



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství

**MODELOVÁNÍ EROZE PŮDY S VYUŽITÍM DAT PODROBNÉHO
MONITORINGU**

SOIL EROSION MODELING USING DETAILED MONITORING DATA

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Tomáš Laburda

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

Školitel: Doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.

Praha, 2021



PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Tomáš Laburda

Název disertační práce: Modelování eroze půdy s využitím dat podrobného monitoringu

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Josefa Krásy, Ph.D.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu: GF17-33751L - Vliv kinetické energie deště na uvolňování a transport půdních částic, QJ1330118 - Monitoring erozního poškození půd a projevů eroze pomocí metod DPZ, QK1720289 - Vývoj automatizovaného nástroje pro optimalizaci monitoringu eroze zemědělské půdy pomocí distančních metod, SGS17/173/OHK1/3T/11 - Experimentální výzkum erozních a transportních procesů v zemědělsky využívané krajině, SGS20/156/OHK1/3T/11 - Monitoring, experimentální výzkum a matematické modelování srážko-odtokových a erozních procesů, TH02030428 - Navrhování technických opatření pro stabilizaci a ochranu svahů před erozí, SS01020366 - Využití dat dálkového průzkumu Země pro posouzení negativních dopadů přívalových srážek.

V Praze dne _____

_____ podpis

ABSTRAKT

Vodní eroze půdy je v současné době stále aktuální problém, který negativním způsobem ohrožuje jak zemědělské pozemky a jejich produkční schopnost, tak i široké okolí od vodních zdrojů až po intravilán. V dnešní době existuje mnoho způsobů určení erozní ohroženosti, přímého měření a monitoringu ztráty půdy, avšak stále je zde velký potenciál pro jejich ověřování, zpřesňování či vyvíjení metod nových. Tato studie se zabývá problematikou sběru erozních dat pomocí přímých a nepřímých metod s cílem ověření jejich vzájemné korelace a odvozením jednoduchého vztahu pro rychlý odhad množství eroze půdy na základě vytvořených rozdílových digitálních modelů terénu.

Pro tyto účely byly v rámci disertační práce provedeny různé typy experimentů, které testovaly a ověřovaly tyto metody v několika měřících experimentálních ploch od malých ($< 1 \text{ m}^2$) po středně velké ($< 10 \text{ m}^2$). Tyto experimenty byly založeny na sledování erozních procesů s využitím přirozených i umělých srážek a při kombinaci přímého a nepřímého měření erozních jevů a procesů. Z hlediska přirozených srážek se jednalo o venkovní experimenty pod širým nebem při zkoumání kapkové eroze půdy. V případě využití umělých srážek se jednalo o dva různé dešťové simulátory při testování kapkové eroze a zároveň i při standardních erozních experimentech doprovázených povrchovým odtokem. Přímé metody monitoringu eroze zahrnovaly měření erozního procesu za pomoci odběru vzorků povrchového odtoku či přímo půdních částic u kapkové eroze, s následnou laboratorní analýzou množství erodovaných půdních částic. Tyto hodnoty byly považovány za referenční hodnoty. Nepřímé metody se zaměřily na využití fotogrammetrické metody „Structure from Motion – Multi-View Stereo“ (SfM-MVS), pomocí níž byly analyzovány následně vzniklé projevy zkoumaných erozních procesů pomocí digitálních modelů terénu a vytvořených rozdílových modelů. Zpracování dat zahrnovalo využití částečně automatizovaného procesu pomocí hromadných příkazů v prostředí Agisoft Metashape a pomocí výpočtového skriptu v prostředí ArcGIS.

Oba tyto přístupy byly porovnávány a byl zkoumán jejich vzájemný vztah. Na základě získaných a analyzovaných dat byly odvozeny lineární regresní rovnice pro odhad množství eroze na základě výškového rozdílu digitálních modelů terénu s výsledným koeficientem determinace ($p < 0,05$) v rozmezí od 0,63 do 0,72 v závislosti na testované půdě a lokalitě. V případě experimentu zkoumající kapkovou erozi bylo možné díky velkému počtu provedených experimentů na třech různých půdních vzorcích analyzovat i vliv odlišného zrnitostního složení.

Klíčová slova: vodní eroze, fotogrammetrie, SfM-MVS, půda, odtok, déšť, simulátor

ABSTRACT

Water erosion of soil is a current problem, which negatively threatens both agricultural land and its productive capacity, as well as the wider environment from water sources to urban areas. Today, there are many ways to identify erosion risk, directly measure and monitor soil loss, but there is still great potential for verifying, refining or developing new methods. This study deals with the issue of erosion data collection using direct and indirect methods in order to verify their mutual correlation and derive a simple relationship for rapid estimation of soil erosion based on the created differential digital elevation models.

For this purpose, various types of experiments were performed within the dissertation, which tested and verified these methods in several scales of experimental plots from small ($< 1 \text{ m}^2$) to medium-sized scales ($< 10 \text{ m}^2$). These experiments were based on the monitoring of erosion processes using natural and artificial precipitation and a combination of direct and indirect measurements of erosion phenomena. In terms of natural precipitation, these were outdoor experiments in the open air to study droplet erosion of the soil. In the case of the use of artificial precipitation, there were used two different rainfall simulators in the testing of droplet erosion and at the same time in standard erosion experiments accompanied by surface runoff. Direct methods of erosion monitoring included measurement of the erosion process by sampling surface runoff or directly soil particles in droplet erosion, followed by laboratory analysis of the amount of dried soil particles. These values were taken as reference values. Indirect methods included the use of the contactless remote sensing method, namely the terrestrial photogrammetric method "Structure from Motion - Multi-View Stereo" (SfM-MVS), which was used to analyze the subsequent manifestations of the investigated erosion processes using digital elevation models and subsequent digital elevation models of difference. Data processing included the use of a partially automated process using batch commands in the Agisoft Metashape and a computational script in the ArcGIS.

Both of these methods were compared and their relationship was examined. Based on the obtained and analyzed data, linear regression equations were derived to estimate the amount of erosion based on the height difference of digital elevation models with the resulting coefficient of determinance ($p < 0,05$) ranging from 0,63 to 0,72 depending on the tested soil and locality. In the case of an experiment investigating splash erosion, it was possible to analyze the effect of different grain size distribution due to the large number of experiments performed on three different soil samples.

Keywords: soil erosion, photogrammetry, SfM-MVS, runoff, soil, rainfall, simulator

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému školiteli doc. Ing. Josefu Krásovi, Ph.D. za poskytnuté odborné znalosti a vedení této disertační práce. Dále bych rád poděkoval také Ing. Petru Kavkovi, Ph.D a Ing. Davidovi Zumrovi, Ph.D. za odborné vedení a rady v rámci dílčích projektů souvisejících s touto disertační prací. Také bych chtěl poděkovat i ostatním členům Katedry hydromeliorací a krajinného inženýrství za jejich spolupráci při experimentálním měření. Bez jejich pomoci by nebylo provedení experimentů možné.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat také mým rodičům za dlouhodobou podporu při mých studiích a manželce za její trpělivost a oporu.

