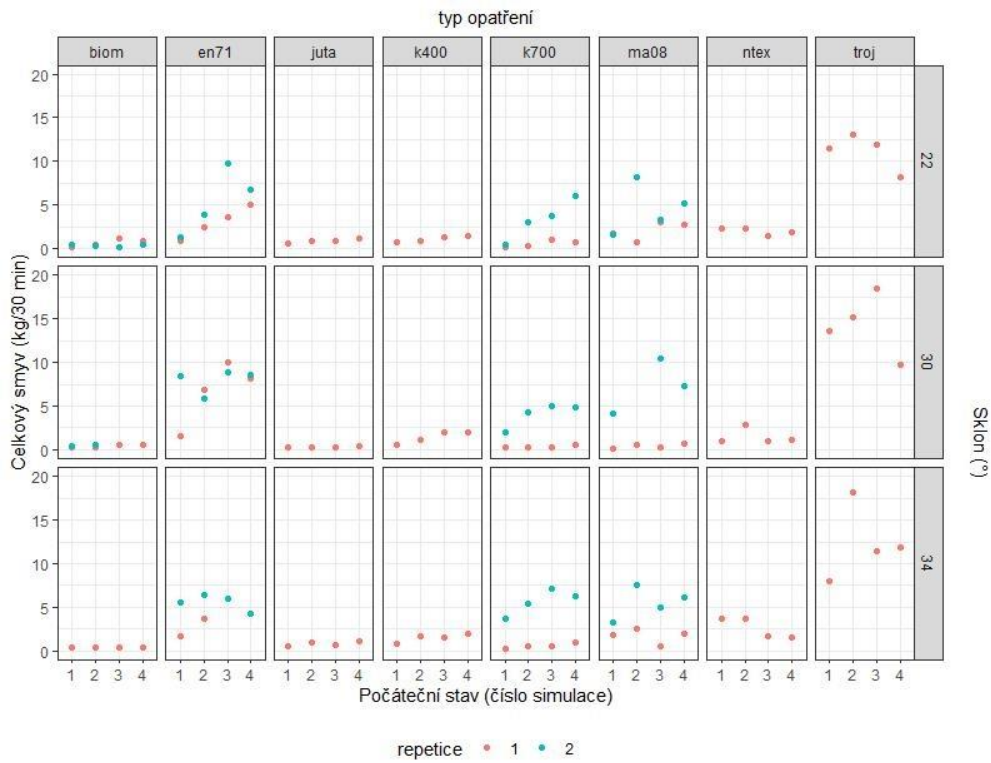


**Obrázek 6: Efekt RECPs (Rolled Erosion Control Products) (a) množství sedimentu, (b) na množství povrchového odtoku. Levý z dvojice box plotů zobrazuje hodnoty pro všechny RECP, pravý pro holou půdu. Střední tlustá čára zobrazuje mediánovou hodnotu, hranice box plotu 25 resp. 75 hodnotu kvartilů**

Odtok z ploch bez opatření je oproti plochám s opatřením v průměru o 40 % vyšší (obrázek 6a). V případě odnosu sedimentu je vliv opatření daleko významnější (Obrázek 6b).

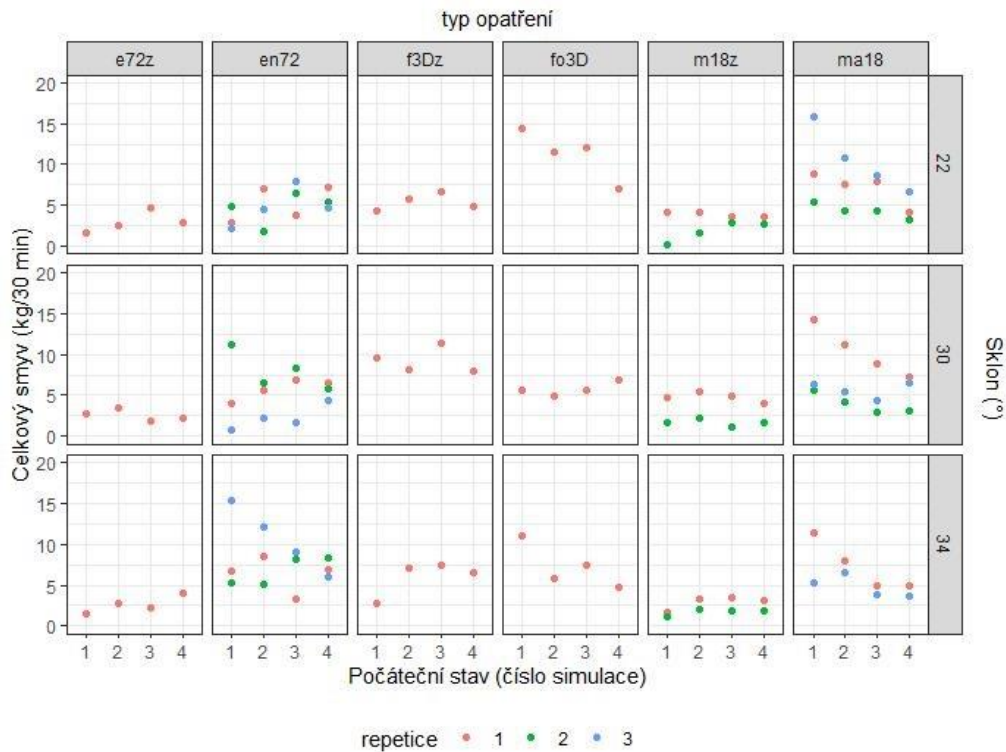
Na obrázcích 7, 8 a 9 jsou zobrazeny výsledky ztráty půdy z jednotlivých ploch s různými opatřeními. Rozděleny jsou do tří obrázků dle způsobu opatření. Na obrázku 7 jsou plošné materiály, které byly použity pouze ve variantě položené na plochu a přikotveny zemními kotvami. Na obrázku 8 jsou materiály v porovnání položené na plochu a přikotveny jako v předchozím případě a druhým způsobem, který je kotvení materiálu a zasypání po horní hranu výrobku. Na obrázku 9 jsou méně obvyklá opatření, která jsou využitelná tam, kde nejsou kladeny tak velké nároky na stabilizaci svahu z hlediska možného usmýknutí.

Na následujících obrázcích je hodnoceno celkové množství smyvu v kilogramech za celou dobu simulace, tedy za 30 minut experimentu od počátku povrchového odtoku. Zkratky výrobků v tabulkách viz tabulka 1.



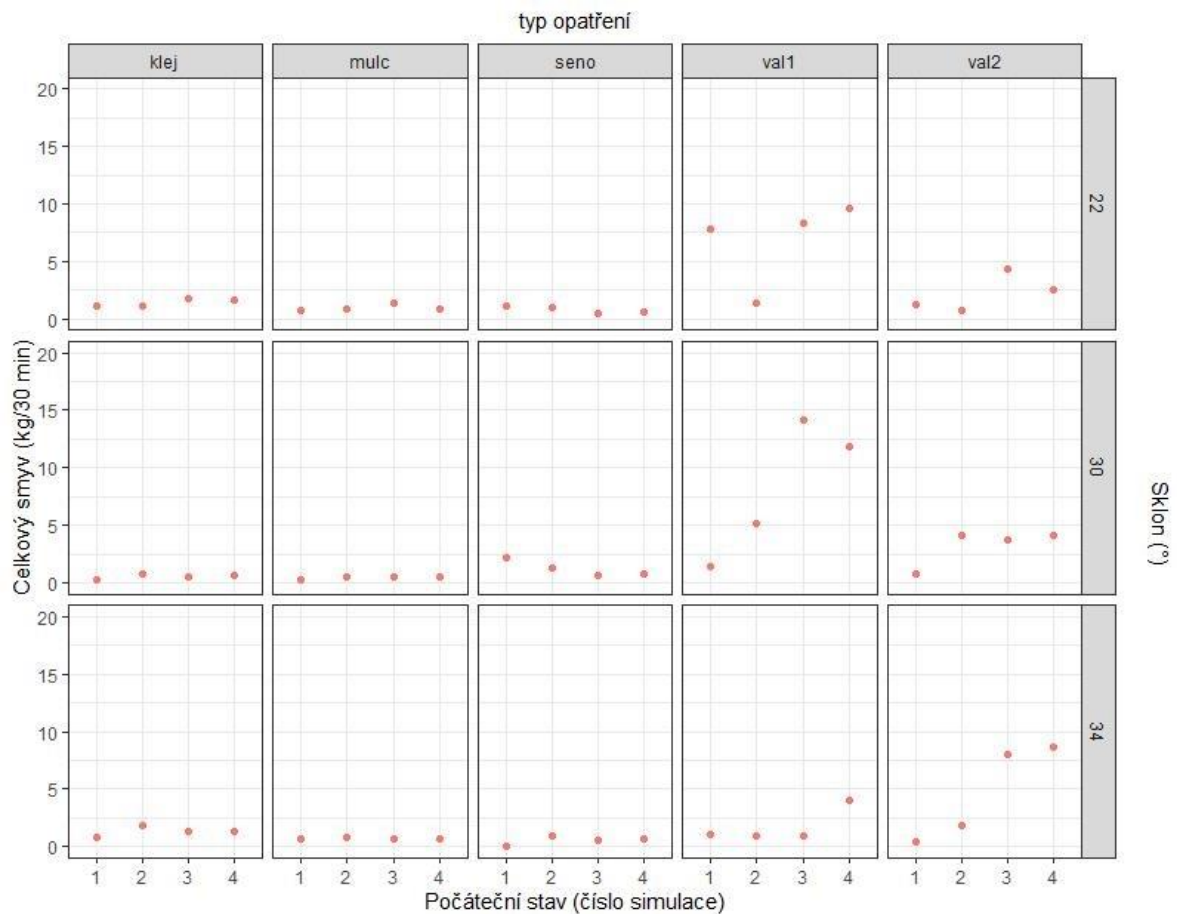
Obrázek 7: Přehled jednotlivých materiálů z kategorie plošných opatření.

Při testování plošných materiálů připevněných zemními kotvami (obrázek 7) ukázaly nejlepší výsledky materiály Biomac, juta, kokosová síť k400 a netkaná geotextílie. Všechny tyto materiály vykázaly velice malou ztrátu půdy do hodnoty přibližně 4 kg. Hůře pak dopadly materiály Enkamat 7010, kokosová síť k700 a macmat 8.1 se ztrátou půdy až 10 kg a nejhůře dopadla 3D stabilizační rohož se ztrátou půdy dokonce až 20 kg.



**Obrázek 8: Přehled simulací na plošných materiálech ve dvou způsobech upevnění na plochu. Zaprvé jde o položení materiálu na experimentální plochu a v druhém případě byl protierozní materiál zahrnut po horní okraj výrobku.**

Při porovnání zasypaných a nezasypaných materiálů (obrázek 8) vyplývá, že o něco menší ztrátu půdy vykazovaly zasypané materiály. Testovány tímto způsobem byly materiály Enkammat 7220, Fortrac 3D a Macmat 18.1. Při zasypaní materiálu byla ztráta z těchto ploch přibližně 2,5 – 5 kg. Pokud byly materiály pouze přikotveny na plochu, byla někdy ztráta také 2,5 kg, ale v mnoha případech ztráta půdy dosahovala až 15 kg.



Obrázek 9: Přehled simulací na dalších materiálech, které nejsou plošné textilie, a proto nepomáhají proti možnému sesunutí svahu.

Z materiálů, které nejsou plošné geotextilie (obrázek 9) dosáhly vynikajících protierozních výsledků klejonáž, seno a mulč. Všechny tyto materiály dosáhly ztráty půdy pod 2 kg. V případě použití válců mají dva válce lepší protierozní schopnost než jeden, ale i tak se výsledky pohybovali až do 15 kg v případě jednoho válce a 10 kg v případě dvou válců.

Je zde vidět patrný rozdíl mezi jednotlivými opatřeními. Nejlepší ochrannou schopnost obecně mají přírodní materiály.

### 3.2.2.1 Párové testy a efektivita opatření

Párové testy byly porovнены pouze pro materiály uvedené v tabulce 4.

Tabulka 4: Párové testy

Označení	Název	Kategorie
biom	Biomac-c	přírodní plošný materiál
en71	Enkamat 7010	umělá geomatrace s 3D strukturou
en72	Enkamat 7020	umělá geomatrace s 3D strukturou



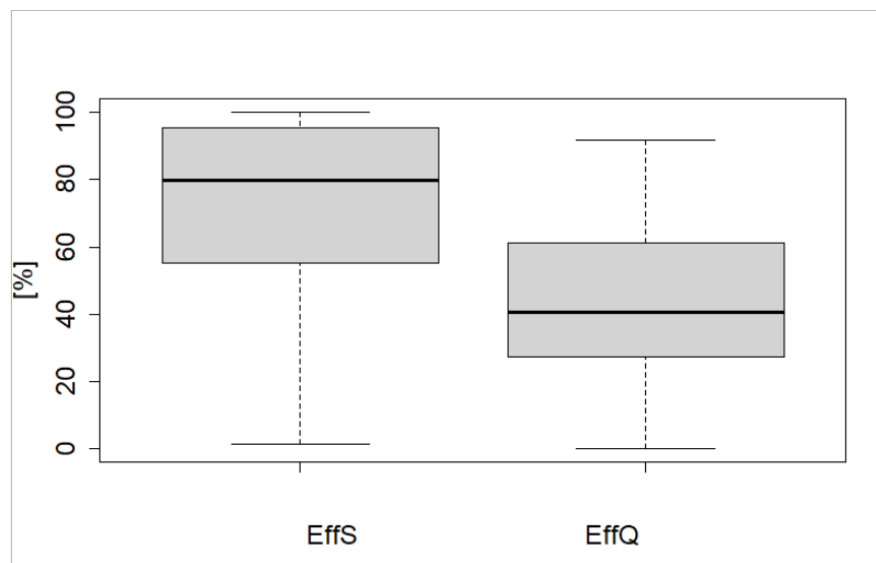
# T A Č R

k700	Kokosová síť K700	přírodní síťový materiál
ma18	Macmat 18.1	umělá geomatrace s 3D strukturou
ma08	Macmat 8.1	umělá geomatrace s 3D strukturou

Plocha holé půdy je referenčním stavem, ke kterému je možné určovat efektivitu příslušných opatření. Ta je důležitým hodnotícím kritériem pro stanovení vlivu opatření a lze ji definovat jako poměr rozdílu vlivu opatření vztažený k hodnotě bez vlivu opatření. Vztah odvodil Sutherland (1998), který jej využil pro odvození efektivitu z hlediska odnosu sedimentu.

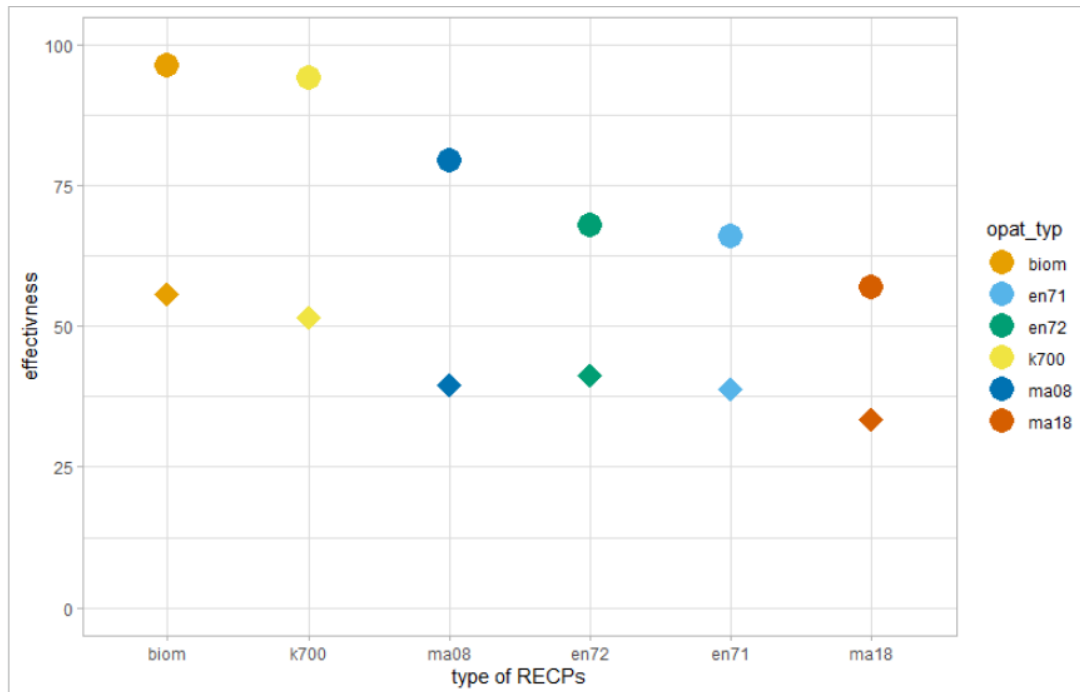
$$E_{ff}[\%] = \frac{\text{Hodnota jevu bez opatření} - \text{hodnota jevu s opatřením}}{\text{Hodnota jevu bez opatření}} * 100$$

Stejný vztah je možné využít i pro hodnoty odtoku (Álvarez-Mozos, 2014). Aby bylo možné sledovat vývoj efektivitu opatření v čase byly pro všechny simulace vypočteny kumulativní hodnoty velikosti odtoku a množství sedimentu v kroku odpovídajícímu měření (2,5 min). Pro párová měření byla určena efektivita z hlediska odtoku (EffQ) a smyvu (EffS). Celkově je efektivita vyšší z hlediska smyvu než odtoku, jak ukazuje obrázek 10.



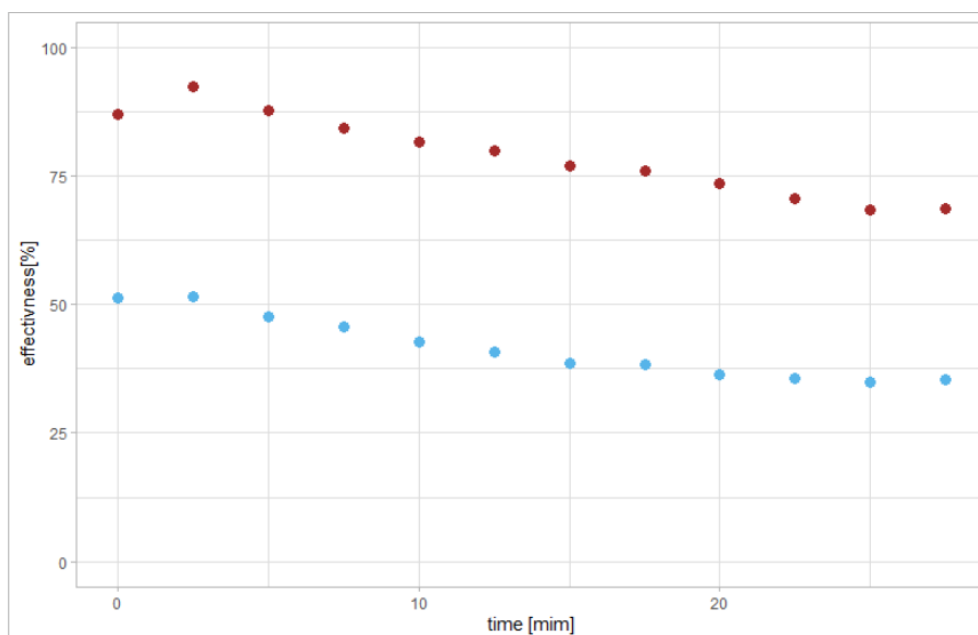
Obrázek 10: Box plot ukazující efektivitu opatření na smyv (EffS) a odtok (EffQ). Průměrná efektivita z hlediska ochrany před smyvem je okolo 80%.

Efekt opatření na smyv a odtok není neměnnou veličinou. Liší se jak mezi jednotlivými opatřeními, jak je vidět na obrázku 11.



Obrázek 11: Rozdíl v efektivitě konkrétních opatření, označeno barevně. Symbol kola značí EffS, symbol čtverce pak EffQ

Vyhodnocení bylo zaměřeno na průběžnou změnu efektivity, která byla vypočtena pro jednotlivé kumulované hodnoty po časových úsecích. Pro celkové zhodnocení vývoje efektivity opatření byla pro jednotlivé časové úseky spočtena průměrná a mediánová efektivita. Z obrázku 12 je pak patrná časová změna efektivity.



Obrázek 12: Vývoj efektivity v čase simulace, červeně je označen vývoj EffS a modře EffQ

### 3.3 Stanovení povrchových změn a množství eroze pomocí fotogrammetrických metod

Standardní určení erozních škod na realizovaných stavbách pomocí dešťových simulací, nebo odběrem odplaveného materiálu je velmi náročné. Moderní metody detailního snímkování povrchů a následného vytváření 3d modelů povrchů umožňují výpočet objemových změn a jejich využití je možné i pro určení erozního ohrožení. Verifikace těchto metod s přímým měřením eroze je jedním z dílů řešení projektu. Již od začátku projektu bylo prováděno bezkontaktní měření povrchu půdy pomocí fotogrammetrické metody "Structure from Motion" (SfM). Tato metoda je běžně aplikovaná při erozních experimentech od malých měřítek (experimentální plocha do 10 cm<sup>2</sup>), přes střední měřítka (do 1-100 m<sup>2</sup>) až po velká měřítka jako jsou např. celé pozemky či povodí (plocha nad 100 m<sup>2</sup>). V případě tohoto projektu byly měřeny plochy o velikosti 4 m<sup>2</sup> (Halový DS ČVUT v Praze), resp. 2x5,1 m<sup>2</sup> (Lokalita Jirkov) a dále venkovní lokality určené pro dlouhodobý monitoring (viz kapitola 3.6), kde se jednalo o umělé svahy o velikostech do 15 m<sup>2</sup>, dále hráz rybníka se svahem o ploše přibližně do 700 m<sup>2</sup> a násep liniové stavby o svahu s plochou okolo 1300 m<sup>2</sup>. Vzhledem k těmto rozměrům experimentálních ploch (mimo hráz rybníka a násep liniové stavby) bylo možné díky použité fotografické technice pracovat s výsledným rozlišením 1 mm/pix. Fotogrammetrické zpracování pořízených fotografií bylo prováděno pomocí softwaru Agisoft Metashape (dříve Agisoft Photoscan).

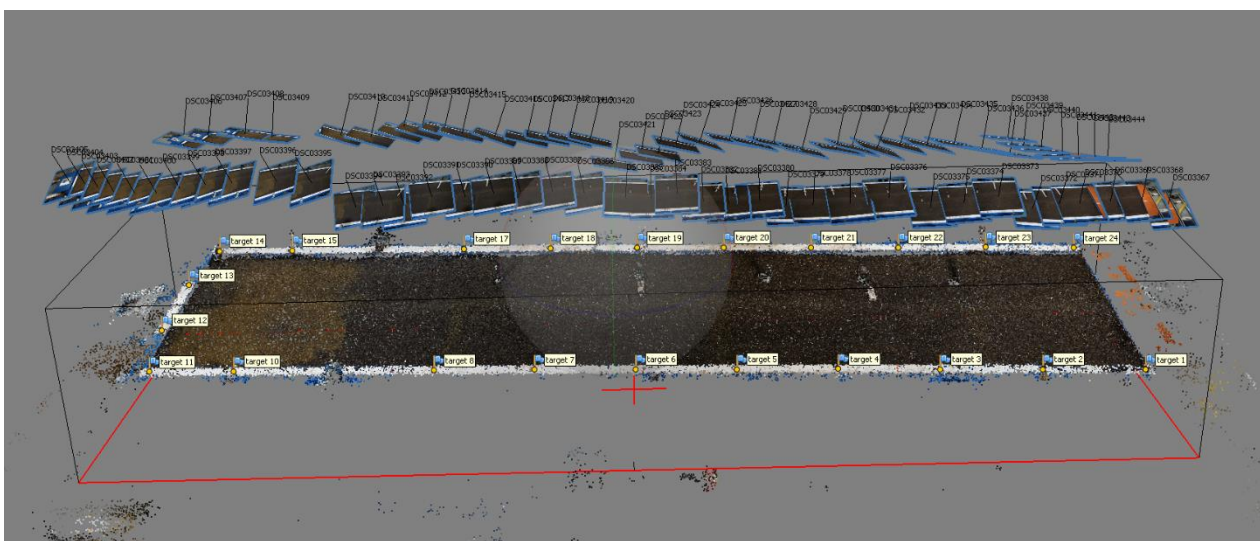
Pro potřeby fotogrammetrického zpracování byly v případě experimentálních ploch na lokalitě Jirkov i v případě halové dešťového simulátoru ČVUT v Praze instalovány referenční terče po obvodu experimentálních ploch, které měly za cíl vytvořit přesný souřadný systém pro následné referencování získaných dat. V případě lokality Jirkov byly všechny experimentální plochy s umělým zadržováním vybaveny celkem 11 terči - 9 terčů bylo umístěných po obvodu a 2 terče byly umístěny na dělicím prkně uprostřed. Všechny terče byly následně zaměřeny pomocí totální stanice a výsledné polohopisné i výškopisné souřadnice bylo poté přiřazeny k odpovídajícím bodům při zpracování dat. Experimentální plocha na halovém DS byla vybavena celkem 24 terči, která byly vyrobeny a instalovány v již předem definovaném souřadném systému. Porovnání obou systémů je názorně zobrazeno na obrázku 13.



Obrázek 13: Umístění a počtu referenčních terčů na experimentální ploše (a) lokality Jirkov (na obrázku vlevo) a (b) halového DS ČVUT v Praze (na obrázku vpravo).

Takto připravené experimentální plochy byly vždy snímány pomocí bezrcadlového fotoaparátu Sony s velikostí čipu APS-C. V případě lokality Jirkov byl použit fotoaparát Sony NEX-5N s rozlišením 16,1 Mpx v kombinaci se širokoúhlým objektivem Samyang s ohniskem 12 mm, resp. 18 mm v přepočtu na kinofilm. Při experimentech na halovém DS byl využit fotoaparát Sony A6000 s rozlišením 24,1 Mpx v kombinaci s objektivem Sony 16-50 mm nastaveným na 16 mm, resp. 24 mm v přepočtu na kinofilm. Snímkování experimentální plochy probíhalo v několikrát v průběhu jednoho experimentu. Vždy byl povrch plochy snímán před samotným započítáním experimentu pro získání počátečního stavu (snímání 1). Dále bylo snímání prováděno po první suché simulaci (snímání 2) a po následné mokré simulaci (snímání 3). V případě více provedených simulací, byl povrch snímán vždy znovu. Každé jedno snímání znamenalo pořízení přibližně 80-100 fotografií v případě lokality Jirkov, a přibližně 50-70 fotografií v případě halového DS, kde díky stálému a rovnoměrnému osvětlení v kombinaci s více

referenčními terčí a menší vzdálenosti fotoaparátu od povrchu stačil menší počet snímků. Z hlediska polohy fotoaparátu při snímání byla snaha pořídit kolmé fotografie ve dvou řadách při okrajích kontejneru s co největším překryvem sousedních snímků v podélném i příčném směru. Ukázka polohy fotoaparátu pro jednotlivé snímky při snímání plochy halového DS je na obrázku 14. Při snímání plochy je nastavený režim priority clony s hodnotou okolo F8 a citlivostí okolo hodnoty ISO 800 (max. 1600), tak aby bylo docíleno co největší hloubky ostroty snímků, ale zároveň tak, aby dopočítaný expoziční čas nebyl kratší než přibližně 1/80 sekundy z důvodu zajištění dostatečné ostroty snímků.



Obrázek 14: Zobrazení polohy fotoaparátu vůči jednotlivým snímkům plochy

### 3.3.1 Fotogrammetrické vyhodnocení

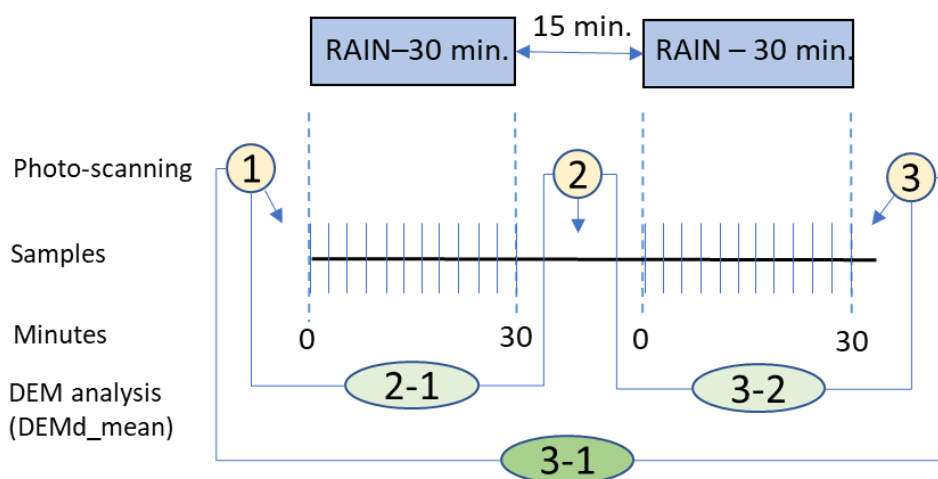
Následné vyhodnocení snímků se provádí po rozříděných všech fotografiích podle lokality, úpravy povrchu a čísla simulace. Prvním krokem fotogrammetrického zpracování je nahrání odpovídajících snímků do softwaru Agisoft Metashape a jejich prvotní orientační spojení. Následně se pomocí automatické detekce s případnou manuální korekcí detekují na všech snímcích jednotlivé referenční terče. Následně se k těmto terčům přiřadí odpovídající souřadnice z připraveného souboru pro jednotlivé plochy. Následné kroky jsou spuštěny automaticky pomocí vytvořeného hromadného "batch" souboru. Tento soubor automaticky vytváří mračno bodů, texturu a výsledné ortofoto snímky a digitální modely terénu (DEM), včetně jejich exportu do určených adresářů. Vyhodnocení samostatných snímků je tímto krokem u konce.

Z podstaty experimentů, kdy jsou prováděny fotogrammetrická měření pro několik stavů (snímání 1-3), je důležité, aby byla získaná data obsahově a kvalitativně přibližně stejná při všech 3 snímání v řadě (Obrázek 15). Z jednoho standardního experimentu je teoreticky možné získat 3 rozdílové modely (2-1, 3-2 a 3-1). V případě, že ze 3 snímání nejsou dostatečně kvalitní data z jednoho snímání, lze logicky získat místo 3 rozdílových modelů pouze 1. V případě, že se nepodaří zajistit dostatečně kvalitní data ze 2 snímání ze 3, potom nelze vytvořit žádný rozdílový model. V případě chybějící části experimentální plochy na výsledném DEM je zapotřebí zmenšit výpočtový polygon, čímž se ale významně snižuje kvalita dat. Pro vyhodnocení erozních jevů je totiž důležité, aby byly porovnávány plochy vždy ve stejném a celém rozsahu tak, aby byly v ploše dlouhodobě a rovnoměrně zahrnuta místa

T A

Č R

kde dochází k erozi materiálu (horní strana plochy) a zároveň i místa kde dochází k sedimentaci materiálu (spodní strana plochy). Tento aspekt je velmi důležitý a omezující z hlediska využitelného počtu provedených simulací a fotogrammetrických měření, a proto je ve finálním vyhodnocení podstatně nižší počet měření, než bylo skutečně provedeno.



Obrázek 15: Schéma experimentu se suchou a mokrou simulací a odpovídajícím fotogrammetrickým snímaním povrchu půdy a následných kombinací vzniku rozdílových modelů.

### 3.3.2 Analýza rozdílových modelů

V dalším kroku se pracuje již pouze s vygenerovaným ortofoto snímkem a DEM pomocí GIS softwaru, v tomto případě pomocí ArcGIS. Na základě ortofoto snímků je vytvořen, resp. upraven polygon, určující, která část plochy bude zahrnuta do výpočtu výsledných rozdílových analýz. Primárně je tímto polygonem vždy celá část experimentální plochy (mimo cca 2 cm okraje), nicméně na základě zkušeností a reálných dat je v naprosté většině nutné tento polygon upravit. V případě dat z lokality Jirkov se tento polygon upravuje tak, aby zahrnoval plochu, která je k dispozici na všech třech DEM z jednoho měření, tj. Před simulací, po suché simulaci a po mokré simulaci. Z důvodu špatných světelných podmínek či malého množství fotografií někdy může dojít v některých částech plochy k chybějícím částem DEM. V případě dat z halového DS se naopak polygon upravuje tak, aby v sobě neobsahoval místa, kde jsou umístěna vlhkostní čidla a k nim vedoucí kabely, případně část srážkoměru, neboť tyto předměty by mohli ovlivnit výsledná data. Další část zpracování se provádí již pouze pomocí vytvořeno skriptu, který analyzuje vždy kombinaci dvou DEM před simulací a po simulaci. Každá tato kombinace DEM vygeneruje rozdílový model se souhrnnou statistikou jednotlivých parametrů. Do finálního vyhodnocení je zahrnut parametr s označením DEMd\_mean, který vyjadřuje průměrnou výškovou změnu zahrnutých pixelů DEM před simulací (DEM1) od DEM po simulaci (DEM2). Pomocí známé rozlohy výpočtového polygonu a výškové změně DEMd\_mean je prostým součinem vypočítána celková změna objemu v důsledku simulovaného deště. Při hodnotě se záporným znaménkem se jedná o úbytek (erozi), při kladné hodnotě by se jednalo o převažující sedimentaci či objemové změny z důvodu zvýšení vlhkosti či aplikování mražení půdy. Při vyhodnocení se však tyto kladné hodnoty nepoužívaly, neboť se ve většině případů jednalo o zkreslení, kdy výpočtový polygon zahrnoval převažující plochu oblasti z dolní části experimentální plochy, kde převažuje sedimentace, a naopak v těchto případech nebyla

zahrnutá horní část, kde dochází k plošné erozi. Proto byly tyto rozdílové modely vyřazeny z finální analýzy.

### 3.3.3 Výsledky

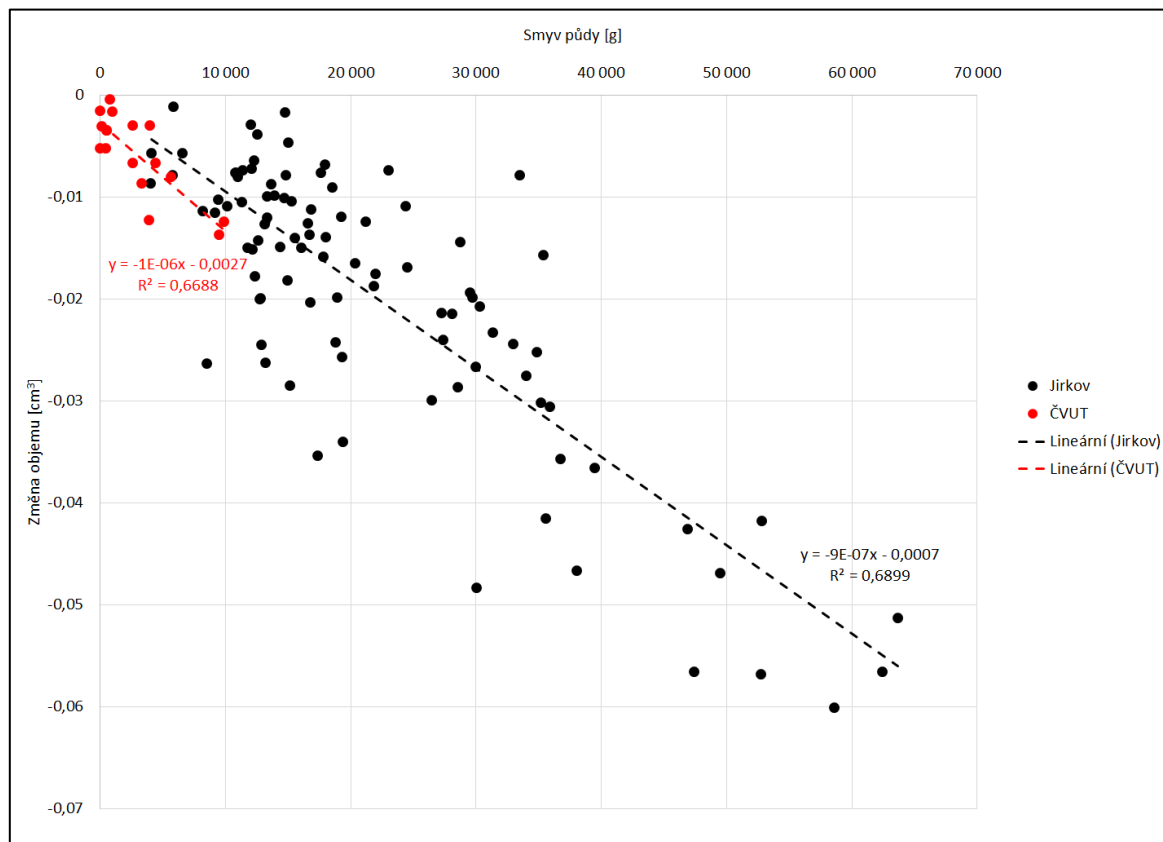
#### 3.3.3.1 Experimentální plochy Jirkov

V průběhu projektu bylo v letech 2017 až 2020 provedeno v rámci 240 erozních experimentů celkem 234 fotogrammetrických snímkování. Z tohoto počtu bylo 84 měření vyhodnoceno v plné kvalitě přes celou experimentální plochu, 110 měření bylo vyhodnoceno v rámci zmenšeného rozsahu v menší ploše a 40 měření nebylo možné vyhodnotit vůbec z důvodu nízké kvality vstupních dat z různých důvodů, které není možné v terénu zcela eliminovat. Mezi ty patří například nevhodné osvětlení experimentálních (=ostré slunce), které způsobuje velké rozdíly mezi stíny a světly, špatně dostupný povrch půdy v kontejneru ohraničený samotnou konstrukcí zadešťovacího zařízení, která nedovoluje dobrý přístup pro focení a navíc taktéž vytváří ostré a nepravidelné zastínění povrchu, čímž vznikají špatně komponované fotografie. V několika případech došlo ke znehodnocení snímání z důvodů znečištění objektivu kapající vodou právě ze zadešťovací konstrukce. V těchto všech případech nebylo možné zhotovit digitální model terénu, čímž nebylo možné tato měření zařadit do vyhodnocení těchto dat. Dalším omezením využití dat jsou aspekty týkající se nutnosti analýzy dat přibližně stejného rozsahu a kvality, jak je popsáno v kapitole výše (viz Fotogrammetrické vyhodnocení). Ve finálním vyhodnocení je z těchto všech důvodů využito 95 jednotlivých rozdílových modelů, která splňují kvalitativní požadavky v dostatečném rozsahu.

#### 3.3.3.2 Halový DS ČVUT v Praze

Přehled všech experimentů na halovém DS je uveden v příloze. Z celkového počtu 60 všech provedených experimentů bylo fotogrammetricky vyhodnoceno 28 simulací, což zahrnuje celkem 87 úspěšně provedených a vyhodnocených fotogrammetrických měření. V některých případech byla část snímků pořízena v nedostatečné kvalitě pro dostatečně kvalitní finální výstup v podobě DEM, a tudíž nebylo možné tato fotogrammetrická měření využít při finálním vyhodnocení. Tento případ nastal celkem u 16 fotogrammetrických měření. Naopak v některých případech, kdy byla simulace vyhodnocena fotogrammetricky nebyly k dispozici hodnoty smyvu půdy z důvodu, že povrchový odtok vůbec nenastal či simulace byla z důvodu technické závady zkrácena. Proto je celkový počet simulací, kdy je k dispozici údaj z přímého měření povrchového odtoku a smyvu a zároveň i pomocí fotogrammetrie ve finále ještě nižší. Celkem mohlo být porovnáno pomocí obou metod 34 jednotlivých fotogrammetrických měření, což představuje ve finále 17 rozdílových modelů.

Pro účely ověření metody fotogrammetrie pro popis erozního účinku deště byly porovnány data z přímého měření eroze pomocí odběru vzorků povrchového odtoku a následné analýzy půdního smyvu v něm obsaženém s daty získaných pomocí fotogrammetrického měření. Graf na obrázku 16 zobrazuje závislost naměřeného množství smyvu na ose x a vypočítané změny objemu pomocí fotogrammetrické metody na ose y. Záporná hodnota na ose y znamená zmenšení objemu vzorku v důsledku odnosu materiálu, tj. erozi půdy. Do srovnání jsou zahrnuta měření pouze na ploše s úhorem na venkovních experimentálních plochách v lokalitě Jirkov a na testovací ploše na halovém DS na ČVUT v Praze.



Obrázek 16: Graf závislosti naměřeného smyvu půdy na vypočítané objemové změně povrchu při experimentech na úhuru

Z grafu na obrázku 16 je patrný významný lineární trend mezi porovnávanými veličinami. V případě lokality Jirkov dosahuje tato závislost koeficientu determinance 0,69 ( $p < 0,05$ ) a v případě lokality ČVUT 0,67 ( $p < 0,05$ ). V obou případech se podařilo dosáhnout velmi blízkých trendů pro obě lokality.

Metoda fotogrammetrického snímání a analýzy rozdílových modelů terénu se ukázala být užitečnou metodou pro odvozování půdního smyvu pomocí bezkontaktního měření. Výhodou tohoto způsobu je poměrně vysoká korelace se skutečně naměřenými půdními smyvy, časová nenáročnost provádění experimentů (měření pouze před experimentem a po něm). Nevýhody této metody však zůstávají z hlediska absence podrobných dat průběhu odtoku a smyvu v detailních časových krocích či absence dat rychlosti povrchového odtoku.

### 3.4 Změny zrnitostního složení sedimentu

Intenzitu eroze a účinek protierozních opatření s ohledem na další negativní efekty, jako je zanášení odvodňovacích systémů, vodních toků a nádrží je důležité sledovat detailněji. Eroze je selektivním procesem. Podle rychlosti povrchového odtoku a tečného napětí na rozhraní půda-voda jsou transportovány půdní částice – agregáty o určité velikosti a hmotnosti. Na zrnitostní složení sedimentu a skladbu půdních agregátů jsou navázány další látky (živiny i škodlivé látky). Během prováděných experimentů v rámci řešeného projektu bylo analyzováno zrnitostní složení půdních sedimentů, který byl odplaven z experimentálních ploch. V průběhu řešení byly z investiční podpory mimo projekt pořízeny moderní přístroje pro analýzu zrnitosti. Během projektu tak byla metoda stanovení zrnitosti



# T A Č R

změněna. Testovány byly tři metody – nejstarší používanou metodou je hustoměrná zkouška prováděná pomocí hustoměru. Další dvě alternativní metody využívají moderních přístrojů, kterými jsou přístroj PARIO a laserový difraktometr Mastersizer 3000. Principy měření jsou popsány dále v textu. Vzhledem k rychlosti zpracování vzorků byla v posledních dvou letech řešení využívána pouze metoda laserové difrakce.

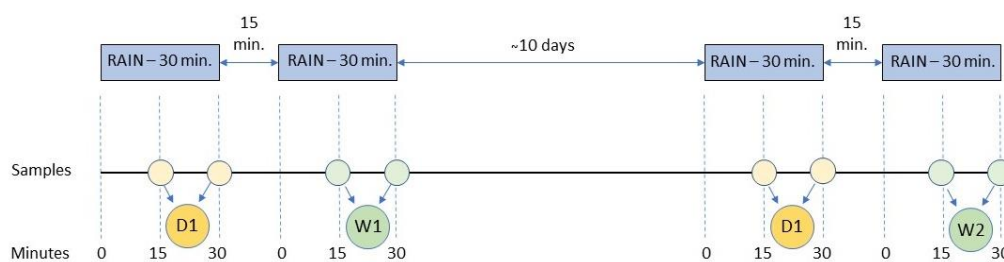
## 3.4.1 Postup odebrání půdních vzorků

Na každé z ploch byly odebrány čtyři půdní vzorky – D1, W1, D2 a W2 (obrázek 17). Pro každý materiál proběhl experiment na třech různých sklonech kontejneru s půdou – 1:2,5 (22°), 1:1,75 (30°), 1:1,5 (34°).

První vzorek byl odebrán během první dešťové epizody, kdy má půda ještě přirozenou vlhkost (D1). Následovala patnáctiminutová pauza, kdy plocha nebyla zadešťována. Další odběr proběhl během druhé dešťové epizody (W1). Tentokrát již ale půda byla plně nasycena po předchozí srážce.

Následujících deset dní byl kontejner ponechán, aby experimentální plochy vysychaly a pak proběhlo další zadešťování, během kterého proběhl stejný postup při odebrání vzorků jako při prvním experimentu – jeden vzorek odebrán na půdě s přirozenou vlhkostí (D2) a poté vzorek z půdy plně nasycené po dešťové epizodě (W2). Rozdílem druhého experimentu bylo, že půda v kontejneru před začátkem události již obsahovala erozní rýhy z předchozího zadešťování.

Pro každou plochu tak vznikly čtyři vzorky půdního sedimentu – dva odebrané jako suchá varianta (D1, D2) a dva jako varianta mokrá (W1, W2), se kterými se dále pracovalo v laboratoři, kde byl analyzován zrnitostní rozbor půdního vzorku.



Obrázek 17: Schéma postupu odebrání půdních vzorků

## 3.4.2 Metody měření

### Laserový difraktometr

Přístroj Mastersizer 3000 využívá principu laserové difrakce – rozdílného rozptylu laserového paprsku při průchodu částice o různé velikosti. Velikost částic je určena na základě rozptylu světelného paprsku. K určení závislosti mezi velikostí částic a intenzitou záření se používají teorie Fraunhoferova modelu a Mieho teorie rozptylu. (MASTERSIZER Manuál, 2017)

Laserový difraktometr umožňuje analýzu zrnitostního složení nejdříve na půdním vzorku obsahujícím agregáty a následně na témže půdním vzorku s rozbitými agregáty, které jsou během měření rozrušeny ultrazvukem.

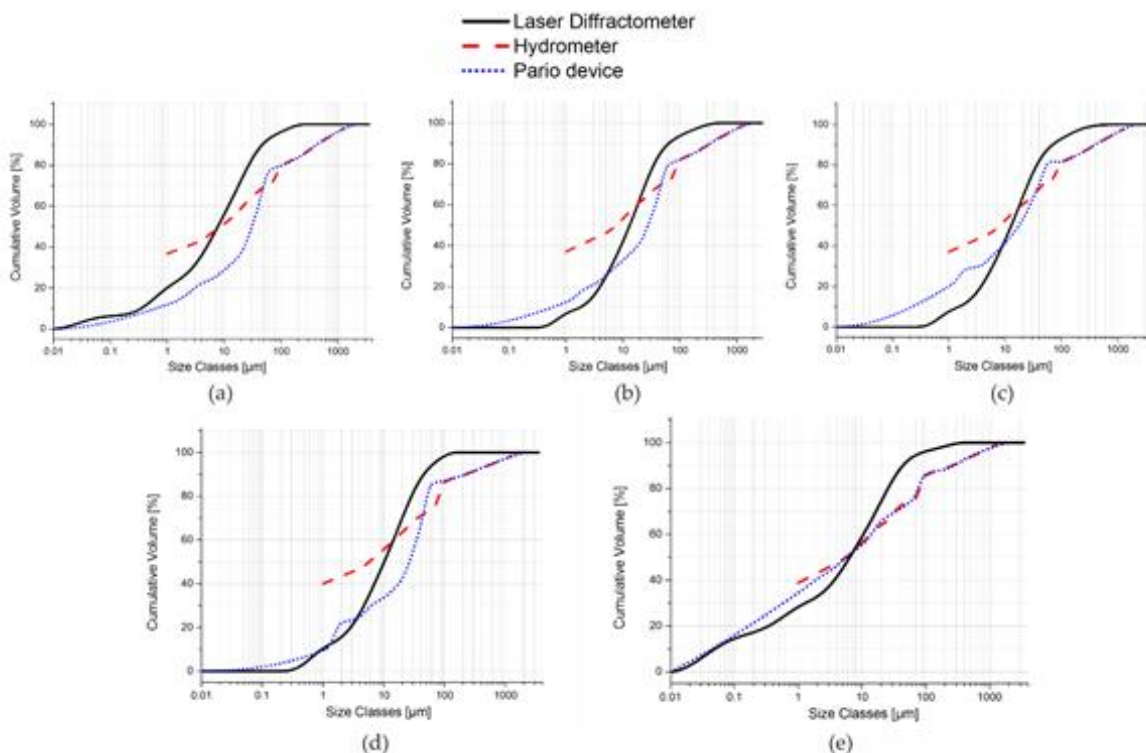
### Hustoměrná zkouška

Hustoměrná zkouška je nepřímá metoda používaná pro stanovení zrnitostního rozboru. Je založena na sledování kontinuální sedimentace půdního vzorku v odměrném válci podle Stokesova zákona. Měření hustoty probíhá v různých časových intervalech a provádí se speciálním hustoměrem. Hustoměrnou zkoušku lze provádět pouze na půdním vzorku s rozrušenými půdními agregáty. (Beuselinck et al., 1998; Motsara et al., 2008)

### Přístroj PARIO

Přístroj PARIO je automatizovaný systém pro určení zrnitostní analýzy půd a stejně jako hustoměrná zkouška je založen na platnosti Stokesova zákona. Hodnoty získané přístrojem PARIO dále vyhodnocuje software PARIO Control. Přístroj PARIO lze použít pouze pro půdní vzorek s rozrušenými půdními agregáty. (PARIO Manuál, 2018, Durner, et al., 2017)

V rámci řešeného projektu byly nejprve jednotlivé metody porovnány, tak aby bylo možné navázat novými metodami na starší způsob vyhodnocení zrnitostního složení. Porovnání metod pro stanovení zrnitostního složení bylo provedeno na pěti vybraných půdních vzorcích (Obrázek 18) půdy využívané na experimenty v Jirkově. Výsledky z hustoměrů jsou oproti ostatním nadhodnocené a říkají, že částic jemnějších než 1  $\mu\text{m}$  je ve všech půdních vzorcích téměř 40 %. Tvar zrnitostních křivek z přístroje PARIO je podobný křivkám z laserového difraktometru. Křivky z hustoměru se ale liší, klesají oproti ostatním lineárně.



Obrázek 18: Porovnání výsledků tří použitých metod pro stanovení zrnitostního složení.

### 3.4.3 Popis výsledků

Po porovnání metod pro stanovení zrnitostního složení byl vybrán laserový difraktometr pro měření zrnitosti všech získaných půdních vzorků. Hustoměrná zkouška a měření přístrojem PARIO jsou časově mnohem náročnější než měření laserovým difraktometrem, který zároveň umožňuje vyhodnocení půdního vzorku obsahujícího půdní agregáty i vzorku po porušení struktury agregátů. Výraznou výhodou laserového difraktometru je velice malé množství sedimentu potřebné pro měření. Zatímco hustoměrná zkouška a přístroj PARIO potřebují 40 g, laserový difraktometr analyzuje zrnitostní složení z 1 g vzorku půdního sedimentu. Díky tomu lze vyhodnocovat zrnitost i z experimentů, kde je půdního sedimentu málo, tedy na plochách s plošnými technickými protierozními opatřeními.

Byly vybrány tři hodnoty velikosti částic pro statistické porovnání zrnitostního složení – 2 µm, 10 µm a 50 µm. Tyto hranice byly zvoleny na základě běžně používaných klasifikačních systémů půd podle jejich zrnitosti. Hodnoty 2 µm a 50 µm určují hranice frakcí trojúhelníkového diagramu (NRCS USDA) a hodnoty 10 µm využívá pro zatřídění půdy klasifikační systém dle Nováka. Pro tyto hodnoty byl stanoven medián.

### 3.4.4 Sumarizace úhor

Tabulky 5, 6 a 7 zobrazují hodnoty mediánů pro velikosti částic menších než 2, 10 a 50 µm. Na všech sklonech pro vzorky s půdními agregáty s pozdějším časem odběru přibývá částic menších než 50 µm, kromě posledního odebraného W2. Pro půdu bez agregátu erodovanou na sklonech 22° a 30° platí, že vzorky D1 a D2 mají více částic menších než 2 µm v porovnání se vzorky W1 a W2, stejně tak platí pro částice menší než 10 µm. U vzorků bez půdních agregátů erodovaných na sklonu 34° se procento částic menších než 2 a 10 µm snižuje s pozdějším časem odběru. Množství částic (bez agregátů) menších než 50 µm se na sklonu 22° nemění. Na sklonech 30° a 34° obsahuje vždy vzorek bez agregátů D1 a D2 více částic menších než 50 µm než vzorky W1 a W2.

Na počátku deště je množství půdních agregátů v půdních vzorcích erodovaných na svazích 30° a 34° vyšší v porovnání se vzorky erodovanými později. Pro půdu erodovanou na sklonu 22° však platí opačný trend.