Obsah

1	Motivace	8
2	Úvod do problematiky vodní eroze.....	10
2.1	Vodní eroze jako globální riziko	10
2.2	Stanovení erozní ohroženosti	14
2.2.1	Empirické modely.....	14
2.2.2	Fyzikálně založené modely.....	16
2.3	Měření a monitoring eroze půdy	17
2.3.1	Přímé měření erozních procesů	17
2.3.2	Nepřímé měření erozních procesů – monitoring erozních projevů.....	30
3	Monitoring kapkové eroze (experimentální plocha < 1 m ²)	40
3.1	Motivace experimentu.....	40
3.2	Popis a metody experimentu	41
3.2.1	Konstrukce “splash cupu” (SC)	41
3.2.2	Příprava půdních vzorků.....	42
3.2.3	Monitoring deště.....	43
3.2.4	Fotogrammetrické měření	44
3.2.5	Zpracování a analýza naměřených dat.....	45
3.3	Výsledky	47
3.3.1	Vizuální porovnání povrchu půdy	47
3.3.2	Variabilita přípravy vzorku	48
3.3.3	Vliv počáteční výšky povrchu půdy	50
3.3.4	Vliv počáteční drsnosti povrchu půdy.....	50
3.3.5	Objemové změny vzorku.....	50
3.3.6	Změna povrchové drsnosti.....	54
3.3.7	Odvození regresního modelu	56
3.4	Souhrn výsledků a diskuze	58
4	Monitoring středně velkých erozních ploch (plocha < 10 m ²)	62
4.1	Popis a metody experimentu	62
4.1.1	Experimentální plochy.....	63
4.1.2	Fotogrammetrické měření	65
4.1.3	Zpracování a analýza naměřených dat.....	67

4.1.4	Vstupní data	70
4.2	Výsledky	71
4.2.1	Objemové změny vzorku	71
4.2.2	Vliv rýhové a mezirýhové eroze	76
4.2.3	Odvození regresní modelu	77
4.3	Souhrn výsledků a diskuze	79
5	Diskuze	82
5.1	Výběr použitých metod	82
5.2	Kvalitativní hodnocení SfM-MVS dat	83
5.1	Vliv vlastností testovaných půd	84
5.2	Porovnání metody přímého a nepřímého měření	86
5.3	Problémy	90
6	Závěr	91
7	Seznamy	93
7.1	Seznam použité literatury	93
7.2	Seznam publikací autora	105
7.3	Seznam výzkumných projektů	113
7.4	Seznam obrázků	114
7.5	Seznam tabulek	116
7.6	Seznam použitých zkratk	117

1 Motivace

Téma disertační práce si dává za cíl zhodnotit stav a metody monitoringu eroze půdy pomocí přímých a nepřímých metod v různých měřících v rámci několika různých experimentálních měření, které byly prováděny mezi lety 2015-2020. Toto téma svým zaměřením navazuje na výsledky disertační práce Ing. Markéty Báčové s názvem „Monitoring projevů vodní eroze na zemědělských půdách“ (Báčová, 2018). V této práci byl stanoven základní postup využití nepřímých bezkontaktních metod při monitoringu eroze půdy a zároveň byla provedena analýza srovnávající tuto bezkontaktní metodu s metodou kontaktní, avšak již bez detailnějšího porovnání s přímým měřením erodovaného materiálu při dlouhodobých a opakovaných experimentálních měřeních. Zároveň bylo v této práci podrobně analyzováno několik vlivů fotogrammetrického získávání a analyzování snímků a výsledných modelů terénu. Mezi tyto vlivy byly zařazeny například parametry týkající se počtu referenčních vlíčovacích bodů, výšky fotogrammetrického snímkování od zájmového povrchu a nastavení hodnot při zpracování snímků v prostředí softwaru Agisoft Photoscan (nyní Agisoft Metashape). Všechny tyto poznatky byly cennými podklady a poskytly užitečné informace při tvorbě této disertační práce z hlediska metodiky zpracování fotogrammetrických dat a jejich analýzy. Z tohoto důvodu je tato disertační práce oproti zmiňované práci Ing. Báčové zaměřena na hromadné vyhodnocení velkého setu naměřených dat bez širší analýzy vlivu jednotlivých parametrů fotogrammetrického měření. Negativní vliv možných chyb byl eliminován právě na základě poznatků z její práce.

Další práce týkající se uvedených metod a experimentů byly v dílčí podobě zpracovány i za přispění autora také v rámci diplomových prací studentů katedry K143 a Geomatiky. Mezi tyto práce patří diplomová práce Ing. Moniky Macháčkové (Macháčková, 2015) a Ing. Martin Florian (Florian, 2016), které se obě věnovaly fotogrammetrickému měření a analýze změn povrchu zemědělské půdy v důsledku dlouhodobého působení deště při různé agrotechnické úpravě půdního povrchu. Autor této disertační práce publikoval shrnující článek z těchto experimentů, které však byly prováděny pouze fotogrammetrickým měřením bez přímého měření eroze, a tudíž bez možnosti porovnání obou metod (Laburda et al., 2017). Při těchto experimentech si autor reálně vyzkoušel zpracování velkého množství fotogrammetrických dat, která mohl úspěšně rozšířit při dalších experimentech již s využitím přímého i nepřímého měření erozních procesů. Dílčí část využitých dat byla zpracována v rámci spolupráce autora se studentem bakalářského programu Bc. Michala Vrány v rámci jeho bakalářské práce (Vrána, 2019). V té se v rámci širšího týmu zabýval projevy kapkové eroze zaznamenávané pomocí fotogrammetrické metody v kombinaci s přímým měřením množství eroze pomocí odběru půdních vzorků. V rámci své práce pomohl s měřením a částečným vyhodnocením fotogrammetrických dat, která byla dále analyzována především v rámci této disertační práce a je předmětem případové studie v kapitole 3. Samostatně byl tento dlouhodobý experiment zpracován a publikován také ve zkrácené verzi v impaktovaném článku autora této disertační práce, který pod názvem „SfM-MVS photogrammetry in splash erosion monitoring under natural rainfall“ ve vědeckém periodiku *Earth Surface Processes and Landforms* publikovaný nakladatelstvem John Wiley & Sons (Wiley) a British Society for Geomorphology (BSG) (Laburda et al., 2021).

Část experimentálních dat této disertační práce využívá data získaná pomocí laboratorního dešťového simulátoru, na kterém autor prováděl dlouhodobá měření již od magisterského studia jako pomocný vědecký pracovník. Drtivá většina provedených experimentů však až do roku 2018 nebyla systematicky prováděna pomocí fotogrammetrické metody. Z tohoto důvodu nebylo možné tuto velkou část experimentů zahrnout do výsledné analýzy této práce. Část využitých data z laboratorního dešťového simulátoru se týká až období po jeho modernizaci od roku 2018, na které se autor osobně podílel a která je popsána v článku od Kavka et al., (2019). Původním cílem bylo využití většího množství dat z tohoto zařízení, ale kvůli komplikacím z důvodu rekonstrukcí popisované podrobněji v kapitole 2.3.1.2 tvoří tato data minoritní část ve výsledné analýze.

Hlavním cílem této disertační práce bylo pomocí velkého množství provedených a vyhodnocených experimentů, a i výše popsaných prací, vzájemné porovnání přímých a nepřímých metod hodnocení erozních procesů a odvození vztahů mezi nimi za účelem odhadu ztráty půdy na základě nepřímého měření eroze půdy pomocí fotogrammetrické metody SfM-MVS.