Tabulka 5: Statistické porovnání času odběru vzorků na sklonu 22° [%]

		S agregáty				Bez agregátů			
		D1	W1	D2	W2	D1	W1	D2	W2
medián	2 µm	5.19	3.49	5.02	3.04	17.95	16.25	18.00	17.31
	10 µm	22.35	20.12	22.04	19.31	49.58	48.35	50.47	49.12
	50 µm	50.46	51.69	52.44	47.79	91.27	91.31	90.90	91.11

Tabulka 6: Statistické porovnání času odběru vzorků na sklonu 30° [%]

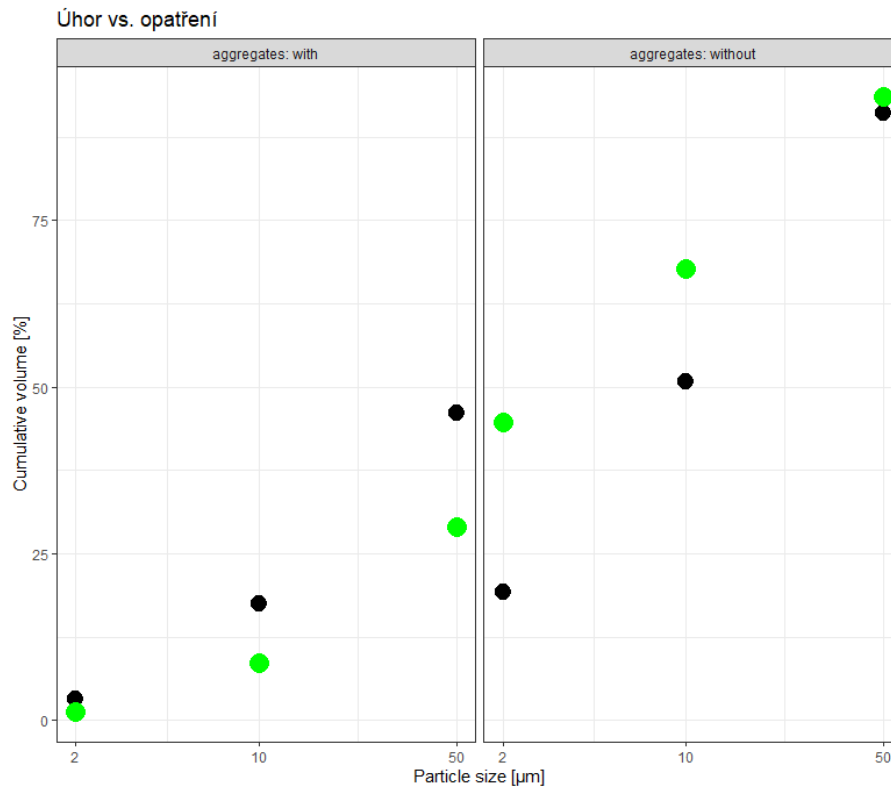
		S agregáty				Bez agregátů			
		D1	W1	D2	W2	D1	W1	D2	W2
medián	2 μm	3.99	3.46	5.46	3.88	22.76	17.54	19.01	16.92
	10 μm	20.27	19.47	22.38	19.98	54.23	48.58	49.69	48.17
	50 μm	46.95	47.54	47.46	48.95	92.44	90.63	91.17	90.92

Tabulka 7: Statistické porovnání času odběru vzorků na sklonu 34° [%]

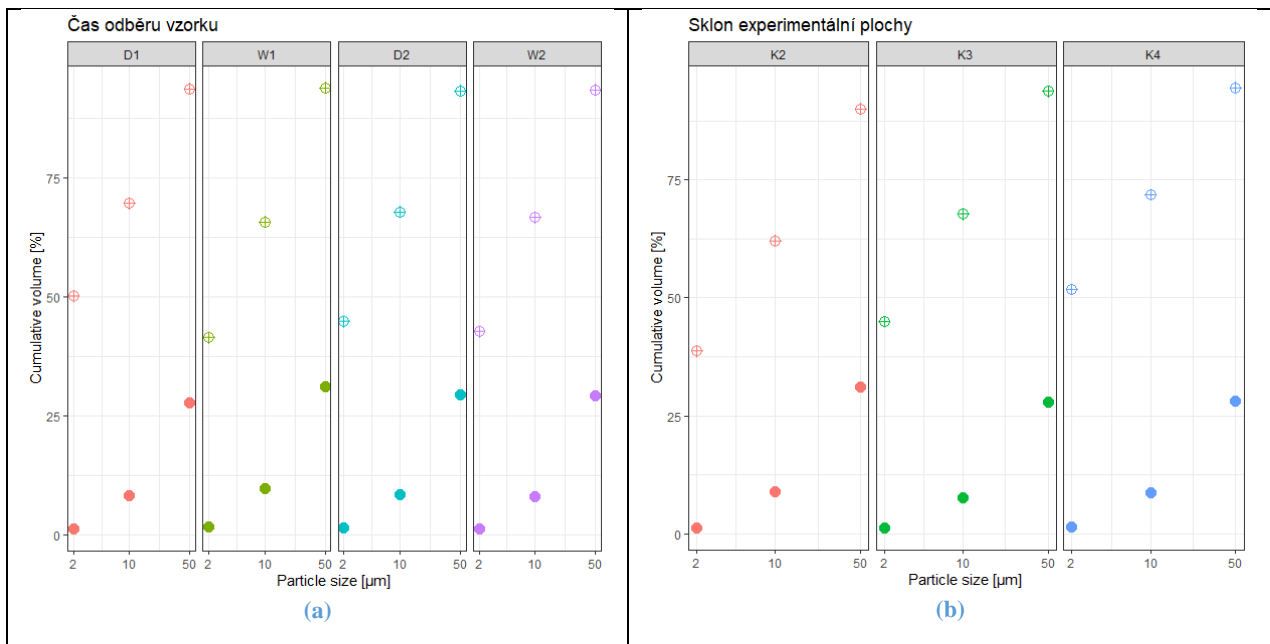
		S agregáty				Bez agregátů			
		D1	W1	D2	W2	D1	W1	D2	W2
medián	2 μm	5.26	3.98	4.33	3.88	19.52	15.87	15.37	14.94
	10 μm	22.95	20.45	21.90	21.15	52.05	48.29	46.47	46.67
	50 μm	52.70	52.67	55.35	53.38	90.72	89.75	90.30	89.50

### 3.4.5 Zrnitosti na opatřeních

Laserovým difraktometrem byly analyzovány vzorky půdního sedimentu erodovaného na experimentálních plochách, na kterých byla použita různá plošná technická opatření: Biomac-c, Enkamat 7020, Enkamat 7020 zasypaný, Kokosová síť K700, Fortrac 3D, Fortrac 3D zasypaný, Juta, Klejonáž, Mulč, Trojúhelník, Macmat 18.1 zasypaný. Bylo stanoveno zrnitostní složení sedimentu s půdními agregáty i bez agregátů. Z celkového porovnání zrnitostního složení sedimentu z plochy bez opatření a z plochy s opatřením (všechny materiály) na obrázku 19 je patrné, že půda s agregáty erodovaná na plochách s opatřením obsahuje hrubší částice než půda erodovaná na úhoru. Naopak je tomu po rozbití půdních agregátů, kdy sediment z ploch s opatřením obsahuje jemnější částice oproti sedimentu z ploch s úhorem. Z výsledků je patrné, že na plochách s opatřením jsou vyplavovány částice, které jsou před rozbitím agregátů větší než v případě plochy bez opatření, ale po jejich rozbití jsou naopak jemnější. Což indikuje větší přítomnost lehčích částic, které tvoří půdní agregáty.

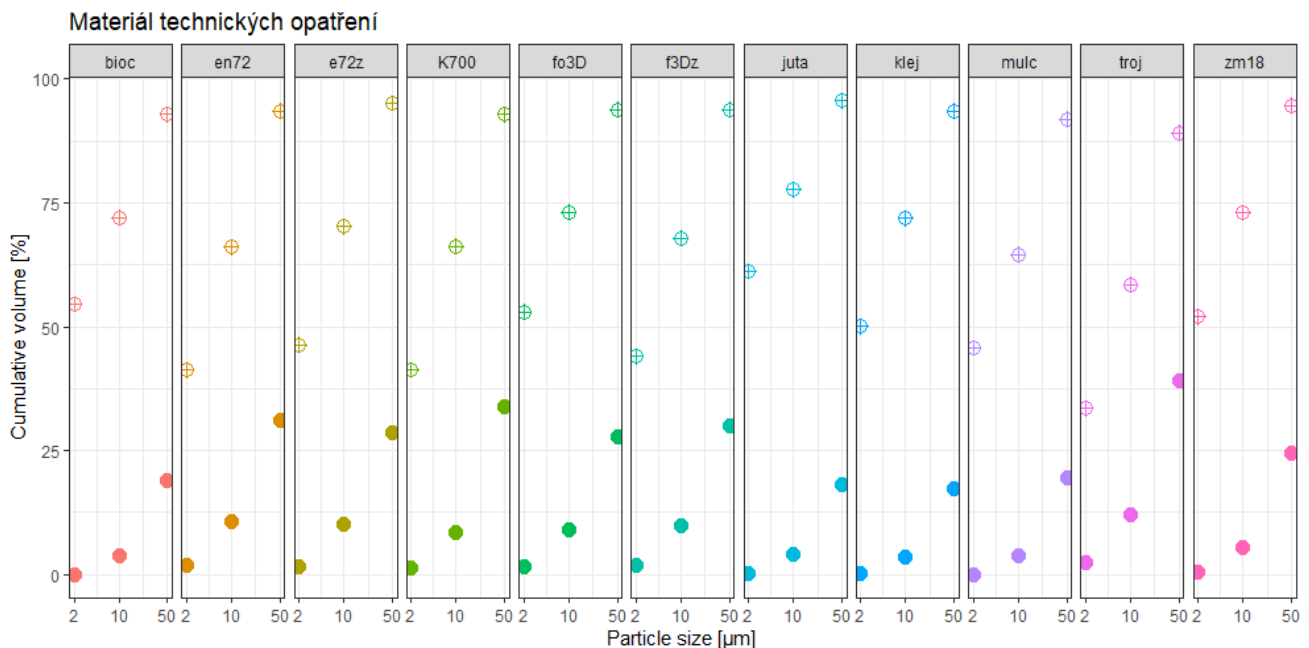


Obrázek 19: Porovnání mediánů procentuálního zastoupení částic na plochách s úhorem (černě) a na plochách s opatřením (zeleně) před rozbitím agregátů (vlevo) a po rozbití (vpravo).



Obrázek 20: Medián procentuálního zastoupení částic menších než 2, 10 a 50 µm v závislosti na čase odběru vzorku (a) a na sklonu kontejneru (b) – K2 sklon 34°, K3 sklon 30°, K4 sklon 22°. Plný symbol – půdní vzorky s agregáty, prázdný symbol – půdní vzorky bez agregátů.

Na obrázcích 20 a 21 jsou mediány procentuálního zastoupení částic v sedimentu v závislosti na konkrétním opatření. Pro všechny materiály platí, že po rozbití agregátů (symbol terče) je obsah částic menších než 50  $\mu\text{m}$  okolo 90 %. Naopak množství částic v sedimentu před rozbitím (symbol kruhu) agregátů je vždy téměř nulové. Sediment s agregáty z materiálu s nejvyšší efektivitou Biomac-c obsahuje nejvíce částic větších než 50  $\mu\text{m}$ , podobně jako sediment z Juty, Klejonáže a Mulče. Nejvíce částic menších než 50  $\mu\text{m}$  obsahuje sediment z Trojúhelníku, dále pak z Kokosové sítě. Rozdíl v zrnitostním složení sedimentu na materiálech zasypaných a nezasypaných se nijak výrazně neliší (Enkamat 7010 a Fortrac 3D).



Obrázek 21: Medián procentuálního zastoupení částic menších než 2, 10 a 50  $\mu\text{m}$  v závislosti na opatření (plný symbol – půdní vzorky s agregáty, prázdný symbol – půdní vzorky bez agregátů).

### 3.4.6 Vazba zrnitosti a objem odtoku

Technická opatření ovlivňují zrnitostní složení půdního sedimentu. Každý z testovaných materiálů způsobuje odplavování hrubších částic v porovnání s půdou erodovanou na plochách bez opatření. Po rozbití agregátu v erodovaném půdním vzorku bylo zjištěno, že sediment odplavený z ploch s opatřením obsahuje jemnější částice než sediment z úhoru. Zrnitostní složení se liší v závislosti na materiálu opatření. Nejlepší materiál z hlediska efektivity způsobuje erozi největších agregátů tvořených nejmenšími částicemi. Čas odběru půdního vzorku od počátku experimentu ani sklon experimentální plochy nemají na zrnitostní složení sedimentu vliv.

## 3.5 Měření půdní vlhkosti

Povrchové procesy jsou významně ovlivněny i procesy v půdním prostředí. Vlhkostní režim půdního profilu, infiltrační kapacita půdy, změny půdních charakteristik jako na příklad krustace povrchu (slévání půdních částic vlivem kinetické energie deště) nebo změny struktury a makroporozity jsou vlastnostmi, které rozhodují o dynamice povrchového odtoku a eroze. Stratifikace půdních horizontů a jejich aktuální nasycení rozhoduje i o stabilitě humózní vrstvy, která je v případě nevhodných podmínek

T A

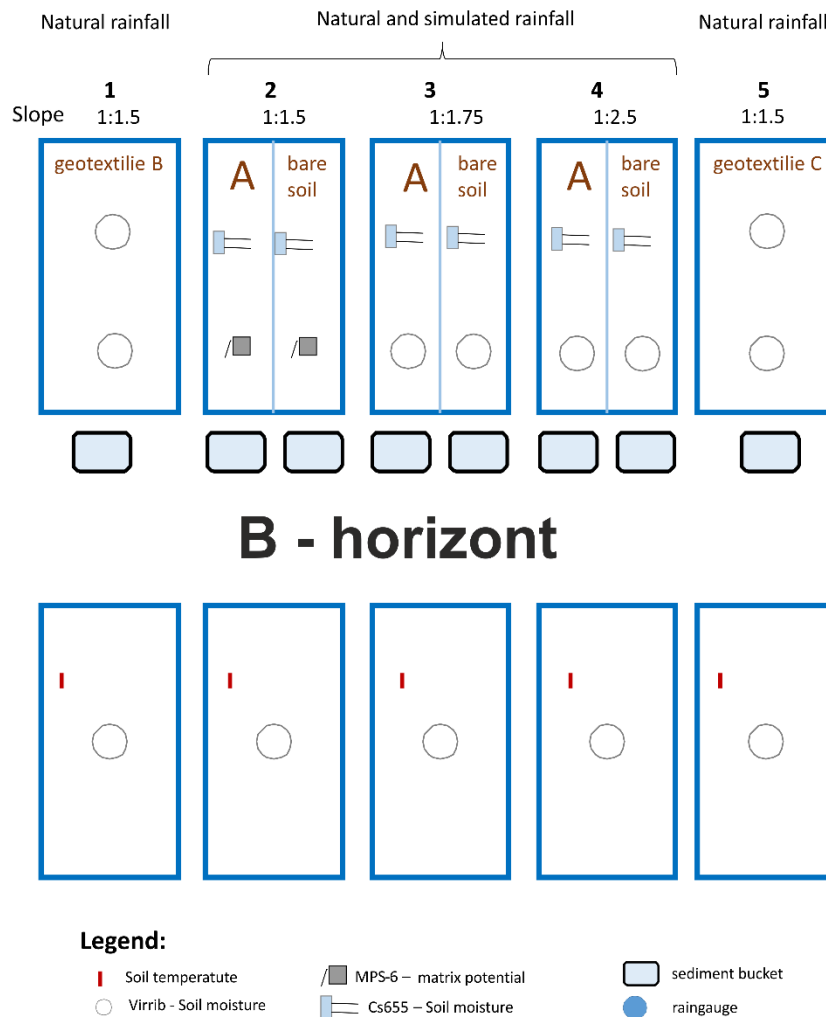
Č R

na násypech náchylná k deformacím a sesuvům. Motivací pro podrobné sledování vlhkostního režimu v půdě bylo sledovat, zdali a jak jsou podpovrchové procesy ovlivněny aplikací geotechnických opatření na povrchu. Vlhkostní režim byl sledován na obou experimentálních plochách v Jirkově a laboratoři ČVUT.

### 3.5.1 Experimentální plochy Strix Jirkov

Experimentální plochy v Jirkově byly v rámci projektu instrumentovány sadou základních čidel pro monitorování proudění vody půdním profilem. Cílem monitorování je sledovat, zda teplotní režim a infiltrace a mělký podpovrchový odtok vykazují odlišné charakteristiky na nechráněné ploše (část povrchu bez geotextilie) a na ploše s protierozním opatřením. Tyto informace doplňují kvantitativní měření povrchového odtoku během zadržovacích experimentů na sledovaných plochách.

Pro monitorování jsou využity dva typy čidel, všechny napojené na společný datalogger s přenosem dat na cloudové úložiště. Základním čidlem je reflektometr CS655 (Campbel Sci., UK), který mimo objemové vlhkosti zaznamenává i teplotu půdy a elektrickou konduktivitu. Čidla byla instalována do orniční vrstvy (7 cm pod povrch) v horní části svahu, zejména s cílem sledovat režim podpovrchového proudění v různých částech experimentálního svahu. Čidla Virrib (Amet, ČR) zaznamenávají objemovou vlhkost. Tato čidla byla umístěna do ornice (10 cm pod povrch) do části s protierozním opatřením a bez protierozního opatření. Jedno Virrib čidlo bylo vždy instalováno do ztuhlého podloží, do hloubky 35 cm, s cílem monitorování pohybu čela zvlhčení. Obdobným způsobem byly osazeny všechny plochy s dešťovým simulátorem (K2 až K4). Schéma zapojení čidel je na obrázku 22.



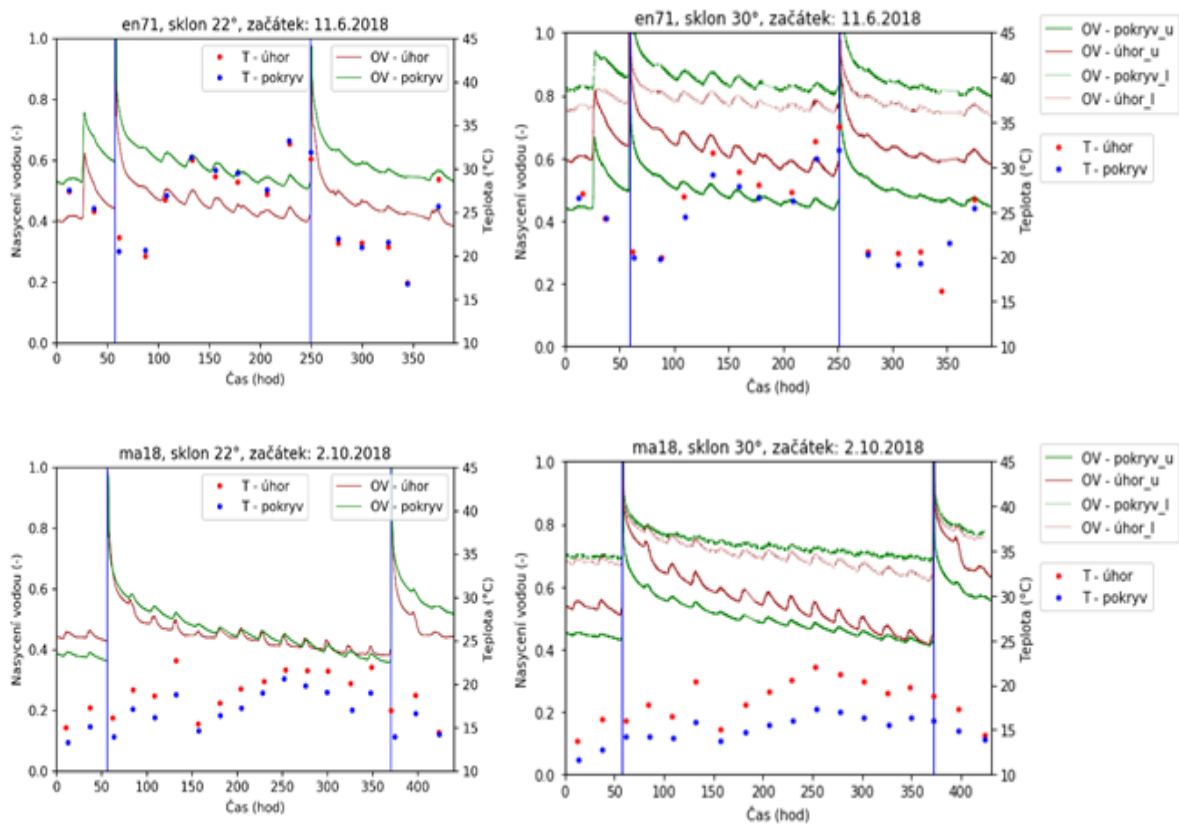
**Obrázek 22: schéma experimentální plochy Jirkov včetně popisu a umístění jednotlivých čidel pro monitorování vlhkostního režimu půdního profilu**

Na obrázku 23 jsou pro ilustraci zobrazeny výsledky monitorování vlhkosti pro dva typy pokryvů (EN71 a MA18) pro dva experimentální kontejnery s různými sklony (22° a 30°) v delším časovém horizontu, obsahujícím dvě dešťové simulace. Na grafech je vizualizován stupeň nasycení orniční vrstvy, tedy aktuální objemová vlhkost podělená nasycenou objemovou vlhkostí. Červené a modré body ukazují maximální teplotu, která byla dosažena v rámci každého dne. Modré svislé čáry vyznačují čas, kdy byly provedeny dešťové simulace.

Z výsledků lze vidět, že stupeň nasycení v průběhu času slabě osciluje s denní periodou. To je způsobeno teplotním ovlivněním měření, lokální maxima těchto oscilací nastávají ve stejný čas, kdy je dosahováno maximální denní teploty. Teplotní ovlivnění měření vlhkosti je dokumentováno v literatuře, je nejzjevnější v mělkých půdních horizontech. Nicméně, pro časové měřítko jednoho experimentu je teplotní chyba poměrně nízká, i při dlouhé redistribuci vlhkosti lze oscilace v případě potřeby filtrovat, trend poklesu vlhkosti v čase je zřejmý.



Ilustrace vlhkostního režimu na obrázku 23 ukazuje typický záznam z monitoringu. V důsledku deště dochází velmi rychle k nasycení svrchní půdní vrstvy (stupeň nasycení je roven 100 %) a povrchovému odtoku. Na ploše se sklonem 30° byla čidla instalována ve dvou úrovních – v horní (u) a spodní části svahu (l). Čidla ve spodní části svahu zaznamenávají vyšší vlhkosti než čidla v horní části svahu, což naznačuje pozvolný podpovrchový odtok v rámci ornice. Svah je drénován odshora, ve spodní části dochází ke kumulaci vody a velmi pozvolnému vysychání. Rozdíl v nasycení horní a spodní části svahu byl po týdnu od zadešťovacího experimentu až 20 %. Toto má důsledky na stabilitu svahu, neboť právě pata svahu je k případným sesuvům nevíce náchylná.



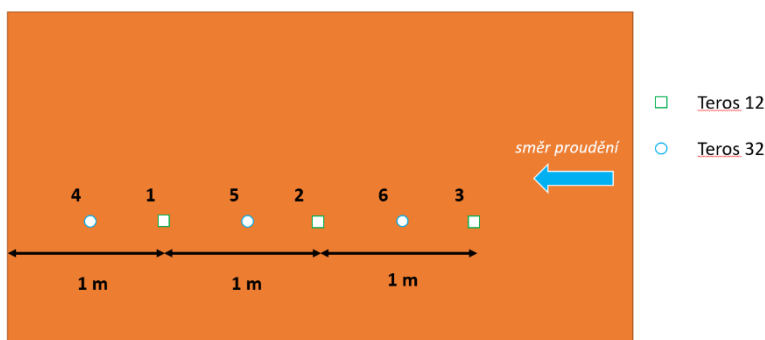
**Obrázek 23: průběh vlhkostního a teplotního režimu mělkého půdního profilu v průběhu zadešťovacích experimentů**

Společnou analýzou měření z mělkých čidel CS655 a čidel Virrib, která byla instalována do hlubšího horizontu, lze vyvodit následující charakteristiky: (i) čelo zvlhčení se vertikálně pohybuje velmi rychle v prostředí ornice, nicméně v podloží je rychlost výrazně pomalejší. Během simulace nedošlo k nasycení hlubšího profilu. (ii) Ornice se velmi rychle nasytí, ale také se relativně rychle drénuje, zejména v horní části svahu. Důvodem je významné množství velkých pórů (zejména meziagregátové prostory), které se odvodňují nejrychleji. (iii) podložní vrstva si zachycenou vodu udržuje velmi dlouho, vysychá v řádech dnů. (iv) Plocha krytá geotextilií reaguje na srážku velmi podobně dynamicky jako plocha bez geotextilie, nicméně, pomaleji se po konci srážky drénuje, a i pomaleji vysychá (nižší výpar).

Na základě vyhodnocení dat z monitorování vlhkosti se neprokázal významný vliv různého sklonu jednotlivých ploch na vlhkostní režim testovaného svahu. Všechny vyhodnocené experimenty vykazují velmi podobný průběh, na všech lze dokumentovat obecné závěry, zmíněné v přechodném odstavci.

### 3.5.2 Dešťový simulátor – laboratoř

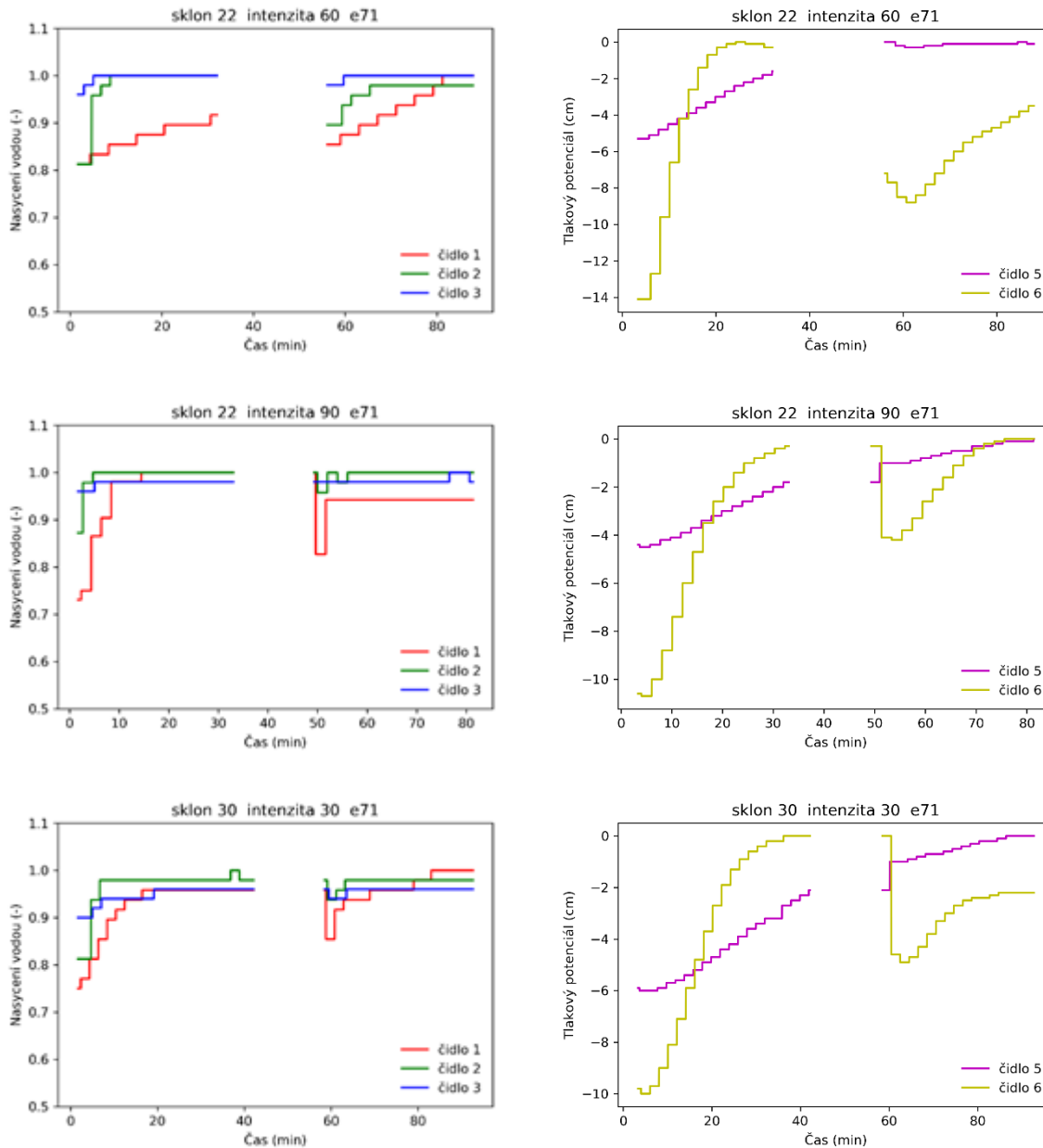
Vlhkost půdního prostředí a tlakový potenciál půdní vody byl monitorován i během experimentů prováděných na laboratorním dešťovém simulátoru ČVUT. Pro monitorování byla použita čidla Teros 12 a Teros 32 (METER Group, Německo). Teros 12 je čidlo, které slouží pro měření vlhkosti, teploty a elektrické konduktivity porézního prostředí. Čidlo měří dielektrickou permitivitu v okolí čidla, přičemž celková permitivita je silně ovlivněna množstvím vody (voda má řádově vyšší el. permitivitu než půdní skelet a půdní vzduch). Výhodou čidla je, že vysílá elektromagnetické vlny s velmi vysokou frekvencí, a proto je měření jen velmi málo ovlivněno salinitou prostředí. Druhý typ čidla, tenzometr Teros 32, slouží k měření tlakového potenciálu půdní vody. Čidlo má keramickou pórovou čepičku, díky které je v kontaktu voda v čidle s vodou v porézním prostředí (půdou). V půdním vzorku, na kterém byly experimenty prováděny, se nacházela tři vlhkostní čidla Teros 12 a tři tenzometry Teros 32. Rozložení čidel je zobrazeno na obrázku 24.



Obrázek 24: Rozložení čidel na laboratorním dešťovém simulátoru

Zadešťovací experimenty probíhaly v obdobném režimu jako na plochách Strix v Jirkově, tedy se skládaly ze dvou srážkových epizod s krátkým časovým rozestupem. Na rozdíl od Jirkova byly v laboratoři simulovány srážkové epizody s různou intenzitou, kontejner s půdním vzorkem měl v jednotlivých případech variabilní sklon. Ve všech dále uvedených případech byl půdní povrch pokryt ochranným materiálem en71.

Ilustrativní výsledky z vybraných experimentů jsou uvedeny na obrázku 25. Z výsledků je patrné, že rychlost sycení profilu je ovlivněna především intenzitou srážky. V případě, kdy je sklon kontejneru nastavený na 22° dojde k mnohem rychlejšímu nasycení profilu při intenzitě 90 mm/h v porovnání s intenzitou 60 mm/h. Nicméně z dalšího obrázku lze vidět, že i při relativně nízké intenzitě srážky (30 mm/h) je plného nasycení dosaženo v relativně krátkém čase, a to v případě, kdy sklon kontejneru je nastavený na 30°.



Obrázek 25: průběh vlhkostního a maticního potenciálu mělkého půdního profilu v průběhu zadržovacích experimentů. Intenzity srážek uváděny v  $\text{mm h}^{-1}$ .

### 3.6 Dlouhodobý monitoring přirozených dešťů

Od roku 2019 bylo zahájeno monitorování několika uměle vytvořených svahů na reálných stavbách nebo experimentálních svazích. Cílem bylo monitorovat a zjistit stav těchto svahů při dlouhodobém účinku deště bez jakýchkoliv dalších zásahů. Z tohoto důvodu nebyl na těchto svazích zároveň zachytáván povrchový odtok s půdním smyvem. V tomto případě byl monitorován svah pouze vizuálně za použití fotografické techniky či v některých případech i včetně dalšího fotogrammetrického zpracování. Ponechání svahů přirozenému vývoji však přineslo i očekávaný stav, kdy postupně došlo k

úspěšnému rozvoji vegetace, čímž došlo v podstatě k nemožnosti dalšího monitoringu pomocí konvenčních metod, jako je fotogrammetrie. Ačkoliv je v současné době ve výstavbě relativně velké množství liniových staveb, bohužel přítomnost a pohyb nezávislého týmu lidí na staveništi pro mnohé realizační projekty natolik velká komplikace, že není možné takto provádět dlouhodobý monitoring. V roce 2020 byla situace navíc zkomplikována pandemií koronaviru, kdy došlo k úplnému zákazu vstupu na některé plánované lokality.

U jednotlivých lokalit je záměrně vynechána jejich přesná lokalizace. Buď se jedná o neveřejné objekty, anebo stavby v průběhu výstavby, anebo těsně po dokončení. Anonymizace dat je ochranou investorů anebo realizačních firem.

Dlouhodobý monitoring je zároveň komplikovaný z hlediska přesného určení průběhu srážky. Navíc je měření plně závislé právě na přirozených deštích, kterých vzhledem k extrémně suchým rokům během řešení projektu bylo málo. I když má měření na přirozených plochách a dlouhodobí monitoring své nezastupitelné místo, tak pro systematické měření jsou zatíženy velkou nejistotou výskytu přirozeného deště.

#### Experimentální plocha Jirkov

Na experimentální lokalitě Jirkov byly dvě plochy ponechány bez zadešřovače, pro dlouhodobé experimenty smyvu a pro další využití. Během suchých let 2017–2019 nebyla na plochách evidována žádná významná událost. Na podzim roku 2019 byly na plochu č 5 (viz obrázek 26) umístěno sedm testovaných protierozních materiálů. V pokusných čtvercích 1x1 byli umístěny na plochu. Část plochy 1x1 byla ponechána bez povrchové úpravy – úhor. Tato opatření byla aplikována včetně posypu travního semene. V průběhu roku 2020 byl sledován vegetační růst na jednotlivých opatřeních. Stejně jako na jiných reálných svazích i v tomto případě došlo k rovnoměrnému růstu vegetace až do výšky cca 50 cm, což znemožnilo další monitoring pomocí fotogrammetrické metody. V průběhu roku 2020 však žádný protierozní materiál nevykazoval známky rozkladu nebo defektu. V ploše nebyla pozorována ani zvýšená eroze v podobě tvorby rýh.

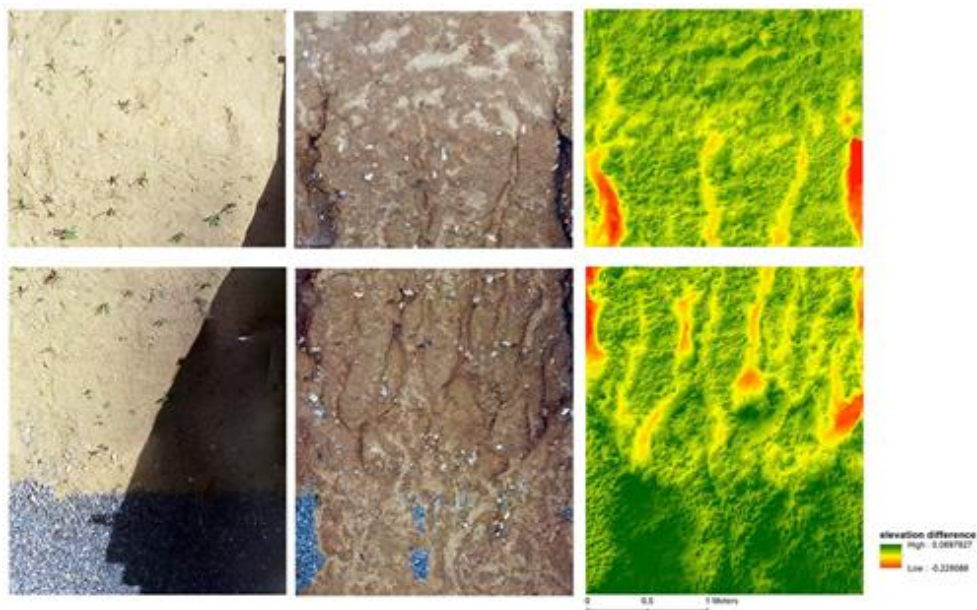


Obrázek 26: Experimentální plocha č. 5 určená pro dlouhodobý monitoring na přirozeném dešti

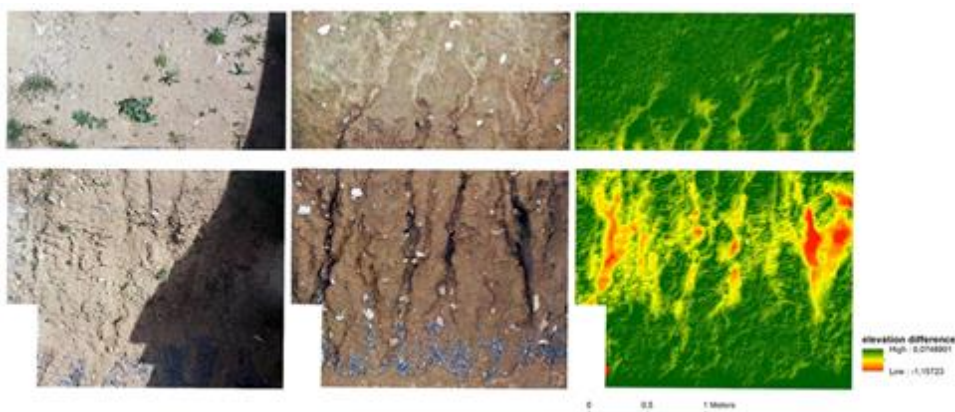
### Umělý svah

ČVUT v Praze provozuje několik testovacích lokalit pro sledování dlouhodobého působení přirozených procesů na stavební konstrukce. V jednom z těchto areálů bylo umožněno vytvořit umělý svah pro monitoring eroze na strmých svazích. Plocha byla umístěna mezi betonovými zdmi spřaženými pomocí ocelových nosníků, proto jsou jednotlivé obrázky rozděleny na dílčí segmenty. Tento svah byl monitorován od jara 2019, kdy byly provedeny 8.5 a 16.6. monitorovací nálety pomocí UAV po sérii silných srážkových událostí.

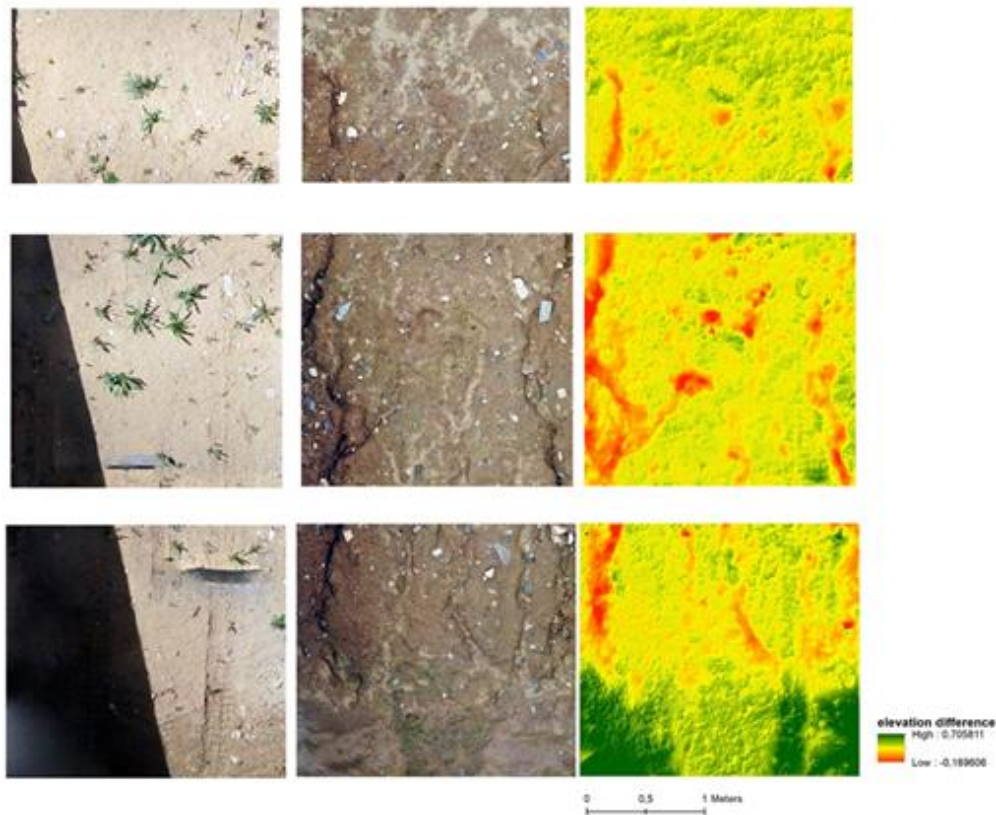
Celkem byly vybrány 3 úseky svahu s přibližnou šířkou 2 m a sklonem svahu od 30 do 63 %. Pro tyto úseky byly zhotoveny ortofoto snímky a digitální modely terénu, ze kterých byl vytvořen konečný rozdílový model terénu s viditelnými rýhami. Následující tři trojice obrázků 27, 28 a 29 ukazují ortofoto snímky z jednotlivých náletů v kombinaci s výsledným rozdílovým modelem a tabulka 8 udává kvantitativní odhad eroze půdy z analýzy rozdílových digitálních modelů terénu.



Obrázek 27: Svah č. 1 s průměrným sklonem 47 %. Ortofoto před deštěm, po dešti a výsledný rozdílový model terénu.



Obrázek 28: Svah č. 2 s průměrným sklonem 63 %. Ortofoto před deštěm, po dešti a výsledný rozdílový model terénu.



Obrázek 29: Svah č. 3 s průměrným sklonem 30 %. Ortofoto před deštěm, po dešti a výsledný rozdílový model terénu.

Tabulka 8: Průměrné změny povrchu na svahu č. 1-3

Číslo svahu	Průměrný sklon [%]	Průměrný výškový rozdíl [m]	Změna objemu [m <sup>3</sup> ]
1	46,5	-0,012	-0,087
2	63,0	-0,044	-0,482
3	30,1	-0,016	-0,218

Z uvedené tabulky 8 vyplývá, že na sledovaných svazích 1 až 3 ve všech případech došlo k průměrnému poklesu povrchu půdy o 1,2 až 4,4 cm, což na uvedené ploše představuje objemová ztráta od 0,087 m<sup>3</sup> do 0,482 m<sup>3</sup>. Nejvyšší změna povrchu byla zaznamenána na ploše s nejvyšším sklonem, nicméně nejmenší ztráta byla vypočtena na prostředním sklonu 46,5 %.

Z tvorby rýh a celkového smyvu je patrné, že erozní procesy vyvolané umělým i přirozeným deštěm mají podobné projevy a porovnání přímých metod měření ztráty půdy a bezkontaktních metod je relevantní. Pro zvýšení přesnosti odhadu množství erodovaného materiálu na monitorovaných svazích by bylo zapotřebí provést více monitorovacích náletů v delším časovém horizontu v kombinaci s přímým měřením erodovaného materiálu.

Na sledovaném svahu č. 1 a 2 byly v rámci monitoringu erozních jevů umístěny dva typy přírodních protierozních materiálů. Tyto dva svahy byly pokryty kombinací materiálu Biomac-c a kokosové sítě

# T A Č R

K700. Instalace zakrytí svahů proběhla 2.7.2020 a následný monitorovací nálet pomocí UAV proběhl 31.7.2020. Na obrázku 30 jsou vyobrazeny ortofoto snímky svahu č. 1 a 2 bezprostředně po instalaci a následně necelý měsíc po instalaci po několika srážkových událostech. Bohužel z důvodu nižší kvality snímků a malé porovnatelné ploše nebylo možné analyzovat digitální modely terénu v dostatečné kvalitě. Pozdější monitoring nebyl realizován z důvodu ochranných opatření proti šíření nemoci Covid-19 v areálu s umělým svahem.



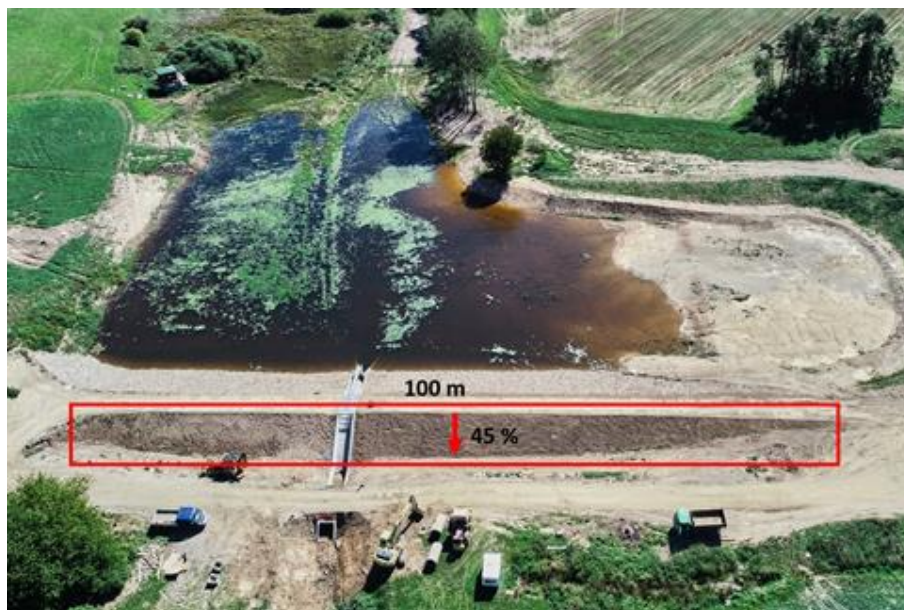
Obrázek 30: Ortofoto snímky svahu č. 1 a 2 po instalaci zakrytí a po srážkových událostech.

## Hráz rybníka

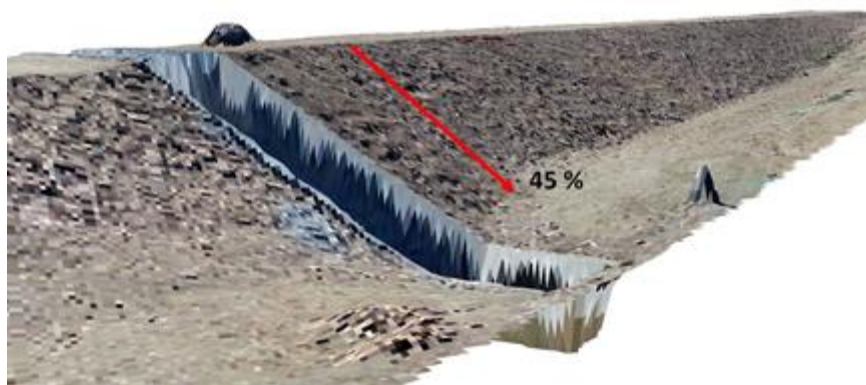
Pro monitoring erozního poškození byla vybrána hráz rybníka na Plzeňsku, který byl vybudován v letech 2018 až 2019. Hráz je zemní, přičemž návodní svah je zpevněn kamenivem a vzdušní líc je ponechán bez opevnění s holou orníci pro budoucí zatravnění. Hráz je dlouhá 100 m a sklon vzdušného svahu, na kterém se provádí monitoring eroze, má sklon 45 % (1:2,2).

První monitorovací nálet byl proveden po jejím dokončení dne 4.9.2019, kdy byl vzdušní líc bez vegetace, proto byl tento nálet zamýšlen jako referenční stav pro posuzování v dalším období. Ačkoliv byl druhý nálet proveden již 31.10.2019, na vzdušném líci se objevila již rostoucí vegetace. Vzhledem k velké hustotě vegetace nebylo možné porovnat vytvořené digitální modely terénu z hlediska posouzení objemových změn v důsledku eroze půdy viz obrázky 31, 32 a 33.

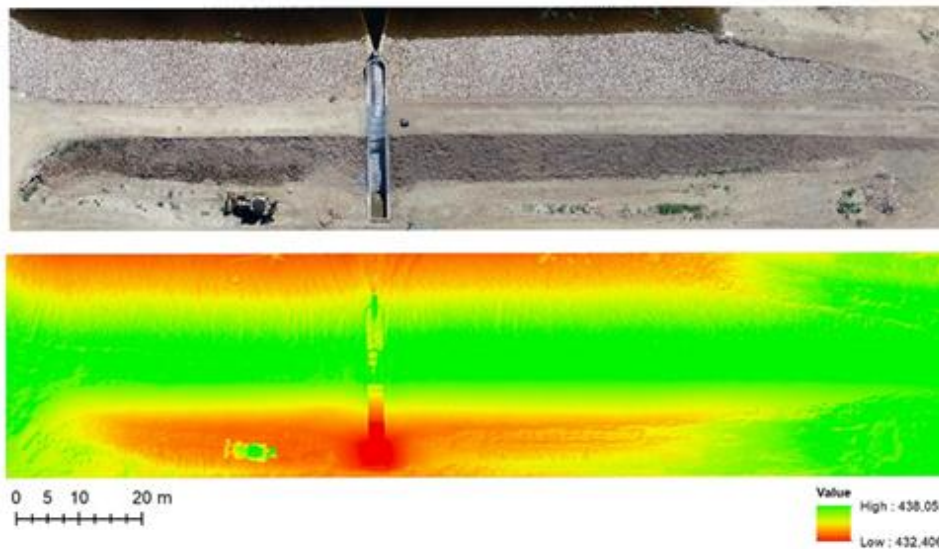




Obrázek 31: Monitorovaná hráze rybníka



Obrázek 32: 3D pohled na vzdušný svah hráze rybníka Mostišťe



Obrázek 33: Ortofoto a digitální model terénu z monitorovacího náletu ze dne 4.9.2019

### 3.7 Experimentální ověření retence plošných opatření

Protierozní materiály pomáhají zejména chránit půdu před vznikem rýhového povrchového odtoku a tím zrychlenou ztrátou půdy. Dalším vlivem je retence, která je dána vlastnostmi konkrétního materiálu. Tím dochází ke zpomalení počátku odtoku a snižuje se množství vody, které odečte z dané plochy. Zvětší retenční schopnost povrchu, kdy je voda zachycena vlastním materiálem. Tento efekt už byl v historii sledován například (Kalibová et al. 2016). Tento pozitivní efekt mají větší především přírodní materiály. Testovány byly tři zástupci přírodních materiálů K700, K400 a Biomac-c) a dva výrobky trvalé (umělé) ochrany (Enkamat 7220 a Macmat 18.1).

Každý materiál byl upraven na rozměr 4 x 1 m, který odpovídá experimentální ploše laboratorního simulátoru. Při provádění těchto experimentů byla nejdříve na experimentální plochu pod dešťovým simulátorem rozložena nepropustná fólie, která byla zadeštěna tak, aby byly zaplněny veškeré deprese a nebylo tak ovlivněno samotné měření. Jako referenční bylo provedeno měření bez opatření, pouze s plastovou fólií, aby byl změřen vývoj odtoku bez vlivu jakéhokoliv opatření, a to pro intezitu 40 a 60 mm/h. Celkový objem zadržené vody byl stanoven gravimetricky. Předem zvážená textilie byla umístěna na nepropustnou plochu se zaplněnými povrchovými depresemi a následně byla na 10 minut spuštěna srážka 40 mm/h, nebo 60 mm/h. Odtok byl odebírán po každou půl minutu, aby byla detailně zaznamenána iniciální fáze vývoje povrchového odtoku. Odběr byl prováděn do odběrných nádob a každá byla následně zvážena.

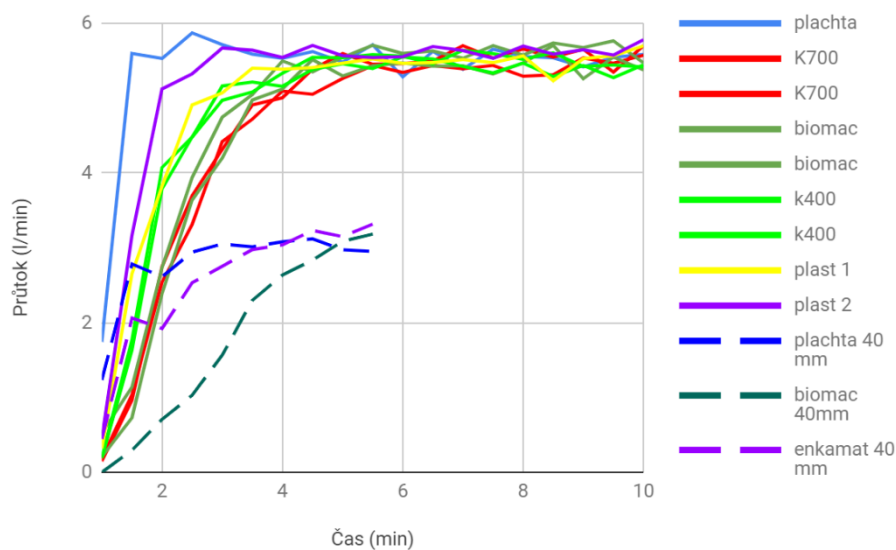
Pro testování vlivu na vznik povrchového odtoku byly vždy porovnány hodnoty odtoku na ploše s opatřením s plochou bez opatření. Výsledky retence materiálů budou aplikovány do fyzikálního modelu popisujícího erozní proces.

Výsledky těchto měření jsou zobrazeny na obrázku 26 a 27. Je vidět, že u všech přírodních materiálů je ovlivnění počátečního objemu povrchového odtoku přibližně 4 minuty. Pro plastové materiály jsou to přibližně 3 minuty. Zdržení je způsobené tím, že se voda nasákne do materiálu, a také tím, že materiál dělá překážku v toku a vytváří další mikrodeprese. Tyto dva jevy od sebe nejde při takovém experimentu

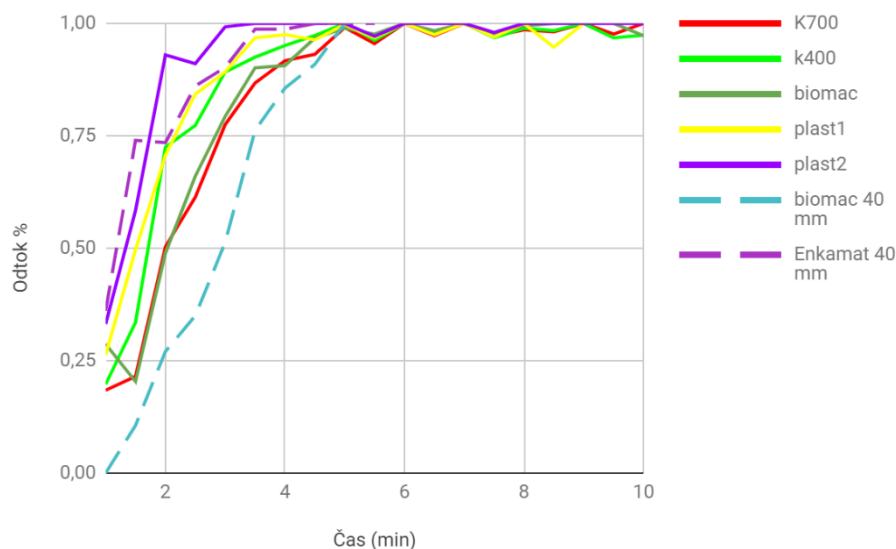
# T A Č R

oddělit. Testována byla intenzita 40 a 60 mm/h. Pro umělý materiál Enklamat 7220 jsou výsledky obdobné, zatímco u přírodního materiálu Biomac-c je vidět větší oddálení povrchového odtoku při experimentu s nižší intenzitou srážky, jelikož delší dobu trvá než naprší dostatečné množství vody, která naplní jeho retenci, která je pro tento materiál podstatně větší než u plastových materiálů.

Znázornění objemu povrchového odtoku pro všechny materiály je zobrazeno na obrázku 34. Tam kde byly provedeny repetice jsou tyto hodnoty znázorněny stejnou barvou. Jedná se o skutečný změřený odtok z plochy během experimentu. Na obrázku 35 je znázorněn poměr objemu povrchového odtoku vzhledem ploše bez opatření.



Obrázek 34: Vývoj objemu povrchového odtoku na plochách s různým způsobem zakrytí



Obrázek 35: Odtok z ploch v [%] oproti ploše bez opatření

T A

Č R

Z tohoto výzkumu vyplývá, že geotextilie nejen že chrání svahy před vznikem rýhové eroze a zvýšenou ztrátou půdy, ale geotextilie jsou schopné zadržet vodu i nasáknutím od sebe (pouze přírodní materiály), nebo udržení části vody na povrchu ve vniklé morfologické síti (3D struktura materiálu). Z tohoto pohledu jsou vhodnější přírodní geotextilie, která mají vyšší zádržnou schopnost.