2 Úvod do problematiky vodní eroze

2.1 Vodní eroze jako globální riziko

Eroze půdy je jev, který byl, je a bude do jisté míry jevem přirozeným. V důsledku lidské činnosti či změnám klimatu však dochází v krajině ke změnám, které tento jev umocňují do takové míry, kdy probíhá zrychlená forma eroze, která není dlouhodobě udržitelná. Vzhledem k tomu, že půda je jedním z nejcennějších přírodních bohatství a neobnovitelným přírodním zdrojem, mělo by být o ni s tímto ohledem pečováno. Eroze má mnoho podob lišících se způsobem, časem a také místem působení. V České republice je nejzávažnější formou tohoto jevu eroze vodní, ohrožující zemědělské pozemky ve svažitých terénech, při které dochází k narušení schopnosti půdy plnit své základní produkční i mimoprodukční schopnosti (Obrázek 1). Zrychlená forma eroze půdy připravuje zemědělské pozemky o její nejúrodnější část – ornici, zhoršuje fyzikálně-chemické vlastnosti půd, snižuje mocnost půdního profilu, obsah nutrientů a humusu, zvyšuje šterkovitost, poškozují vegetaci případně způsobuje odnos osiva a v neposlední řadě ztěžuje pohyb agrotechniky (Vopravil et al., 2010).



Obrázek 1 Ukázka vodní eroze půdy na zemědělském pozemku ve Středočeském kraji na experimentálním povodí Býkovického potoka (foto autor).

Není pochyb, že za zrychlenou formou eroze půdy stojí člověk a jeho aktivity spojené se změnou využití krajiny. Ačkoliv v řadě vyspělých zemích jsou aplikována různá protierozní opatření, v řadě méně vyspělých regionů jako je subsaharská Afrika, Jižní Amerika a jihovýchodní Asie lze s postupným rozvojem zemědělství a větším zábořem půdy očekávat zvýšení intenzity eroze půdy. Například mezi lety 2001 a 2012 došlo především díky těmto zmíněným regionům

ke globálnímu zvýšení eroze půdy o 2,5 % (Borrelli et al., 2017). Z finančního pohledu bylo vyčísleno, že globální roční ztráta půdy odhadnutá na 17 biliónů tun stojí v nákladech na ztrátu produkce a řešení škod celkem 8×10^9 US \$ (Sartori et al., 2019). Globálně je přitom ohroženo erozí půdy celkem 20 % zemědělské půdy, přičemž 7 % půdy je ohroženo alespoň dvěma degradačními procesy (Právělie et al., 2021). Z hlediska ohrožení zemědělských půd na území ČR je vodní erozí ohroženo přibližně 50 % orné půdy a dále přibližně 10 % orné půdy je ohroženo erozí větrnou. Na většině ohrožených pozemků přitom není prováděna systematická protierozní ochrana, která by snižovala ztrátu půdy pod limity přípustných hodnot (Janeček et al., 2012).

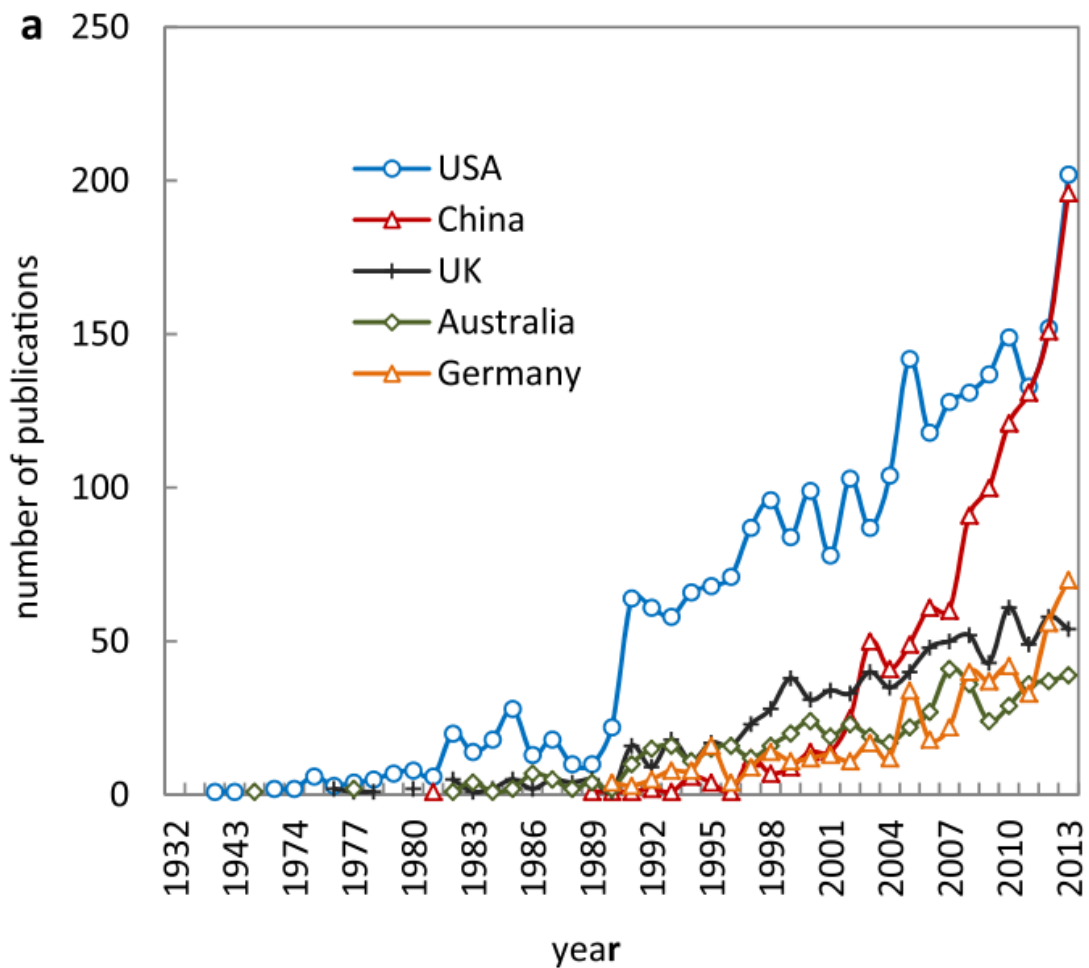
V současné době jsou již známy metody, pomocí kterých dokážeme účinky vodní eroze měřit, modelovat a tím i do jisté míry předvídat. Na základě toho se můžeme vyvarovat nepříznivých účinků vodní eroze a zabránit škodám jak přírodním, tak i na lidském majetku. I přesto je však zapotřebí výzkum vodní eroze dále rozvíjet a zkoumat nové metody jak erozi monitorovat, hodnotit, předvídat a následně se proti ní bránit (Nearing and Hairsine, 2011). Snaha zabránit zrychlené formě eroze půdy by měla být vlastní každému majiteli či nájemci zemědělské půdy, a to nejen z důvodu ochrany životního prostředí a cenného přírodního zdroje, kterým půda bezesporu je, ale také z finančních hlediska v případě žádání o státní podporu při zajištění protierozní ochrany. Podmínky, která musí zemědělec v ČR dodržovat při žádání o poskytnutí plné výše podpory, jsou zahrnuty ve standardech Dobrého zemědělského a environmentálního stavu půdy (DZES). Tyto standardy zajišťují hospodaření v souladu s ochranou životního prostředí a jsou také součástí nutné kontroly podmíněnosti (Cross Compliance) (Novotný, 2017).