Celková retence byla určena rozdílem hmotnosti před a po experimentu pro jednotlivé materiály. Výsledky z měření retenčních schopností pro hodnocené materiály jsou uvedeny v tabulce 9. Výsledky jsou uvedeny pro měřenou plochu 4 m<sup>2</sup>. Tabulka uvádí i hodnoty přepočtené pro lepší ilustraci na plochu 1 hektar a retenci ve standardních výškových mm. Zvláště u přírodních textilií je patrné, že jsou v sobě schopny zadržet velké množství vody: 7-11 m<sup>3</sup> vody na hektar. U plastových materiálů není velká zádržná schopnost, protože není schopná do sebe nasáknout vodu a jedná se jen o vodu, která je uchycená v plastové mřížce. Přesto se ale jedná o 4 m<sup>3</sup>/ha, což také snižuje celkovou hodnotu vody, která z plochy odeče.

**Tabulka 9: Schopnost jednotlivých materiálů zadržet v sobě vodu. Jedná se o vodu zadržanou materiálem, a nebo tu, která je zadržena ve vzniklých mikro depresích mezi jednotlivými vlákny.**

	zadržení [l/4m <sup>2</sup> ]	zadržení [l/ha]	Retence [mm]	opatření
Kokosová síť K700	4,5	11183,8	1,1	
Biomac-c	3,5	8652,5	0,9	
Kokosová síť K400	2,8	7041,9	0,7	
Enkamat 7220	1,6	4043,8	0,4	
Macmat 18.1	1,6	4056,3	0,4	

### 3.8 Inovace technologických postupů při protierozní ochraně

Protierozní materiály mohou být na plochu aplikovány několika způsoby. Během rutinních experimentů na lokalitě Jirkov byly testovány dva technologické postupy instalace 3D materiálů. Ty jsou standardně (a) pouze přikotveny, a nebo (b) jsou kotveny a přesypány vrstvou zeminy. V prvním případě byly během pokusů na experimentální laboratoři Jirkov sledovány tvorby preferenčních drah soustředěného odtoku pod instalovaným materiálem, což významně snižuje jeho účinnost. Zároveň bylo pozorováno lokální zachycení půdních částic do 3D struktury. V případě přesypání zeminou docházelo k odplavení vrstvy zeminy až do úrovně 3D struktury. Mezi další možnosti způsobu ukotvení geotextilie patří situace, kdy je horní část svahu přehrnuta zeminou a spodní část svahu je pokryta jen připevněným materiálem bez zahrnutí. V případě srážky se smyje půda z horní části, ale tyto částice jsou deponovány ve spodní části a vyplní tak mezery v odkryté 3D struktuře protierozního materiálu. Většina půdy je tak zachycena ještě na svahu a není odnášena vodním tokem dále.

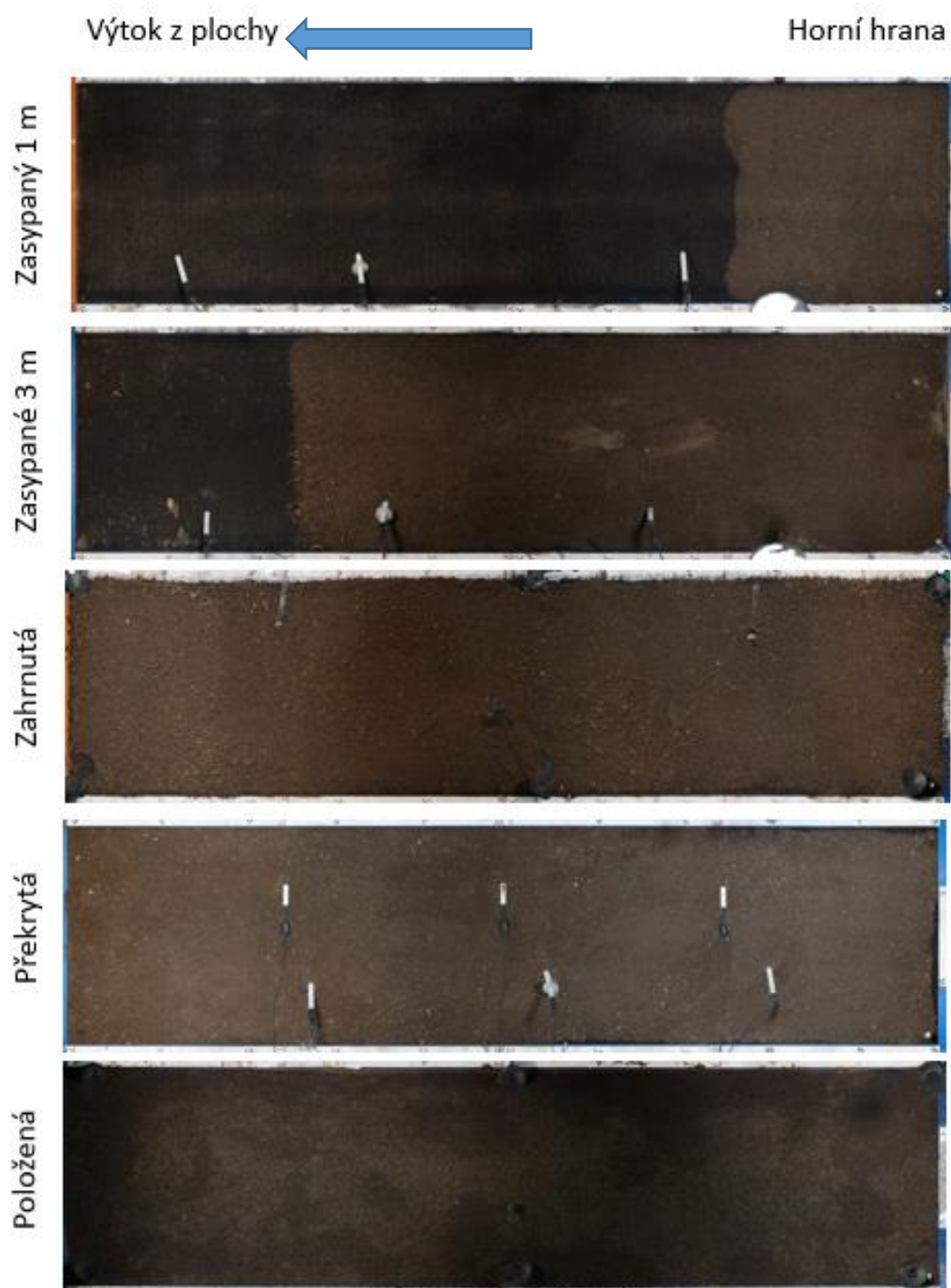
Další částí tohoto výzkumu bylo sledování vlivu délky a způsobu zasypání experimentální plochy na ztrátu půdy z plochy. Pro tyto experimenty byl zvolen sklon 22° a proběhlo několik měření kdy byly použity následující způsoby zasypání plochy, které jsou graficky ukázány na obrázku 36:

- Plocha úhoru – plocha bez opatření, jde o holou půdu
- Překrytý 1m – zasypaná pouze část materiálův délce 1 m od horního konce a přehrnutá 1 cm vysokou vrstvou půdy.

**T A**

**Č R**

- Překryté 3m - zasypaná pouze část materiálu v délce 3 m od horního konce a přehrnutá 1 cm vysokou vrstvou půdy.
- Zahrnutý - protierozní materiál po celé délce svahu zasypana pouze po horní hranu geotextilie.
- Překrytý - protierozní materiál po celé délce svahu a přehrnutá 1 cm vysokou vrstvou půdy.
- Položený - protierozní materiál po celé délce svahu volně položená a připevněná kotvami k povrchu



Obrázek 36: Ukázka způsob zasypání. Šipka znázorňuje směr proudění

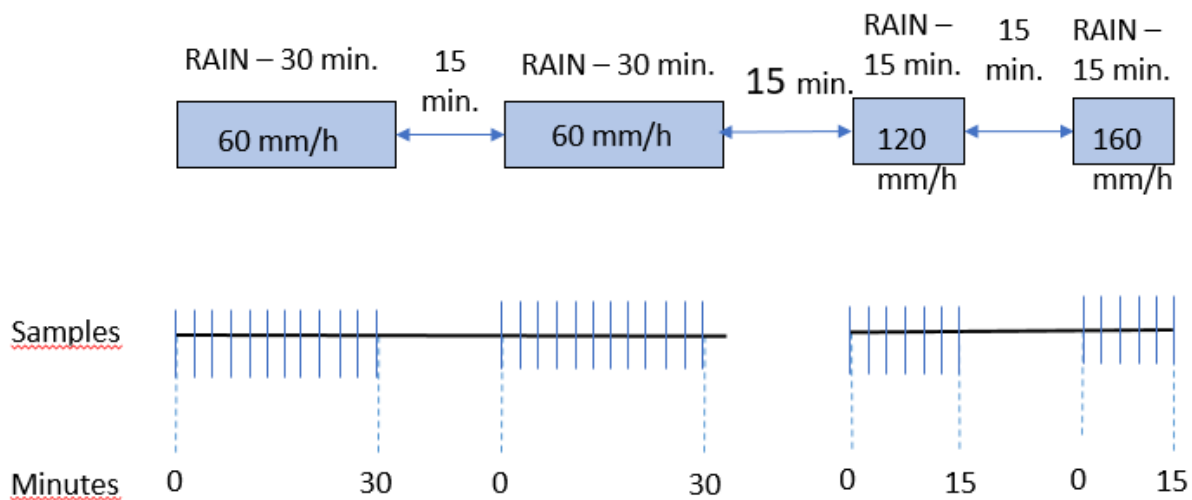
Pro tyto experimenty byla využita intenzita 60, 90, 120 a 160 mm/h. Vysoké intenzity odpovídají intenzitám umělých dešťů na lokalitě Jirkov, ale také ukazují vliv opatření na větší intenzitu povrchových procesů. Metoda zvyšování intenzit směřujících ke kolapsovému stavu je součástí mezinárodních technických standardů ASTM D6459 - 19 „Standard Test Method for Determination of

T A

Č R

Rolled Erosion Control product (RECP) Performance in Protecting Hillslopes from Rainfall-Induced Erosion“.

Experimenty měly totožný průběh jako experimenty ostatní měření na laboratorním DS. Po klasickém experimentu (v suchých i mokřích půdních podmínkách o délce 30 min s mezerou 15 min) s intenzitou 60 mm/h byly po další patnáctiminutové pauze provedeny další dva experimenty s intenzitami 120 a 160 mm/h s dobou trvání 15 minut. Způsob provádění experimentů je znázorněn na obrázku 37.



Obrázek 37: Znázornění způsobu provádění experimentů na laboratorním simulátoru s vysokou intenzitou. Během každého experimentu je znázorněno odebrání vzorků na určení objemu povrchového odtoku a množství ztráty půdy.

Při intenzitě 60 mm/h byly použity oba systémy tvorby srážky. Kyvný systém byl použit na půdním typu “skrývka ornice” a pulzní systém byl použit na hlíně “směs trávníková”. Intenzita 120 a 160 mm/h byla využita pulzním systémem. Intenzita 90 mm/h byla provedena kyvným systémem.

Na kyvném systému při intenzitě 60 mm/h byla textilie v jednom případě pouze položena na povrch a přidělena kotvami a v druhém případě byla zasypána po hodní okraj výrobku. Ke srovnání byla provedena totožná simulace na ploše úhoru. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 10. Je patrné, že nejvhodnějším způsobem je zasypání protierozního materiálu po vrchní hranu výrobku. Pokud byl materiál překryt vrstvou zeminy tl. 1 cm, tak zpočátku byla ztráta půdy dokonce větší než na ploše bez opatření, ale při simulaci na předem nasycené půdě již byla ztráta půdy přibližně poloviční oproti ploše bez opatření.

Tabulka 10: celkové hodnoty smyvu pro všechny experimenty a porovnání procentuální ztráty půdy oproti ploše bez opatření.

Intenzita [mm/hod]	Úhor kg	Zahrnutá		Překrytá		Překrytý 1m		Překryté 3m		Položená	
		Kg	%	kg	%	Kg	%	kg	%	kg	%
Skrývka ornice											
60 suchá	2,7	0,04	1,48%	5	185,19%					0,002	0,07%

60 mokrá	5	1	20,00%	3	88,00%				0,75	15,00%
90 suchá	17	5	29,41%	10,5	96,37%					
90 mokrá	8	3,7	46,25%	5	92,19%					
Směs trávnicková										
60 suchá	3,8			4,9	66,07%	0,2	5,26%	0,2	5,26%	
60 mokrá	5,7			2,9	91,07%	0,5	8,77%	0,6	10,53%	
120 mokrá	32			8,5	99,17%			2,4	7,50%	
160 mokrá	100			5,5	99,95%			3	3,00%	

Na pulzním systému s intenzitou srážky 60 mm/h byly testovány způsoby zasypání i pouhé části plochy. Pro tyto experimenty byly využity plochy úhoru, 3D geomatrace zasypána pouze horní částí v délce 1 metr, geomatrace zasypána v horní 3 metrové délce a geomatrace zasypána v celé délce po horní hranu 3D struktury. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 10. Nejlépe dopadly výsledky pro částečně zasypané výrobky, kdy výsledky byly téměř totožné a ztráta půdy byla přibližně 10x menší než na ploše úhoru. Geomatrace překrytá vrstvou zeminy byla jako v předchozím experimentu na ploše se suchou zeminou dokonce horší než plocha úhoru, ale na předem nasycené ploše byla ztráta půdy poloviční oproti ploše bez opatření.

Intenzita 90 mm/h byla použita pro plochu úhoru a plochu pokrytou geomatrací zasypanou na horní okraj 3D struktury výrobku a další variantu přikotvení matrace, kdy byl protierozní materiál přehnut 1 cm vrstvou zeminy. Výsledky při této intenzitě odpovídají předchozím měřením a jsou zobrazeny v tabulce 10. Nejlépe vyšla technika zasypání po horní okraj matrace, kdy ztráta půdy byla přibližně třetinová oproti ploše úhoru. V případě překrytí matrace centimetrovou vrstvou zeminy je ztráta půdy přibližně dvoutřetinová oproti ploše bez opatření. Při této intenzitě již dochází k tvorbě rýh a proto má i geomatrace překrytá vrstvou zeminy vyšší ochranný efekt než při experimentech s nižší intenzitou.

Pro testování vysoké srážky s intenzitou 120 a 160 mm/h byly využity plochy úhoru, s opatřením zasypáním na horních třech metrech a s opatřením po celé délce zahrnutým po horní úroveň materiálu. Výsledky pro obě tyto intenzity jsou v tabulce 10. Při intenzitě 120 mm/h bylo nejméně odnosu na ploše s opatřením na horních 3 metrech, jde o množství asi 15x menší než na ploše bez opatření. Pokud byl materiál překryt k horní hraně, pak byla ztráta půdy čtvrtinová oproti ploše bez opatření. Při intenzitě 160 mm/h již vznikly na ploše bez opatření velké rýhy a ztráta půdy z plochy byla enormní. V tomto případě opatření zafungovala velmi dobře, a i když plocha s překrytými horními třemi metry byla dvakrát efektivnější, než plocha zakrytá po horní hranu, tak pro oba způsoby zakrytí plochy byla ztráta půdy 20 - 30x lepší než z plochy bez opatření. Protierozní materiál v tomto případě zabránil vzniku extrémních erozních rýh. Na obrázku 38 je znázorněno rozplavování materiálu zeminy do geomatrace. Po experimentu se srážkou 60 mm/h je vidět malý pohyb materiálu, ovšem po aplikaci srážky 120 mm/h a následně 160 mm/h je vidět znatelný pohyb zeminy, který tvořil překrývající vrstvu na horní části plochy.



T A

Č R



Obrázek 38: ukázka rozplavování předělu u částečně zasypané plochy. Vlevo před experimentem, uprostřed po experimentu se srážkou 60 mm/h a vpravo po srážce 160 mm/h

Z těchto testů vyplývá, že nejlepšími typy upevnění protierozního materiálu jsou překrytí na necelé ploše. Druhým vhodným způsobem je zahrnutí po horní okraj 3D struktury výrobku, kdy měření vykazuje také vhodnou ochranu, ale ztráta půdy je přibližně 2 větší než v případě překrytí pouze části plochy. Naopak nejhorší s ohledem na ztrátu půdy je překrytí celé plochy svahu několikacentimetrovou plochou zeminy, která bývá při deštích smývána a zemina je odnášena tokem. I v tomto případě je však ztráta půdy zejména při extrémních srážkách mnohem nižší, než na ploše bez opatření.

### 3.9 Validace modelu odtoku na umělých svazích

SMODERP je fyzikálně založený epizodní hydrologicko-erozní model sloužící především k návrhu technických opatření proti erozi. Základními procesy zahrnutými do modelu jsou Phillipsova rovnice, povrchový odtok, retenční kapacita povrchu, drsnost povrchu a vliv vegetace na odtok a erozi. Základem modelu je bilanční rovnice hladin a kinematické řešení proudění. Parametry kinematické rovnice byly kalibrovány a validovány v minulosti na holé půdě pro sklony svahů do 10 %.

Na základě měření povrchového odtoku získaných během experimentů na dešťových simulátorech v rámci řešeného projektu proběhla validace parametrů rovnice povrchového odtoku pro sklony nad 20 %. Ověření funkčních vztahů je prováděno ve dvou krocích. V prvním kroku je řešena bilanční část výpočetního modelu tak, že jsou hledána optimální řešení pro parametry infiltrační rovnice a povrchové retenční kapacity tak, aby byla splněna podmínka co nejmenšího rozdílu mezi celkovým povrchovým odtokem a zároveň začátkem povrchového odtoku mezi měřenými a modelovanými daty. Ve druhém kroku jsou hledány parametry kinematické rovnice, tak, aby byla splněna podmínka průběhu průtoku a změřené rychlosti. Pro základní validaci tak byly použity primárně výsledky z halového simulátoru, kde jsou rychlosti měřeny systematicky. Na experimentální lokalitě Jirkov je měření rychlostí technicky velmi náročné.

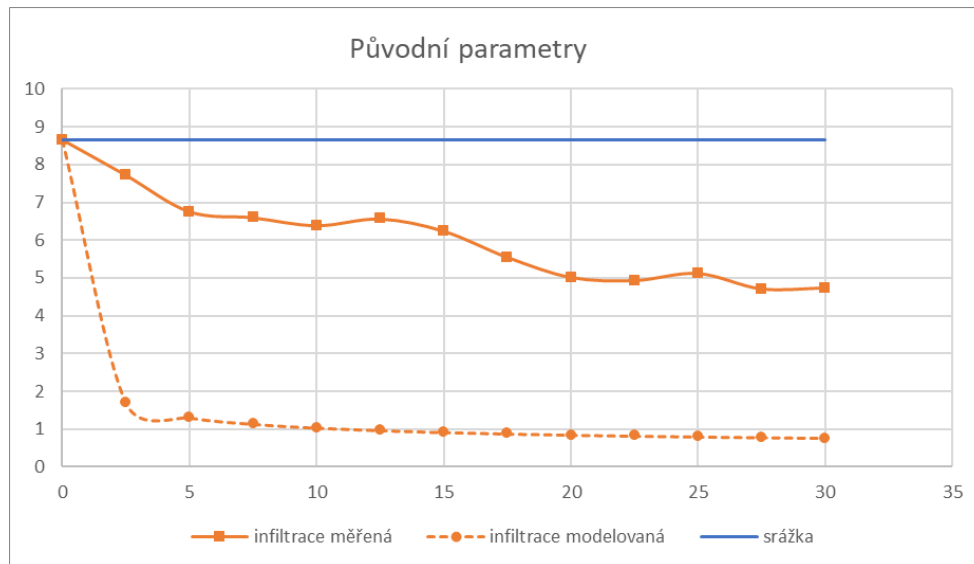
Z předchozích zkušeností řešitelského kolektivu ČVUT v Praze se osvědčila metoda měření pomocí viditelného barviva přidávaného do odtoku. Jako barvivo se používá potravinářská látka Brilliant Blue, která málo sorbuje na půdní částice.

Pro validaci byla použita zjednodušená verze modelu SMODERP převedená do tabelárního řešení v MS Excel, která je dostatečnou reprezentací modelu. Takto připravený model pracuje v prostorovém rozlišení 1×1 m. Dále je ukázán postup validace – ověření funkčnosti tohoto fyzikálního přístupu, který je naznačen na následující sekvenci obrázků 39, 40 a 41. Validace proběhla na měření na dešťovém simulátoru v Jirkově na ploše 3 (sklon 30°s intenzitou deště 130 mm/h, což odpovídá 8,67 l/min na

# T A Č R

zadešťovanou plochu) na vzorku půdy, která je zatříděna jako jílovitá hlína a má průměrné manuálové hodnoty modelu SMODERP (Tabulka 11).

V úvodní fázi před kalibrací jsou do modelu vloženy průměrné manuálové hodnoty pro výpočet infiltrace a povrchové retence.

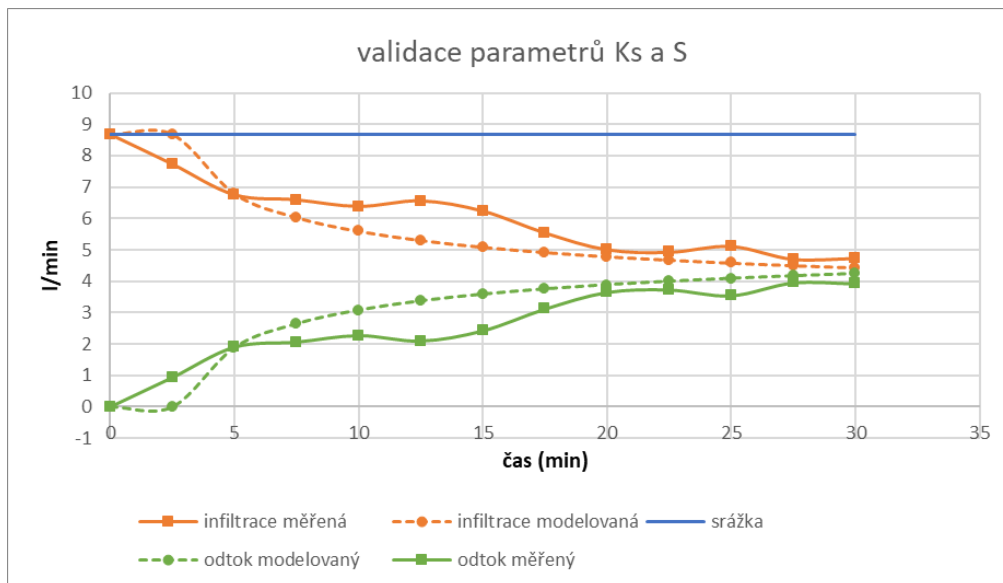


Obrázek 39: Porovnání měřených a modelovaných veličin před validací parametrů.

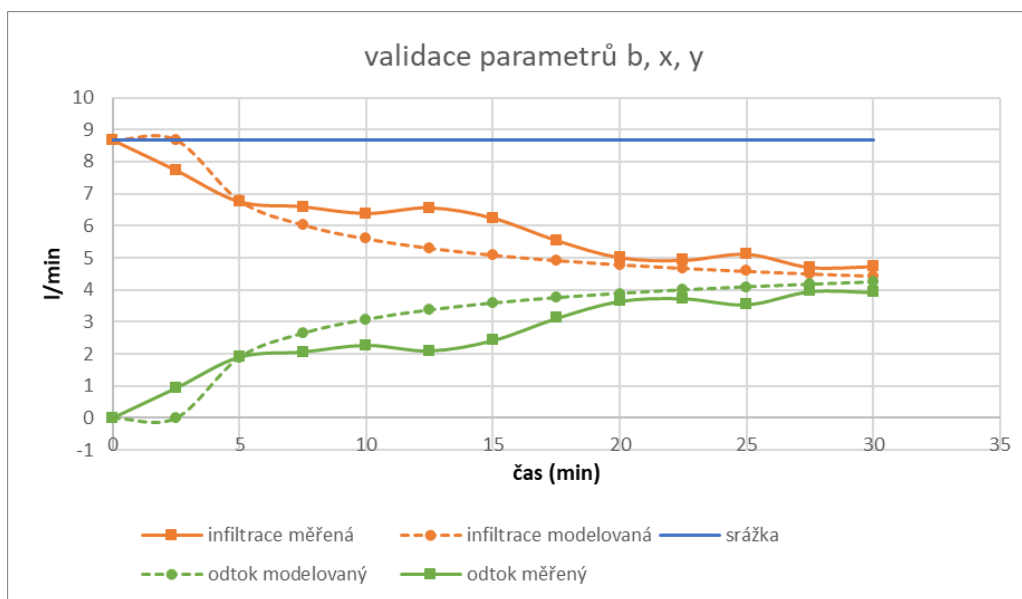
K hledání optimálního řešení je používána metoda nejmenších čtverců, která je zakomponována ve funkci řešitele MS Excel.

Nejoptimálnější nalezené řešení pro dané měření v porovnání se změřenými veličinami je uvedeno v následující tabulce:

- $K_s = 0,00001198 \text{ m/s}$
- $S = 0,00054992 \text{ m/s}^{0,5}$
- $Ret = 0,2 \text{ mm}$



Obrázek 40: Porovnání měřených a modelovaných veličin po validaci parametrů Ks a S.



Obrázek 41: Porovnání měřených a modelovaných veličin po validaci všech parametrů.

Tabulka 11: Tabulka manuálových parametrů pro hlinitou půdu a parametrů po validaci.

	Ks [m/s]	S [m/s <sup>0,5</sup> ]	Ret [mm]	n [s/m <sup>1/3</sup> ]	b -	X -	y -
Původní parametry jílovitá hlína	0,000001666	0,000129099	0,2	0,02	1,666	11,2571	0,6358
Parametry po validaci Ks, S, a ret z hlediska bilance	0,00001198	0,00054992	0,2	0,02	1,666	11,2571	0,6358
Parametry po validaci	0,00001198	0,00054992	0,2	0,02	1,6764	10	0,4462

V následující tabulce (Tabulka 12) je porovnán měřený a modelovaný objem odtoku a rychlost v 15 a 25 minutě experimentu.

Tabulka 12: Porovnání měřených a modelovaných veličin.

Čas od začátku simulace [min]	Rychlost [m/s]			Objem odtoku [l]		
	Změřená	Modelované Ks, S, ret	Modelovaná rychlost	Změřený objem odtoku	Modelované Ks, S, ret	Modelovaný objem odtoku
15	0,169	0.271	0,152	32,01	32.04	31,55
25	0,161	0.28962	0,162	87,83	91.51	90,98

Z Tabulky 12 je patrné, že pro validaci modelu na měřená data je důležité znát jak parametr průběhu odtoku, tak alespoň bodově hodnotu rychlosti proudění. Také je zřejmé, jak jsou správně nastavené parametry modelu důležité z hlediska výpočtů pro určení erozní ohroženosti a vhodnosti zvoleného opatření.

## 4 Stabilizace humózní vrstvy

Jelikož je humózní vrstva na povrch svahů pokládána dodatečně, většinou až po dokončení výstavby celé zemní konstrukce, nebývá vhodně napojena na vlastní svah, který je na svoji stabilitu prověřen projektantem. Právě proto existuje reálné riziko sesutí povrchové humózní vrstvy na svazích jak zářezů, tak i násypů. Z tohoto pohledu je nejnepříznivějším stavem plně nasycená humózní vrstva na málo propustném, zejména jílovitém, podkladu. Podklad se vlivem zvýšené vlhkosti dostává do stavu měkké či až kašovité konzistence a jeho smykové parametry se sníží pod kritickou mez. K obdobné situaci může

T A

Č R

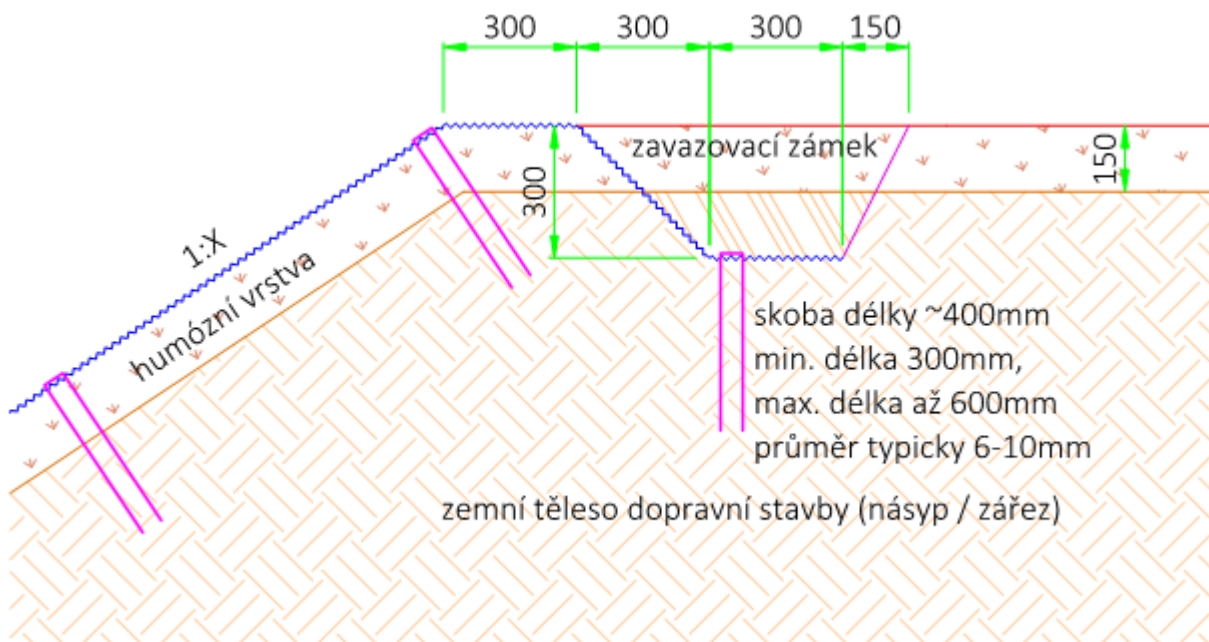
dojít vlivem zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů jak vlastní humózní vrstvy, tak i podkladní vrstvy, kdy dojde ke zvětšení pórovitosti a snížení pevnosti.

Z výše uvedeného je jasné, že k omezení sycení svahu vodou je nepustit do svahu žádnou vodu z oblasti nad vlastním svahem a tuto vodu odvézt jiným technickým způsobem buď do kanalizace nebo vodoteče. Pokud však nátok nelze zabránit, pak je třeba zajistit, aby k nátoku do svahu nedocházelo koncentrovaně, ale rovnoměrně plošně.

Pro zajištění stability humózní vrstvy je proto třeba řešit především horní založení plošných prvků, jejich zakotvení nad korunou svahu a navrhnout vhodný způsob kotvení (délka kotev, jejich průměr, aplikace kotev, využití stabilizačních podložek atp.).

#### 4.1 Horní založení – zavazovací zámek

Horní zavazovací zámek plní defacto 2 důležité základní funkce, zajišťuje, že voda, která by případně natékala na svah, nebude protierozní opatření podtékat čímž by došlo k vyřazení protierozního opatření z funkce a zajišťuje, že protierozní materiál je bezpečně uchycen nad svahem a lze plně využít jeho tahovou pevnost. Řádné provedení zavazovacího zámku je proto velice důležité. Následující obrázek 42 znázorňuje standardizovaný detail, který by měl splnit všechny požadované vlastnosti.



Obrázek 42: Typický detail zavazovacího zámku

#### 4.2 Stabilizační účinek kotvení

Kotvení protierozního prvku na povrchu přes povrchovou humózní vrstvu až do podkladu je dalším důležitým opatřením, které zvyšuje odolnost proti sesunutí povrchové vrstvy. Tvar a velikost příčného řezu kotevního prvku, jeho délka a četnost těchto kotevních prvků jsou činitelé, kteří ovlivňují přínos kotvení na zvýšení odolnosti povrchové vrstvy před sesutím. Ve svém principu se kotevní prvek chová jako miniaturní pilota, která je namáhána na vodorovnou únosnost. Vlastní povrchový protierozní prvek může pomoci s přenosem síly mezi kotevním prvkem a humózní vrstvou zeminy, kdy tření na kontaktu

T A

Č R

mezi humózní povrchovou vrstvou a protierozním prvkem stabilizuje povrchovou vrstvu, ale zároveň vzniklá třecí síla zatěžuje na úrovni terénu kotevní prvek. Kotevní prvek musí být schopen tuto dodatečnou třecí sílu přenést do podkladní vrstvy, aniž by došlo k jeho porušení (vytržení).

Kotevní prvek se typicky skládá ze skoby tvaru U vyrobené ohnutím žebříkové oceli. Průměr drátu k výrobě skob se typicky pohybuje od 6 do 10 mm. Délka skob bývá nejčastěji 400 mm, s tím, že minimální délka je dvojnásobek mocnosti humózní vrstvy a maximální délky nepřekračují čtyřnásobek, neboť prodloužení již nemá žádný dodatečný efekt. Skoby ve tvaru J nejsou vhodné, pokud je potřeba zvýšit stabilitu povrchové vrstvy, neboť pomáhají jen polovičně přenosu sil mezi vrstvami zeminy.

Pokud kotevní prvek rozšíříme o podložku, která ve větší ploše přichytí protierozní matraci k humózní vrstvě, dojde k významnému navýšení únosnosti spoje mezi skobou a protierozním prvkem, čímž se významně navýší stabilizační efekt kotevního systému. Detailnější rozbor kotevních prvků je uveden v samostatných kapitolách níže.

Vzdálenost, resp. hustota kotevních prvků pomáhá nejen se stabilizací povrchové humózní vrstvy, ale též s kontaktem mezi protierozním prvkem a humózní zeminou. Z tohoto důvodu se rozteč kotevních prvků volí hustší se zvyšujícím se sklonem chráněného svahu, neboť se zvýšeným sklonem dochází ke zvýšení destabilizujících sil od tíhy a snížení stabilizujících sil vlivem tření na rozhraní vrstev. U vyšších sklonů svahů je taktéž vyšší riziko podtékání protierozního prvku, pokud není v dobrém kontaktu s podkladem.

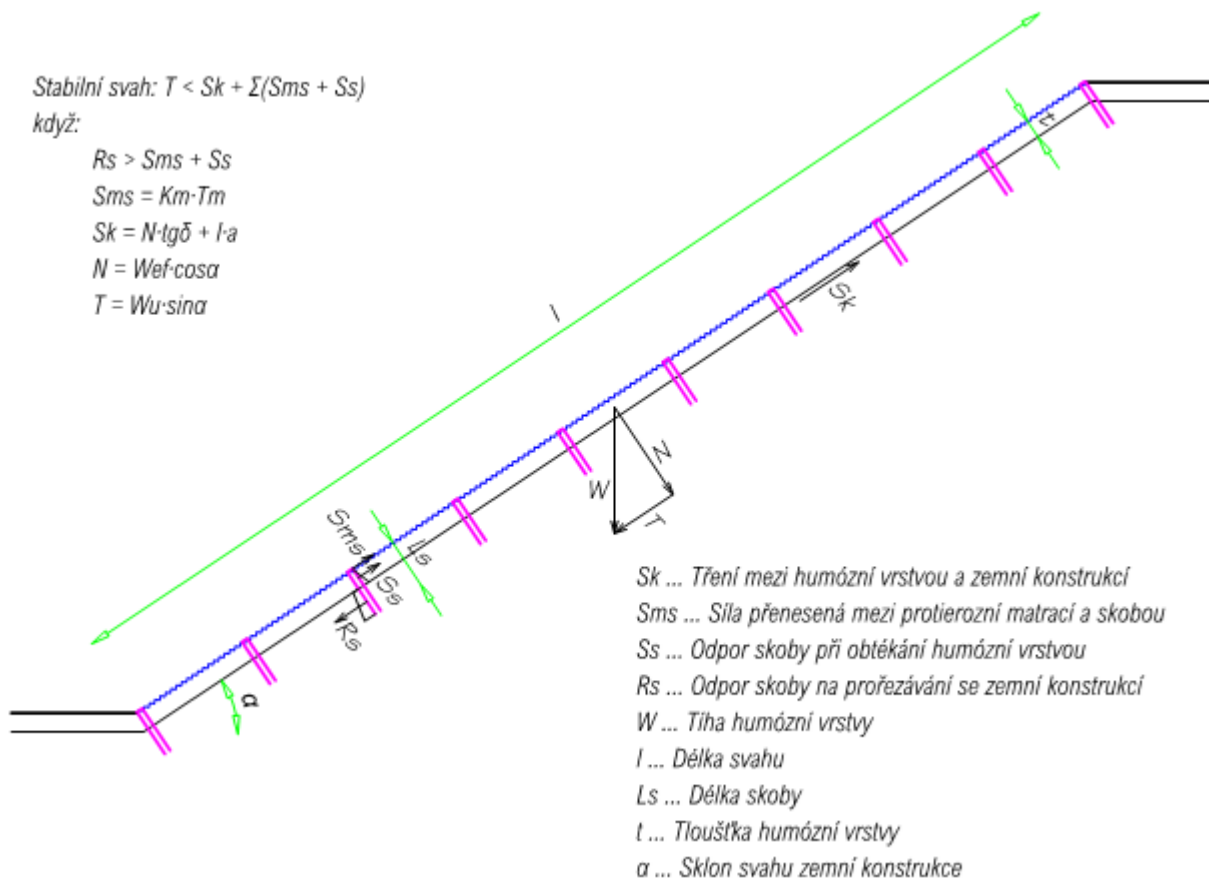
### 4.3 Ošetření podkladní vrstvy a zdrsnění jejího povrchu

Kontakt mezi povrchovou humózní vrstvou a podkladem se nezanedbatelným způsobem podílí na stabilitě povrchové vrstvy. Pokud je podklad hladký, jak tomu běžně bývá po přesném tvarování svahu, tak je povrchová vrstva náchylnější na usmyknutí po podkladu, jelikož je součinitel tření kontaktu nižší. Avšak pokud by byl povrch zdrsněn před pokládkou humózní vrstvy, tak to může pozitivně ovlivnit stabilizační opatření – zvýšit součinitel tření kontaktu. Nejvhodnějším způsobem, jak povrch jílovitého svahu zdrsnit, je použití standardní lžice na bagru či rypadla. Vodorovné vrypy kolmé na sklon svahu zdrsňují podklad nejlépe.

Ke snížení možnosti ztekucení humózní vrstvy přispěje i její zhutnění, kdy se sníží pórovitost humózní vrstvy a tím i možný objem vody při plném nasycení, které má za následek snížení celkové vlhkosti a tím k omezení rizika změny konzistence k horšímu. Zhutnění přispěje i k lepšímu kontaktu mezi podkladem a humózní vrstvou.

### 4.4 Posouzení stability povrchové vrstvy

Kontrola stability povrchové vrstvy je založena na stanovení a porovnání stabilizujících a destabilizujících sil na kontaktu povrchové vrstvy a podkladu, schematicky jsou možné působící síly naznačeny na obrázku 43. Stanovení působících sil vychází z principů mechaniky zemin, a tudíž i vstupní údaje budou k dispozici převážně z geotechnického průzkumu, resp. pedologických dat pro vlastní humózní vrstvu.



Obrázek 43: Schéma sil působících na stabilitu povrchové vrstvy

Pro zajištění stabilního svahu je třeba zajistit, aby síly destabilizující byly menší než síly stabilizující, resp. aby součinitel spolehlivosti konstrukce  $\gamma_R$  dle rovnice (1) byl větší než 1,0.

$$\gamma_R = \frac{S_k + N_s \cdot \min(R_s; S_s + S_{MS}) + T_M}{T} \quad (1)$$

Kde jednotlivé síly a geometrické veličiny jsou znázorněny na obrázku 43 a výpočet sil je uveden v rovnicích (2)-(11) níže.

Efektivní tíha humózní vrstvy:

$$W_{ef} = t \cdot l \cdot (\gamma_{HV} - S_r \cdot \gamma_w), \quad (2)$$

$\gamma_{HV}$  ... objemová tíha humózní zeminy,  
 $S_r$  ... stupeň nasycení humózní vrstvy.

Totální tíha humózní vrstvy:

$$W_u = t \cdot l \cdot \gamma_{HV}, \quad (3)$$

Normálová složka tíhy:

$$N = W_{ef} \cdot \cos \alpha, \quad (4)$$

T A

Č R

Tangenciální složka tíhy:

$$T = W_u \cdot \sin \alpha, \quad (5)$$

Třecí síla mezi humózní vrstvou a zemní konstrukcí :

$$S_k = N \cdot \operatorname{tg} \delta + l \cdot a, \quad (6)$$

$\delta$  úhel vnitřního tření na kontaktu mezi humózní vrstvou a zemní konstrukcí,  
 $a$  soudržnost na kontaktu mezi humózní vrstvou a zemní konstrukcí.

Odpor jedné skoby tvaru U na obtékání zeminou humózní vrstvy:

$$S_s = 2 \times 3 \cdot d_s \times \left( \frac{1}{2} \cdot (\gamma_{HV} - S_r \cdot \gamma_w) \cdot t^2 \cdot K_{p,HV} + t \cdot c_{HV} \cdot K_{p,c,HV} \right), \quad (7)$$

$d_s$  průměr skoby,  
 $K_{p,HV}$  součinitel pasivního zemního tlaku humózní vrstvy pro třecí složku,  
 $K_{p,c,HV}$  součinitel pasivního zemního tlaku humózní vrstvy pro adhezni složku,  
 $c_{HV}$  soudržnost humózní vrstvy.

Únosnost spoje mezi skobou a protierozním prvkem:

$$S_{MS} = K_M \cdot T_M, \quad (8)$$

$T_M$  tahová pevnost protierozního prvku,  
 $K_M$  redukční součinitel stanovený experimentálně.

Odpor jedné skoby tvaru U na prořezávání se zeminou zemní konstrukce:

$$R_s = 2 \times 3 \cdot d_s \times \frac{1}{2} [(L_s - t)^2 \cdot (\gamma_{ZK} - S_r \cdot \gamma_w) + t \cdot L_s \cdot (\gamma_{HV} - S_r \cdot \gamma_w)] \cdot K_{p,ZK}, \quad (9)$$

$\gamma_{ZK}$  objemová tíha zeminy zemní konstrukce,  
 $K_{p,ZK}$  součinitel pasivního zemního tlaku zeminy zemní konstrukce.

Limitní hodnota odporu skoby:

$$R_s > S_s + S_{MS}, \quad (10)$$

Počet skob ve svahu:

$$N_s = \frac{l}{a_s}, \quad (11)$$

$a_s$  počet skob na 1 m<sup>2</sup> povrchu svahu

Pokud by i nadále nebylo možné zajistit stabilitu povrchové humózní vrstvy, pak bude třeba přistoupit k vyztužení této vrstvy pomocí výztužné geomříže umístěné na rozhraní mezi tělesem zemní konstrukce a povrchovou humózní vrstvou nebo využít geobuněk s výztužnými lanky. Návrh tahového prvku – geomříže, resp. lanka, bude proveden v souladu s ČSN EN 1997-3 (tato EN je dnes v přípravě, její finální publikace se předpokládá v srpnu 2024, avšak lze usuzovat, že v květnu 2021 bude uveřejněna verze před definitivním hlasováním v anglickém originále pro odbornou veřejnost prostřednictvím ČAS).

#### 4.5 Principy kotvení a přehled stávajících řešení kotvení

Problematika protierozních sanačních opatření zemních těles je ve velké řadě případů řešena instalací vhodného protierozního materiálu. Je standardní, že je řešena vhodnost materiálu na konkrétní sklon a povrch, je detailně řešen doporučený rastr kotvení, ale málokdy je při realizační praxi detailněji řešena



**T A**

**Č R**

problematika jeho ukotvení. Nejčastěji bývá uváděn odkaz na instalační postup doporučený výrobcem konkrétního materiálu. Ten však více řeší únosnost kotvení vzhledem k materiálu samotnému než ke konkrétnímu podkladu. Je to pochopitelné, protože variabilita povrchů, na které jsou rozličné protierozní materiály pokládány je značná.

Výrobci nejčastěji z používaných materiálů doporučují využívat ocelových pozinkovaných nebo dřevěných kotviček. Často bez doporučení na jejich délku. V případě kovových materiálů se nejčastěji využívají kotvičky ve tvaru „J“ nebo „U“ vyráběné z ohýbané oceli o různých délkách a průměrech (viz obrázky 44 a 45). Případně i dřevěné řešení viz obrázek 46.

T A  
Č R





Obrázek 44: Ocelové kotvy z ohýbané žebříkové ocele různých tvarů a délek o průměru drátu 6 až 10mm



Obrázek 45: Ocelová kotvící skoba z hladkého drátu o průměru 3mm (písmeno U) a 3,8mm (písmeno J) s profilací

# T A Č R



Obrázek 46: dřevěný kolík používaný zejména zahradníky ve spojitosti s biodegradálními síťovými materiály

Tato řešení jsou pro investory i zhotovitele zajímavé svojí jednoduchostí a zejména bezkonkurenčně nízkou cenou. Tato řešení jsou naprosto majoritní pro řešení, se kterými se setkáváme v ČR a okolních zemích.

Existují však u jiné systémy, které se snaží tuto problematiku řešit. Zajímavý je například systém Terra lock<sup>1</sup> od společnosti Gripple z Velké Británie (obrázky 47 a 48), který je založen na aplikaci kotevního prvku, který je aktivován „dotážením“ ocelovým lankem a využívá kotevní hlavu pro přitlačení sanačního materiálu. K umístění kotevního prvku je využívána aplikační sonda, kterou je možné připojit na pneumatické nářadí.

Tento systém je sice sofistikovaný, bude přinášet lepší a spolehlivější výsledky kotvení protierozních materiálů, ale bohužel jeho zásadní problémem je jeho cenová nekonkurenceschopnost.



<sup>1</sup> <https://www.gripple.com/products/civil-construction/terra-lock-system/#overview>

# T A Č R

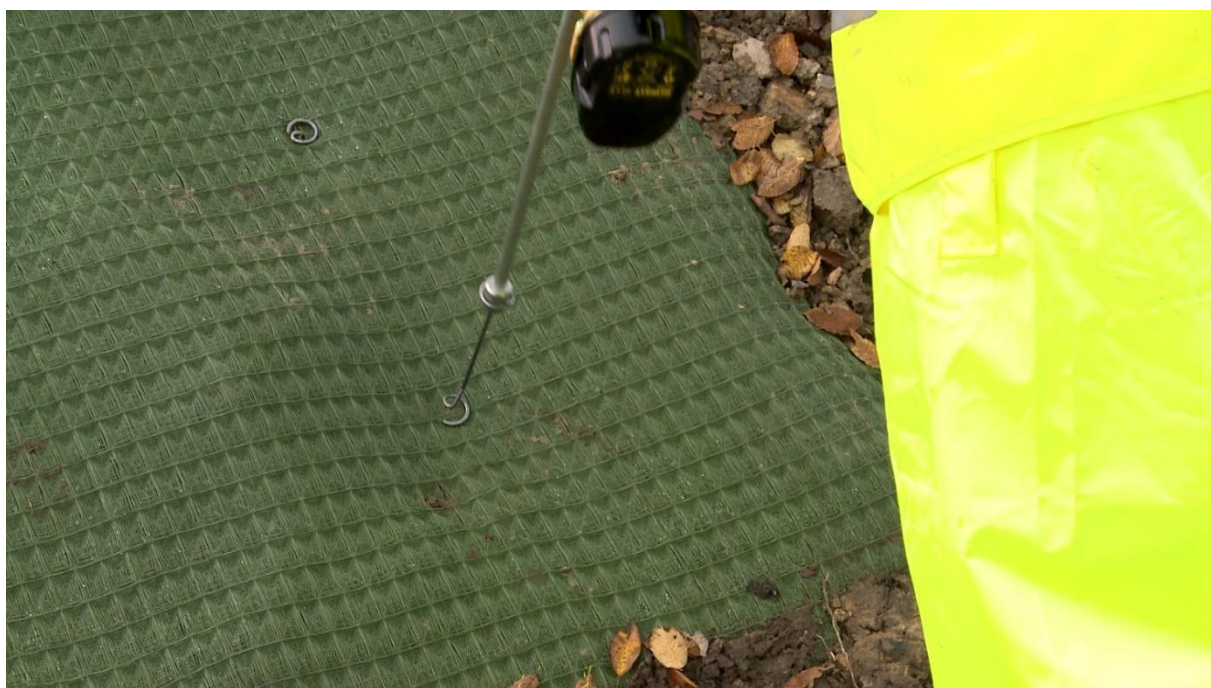
Obrázek 47: Základní prvky systému Terra lock. Zdroj: <https://www.westernexcelsior.com/products/pda.mgi>



Obrázek 48: Detail ukotveného materiálu pomocí systému Terra lock. Zdroj: <https://www.gripple.com>

Dalším řešením, které je možné v kotvení protierozních opatření nalézt jsou šroubované skoby. Toto řešení zpravidla využívá akumulátorové nářadí.

Příkladem je například opět systém Terra-Lock® Pin Range (obrázek 49).



Obrázek 49: Ukázka kotviček k aplikaci šroubování. Zdroj: <https://www.gripple.com/products/civil-construction/terra-lock-pin/#overview>

Tento princip je využíván i u řady jiných výrobců a je využíván i pro další podobné účely. Například jako kotvení lehkých dřevěných konstrukcí a obecně menších zemních kotev (obrázek 50).



Obrázek 50: Ukázky různých typů zemních kotev. Zdroj: <https://anchormfg.com/sta-lok-tie-down-anchors/>

Vzhledem k úsilí o originální řešení byl k ověření jedinečnosti využit systém Úřadu průmyslového vlastnictví. Systém obsahuje informace o průmyslových právech přihlášených v České republice - ÚPV (Úřad průmyslového vlastnictví) a o průmyslových právech přihlášených v zahraničí, které mají platnost na území České republiky - EPO (Evropský patentový úřad), WIPO (World Intellectual Property Organization), EUIPO (European Union Intellectual Property Office).

Rešerše se zaměřovala zejména na typ ochrany průmyslový vzor, užitný vzor a patent.

**T A**

**Č R**

Klíčová slova, které byla k rešerši volena byla: kotva, kotvička, kotevní, sanační materiál, zemní a jejich anglické ekvivalenty.

Žádné z nalezených řešení pod ochranou průmyslových práv není zcela relevantní k řešení, které je předmětem této rešerše. Zejména pokud se zaměříme na řešení tématu, kotvení protierozních materiálů, žádné z chráněných řešení se tohoto tématu netýkalo.

Pokud jsme se zaměřily na jednotlivé komponenty systému: kotvičku, podložku a aplikátor, tak nalezneme některá řešení, která se dotčeného tématu kotvení protierozních materiálů netýká.

Pro kotvení jde například o:

CS: Kotevní zařízení pro kotvení do vícevrstvé půdy

[https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print\\_detail.det?pspis=EP/2379811&plang=CS](https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=EP/2379811&plang=CS)

CS: Zašroubovatelná zemní kotva

[https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print\\_detail.det?pspis=PT/1970-5069&plang=CS](https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PT/1970-5069&plang=CS)

CS: Zemní kotevní šroub

[https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print\\_detail.det?pspis=PT/1980-2708&plang=CS](https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PT/1980-2708&plang=CS)

CS: Zemní vrut pro ukotvení nadzemních zařízení

[https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print\\_detail.det?pspis=PUV/20773&plang=CS](https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PUV/20773&plang=CS)

CS: Zemní vrut

[https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print\\_detail.det?pspis=PUV/28858&plang=CS](https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PUV/28858&plang=CS)

CS: Horninová expanzní kotva

[https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print\\_detail.det?pspis=PT/2009-885&plang=CS](https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PT/2009-885&plang=CS)

CS: Půdní kotva

[https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print\\_detail.det?pspis=PUV/22820&plang=CS](https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PUV/22820&plang=CS)

Aplikátor :

CS: Zařízení k zavrtání šroubových kotev pro zemní kotvení konstrukcí

[https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print\\_detail.det?pspis=PT/1961-4101&plang=CS](https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=PT/1961-4101&plang=CS)

CS: Zemní vrty (zařízení na -)

[https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print\\_detail.det?pspis=RCD/000991781-0001&plang=CS](https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=RCD/000991781-0001&plang=CS)

Zemní vrták

[https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print\\_detail.det?pspis=RCD/001910753-0005&plang=CS](https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=RCD/001910753-0005&plang=CS)



T A

Č R

V případě podložky se jedná o:

Podložka na kotvu

[https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print\\_detail.det?pspis=RCD/002148833-0001&plang=CS](https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=RCD/002148833-0001&plang=CS)

Zemní kotvy s podložkou

[https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print\\_detail.det?pspis=RCD/001039762-0004&plang=CS](https://isdv.upv.cz/webapp/resdb.print_detail.det?pspis=RCD/001039762-0004&plang=CS)

#### 4.6 Základní předpoklady pro systém kotvení

Na základě předchozích rešerší, sledování potřeb na reálných stavbách realizovaných v letech 2019 a 2020 a rozhovory se stavbyvedoucími, projektanty a dalšími praktiky jsme identifikovali následující požadavky na zlepšení systému kotvení.

- 1) Požadavky na ekonomickou rentabilitu.
- 2) Zvýšení možnosti zátěže protierozního materiálu, zejména v měsících bezprostředně po instalaci.
- 3) Prevence vytrhávání jednotlivých kotviček.
- 4) Jednoduchost aplikace a akcentem na její zrychlení.
- 5) Omezení pohybu po pokládání materiálu.
- 6) Vyloučení možnosti využívání aku nářadí.

Požadavek č. 1 na ekonomickou rentabilitu je pochopitelný a pochází zejména od realizátorů a projektantů. V případě již běžících projektů, by změny technologie kotvení vůbec nepřicházely v úvahu, protože standardně se počítá s velmi nízkou cenou kotvení.

Druhý požadavek vychází ze zkušeností se zranitelností takových opatření prudkými dešti před jejich definitivním usazením, zejména pak zarostlou vegetací. Takové situace způsobují realizátorům a investorům miliónové škody, i když k takovým problémům samozřejmě dochází jen někdy.

Požadavky číslo tři na prevenci vytrhávání jednotlivých kotviček souvisí s požadavkem č. 5. na snížení pohybu pracovníků po materiálech, které ještě nejsou stabilizované prorůstající vegetací. Poškození protierozního materiálu při jeho instalaci a samovolné vypadávání (často vyplavování) jednotlivých kotviček jsou častou reklamací takových prací. Příklad takového porušení je zobrazen na obrázku 51.



Obrázek 51: Poškození kokosové sítě pohybem pracovníků a nesprávně založená sanační síť.