Při hodnocení erozních jevů a následných projevů v krajině je důležité rozdělit typy eroze na jednotlivé formy, které jsou určeny tím, jak je povrchový odtok koncentrovaný v ploše a tím pádem jaké za sebou zanechává projevy. Obecně lze proto rozdělit vodní erozi na dvě formy (Holz et al., 2015):

- **plošná eroze** je charakteristická tím, že působí přibližně rovnoměrně v celé ploše zasaženého území. Do plošné eroze lze zařadit i prvotní fázi jakékoliv eroze, tzn. kapkovou erozi (Zhang, 2019). Ta probíhá na základě dopadu dešťových kapek, které předávají svojí kinetickou energii půdním částicím, případně půdním agregátům, které rozbíjejí na menší části až samostatné půdní částice. Tímto způsobem se dá mluvit o nastartování erozního procesu, který probíhá nepozorovatelně v celém zasaženém území. Postupným zaplňováním infiltrační kapacity půdy se začíná tvořit povrchový odtok, který zpočátku působí přibližně rovnoměrně, tzn. plošně. Teprve díky geomorfologickým vlastnostem území začíná postupně docházet k soustředování povrchového odtoku, kdy dochází k nepravidelné tvorbě zvýšeného koncentrovaného povrchového odtoku, čímž se již nadále nedá mluvit o plošné erozi.
- **výmolná eroze** vzniká při geomorfologicky vhodných podmínkách postupným soustředováním plošného odtoku v preferenčních cestách a následnou tvorbou zpočátku mělkých, ale postupně čím dál hlubších erozních rýh. Právě hloubka, délka a rozsah těchto útvarů dále rozděluje tyto typy soustředěné formy eroze na další

podkategorie. Rýžková eroze je charakteristická drobnými rýžkami s hloubkou do 10 cm, brázdová eroze dosahuje nepravidelných mělkých a širších zářezů, rýhová eroze je charakteristická širšími rýhami až do 30 cm hloubky, výmolná eroze může dosahovat výmolů hlubokých až 100 cm v místech koncentrace několika rýh a posledním nejsilnějším projevem tohoto typu eroze je stržová eroze se stržemi hlubokými více než 1 m a délkou více než 1 km (Novotný, 2017).

V kontextu výzkumu eroze v rámci historie lze mluvit o jeho prvopočátcích přibližně od první poloviny 20. století. Dle studie zabývající se vývojem erozního výzkumu od roku 1900 do roku 2013 od Zhuang et al., (2015), se erozní výzkum soustředil především v USA a evropských zemích, které jasně dominovali počtu publikovaných vědeckých studií až do roku 2001. Přibližně od tohoto data lze sledovat prudký nárůst publikací týkající se eroze půdy především v Číně a částečně také v Austrálii. Díky tomu mají nejvyšší počet publikací výzkumné instituty v čele s Chinese Academy of Sciences (Čína), následované United States Department of Agriculture – Agriculture Research Service (USDA–ARS), (USA) a Katholieke Universiteit Leuven (Belgie). Za vysokým počtem studií zabývající se erozí půdy v Číně může být zřejmě fakt, že dle odhadů dochází k nejvyšším ztrátám půdy z důvodu vodní eroze právě v Číně v objemu od 150 do 200 t.ha⁻¹.rok⁻¹, následované USA s odhadem eroze půdy v rozmezí od 5 do 170 t.ha⁻¹.rok⁻¹ (Senanayake et al., 2020). Z hlediska kategorií erozního výzkumu byl nejvyšší počet publikací dedikován pod zemědělství (46 %), životní prostředí a ekologii (30 %) a geologii (26 %) následované vodní zdroji (22 %) (Zhuang et al., 2015).

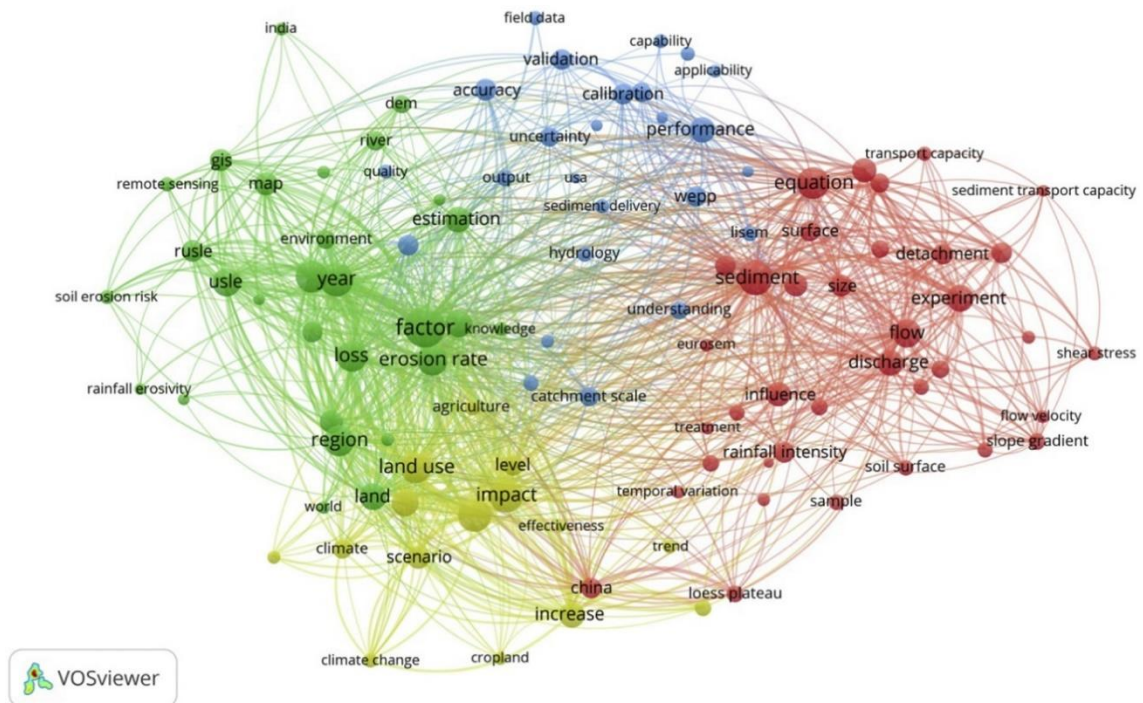


Obrázek 2 Vývoj výzkumných publikací zabývajících se erozním výzkum ve světě (převzato od Zhuang et al., 2015).

Zajímavým zjištěním ve studii od Zhuang et al., (2015) bylo, že v posledních letech bylo více studií zaměřené na životní prostředí a geologii než na zemědělství. V rámci zaměření zahrnutých studií byla analyzována použitá klíčová slova. Kromě nejrozšířenějšího slovního spojení „eroze půdy“ a „odtok“, byly na předních příčkách velice často zastoupena klíčová slova vztahující se k použitým metodám. Nejčastěji byly zmíněny metody „GIS“ a „remote sensing“. Právě tyto dvě klíčová slova, která jsou součástí této disertační práce, byla ve zmiňované studii vyhodnocena z hlediska metod jako nejčastější. Třetí metodou, která v počtu klíčových slov následovala byla metoda měření rozpadu radionuklidů ^{137}Cs v půdě, která taktéž zažívá prudký vývoj (Zhuang et al., 2015). Tato metoda se uplatňuje především při odhadu historických dat dlouhodobé ztráty půdy v porovnání s aktuálními měřeními pomocí modernějších metod, jako je například právě fotogrammetrie (Eltner et al., 2015).