Požadavky číslo 4 a 6 spolu opět souvisí. Jsou navázány na základní požadavek, aby systém byl levný. Vyšší efektivita instalace může ospravedlnit o něco vyšší náklady na jednotlivé jeho prvky. Aku náradí bylo většinou praktiků odmítnuto ze dvou důvodů. Jedná se o technologii, které se v takové míře na využívá a její zavedení by bylo ekonomicky a organizačně náročné. V neposlední řadě panovala obava o spolehlivost takového náradí v podmínkách, které na stavbách často panují. (vlhko, bláto)

#### 4.7 Postup vývoje systému kotvení geosyntetických protierozních materiálů

Prvním směrem vývoje bylo prověření možností šroubovacích kotviček za využití pneumatického náradí. Bohužel se po prvních propočtech ukázalo, že v případě využití síly pneumatického náradí, by požadavky na materiál šroubovacích kotviček byly příliš veliké a nebylo by možné konkurovat stávajícímu způsobu kotvení. Proto byla zvolen způsob kotvení vycházející z nejobvyklejšího přístupu. Kotvení zatlučenými kotvičkami/hřeby.

##### Zátěžové testy systému

Pro zjištění základních parametrů takového kotvení byly na pokusné lokalitě v Jirkově, realizovány zátěžové testy stávajícího typu kotviček.

Testy byly realizovány na testovací ploše č. 1 se sklonem 1:1,5 (obrázek 52) s využitím základních typů kotviček v různých délkách a dvěma typy materiálů. Jednalo se o Enkamat 7220 a Macmat 18. Test spočíval v natahování sanačního materiálů sevřeného v dolní části mezi dvě lišty pomocí pákového navijáku, tak aby docházelo k rovnoměrnému zatěžování materiálu i kotviček. Test byl realizován na jednom pruhu materiálu v délce celé plochy (4 m) ale v šířce 1 m. Materiály byly zvolené s tím, že u nich výrobce deklaroval nejnižší pevnost z testovaných materiálů.



Obrázek 52: Přehledové foto experimentu

Ve vrchní části testovaného pásu byl udělán zámek a kotvení bylo realizováno v rastru 1x1m s tím, že nejbližší kotva od zatěžovaného prvku byla právě 1 m. Testy byly realizovány buď na celou plochu materiálu, kde kotvičky mohli pracovat jako systém, nebo jen na jednu řadu kotviček.

Vzhledem k tomu, že vrstva ornice na testovací lokalitě byla cca 10 cm, byla nejmenší délka testované kotvičky zvolena 20 cm. Tedy dvojnásobek humózní vrstvy. Během přípravy testů se totiž ukázalo, že kratší kotvičky jsou vytaženy jen samotnou vahou tažného systému. Taktéž po zkušebním testu jsme vyřadili kotvičky ve tvaru „J“ protože vykazovali nedostatečnou pevnost.

Tahová síla byla měřena pomocí jeřábové váhy s rozsahem do 500 kg a citlivostí 100 g. Vzhledem k tomu, že celý systém táhla nezačínal zcela v klidu, není možné naměřené hodnoty považovat za absolutní. Nicméně zcela postačí k relativnímu porovnání jednotlivých způsobů kotvení. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 13.

Tabulka 13: Výsledky zátěžových testů

číslo testu	testovaný materiál	typ kotvy/typ kotvení	orientace kotvy ve svahu	délka kotvy v cm	naměřené zatížení v Kg	síla do kolapsu
1	Enkamat 7220	U / systém	svislá	30	27	264,78
2	Enkamat 7220	U / systém	kolmá	30	35	343,23
3	Enkamat 7220	U/ samotná kotva	kolmá	30	52	509,95
4	Enkamat 7220	U/ samotná kotva	svislá	30	43	470,72
5	Enkamat 7220	U s podložkou/samotná kotva	kolmá	30	88	862,99
6	bez materiálu	U/přímý tah na kotvu svislá	svislá	30	60	588,40
7	bez materiálu	U/přímý tah na kotvu svislá	svislá	20	28	274,59
8	Macmat 18	U/systém	svislá	30	8,3	81,40
9	Macmat18	U/ systém	kolmá	30	50	490,33
10 <sup>2</sup>	Macmat 18	U s podložkou/systém	kolmá	30	60	588,40
11	Macmat 18	U s podložkou/systém	kolmá	30	76	745,31
12	bez materiálu	U/přímý tah na kotvu kolmá	kolmá	30	60	588,40

<sup>2</sup> nedosaženo maximální síly při vytržení kotvy, došlo k uvolnění úchytu

Testy ukázaly následující závěry:

- 1) Je rozdíl v orientaci kotvičky. Kotvičky, které jsou po směru tahu se snadněji „proříznou“ sanačním materiálem. Zejména u křehkých materiálů jde o velmi zásadní rozdíl (obrázky 53).
- 2) Při porovnání kotviček 30 cm a 20 cm dochází ke zvýšení únosnosti o téměř 50%.
- 3) Použití podložek zásadně zvyšuje údržnost (obrázek 54).

<sup>2</sup> Před dokončením testu došlo k vytvrnutí záhla test by opakován jako test č. 11.



Obrázek 53: Porovnání vytržení kotvičky při orientaci po tahu a kolmo k němu



Obrázek 54: Vytržení materiálu při použití podložek

Všechny závěry byly zohledněny do návrhu systému kotvení protierozních materiálů.

Vývoj systému kotvení sanačních opatření

Vývoj systému byl pracovníě definován jako kombinace standardizované kotvičky vycházející ze stávající praxe, podložka zlepšující přilnavost materiálu a pomůcka pro šetrnou aplikaci kotev. Tato pomůcka později byla označována jako aplikátor.

Kotvička byla definována na základě výše uvedených pokusů a vzhledem k aplikátoru.

T A

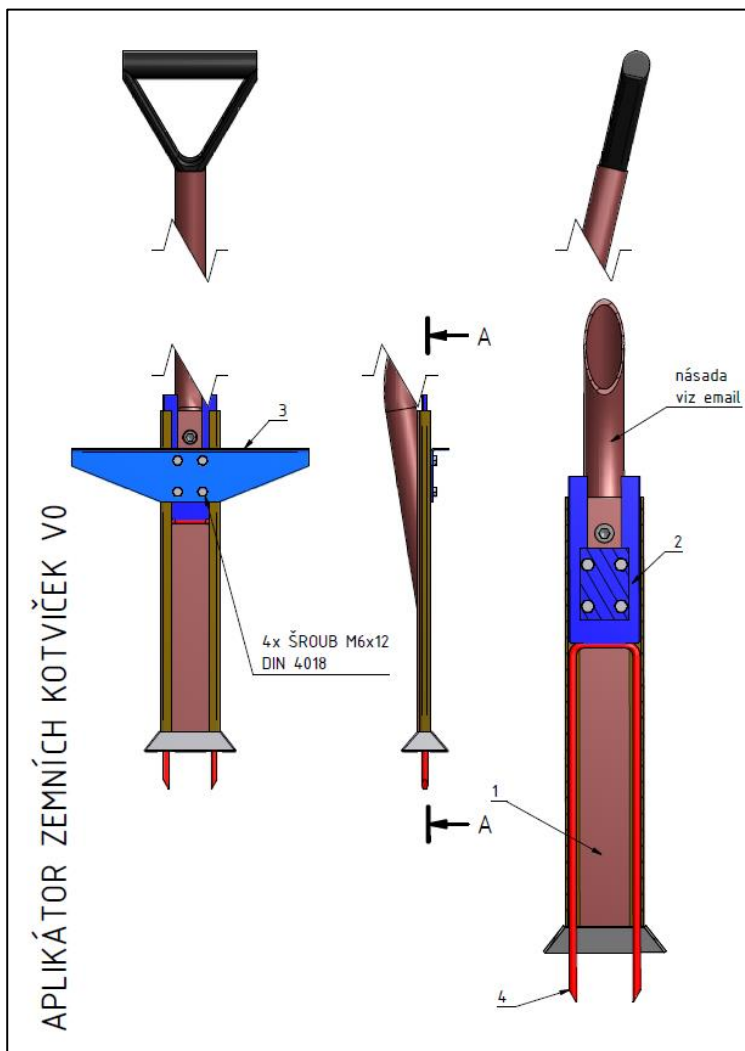
Č R

Jako materiál pro podložku byl zvolen neupravovaný tahokov. K výrobě podložky je možné využít zbytků z jiné výroby a tím je cena podložky stlačena na naprosté minimum. Během vývoje řešitelé experimentovali s různými tvary, ale prostý obdélník vychází nejlépe. Jeho zpracování je nejjednodušší a bez zbytkové. Ostré rohy sice mohou způsobit poškození sanačního materiálu, ale během testování jsme se s tímto problémem nesetkali.

Jednou z vývojových fází podložky byla i podložka, které měla delší hranu ohnutou o cca 2 cm. Důvodem bylo vytvářet na sanačním materiálu miniaturní zádržnou bariéru, která zabraňuje smívání krycí humózní vrstvy. Dopad tohoto prvku (ohnutého okraje) byl však oproti nákladům na výrobu a ztížení manipulace zanedbatelný a tak se od něj upustilo.

Aplikátor byl zpočátku uvažován jako dřík s magnetickou hlavou, přes který by se vestoje kotvička zatloukala paličkou. Od tohoto záměru však bylo upuštěno již během modelování z důvodů váhy nástroje, problematického přesného vedení kotvičky a také minimální úspory času během aplikace.

Další pohled vycházel z tvaru rýče. Kdy pohyblivý jezdec sešlápnutím stupačky zatlačí kotvičku do podkladu. Tento přístup se ukázal jako funkční, ale celková ergonomie nástroje se nepodařilo v první verzi dobře navrhnout (obrázek 55). Proto v prosinci 2019 byla vytvořena ještě další verze (obrázek 56), která opustila ergonomii rýče, ale zachovala pohyblivý jezdec a tím byl vytvořen skutečně funkční nástroj, který byl během roku 2020 ověřen spolu s dalšími prvky v praxi.



Obrázek 55: Aplikátor první verze

T A

Č R



Obrázek 56: Porovnání obou verzí aplikátoru

#### 4.8 Inovativní systém kotvení geosyntetických protierozních materiálů

Nový systém je založen na optimalizovaném přístupu, který zohledňuje více faktorů než jen potřebný rastr kotvení z ohledem na použitý materiál. Celý systém je neodmyslitelně spjat se správným technologickým postupem. Vychází se stávajících postupů a zohledňuje i ekonomické hledisko, protože v silně konkurenčním prostředí, kterým stavebnictví je, by finančně náročný systém neměl šanci na prosazení do praxe. Praxe kotvení georochoží je velmi roztržštěná co se týká postupů i specifikace využívaných kotev. Na základě dobré praxe a experimentů navrhuje pro správné kotvení dodržovat následující zásady.

Zásady dobrého kotvení protierozních materiálů

- 1) Kotvičky musí být zakotveny minimálně 150 mm do hutněného podloží. Ideálně pak dvojnásobek humózní vrstvy.
- 2) Ideální je kotva typu „U“ se dvěma trny o průměru 6 – 10 mm. Čím kamenitější podloží, tím silnější je třeba využít kotvičku, aby nedocházelo k ohnutí během aplikace.
- 3) Kotvičky je třeba instalovat jejich delší stranou kolmo k předpokládanému zatížení protierozního materiálu. (Zpravidla ve směru vrstevnice.) Podložky pod kotvičkami zásadně zvyšují mez vytržení protierozního materiálu z kotvičky při jeho zatížení.
- 4) Při kotvení je třeba minimalizovat přímý pohyb pracovníků po pokládané protierozním materiálu. I malé poškození, zejména v okolí instalovaných kotviček zásadně snižuje mez jejich vytrhnutí. Vhodný je například pohyb po položeném žebříku a využití přípravku na instalaci kotviček.
- 5) Rastr kotvení musí určit projektant dle aktuálních podmínek a konkrétního typu využitého materiálu. Zohlední sklon svahu, mocnost humózní vrstvy a konkrétní šíři využitého protierozního materiálu. (Je



T A

Č R

nutné počítat s potřebou kotvení v krajích každé role.) Rozteč mezi jednotlivými kotvičkami by měl být cca 0,5 – 2 m.

Systém se skládá z následujících komponent:

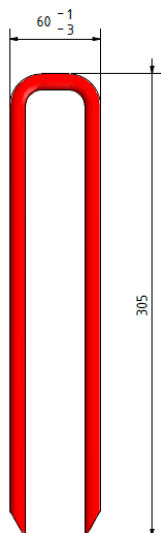
- 1) Standardizovaná kotvička ve tvaru „U“
- 2) Zpevňující podložka
- 3) Aplikátor kotviček

Technické parametry:

Kotvička ve tvaru „U“ (obrázek 57) je stabilnější pro zatěžování v různých směrech. Proto je v rámci systému kotvení upřednostňován tento tvar. Doporučený průměr kotvičky je 6 – 10 mm. Čím kamenitější podloží, tím silnější průměr kotvičky je třeba využít. Velikost ohybu je 60 mm. Kotvičky musí být zakotveny minimálně 150 mm do zhuťněného podloží. Ideálně pak dvojnásobek humusní vrstvy. Minimální délka kotvičky je však 200 mm a maximální 400 mm. Delší kotvičku je problematické aplikovat.

Kotvičky je třeba instalovat jejich delší stranou kolmo k předpokládanému zatížení protierozního materiálu. (Zpravidla ve směru vrstevnice.)

POZ. 4  
ROXOR 10 mm – 700 mm



Obrázek 57: Standardizovaná kotvička

# T A Č R

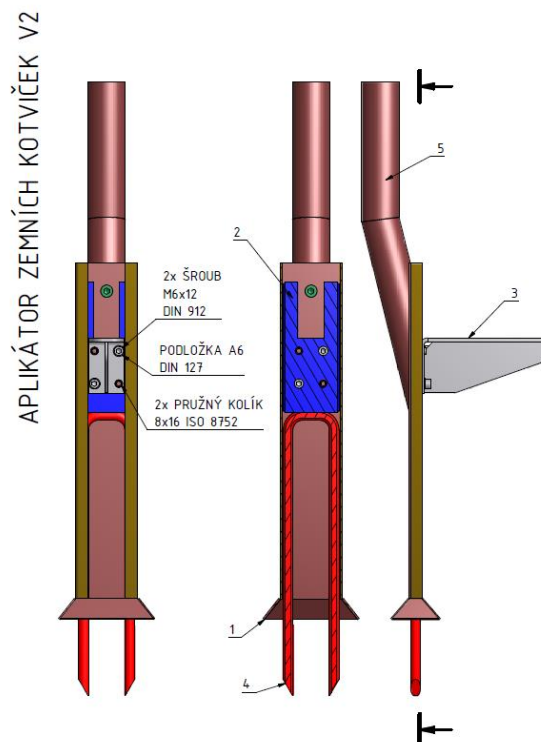
Zpevňující podložky jsou z vhodného tahokovu (obrázek 58), vyrobeného z plechu o síle 1.5 mm s oky 20x15 mm, o rozměru 100 x 150 mm pod kotvičkami několikanásobně zvyšují mez vytržení protierozního materiálu z kotvičky při jeho zatížení. Ideální je pozinkovaná varianta materiálu.



Obrázek 58: Podložka z tahokovu

Při kotvení je třeba minimalizovat přímý pohyb pracovníků po pokládaném protierozním materiálu. I malé poškození, zejména v okolí instalovaných kotviček zásadně snižuje mez vytržení kotveného materiálu. Vhodný je například pohyb po položeném žebříku a využití aplikátoru na instalaci kotviček.

Aplikátor umožňuje pracovníkovi, který jej využívá, aplikovat kotvičky ve stoje, čímž zvyšuje efektivitu práce. Snižuje dobu pobytu pracovníka na kotveném materiálu. Je šetrnější k aplikovanému materiálu, zejména v okolí umístění kotvičky. Umožňuje využití celé váhy osoby, která s ní pracuje na aplikaci kotvičky a omezuje ohnutí kotvičky při aplikaci využitím zpevněného vedení kotvičky.



T A

Č R

Obrázek 59: Aplikátor zemních kotviček

Aplikátor se skládá z dřevěné násady a kovového aplikátoru (viz obrázek 59). Aplikátor je složen z drážky na vložení kotvičky a úderník se stupačkou. Maximální rozměry kovové části aplikátoru jsou 382x103 mm.

#### Pracovní postup:

Pracovník vloží kotvičku do drážky, nechá cca 10 cm vyčnívat. Na vyčnívající kotvičku nasadí podložku. Kolmo k vodorovné rovině přiloží aplikátor na místo aplikace. Sešlápne úderník pomocí stupačky a tím zatlačí kotvičku do země (obrázek 60). V případě nedostatečného zatlačení je možné na stupačce poposkočit, či pomocí paličky kotvičku doklepnout. V případě práce na velmi strmém svahu je třeba stupačku orientovat směrem ze svahu, aby nedošlo ke kolizi mezi stupačkou a svahem.



Obrázek 60: Aplikace kotvičky pomocí aplikátoru

#### Ekonomické parametry:

Finální výrobní náklady se pohybují okolo 5000 Kč na kus aplikátoru. Při malosériové výrobě lze předpokládat její zlevnění. Ceny kotvičky se odvíjí od její délky a průměru, ale včetně výroby nepřekročí 20 Kč á kus. Ceny zpevňující podložky je kalkulována na 7 Kč.

Prototypy vzniklé v rámci projektu jsou ve vlastnictví STRIX Chomutov, a.s. Systém kotvení můžou oba řešitelé bezplatně využívat v rámci vlastní činnosti. V případě prodeje dalšímu subjektu je třeba souhlasu obou řešitelů a respektování smlouvy o využití výsledků. Kde se řešitelé dohodli na vlastnictví 90% STRIX Chomutov, a.s. a 10% ČVUT.

**T A**

**Č R**

#### **4.9 Nasazení systému v ověřovací praxi.**

Aplikátor a kotvičky byly nasazeny a ověřena jejich funkčnost na několika úsecích stavby Modernizace trati Sudoměřice – Votice během května - listopadu 2020 (obrázek 61).





Obrázek 61: Ověření v praxi

Některé postřehy pracovníků se sbíraných v rámci zpětné vazby:

- Je super, že se dají kotvičky „zatloukat“ ve stoje, tím odpadá klečení na mokřém povrchu. A tady je letos mokro pořád.
- Asi tak 1-2 kotvičky z deseti sice musím, dotloukat paličkou, ale i tak je to zrychlení práce.
- Nejprve jsem to považoval za nějakou hloupost, ale celkem to zrychluje práci. Takže za mě dobrý.

#### **7) Návod na práci s aplikátorem**

Na následujícím obrázku (obrázky 62) je detailně zobrazen postup při používání aplikátoru.

- a) Pracovník vloží kotvičku do drážky, nechá cca 10 cm vyčnívat.



b) Na vyčnívající kotvičku se nasadí podložka.



c) Kolmo k vodorovné rovině přiloží aplikátor na místo aplikace.



d) Sešlápne úderník pomocí stupačky a tím zatlačí kotvičku do země.



e) V případě nedostatečného zatlačení je možné na stupačce poposkočit, či pomocí paličky kotvičku doklepnout.

# T A Č R



- f) V případě práce na velmi strmém svahu je třeba stupačku orientovat směrem ze svahu, aby nedošlo ke kolizi mezi stupačkou a svahem



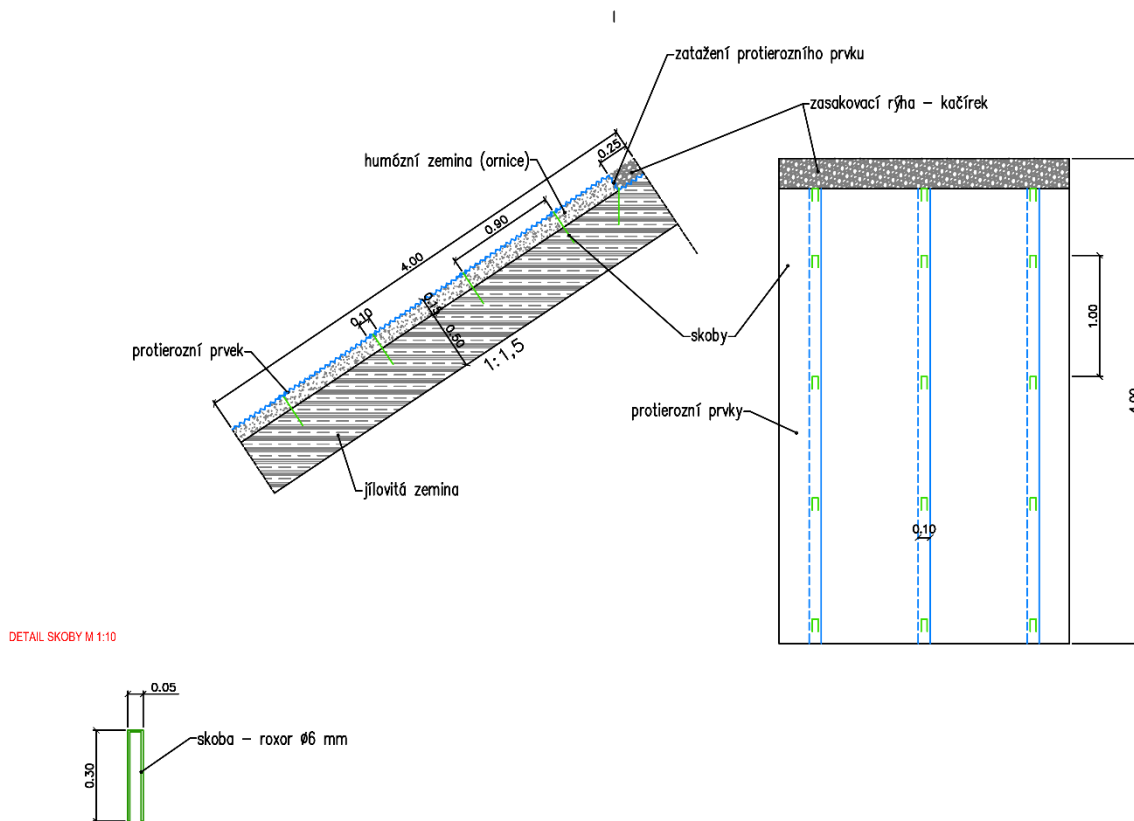
- g) Finálně umístěná kotvička včetně podložky

Obrázek 62: Na obrázcích a – g je detailně zobrazen pracovní postup s aplikátorem



#### 4.10 Experimentální ověření stability rozhraní humózní vrstvy a podloží

V rámci experimentálních pokusů na lokalitě Jirkov bylo provedeno několik testů se záměrem zjistit vlivy jednotlivých opatření ke stabilizaci povrchové vrstvy proti jejímu celkovému usmyknutí. Byl vymyšlen experiment za tímto účelem, jehož schéma je na obrázku 63.



Obrázek 63: Schéma experimentu k ověření vlivů pro zamezení usmyknutí celé humózní vrstvy

Základním principem experimentu je připravený svah s různými variantami protierozních opatření dosycovat vodou přes zasakovací rýhu, čímž se má simulovat téměř plné nasycení humózní vrstvy, která se tím stává nestabilní. Je to defacto ekvivalent dlouhodobých srážek během podzimu, resp. Během jarního tání sněhu. Simulovali jsme hladký povrch zemní konstrukce, na níž se umístí humózní vrstva jen s lehkým přitlačením, tj. Zůstává relativně kyprá náchylná na absorpci velkého množství vody. Jak bylo již uvedeno v úvodu kapitoly 4 při zvýšené vlhkosti dochází ke změně konzistence zeminy konstrukce a tím ke snížení jejích pevnostních charakteristik, což může způsobit překročení smykové pevnosti kontaktu a tím i usmyknutí celé humózní vrstvy.

Při posuzování možnosti usmyknutí celé vrstvy v souladu s kapitolou 4.4 se ukázalo, že právě smyková pevnost kontaktu hraje rozhodující roli a v menší míře pomáhá i kotevní systém. Ale v kritických chvílích může být právě kotevní systém tím jazyčkem na vahách, zda k usmyknutí dojde či nikoliv.

T A

Č R

S ohledem na mechanismus působení bylo dohodnuto otestovat nejprve svah bez protierozního opatření, tj. bez kotevního systému. Následně pak měly být provedeny testy s různými povrchovými systémy i kotevními prvky.

Celkově bylo provedeno 5 testů simulujících usmyknutí celé humózní vrstvy. První test bez aplikace protierozních opatření vyšel nejlépe, kdy celý den před testem drobně pršelo, a tak došlo přirozeným postupem k prosycení humózní vrstvy a nasycení povrchové vrstvy zeminy podloží, která byla v tomto případě tvořena jemnozrnnou zeminou (zejména písčítým jílem). V den testu byl uměle dosycen kontakt mezi humózní vrstvou a podkladní vrstvou pomocí zasakování vody zasakovací rýhou. A následně došlo k postupně se urychlujícímu usmyknutí (ujetí) humózní vrstvy po podkladu. Obrázek 64 ukazuje počáteční a koncový stav experimentu.



Obrázek 64: Experiment na usmyknutí humózní vrstvy bez protierozních opatření - před a po provedení testu

Další dvě simulace byly naplánovány na stejný den v obou krajních kontejnerech. Bohužel se experimenty nepovedly tak jako první, neboť humózní zemina nebyla před začátkem experimentu dostatečně prosycená přirozeně srážkami. Dodatečné sycení přes zasakovací rýhu proto neprobíhalo rovnoměrně. U zkušebního pole s jemnozrnnou zeminou v podkladní vrstvě, si voda našla preferenční cestu skrz humózní vrstvu, kde došlo k vyplavení tunelů skrz humózní vrstvu (k tzv. vnitřní erozi). Tyto tunely se následně propadly a vytvořily se široké erozní rýhy na povrchu. Druhé zkušební pole mělo v podloží více hrubozrnnější zeminu charakteru štěrků hlinitých. Tento typ podloží zapříčinil, že se sytící voda namísto sycení humózní vrstvy a vrstvy podloží vsakovala do hrubozrnnější polohy a v ní odtékala zkušebním polem, a proto nedošlo k problémům na povrchu svahu.

Závěrem z druhého testovacího dne bylo definování základních požadavků na nasycenost humózní zeminy před začátkem intenzivního dosycování kontaktu zemní konstrukce s humózní vrstvou a taktéž

T A

Č R

požadavek na jednotný charakter podkladní vrstvy simulující povrch zemní konstrukce. Podkladní vrstva musí být vytvořena z jemnozrnné zeminy, která má malou propustnost a je náchylná ke změně své konzistence se zvyšující se vlhkostí.

V tomto směru byly provedeny úpravy nejen v krajních, ale ve všech kontejnerech, aby se mohlo provést otestování nejen nejstrmějších svahů a jejich protierozní ochrany. Dalším důvodem pro použití středových kontejnerů, byla skutečnost, že tyto zkušební plochy je možné v případě nedostatku přirozených srážek předsycovat umělým deštěm z instalovaných dešťových simulátorů.

Následně byly připraveny všechny kontejnery na testy. Testovací den v roce 2020 byl i s ohledem na účast všech členů řešitelského týmu a epidemiologická omezení kvůli pandemii zvolen v červenci, kdy však několik dní před vlastním experimentem bylo velice horko a teplo. Umělé dosycování povrchu prostřednictvím dešťového simulátoru bylo prováděno celý den před experimentem, ale příroda se ukázala silnější a předsycení bylo málo efektivní i s ohledem na požadavek nezničit povrch svahu povrchovou erozí od dešťového simulátoru, na němž jsme nechtěli měnit intenzitu, aby byly zachovány stejné výchozí podmínky pro experimenty s protidešťovými opatřeními.

Experimenty byly ukončeny sesutím humózní vrstvy, ale až po kombinovaném namáhání jak sycením přes zasakovací rýhu, tak i intenzivnějším zadešťováním ze simulátoru. Na základě těchto objektivních příčin tak nemohl být systém protierozní ochrany včetně kotvení experimentálně otestován a stanoveny reálné příspěvky od jednotlivých navrhovaných opatření ke zvýšení stability humózní vrstvy proti jejímu celkovému usmyknutí.

Z reálných staveb víme, že k tomuto problému dochází právě ve zmiňovaných obdobích roku (podzim a jaro), jsme schopni definovat jednotlivé činitele přispívající k danému fenoménu, ale stanovit je můžeme zatím jen na základě teoretických znalostí z oblasti geotechniky. Otestována byla účinnost spojení protierozní matrace a kotevního systému, což je presentováno v kapitole 4.7.

## 5 Aplikace výsledků projektu

V rámci řešeného projektu bylo měřením a v praxi ověřena důležitost aplikace ochrany umělých svahů před negativními účinky srážek a vyvolaného erozního procesu. Jako kritický z hlediska eroze je stav během realizace anebo ihned po jejím dokončení, kdy je povrch holý bez vzrostlé vegetace. Cílovým stavem je vegetační porost s plně zapojenými kořeny. Než k tomuto zapojení dojde, tak je nezbytná ochrana povrchů pomocí technických opatření. Krom problematiky povrchové eroze je pak důležité také propojení humózní vrstvy s podloží, které bývá jiného složení a na rozhraní těchto dvou vrstev může docházet při nasycení k posunům. Povrchovou humózní vrstvu je tak nutné nejen chránit proti vodní erozi, ale také proti usmyknutí na rozhraní s podloží. Aplikace výsledků tak směřuje do několika odvětví stavebnictví.

Aplikace výsledků byla promítnuta především do metodiky „Ochrana umělých svahů před erozí a stabilizace povrchové vrstvy“, která je návodem pro posouzení erozního ohrožení svahů na základě fyzikálního přístupu a návodem pro zajištění celkové stability humózní vrstvy na podloží. Zároveň je na stránce [smoderp.fsv.cvut.cz](http://smoderp.fsv.cvut.cz) zpřístupněn SW pro výpočet erozního ohrožení a navrhování ochranného opatření v souladu s touto metodikou.

**T A**

**Č R**

Mimo to se projekt také zabýval technologickým postupem při aplikaci plošných opatření, výsledkem je prototypové řešení systému kotvení. Prototyp kotvícího systému bude zařazen do výrobního portfolia společnosti STRIX Chomutov a bude zapracován do pracovních postupů společnosti s důrazem na využití aplikátoru. Je plánované pořízení výrobní šablony na standardizovanou kotvičku. Spolu s partnerem projektu Geosyntetika. s.r.o bude systém nabízen spolu s již probíhajícím prodejem protierozních materiálů. Počítá se s aktivním představením včetně jeho výhod širší odborné veřejnosti, zejména na vhodných obchodních jednáních. Bohužel v současné době takovému přístupu není příliš přáno.

## **5.1 Stavební inženýrství**

### **5.1.1 Liniové dopravní stavby**

Zde se nejvíce uplatní metodika pro navrhování opatření proti povrchové erozi ve fázi projekce zemní konstrukce. S ohledem na velké plochy svahů na těchto typech staveb (Obr. 65) se zde určitě uplatní i využití kotevního systému při instalaci protierozních prvků.

Protierozní ochrana rozsáhlých svahů těchto zemních konstrukcí významnou měrou omezí smyv a odnos humózních zemin, které by zanášely jak odvodňovací systémy staveb, tak i povrchových toků, kam se vody vypouští. Omezí se náklady na údržbu a likvidaci nánosů těchto odvodňovacích systémů (příkopy, drenáže, kanalizace, retenční nádrže, nádrže s odlučovači ropných látek, ...).



Obrázek 65: Nové Spojení Železniční trať Praha Kolín realizace 2007 aplikace trvalé a dočasné protierozní ochrany nového svahu zářezu (Vaníček, J.)

T A

Č R

### 5.1.2 Skládky

Pro opětovné začlenění tělesa rekultivované skládky do krajiny je součástí celého izolačního systému překrývajícího již plně vyčerpaný objem skládky i protierozní opatření, která mají zajistit povrchovou stabilitu rekultivační vrstvy (Obr. 66) nad fóliovým či minerálním těsněním. U strmějších svahů je mnohdy potřeba vyztužení celé rekultivační vrstvy, aby nedošlo k jejímu sesutí po hladkém povrchu těsnění i proto, že není možné protierozní opatření kotvit skrz těsnící vrstvu, tj. pod potenciální smykovou plochu. V těchto případech se využije výpočet v souladu s Eurokódem 7 pro navrhování geotechnických konstrukcí. V druhé generaci bude toto řešení plně pokryto normativním postupem návrhu.

S ohledem na zajištění ochrany svahů před nadbytečným smyvem humózní zeminou lze plně aplikovat přístup uvedený u liniových dopravních staveb.



Obrázek 66: Skládka odpadů Forcalquier, France na které byl použit vyztužený typ protierozní matrace Enkamat 7010W/200.50PET (prospekt k výrobku Enkamat).

### 5.1.3 Výsypky

Rekultivační vrstvy na výsypkách jsou velice podobné rekultivačním vrstvám na skládkách jen s tím rozdílem, že u běžných výsypek, vzniklých v okolí dolů, nebývá jejich součástí těsnící vrstva, a tudíž je možné systémy kotvit do podloží, tak jako u svahů liniových staveb. Svahy výsypek taktéž bývají výrazně pozvolnější než svahy jiných zemních konstrukcí, protože jsou tvořeny nevhodnými zeminami charakteru vysoce plastických jíílů (výsypky bývalých dolů na hnědé uhlí v severních Čechách).

S ohledem na zajištění ochrany svahů před nadbytečným smyvem humózní zeminou lze plně aplikovat přístup uvedený u liniových dopravních staveb.

### 5.1.4 Úpravy vodních toků

Úpravy vodních toků jsou z oblastí, kde jsou dopady způsobené erozí a ztrátou půdy navíc umocněné přímým dopadem na vodní ekosystémy. Zanášení vodních toků a nádrží sedimentem sebou přináší celou řadu navazujících, především ekologických, negativních dopadů. Zásadním dopadem je zvýšení

T A

Č R

eutrofizace vod, díky změně barvy navíc zvýšení teploty vody a tím snížení množství dostupného kyslíku. Oproti jiným stavbám není možné zajistit například pomocí retenčních nádrží předčištění a je tak třeba zajistit ochranu samotné konstrukce.

V případě vodních toků je třeba do řešení také zahrnout rychlost proudící vody v korytě za zvýšených stavů. Tato problematika je nad rámec tohoto výzkumu. Stabilitu břehových konstrukcí na prodění vody v korytě je třeba řešit odděleně. Princip řešení je, ale z hlediska unášecích sil obdobný. Navržené konstrukční řešení musí splnit podmínky pro návrhové rychlosti a tečné napětí na rozhraní opevnění břehů/voda, tak aby byla zajištěna odolnost těchto konstrukcí.

### 5.1.5 Křížení vodních toků a liniových staveb

Relativně malým, ale častým, detailem je pak křížení liniových staveb a vodních toků. To je řešeno mostní konstrukcí anebo propustkem. Z hlediska ochrany před erozí jsou důležité svahy navazující na samotnou mostní konstrukci, které je třeba chránit i na relativně malých plochách. Ilustrativní ukázková situace je na následujícím obrázku 67.



Obrázek 67: Neošetřený svah křížení vodního toku s liniovou stavbou (Kavka P.)

### 5.1.6 Občanská výstavba a krajinné úpravy

- V poslední době díky výraznému nárůstu ceny stavebních pozemků ve městech řeší projektanti s developery, jak stavební pozemky co nejvíce využít i za cenu technických opatření, které zajistí stabilitu strmých svahů nejen ze statického pohledu, ale právě i z pohledu protierozního (Obr. 68). Jednou z kapitol, jak naložit v intravilánu měst s přebytečnou zemínou je vybudování protihlukového valu (Obr. 69) z přebytečné zeminy vzniklé při výkopech základů budov. Jedná se nejen o využití skrývky ornice, ale i o zeminy z větších hloubek. Tyto zeminy je ale třeba vyztužit, jelikož přirozený úhel vnitřního tření nedovoluje sklony protihlukových valů maximalizovat, tak aby zabíraly co nejméně plochy drahého pozemku. Navrhované sklony těchto valů dosahují až 70° a je třeba použít na jejich povrchu protierozní materiály včetně kotvícího systému.



Obrázek 68: Bytová výstavba v Šáreckém údolí na Praze 6, kde bylo třeba přemodelovat, stabilizovat a následně protierozně opatřit nově vzniklý svah zářezu v bezprostřední blízkosti pozemků budovaných RD.



Obrázek 69: Protihlukový val oddělující nově vznikající bytovou výstavbu od frekventované komunikace Klikatá, Praha 5 Radlice.

## 5.2 Kotvící systém

V rámci projektu byl inovován přístup ke kotvení protierozních výrobků na svazích, který zahrnoval jak principy jednoduššího provádění při zajištění minimálního porušení již instalovaného výrobku, tak i lepšího spolupůsobení jednotlivých prvků systému při minimalizaci nákladů na celý systém, aby byl ekonomicky obhajitelný, resp. Výhodnější. Detaily systému jsou popsány v kapitolách 4.5 – 4.9



T A

Č R

### 5.3 Postupy pro zajištění stability

Výstupem projektu je metodika, která v jedné své části popisuje posouzení stability celé humózní vrstvy před usmyknutím podél celého svahu. Jednotlivé činitele, které spolupůsobí v systému jsou popsány v kapitolách 4.1-4.3 a vlastní postup posouzení je pak uveden v kapitole 4.4.

Je zde reálný předpoklad, že metodika bude zapracována do předpisů ministerstva dopravy, a to konkrétně do TP 53 a TP 97, které jsou, resp. v krátké době budou procházet aktualizací.

### 5.4 Software pro modelování povrchových procesů svahů

Čistě aplikačním výstupem z projektu je výše uvedený SW SmoderpLine. Model je koncipován jako prakticky orientovaný nástroj, který má sloužit pro efektivní a rychlé posouzení navrhovaného opatření svahů liniových staveb z hlediska erozního ohrožení. Rozhraní modelu je uživatelům dostupné na webovém prohlížeči na stránce smoderp.fsv.cvut.cz a tím pádem bez nutnosti dalšího specializovaného SW. Do validace modelu byly využity výsledky měření na dešťových simulátorech, a to jak z hlediska odtoků, ale i z hlediska retenčních vlastností materiálů.

## 6 Zhodnocení průběhu řešení ve vazbě na plánované aktivity

### 6.1 Experimentální měření – lokality, infrastruktura její vybavení v rámci řešeného projektu

V rámci řešeného projektu byly v experimentální části využity dvě stabilní lokality s umělým zadešťováním (Venkovní dešťový simulátor – Jirkov a Halový dešťový simulátor – ČVUT). Tato dvě zařízení byla z prostředků projektu dovybavena pro potřeby projektu. Bez vybavenosti a funkčnosti těchto zařízení by nebylo možné projekt realizovat. Metodologie prováděných experimentů byla po celou dobu řešení dodržena. V průběhu projektu byla modifikována tím, že byly párové testy nahrazeny dvojicí opatření. Spolupráce mezi STRIX a ČVUT v navazujícím vyhodnocení odebraných vzorků (množství odtoku a smyvu) fungovala velmi dobře a pracoviště se vzájemně doplňovala. Celkově bylo provedeno přes 300 experimentů. V každém odebráno minimálně 12 vzorků. Jedná se tedy o zhruba 3500 vzorků. Vedle toho byly odebírány vzorky na zrnitostní složení.

Mimo uměle zadešťované plochy byl prováděn dlouhodobý monitoring, který vzhledem k suchému období nepřinesl systematicky použitelné výsledky.

### 6.2 Získané poznatky z oblasti eroze na umělých svazích a jejich aplikace do software a metodiky

Z hlediska získaných poznatků a jejich aplikace do praxe jsou důležité závěry z hlediska rozdílů v efektivitě jednotlivých typů opatření. Dále pak možnost využití neinvazivních metod DPZ a poměrně značná vazba mezi změřeným množstvím eroze a z rozdílových modelů.

### 6.3 Vývoj kotvícího systému

Na základě dat získaných z experimentální části projektu, díky zkušenostem řešitelů z praxe a podrobné rešerše byl navržen kotvící systém. Ukázalo se, že k jeho přijetí a prosazení do praxe je zásadním hlediskem jeho ekonomičnost. Proto systém rozvíjí a zlepšuje vlastnosti přístupu využívaného v ČR.

T A

Č R

Systém stávající přístup na základě experimentálních testů standardizuje a doplňuje o dva nové prvky. Podložku, která zásadním způsobem omezuje protrhávání kotvičky a aplikátor, který omezuje pohyb pracovníků po čerstvě položeném materiálu a práci zrychluje.

Postupně vznikly dvě vývojové varianty systému a finální byla velmi úspěšně vyzkoušena v praxi.

## 6.4 Publikace průběžných výsledků v rámci projektu

V rámci projektu byly průběžně během celého období výsledky prezentovány na tuzemských i zahraničních konferencích.

V roce 2017, tedy v prvním roce řešení projektu byly prvotní výsledky prezentovány dvakrát, a to jednou na tuzemské konferenci GIS a ŽP 2017 A jednou na mezinárodní konferenci EGU2017

V roce 2018 byly ze zahraničních konferencí dva příspěvky na EGU 2018 a jeden na Terra Envision 2018. Ze zahraničních konferencí byly výsledky publikovány jednou na HyGIS a ŽP 2018 .

Nejvíce výsledků bylo v roce 2019 a to celkem 9. Na zahraničních konferencích byly určité části výzkumu prezentovány na EGU2019, AGU 2019, na ECSMGE (tyto dva příspěvky prošli recenzním řízením a jsou publikovány jako statě ve sborníku a měli by být vloženy do databáze SCOPUS), a na konferenci UrbanRain 2019. Jednou na tuzemské konferenci HyGIS2019. Při řešení projektu byla dokončena jedna diplomová práce, kde studentka pracovala na projektu na zpracování zrnitosti smyvu.

V roce 2020 byl problém s COVID-19 a proto byla většina konferencí zrušena, či přesunuta. Dvakrát byly prezentovány poslední výsledky na EGU 2020, kdy byla konference přesunuta do online prostředí. Seznámení odborné veřejnosti s výsledky projektu bylo provedeno prostřednictvím konference Zakládání staveb Brno, která byla tak jak většina uskutečněných akcí do online prostředí. Bohužel mezinárodní konference, na níž byl přihlášen příspěvek a jehož abstrakt byl akceptován již v roce 2019 byla postupně několikrát přesouvána do budoucna, takže není jasné kdy a zda se konference uskuteční, resp. příspěvek bude finálně akceptován.

## 7 Čerpání finančních prostředků v rámci projektu

### 7.1 STRIX Chomutov, a.s.

Změny v řešitelském týmu ani v úvazcích oproti plánu nebyly. Největší část nákladů byla využita na osobní náklady pracovníků podílejících se na řešení projektu. Z ostatních přímých nákladů byly v prvních letech řešení projektu čerpány prostředky především na dovybavení nutné infrastruktury k řešení projektu. Zejména dovybavení a průběžnou údržbu experimentálního místa v Jirkově a náklady spojené s jeho údržbou a probíhajícími experimenty. Další část nákladů byla směřována na vývoj kotvícího systému, jeho testování apod.

V roce 2020 Strix Chomutov a.s. bude vracet dotaci ve výši 6.080,82 Kč. Důvodem je nečerpání nákladů na ochranu průmyslových práv a vlastnictví. Vzhledem k plánovaným typu výstupů nebylo nutné tyto náklady vyčerpat. Prototyp, certifikovaná metodika ani SW není možné v ČR právně chránit, tedy tyto náklady nebylo možné vyčerpat. V souladu s pravidly TAČR byla část této položky využita na náklady přečerpané v jiných položkách (osobní náklady a materiál) a zbytek bude vrácen poskytovateli dotace.

T A

Č R

## 7.2 ČVUT v Praze

Finanční prostředky byly v rámci projektu čerpány z větší poloviny na osobní náklady členů řešitelského kolektivu. Ten v sobě zahrnoval jak akademické pracovníky, do aktivit byli zapojeni také studenti doktorského a magisterského studia.

Z ostatních přímých nákladů byly v prvních letech řešení projektu čerpány prostředky především na dovybavení nutné infrastruktury k řešení projektu. Zejména dovybavení dešťového simulátoru a náklady spojené s jeho údržbou a rozvojem. Dále pak náklady na obnovu výpočetní techniky zapojených zaměstnanců. Část finančních prostředků byla vynaložena na drobný spotřební a laboratorní materiál. Cestovní náklady byly využity jednak v souvislosti s měřením na lokalitě Jirkov a také s prezentací průběžných výsledků projektu na zahraničních konferencích. Ty byly plánovány i na poslední rok řešení, ve kterém se z důvodů pandemie Sars-Cov2 nekonaly, plánované prostředky tak nebylo možné efektivně využít a byly vráceny do státního rozpočtu. V souvislosti s výsledkem SW byla část prostředků vynaložena v souvislosti s odbornostmi mimo rámec řešitelského kolektivu. Jedná jednak o samotné založení webové stránky s editačním rozhraním, tak aby nebylo nutné zasahovat přímo do kódu stránky, dále pak o specializovanou java úlohu pro komunikaci mezi výpočetním serverem a webovým rozhraním pro uživatele. Součástí řešení jsou také úprava webprocesingových služeb pro poskytování návrhových srážek, které jsou nutným a tímto způsobem jednoduchým způsobem, jak tato vstupní data získat.

## 7.3 GEOSYNTETIKA, s.r.o.

Nadpoloviční většina nákladů na řešení projektu, byla spotřebována na mzdové náklady a na odvody zdravotního a sociálního pojištění. Po čtyřletou dobu byli do projektu zapojeni stejní pracovníci firmy.

Mezi přímé nákladů byly v prvních letech řešení projektu zahrnuty prostředky na zajištění řešení projektu (testované materiály, výroba skob, jejich doprava, ...) včetně doplnění výpočetní techniky odpovědných zaměstnanců. Část finančních prostředků byla vynaložena na ochranné prostředky, možnost nahlížení do ČSN, prodloužení softwarových licencí a pořízení technické literatury. Náklady na dojíždění na měření insitu, byla účtována spotřeba PMH a náklady na služební vozidlo. Další položkou jsou cestovní náklady při účasti na domácích i zahraničních konferencích, na kterých byly prezentovány průběžné výsledky projektu. V důsledku zavedení jarních omezení s šířící se pandemií CV 19, byly prostředky na účast a dopravu na plánované konference nespotřebovány, a tak dojde v rámci vyúčtování k jejich vrácení poskytovateli dotace.

## 7.4 Informace k vrácení nevyčerpaných prostředků z 2020

V roce 2020 došlo k nedočerpání části projektových nákladů. Některé z aktivit z důvodů opatření proti šíření koronaviru nemohly proběhnout. Dne 30.12.2020 jsme proto na základě odhadu čerpání již vrátili TAČRu část dotace ve výši 100.000 Kč. Vrácení celé nevyčerpané části proběhne dle pravidel do 15.2.2021.

T A

Č R

## 8 Plánované navazující aktivity po ukončení projektu a implementace výsledků

Z hlediska navazujících aktivit a potenciálu navazující implementace výsledků bude snaha postupy, které obsahuje metodika zahrnout do aktualizace TP 53 ve kterém je problematika eroze a samotného posouzení či návrh popsán jen velmi stručně. Tento další možný krok je ale záležitostí Ministerstva Dopravy, ze strany členů řešitelského kolektivu je ochota a zájem promítnout získané poznatky do standardů TP.

Vybudovaná infrastruktura umožňující dešťové simulace bude využita pro další navazující výzkum. V omezené míře bez podpory formou grantových soutěží a bude usilováno o pokračující projekty. Znalostně projekt problematiku působení eroze na zemní konstrukce sic prohloubil, ale v mnohých oblastech se ukazují další důvody k pokračujícímu výzkumu a navazující aplikaci do praxe.

Na pracovišti ČVUT v Praze se také předpokládá další budoucí vývoj SW. Koncept SW je vytvořen tak, aby uživatelské rozhraní bylo odděleno od výpočetních rutin. Další zpřesnění, nebo úpravy výpočetních rutin se tak nijak nedotknou samotného uživatelského rozhraní. V budoucnu se může jednat o nahrazení infiltrační rutiny, zpřesnění výpočtu množství sedimentu. Tak jak se předpokládá další využití dešťových simulací, tak se i předpokládá rozšíření změřených dat a tak možné zpřesnění modelu.

Získané výsledky, které byly promítnuty do metodiky a SW budou publikovány ve vědeckotechnických publikacích a časopisech. Samotná metodika a SW budou představeny odborné české veřejnosti prostřednictvím osvěty formou příspěvků v časopisech anebo na lokálních českých konferencích.

Prototyp kotvícího systému bude zařazen do výrobního portfolia společnosti STRIX Chomutov a bude zapracován do pracovních postupů společnosti s důrazem na využití aplikátoru . Je plánované pořízení výrobní šablony na standardizovanou kotvičku. Spolu s partnerem projektu Geosyntetika s.r.o. bude systém nabízen spolu s již probíhajícím prodejem sanačních materiálů. Počítá se s aktivním představením a jeho výhod širší odborné veřejnosti, zejména na vhodných obchodních jednání. Bohužel v současné době takovému přístupu není příliš přáno.

## 9 Literatura a ostatní zdroje

### Relevantní předpisy na které je ve zprávě odkazováno

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

Odvodnění pozemních komunikací. Technické podmínky. Ministerstvo dopravy, odbor pozemních komunikací. Praha. TP 83/2014.

Geosyntetika v zemním tělese pozemních komunikací. Technické podmínky. Ministerstvo dopravy, odbor pozemních komunikací. Praha. TP 97/2008.

T A

Č R

ASTM Standard. Designation: D6459 – 19, 2020. „Standard Test Method for Determination of Rolled Erosion Control product (RECP) Performance in Protecting Hillslopes from Rainfall-Induced Erosion“. ASTM International, West Conshohocken, United States, 2020, DOI: 10.1520/D6459-19.

### Ostatní literatura

Álvarez-Mozos J, Abad E, Giménez R, et al. Evaluation of erosion control geotextiles on steep slopes. Part 1: Effects on runoff and soil loss. CATENA. 2014;118:168-178. doi:10.1016/j.catena.2013.05.018

Beuselinck L., Govers G., Poesen J., Degraer G., Froyen L. (1998). Grain-size analysis by laser diffractometry: Comparison with the sieve-pipette method. Catena, vol. 32, no. 3–4, pp. 193–208.

Durner W., Iden S. C., Unold G. von (2017). The integral suspension pressure method (ISP) for precise particle-size analysis by gravitational sedimentation. Water Resour. Res., vol. 53, no. 1, pp. 33–48.

Kalibová (Šimková), Jana, Jačka, Lukáš. (2017). Impact of rainfall intensity on the hydrological performance of erosion control geotextiles. Environmental Earth Sciences. 76. 429. 10.1007/s12665-017-6746-y.

Kavka, P., Strouhal, L., Jáchymová, B., Krása, J., Báčová, M., Laburda, T., Dostál, T., Devátý, J., & Bauer, M. (2018). DOUBLE SIZE FULLJET FIELD RAINFALL SIMULATOR FOR COMPLEX INTERRILL AND RILL EROSION STUDIES. Stavební Obzor - Civil Engineering Journal, 27(2), 183–194. <https://doi.org/10.14311/CEJ.2018.02.0015>

Malvern Instruments Ltd., Ed. (2017). Mastersizer 3000 User Manual. Worcestershire.

METER Group, Ed. (2018). PARIO Soil Particle Analyzer -manual. München.

Motsara M. R., & Roy R. N. (2008). Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Sutherland RA. Rolled erosion control systems for hillslope surface protection: a critical review, synthesis and analysis of available data. I. Background and formative years. L Degrad Dev. 1998;9(6):465-486. doi:10.1002/(SICI)1099-145X(199811/12)9:6<465::AID-LDR311>3.0.CO;2-4

Vaníček, I., Jirásko, D., & Vaníček, M. (2020). Modern Earth Structures for Transport Engineering: Engineering and Sustainability Aspects (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429263668>

T A

Č R

## 10 Přílohy

Tabulka 14: souhrn provedených experimentů v Jirkově během trvání projektu

Datum	Typ geotextilie
15.6.2017 - 13.7.2017	K400 - kokosové vlákno
21.9.2017 - 30.11.2017	macmat 8.1
2018	
11.4.2018 - 25.4.2018	biomac-c
23.5.2018 - 4.6.2018	K700 - kokosové vlákno
19.7.2018 - 30.7.2018	Enkamat 7020
13.6.2018 - 21.6.2018	Enkamat 7010
10.8.2018 - 6.9.2018	macmat 8.1
12.9.2018 - 20.9.2018	Enkamat 7020
4.10.2018 - 17.10.2018	Macmat18.1
1.11.2018 - 13.11.2018	Macmat18.1
2019	
04.04.2019 - 16.4.2019	Enkamat 7010
02.05.2019 - 17.5.2019	biomac-c
03.06.2019 - 12.6.2019	K700
25.06.2019 - 3.7.2019	k700
24.07.2019 - 31.7.2019	trojúhelník/juta
28.08.2019 - 6.9.2019	kokos 400/klejonáž
25.09.2019 - 9.10.2019	zasypaný macmat/mulč
22.10.2019 - XX	seno/netkanka
2020	
6.5.2020 - 18.5.2020	Enkamat 7020 zásyp/bez zásypu
3.6.2020 - 17.6.2020	Fortrac 3D zásyp/ bez zásypu
30.9.2020 - 9.10.2020	válec 1x / válec 2x
17.8.2020 - 26.8.2020	macmat18 se zásypem a bez

Tabulka 15: souhrn provedených experimentů na laboratorním simulátoru po dobu trvání projektu

Datum	Intenzita	Sklon	Typ povrchu
15.11.2018	60	10	úhor
19.11.2018	60	10	úhor
23.11.2018	60	22	úhor
24.11.2018	60	10	Enkamat 7220
24.11.2018	60	22	Enkamat 7220
24.11.2018	60	22	Enkamat 7220
27.11.2018	60	22	Enkamat 7220 zasypaný
29.11.2018	60	22	úhor
03.12.2018	40	10	úhor
06.12.2018	60	10	úhor
11.12.2018	120	10	úhor
14.12.2018	60	10	úhor
19.12.2018	60	22	úhor
08.01.2019	40	22	úhor
22.01.2019	60	22	Enkamat 7220
09.07.2020	60	22	úhor
16.07.2020	30	22	Enkamat 7220 zasypaný
21.07.2020	60	22	Enkamat 7220 zasypaný
27.07.2020	30	30	Enkamat 7220 zasypaný
29.07.2020	90	22	Enkamat 7220 zasypaný
03.08.2020	60	30	Enkamat 7220 zasypaný
10.08.2020	90	30	Enkamat 7220 zasypaný
17.08.2020	120	22	Enkamat 7220 zasypaný
24.08.2020	90	22	Enkamat 7220 zasypaný
27.08.2020	90	22	úhor
2.11.2020	60	22	úhor
2.11.2020	90/120/160	22	úhor
5.11.2020	60	22	Enkamat 7220 zasypaný horní metr
12.11.2020	60	22	Enkamat 7220 zasypané horní 3 metry
12.11.2020	120/160	22	Enkamat 7220 zasypané horní 3 metry
19.11.2020	60	22	Enkamat 7220 polžený
19.11.2020	120/160	22	Enkamat 7220 polžený
26.11.2020	60	22	úhor
26.11.2020	120/160	22	úhor
3.12.2020	60	22	biomac-c položený
3.12:2020	120/160	22	biomac-c položený

**T A**  
**Č R**