2.2 Stanovení erozní ohroženosti

Pro zjištění erozních účinků deště na zemědělské pozemky je zapotřebí nějakým způsobem umět kvantifikovat erozní ohroženost. Proto byly již přibližně od 40. let 20. století vyvíjeny metody, které dokážou odhadnout ztrátu půdy na daném pozemku a tím i jeho erozní ohroženost v závislosti na pedologických, geomorfologických a klimatických podmínkách. Tyto první metody stanovení erozní ohroženosti byly vyvíjeny zpočátku především na středozápadě USA v tzv. kukuřičném pásu (tzv. Corn Belt), kde byl díky vysokému zastoupení pěstování kukuřice problém s erozí půdy velmi akutní (Wischmeier and Smith, 1978). V zásadě můžeme tyto metody hodnocení erozních procesů rozdělit podle několika faktorů. Tím základním rozdělením však je to, podle jakých způsobů jsou tyto erozní jevy popsány. Tímto způsobem je možné rozdělit tyto metody na tzv. **empirické** a **fyzikálně založené** či **procesně orientované** modely erozních procesů (Aksoy and Kavvas, 2005).



Obrázek 3 Vztahy mezi jednotlivými aspekty a činiteli v erozních modelech. Barva, vzdálenost a tloušťka spojení naznačuje sílu vazby mezi jednotlivými aspekty (převzato od Batista et al., 2019).

2.2.1 Empirické modely

Empirické metody jsou založeny na statistickém vyhodnocení experimentálních dat z četných pokusů na experimentálních plochách v terénu nebo laboratořích. Výhodou je relativní snadnost získání vstupních dat a následný výpočet bez nutnosti použití výpočetní techniky. Proto jsou empirické metody jakýmsi průkopníky v metodách hodnocení erozních procesů. Nevýhodou ovšem představuje omezení v aplikaci pouze na pozemky a podmínky, za kterých byly tyto metody odvozeny a tudíž nemožnost nebo omezenost obecného použití. Obecně se dá říci, že empirické metody jsou vhodné na posuzování erozní ohroženosti v delším časovém měřítku a na větších územních celcích (Batista et al., 2019). Nejpoužívanější empirické metody jsou popsány níže.

2.2.1.1 USLE

Hlavním a nejrozšířenějším zástupcem ze skupiny empirických metod je Universální rovnice ztráty půdy (USLE - Universal Soil Loss Equation), která byla odvozena W. H. Wischmeierem a D. D. Smithem v USA v roce 1965 a používá se jako základní metoda k určování erozní ohroženosti v USA a dalších zemích (Wischmeier and Smith, 1978). Rovnice se používá k výpočtu průměrné roční ztráty půdy na jednotlivých pozemcích a v případě určení přípustné ztráty půdy je možné také vypočítat maximální přípustnou délku nepřerušného svahu. V rovnici jsou zahrnuty parametry vztahující se k eroznímu účinku deště a povrchového odtoku (R faktor), erodovatelnosti půdy (K faktor), délky (L faktor) a sklonu svahu (S faktor), ochranného účinku vegetace (C faktor) a případných protierozních opatření (P faktor). Rovnice má tvar prostého součinu všech těchto faktorů, přičemž ve výsledku se jedná o průměrnou roční hodnotu ztráty půdy, neboť i faktory v rovnici byly stanoveny jako průměrné roční hodnoty. To již samo o sobě dává velký prostor pro rozdíl mezi skutečnou a vypočítanou hodnotou ztráty půdy. Další nepřesnosti mohou vzniknout v důsledku toho, že rovnice USLE byla odvozena na tzv. jednotkovém pozemku, tedy ploše s přesně definovanými parametry, které jsou následující: délka pozemku 22,13 m, podélný sklon 9 %, povrch pozemku udržován mechanicky kultivací ve směru sklonu svahu jako úhor po dobu minimálně 2 let. Pro takovýto jednotkový pozemek jsou faktory L, S, C, a P rovny 1,0. Výhodou této rovnice je jednoduchost výpočtu a relativně snadné určení vstupních parametrů. Naopak její nevýhodou je neschopnost dostatečně popsat časové a prostorové nehomogenity srážek a půdních, vegetačních a morfologických podmínek, a tím pádem i nemožnost přizpůsobit ji na řešený pozemek (Wischmeier and Smith, 1978).

2.2.1.2 RUSLE

Během vývoje erozních poznatků a na základě zkušeností s rovnicí USLE, došlo v 90. letech k jejímu prověření a následnému upravení. Úpravy se týkaly především způsobu získávání jednotlivých faktorů, a proto byla nová rovnice nazvána jako revidovaná, tedy RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). RUSLE se stejně jako rovnice USLE používá pro odhad průměrné dlouhodobé roční ztráty půdy ze zemědělských pozemků, avšak nově ji lze aplikovat i na nezemědělské pozemky, například staveniště. Hlavní rozdíly RUSLE oproti USLE představuje časové a prostorové zpřesnění použitých hodnot v průběhu roku, zahrnutí rýhové eroze či zahrnutí vlivu předchozího využití pozemku (Renard et al., 1997).

2.2.1.3 MUSLE

Na základě principů rovnice USLE byla později odvozena také modifikovaná rovnice MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation), která jako jediná ze zmíněných rovnic počítá množství splavenin z přívalového deště, a to na základě zahrnutí charakteristik transportního činitele – povrchového odtoku. Rovnice byla odvozena v roce 1975 pro povodí o velikosti do 15 km² (Williams and Berndt, 1977).

2.2.2 Fyzikálně založené modely

Oproti empirickým metodám jsou fyzikálně orientované modely založeny na fyzikálním popisu erozních procesů. Rozvoj matematických simulačních metod umožnil jednak vývoj na poli teoretických znalostí erozních procesů, hydrauliky, povrchového odtoku a dalších, a také rozvoj počítačových technologií, bez kterých by složité výpočty nebyly možné. Fyzikálně založené modely odstraňují hlavní nedostatky empirických metod, a proto je můžeme považovat za další vývojový stupeň v oblasti hodnocení erozních procesů. Hlavní výhodou těchto modelů je vysoká efektivita, kdy je možné rychle a levně zkoumat jevy v dlouhodobém měřítku na velkém počtu pozemků s různými způsoby hospodaření a ochrany. Částečnou nevýhodou může být obtížnější získávání vstupních dat, či nutná počáteční kalibrace modelu (Nearing and Hairsine, 2011). Mimo podrobněji popsaných modelů níže se v dnešní době využívá celá řada dalších modelů, jako například ANSWERS (Beasley et al., 1980), CREAMS (Foster et al., 1981), EUROSEM (Morgan et al., 1998), LISEM (De Roo et al., 1996) či SHESED (Wicks and Bathurst, 1996).

2.2.2.1 WEPP

Simulační model WEPP (Water Erosion Prediction Project) byl vytvořen v USA jako model nové generace nahrazující empirické modely, především rovnici USLE. Model začal být vytvářen roku 1985 v USDA-ARS a během následujících let postupně vylepšován. Model WEPP ve výpočtu zahrnuje rýhovou i mezirýhovou erozi, transport sedimentu a jeho ukládání, infiltraci, konsolidaci půdy, ochranné účinky vegetace, růst rostlin, evaporaci a transpiraci, tání sněhu a další aspekty. Model dokáže určit časoprostorové změny v rozložení ztráty půdy na jednotlivých svazích až malých povodích (Flanagan et al., 2007).

2.2.2.2 SMODERP

Model SMODERP (Simulační model povrchového odtoku a erozních procesů) je vyvíjen od konce osmdesátých let na Katedře hydromeliorací a krajinného inženýrství, Fakulty stavební, ČVUT v Praze (Holý et al., 1988). SMODERP řeší srážkoodtokové vztahy a erozní procesy na svahu (pozemku) a jeho výstupy dávají podklady pro posouzení erozní ohroženosti a návrhů prvků protierozní ochrany. Model simuluje povrchový odtok a erozní proces ze srážky proměnné intenzity na jednotlivém pozemku o velikosti cca do 100 ha s nehomogenními morfologickými, půdními a vegetačními poměry (Dostál et al., 2000). Pomocí tohoto modelu je možné určit přípustné délky svahu na základě krajního nevymílacího tečného napětí a krajní nevymílací rychlosti povrchového odtoku, charakteristiky povrchového odtoku (objem odtoku, vrcholový průtok, hloubka, rychlost a tangenciální napětí povrchového odtoku) ve zvolených profilech vyšetřovaného svahu a ve zvolených časových intervalech od počátku srážky a konečně také ztráty půdy (transport půdních částic za dolní hranici pozemku. Odtokové parametry počítá SMODERP v závislosti na pedologických vlastnostech zadané půdy. S postupným vývojem a využitím dešťových simulátorů k testování půd stále dochází ke kalibraci a validaci těchto parametrů. SMODERP, na rozdíl od modelu WEPP, nepočítá ztrátu půdy a množství sedimentu na pozemku, ale vyhodnocuje limitní rychlosti a tečná napětí plošného povrchového odtoku. Na základě těchto údajů je možné posoudit vhodnost pěstovaných plodin a navrhnout jejich změnu či přímo navrhnout přerušení svahu liniovým prvkem (Kavka, 2011).

2.3 Měření a monitoring eroze půdy

Kromě výpočetních modelů se pro hodnocení erozních účinků používají další metody, které v praktických experimentech využívají přirozených srážkových událostí nebo umělých dešťů. Tyto metody byly využity už při odvozování empirických rovnic, jako například rovnice USLE, a jsou i nadále využívány pro odvozování srážko-odtokových charakteristik ve výzkumných lokalitách a získávání vstupních dat do simulačních modelů (Hudson, 1993).

Už od počátku experimentálních měření lze tyto metody rozdělit podle způsobů získávání těchto dat na:

- **přímé měření** erozních procesů – v tomto případě se zaznamenává a měří erozní proces v reálném čase (typicky se jedná o měření množství povrchového odtoku včetně odběru vzorků pro následnou analýzu množství sedimentu v něm). Mezi tyto metody lze zařadit erozní experimenty, které využívají experimentálních elementárních erozních ploch s využitím přirozených srážek či s využitím umělých srážek pomocí dešťových simulátorů (Davidová et al., 2015; Kavka et al., 2011; Laburda et al., 2015).
- **nepřímé měření** erozních procesů – v tomto případě se jedná o zaznamenání a měření erozních projevů na základě porovnání stavů před srážkovou událostí a po srážkové události s následným vyhodnocením změn experimentální plochy v důsledku srážkové události a vzniklých erozních projevů. Mezi tyto metody lze zařadit monitoring a rekonstrukci morfologických změn pomocí kontaktních či modernějších bezkontaktních metod DPZ (Báčová et al., 2019a; Eltner et al., 2013; Hänsel et al., 2016; Moreno et al., 2011). Dále lze mezi nepřímé metody měření eroze půdy zařadit například sledování koncentrace nerozpuštěných látek ve vodních tocích, které slouží jako indikátor erozních procesů (Osugwu et al., 2014; Woodward and Foster, 1997), či měření erozních procesů na základě analýzy rozpadu radionuklidů v půdních vzorcích (Arata et al., 2016).

2.3.1 Přímé měření erozních procesů

Přímé měření erozních procesů zahrnuje reálné měření povrchového odtoku v době, kdy se tento jev skutečně odehrává, či krátce po něm. Z tohoto hlediska je důležité definovat celkovou plochu, na které se tento jev odehrává a k němu vztažený uzávěrový profil, kde je možné pozorovat a měřit erozní projevy v tomto území. V případě přirozených geomorfologických podmínek se jedná o celá hydrologicky uzavřená území – povodí. V tomto případě však mohou být takto definovaná území tak velká, že je velmi obtížné definovat např. pedologické podmínky na celém území či monitorovat všechny změny, které v daném povodí nastaly. Velkou nevýhodou je také absolutní závislost na přirozených srážkových událostech, která prováděný výzkum značně ovlivňuje. V praxi erozního výzkumu se proto často přistupuje k umělému zmenšení těchto území pomocí elementárních erozních ploch, tzn. vytvářejí se menší uzavřené celky, na kterých se snáze a s větší přesností kontrolují požadované parametry a měřené veličiny (Hudson, 1993). Tyto zmenšené a uzavřené celky mají navíc tu výhodu, že kromě přirozených srážek, je na nich možné využít dešťových simulátorů, pomocí kterých je

možné opakovaně simulovat stejné nebo různé srážkové události s variabilním průběhem a intenzitou. Podle velikosti erozních ploch se dá mluvit o různých měřících, které však následně mohou způsobit variabilitu ve výsledných datech (Boix-Fayos et al., 2006).

Co mají všechny tyto metody společné nehledě na měřítko, je způsob měření erozního procesu. Toto měření spočívá v naprosté většině případů v měření množství **povrchového odtoku** v uzávěrovém profilu a odebírání vzorků pro následné zjištění **množství půdního smyvu** či dalších látek. V případě větší komplexnosti výzkumu se často přistupuje také k měření mělkého podpovrchového odtoku, který nastává podle stavu zhutnění podorniční vrstvy či podle infiltrační schopnosti samotné svrchní vrstvy půdy (Horton, 1933; Pilgrim and Huff, 1978). Výjimku při těchto procesech představuje například měření procesu kapkové eroze (viz kapitola 3), při kterém nemusí nutně docházet k povrchovému odtoku vůbec, a naopak se měří rozptýl půdních částic do celého okolí.

Měření množství povrchového odtoku je základním předpokladem k získání potřebných dat pro vyhodnocení srážko-odtokových charakteristik. Toto měření lze obecně provádět pomocí manuálních odběrů vzorků anebo pomocí automatizovaného měření. Nezbytným předpokladem pro měření povrchového či podpovrchového odtoku je soustředění odtoku pomocí sběrného žlabu, na jehož výtoku probíhá samotné měření pomocí těchto metod (Miller, 1994):

- Odvozením průtoku na základě měření výšky hladiny ve sběrných žlabech (tzv. „H-flume“) a na přelivných hranách (tzv. „V-notch“) (Choi et al., 2005).
- Pomocí měření rychlosti proudění ve sběrném žlabu (Ramos et al., 2016).
- Pomocí měření výšky hladiny ve sběrné nádobě pomocí vodoměrných latí (Joel et al., 2002).
- Měření objemu za měřený čas pomocí manuálního odběru nebo pomocí automatického sampleru (Davidová et al., 2015).

Doplňkově lze také měřit rychlost povrchového odtoku v ploše, například pomocí měření hodnoty elektrické konduktivity na výtoku z plochy pomocí konduktometru (Blanco-Canqui et al., 2002; Nakamura, 1971).



Obrázek 4 Měření povrchového odtoku pomocí ultrazvukového čidla ve žlabu (snímek vlevo) a pomocí manuálního odběru povrchového odtoku s měřením času (snímek vpravo).

Druhou část potřebných dat představují hodnoty půdního smyvu obsaženého v povrchovém odtoku. Tyto hodnoty se nejčastěji získávají analýzou odebraných vzorků povrchového odtoku, a to nejčastěji filtrací, vysušením a následným zvážením suché složky půdního smyvu. Způsob získání vzorků půdního smyvu lze rozdělit do několika skupin:

- Manuálně nebo automaticky pomocí sampleru z povrchového odtoku (Davidová et al., 2015) (Obrázek 4 – snímek vpravo).
- Sběr erodovaných půdních částic ze sběrných nádob – například sběrná nádoba při kapkové erozi pro zjištění kumulativní hodnoty eroze půdy (Zumr et al., 2020) (Obrázek 5 – snímek vlevo).
- Sběr erodovaných půdních částic zachycených na speciálních textilních vacích umístěných v otevřeném terénu (tzv. mesh bag) (Hsieh et al., 2009) (Obrázek 5 – snímek vpravo).
- Odvození množství půdního smyvu na základě měření zákalu povrchového odtoku pomocí turbidimetru (Gippel, 1989) .



Obrázek 5 Ukázka zachytávání půdních částic z kapkové eroze do sběrné nádoby okolo vzorku (snímek vlevo) a zachytávání půdních částic v terénu na neohraničeném pozemku pomocí speciálních textilních vaků – tzv. mesh bag (převzato od Hsieh et al., 2009) (snímek vpravo).

2.3.1.1 Elementární erozní plochy

Uzavřené erozní celky, které se využívají k měření erozních jevů mohou dosahovat různých velikostí podle řešeného úkolu. Pro případy sledování kapkové eroze jsou dostačující plochy o velikosti již od 100 cm² s pravidelným tvarem kruhového nebo čtvercového půdorysu (Morgan, 1981). V případě sledování tvorby povrchového odtoku jsou mnohem vhodnější větší plochy s delší stranou ve sklonu svahu, na kterých může dojít právě k tvorbě povrchového odtoku a případně i rýhové eroze. Většinou se tato délka pohybuje přibližně od 2-4 m při šířce od 1-2 m (Boix-Fayos et al., 2006). Standardní plochy, které byly použity při empirickém odvození rovnice USLE, měly délku 22,13 m, šířku 1,83 m a průměrný sklon 9 % (Wischmeier and Smith, 1978). Tyto plochy jsou i nadále využívány v tomto rozměru při erozním výzkumu jako referenční velikost (Kavka et al., 2011). Velikost plochy také často závisí na tom, zda se budou využívat přirozené srážky – potom na rozměru tolik nezáleží, nebo pokud bude využit dešťový simulátor – potom záleží na technických vlastnostech tohoto zařízení. Velikost erozních ploch je velmi důležitá z hlediska toho, jaké erozní procesy je zamýšleno sledovat. Při různých velikostech ploch dochází k různým erozním procesům. Například při erozní studii s velikostmi ploch 176 m², 0,16 m² a 0,04 m² se jasně ukázalo, že pouze největší plochy je možné využít při měření rýhové eroze. Malé plochy byly vhodné pouze pro určení erodovatelnosti půdy při mezirýhové erozi (Bagarello and Ferro, 2004). V jiné studii bylo porovnáváno 5 různých velikostí ploch od 1 m² do 48 m², kde ačkoliv na malých plochách nedocházelo k rýhové erozi, ztráta půdy přepočtená na jednotku plochy byla u nejmenší plochy největší a u největší plochy naopak nejmenší (Bagarello et al., 2018). Co však platí u všech velikostí erozních ploch stejně, je nutnost měřit výsledné hodnoty na co nejvíce replikách stejných ploch se shodnou velikostí a při stejných podmínkách. Často se při experimentech vyskytují velmi vysoké hodnoty koeficientu variability (CV) ve výsledných hodnotách smyvu půdy mezi jednotlivými replikacemi v rozmezí od 30 % do 50 %, a proto je často doporučováno provádět minimálně 3 replikace od každého měření (Rüttimann et al., 1995). Tento postup byl proto zvolen i v případových studiích v kapitole 3 a 4. Nicméně jiné studie potvrdily, že tento koeficient variability mezi jednotlivými repetitivy se postupně snížil při vyšších hodnotách smyvu půdy (Bagarello and Ferro, 2004).



Obrázek 6 Ukázka experimentální erozní plochy s využitím neporušeného vzorku v terénu na experimentálním povodí Býkovického potoka (snímek vlevo) a porušeného půdního vzorku při měření pomocí laboratorního dešťového simulátoru ČVUT v Praze (snímek vpravo).

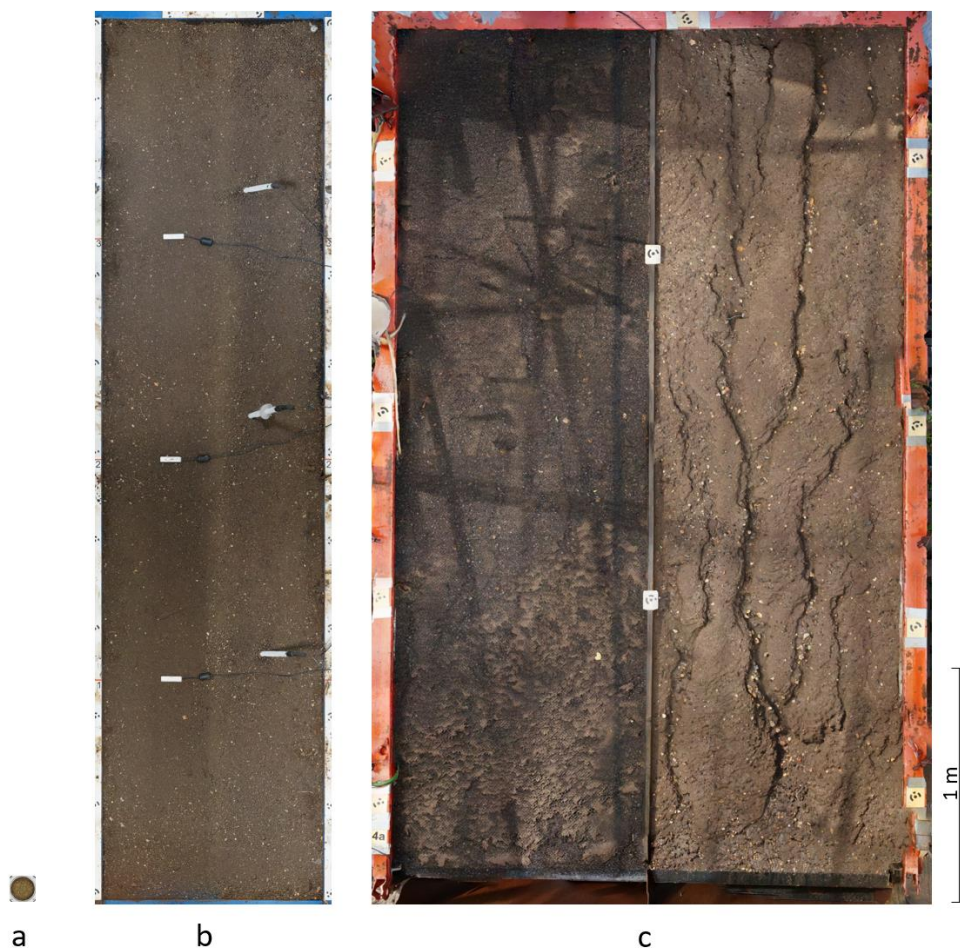
Obecně lze všechny erozní plochy rozdělit podle způsobu využití půdního vzorku na plochy s porušeným půdním vzorkem a neporušeným půdním vzorkem (Boix-Fayos et al., 2006; Shi et al., 2010; Zhao et al., 2010).

- **Neporušený** půdní vzorek znamená, že se půda nikam nepřemísťuje a erozní plocha je vytyčena přímo na daném místě v terénu, tzn. měření probíhá *in situ* (Obrázek 6 – snímek vlevo). Takto připravené plochy mají tu výhodu, že všechny vrstvy orné půdy jsou ve stejném pořadí jako v okolním terénu. Díky tomu jsou při měření zahrnuty kromě povrchových procesů také všechny podpovrchové procesy bez omezení mocnosti půdního vzorku (Whelan et al., 1952). Mezi tyto procesy patří například infiltrace a podpovrchový odtok, které jsou však v terénu mnohem obtížněji měřitelné, než je tomu v případě porušených půdních vzorků. Ačkoliv tento typ byl využitý už při odvozování parametrů rovnice USLE (Wischmeier and Smith, 1978), obecně tento typ uzavřených ploch není v dnešní době doporučován pro dlouhodobé měření eroze půdy z důvodu úbytku erodovatelného materiálu v experimentální ploše v průběhu času (Boix-Fayos et al., 2006). Nicméně využití takovýchto ploch při krátkodobých experimentech pomocí dešťových simulátorů je velice účinné a reprezentativní například při posuzování vlivu vegetace na odtokové charakteristiky (Davidová et al., 2015).
- Při využití **porušených** půdních vzorků je půda přemístěna z terénu do jiného prostředí, kde je umístěna do připravené experimentální nádoby, tzn. měření probíhá *ex situ* (Obrázek 6 – snímek vpravo). Takto připravený půdní vzorek má podstatně změněné vlastnosti jako je například objemová hmotnost, orniční vrstva je promíchána a obecně jsou půdní horizonty (podle hloubky odběru) změněny (Osunbitan et al., 2005). Výhodou u tohoto typu půdních vzorků představuje možnost velkého počtu repetíci s konstantními podmínkami při obnově a doplnění půdního vzorku. Další výhodou může dle typu experimentálního zařízení být také možnost snadného měření infiltrace, perkolace a podpovrchového odtoku.

Při souběžném prezentování výsledků erozních experimentů byly provedeny studie, které měly za cíl porovnat vliv využití porušených a neporušených půdních vzorců na výsledné hodnoty srážko-odtokových vztahů. Z několika studií vyplynulo, že hodnoty výsledného smyvu půdy jsou častěji vyšší v případě využití porušených půdních vzorků (Megahan, 1974; Thomaz and Pereira, 2017; Zhao et al., 2010).

V rámci této disertační práce byla využita data naměřená na těchto experimentálních plochách:

- Kruh o průměru 0,1 m – případová studie měření kapkové eroze v kapitole 3 (Zambon et al., 2020a; Zumr et al., 2020), (Obrázek 7a).
- Obdélník s rozměry 4 x 1 m – měření erozních procesů pomocí laboratorního DS, ČVUT v Praze a pomocí venkovního DS v areálu společnosti Strix s.r.o. na lokalitě Jirkov v kapitole 4 (Kavka et al., 2019; Laburda et al., 2015) (Obrázek 7b,c).



Obrázek 7 Porovnání různých velikostních měřítek testovaných experimentálních ploch: a - kapková eroze (kruh o průměru 0,1 m), b - erozní experimenty na laboratorním DS, ČVUT v Praze (plocha 4x1 m), c - erozní experimenty na venkovním DS v areálu společnosti Strix (2 plochy 4x1 m).

2.3.1.2 Dešťové simulátory

V praxi se často využívají dešťové simulátory, které usnadňují, urychlují a zkvalitňují erozní výzkum. Pomocí těchto zařízení lze kdykoliv a opakovaně snadno generovat srážky o požadovaných parametrech, které iniciují veškeré požadované procesy jako jsou kapková eroze, povrchový odtok s půdním smyvem, podpovrchový odtok a transport ostatních nerozpuštěných a rozpuštěných látek (Grismer, 2012). Vývoj a rozmach těchto zařízení lze vystopovat do podobného období, kdy se začalo s vývojem erozních modelů, tj. přibližně do 30.-40. let 20. století (Cerdá, 1999). Ačkoliv primární výzkum pomocí dešťových simulátorů se soustředí na výzkum eroze půdy, postupně se začaly objevovat studie využívající dešťových simulátorů při experimentech v urbanizovaném prostředí (Yakubu and Yusop, 2017). Mezi hlavní sledované veličiny při experimentech s dešťovými simulátory patří parametry související s erozními procesy jako je množství a rychlost povrchového odtoku, množství půdního smyvu, změny vlhkosti půdy, množství infiltrace, množství kapkové eroze. Všechny tyto procesy jsou shodné s experimentálním měřením na elementárních erozních plochách, a jsou proto pospány v kapitole výše (viz 2.3.1.1). Naopak při experimentech prováděných pomocí dešťových simulátorů je důležité sledovat také parametry a procesy, které souvisejí s generováním samotných dešťových kapek. To je důležité z důvodu opakovatelnosti měření s dostatečně přesnými parametry a podmínkami. Mezi hlavní charakteristiky a parametry sledované při provozu a provádění experimentálních měření patří následující parametry (Rodrigo Comino, 2021).

Intenzita deště je nejzákladnější parametr, který se sleduje při srážko-odtokových experimentech. Nejčastěji se zaznamenává bodově pomocí srážkoměrů pracujících na principu překlápěcího mechanismu se známým objemem a na základě zaznamenávané intenzity překlápění (Lanza et al., 2010). Při sledování erozních experimentů využívající přirozené srážky může být toto bodové měření dostatečně pro popsání intenzity deště na sledované ploše. V případě využití dešťových simulátorů však dochází k velké variabilitě intenzity deště v závislosti na umístění srážkoměru vůči zadešťovacímu zařízení. Proto je důležité analyzovat parametry popisující **rovnoměrnost distribuce** zadeštění plochy, který je jedním z klíčových parametrů každého dešťového simulátoru (Thomas and El Swaify, 1989). Tento parametr je závislý na kombinaci faktorů jako je tlak vody, typ trysky, výška trysky nad povrchem, počet a rozmístění trysek a z nich výsledná intenzita deště. Před využitím erozních experimentů na dešťových simulátorech, by proto mělo být provedeno kontrolní měření, které analyzuje různé kombinaci těchto nastavení s cílem nalézt nejvyšší možnou hodnotu rovnoměrnosti. Nejčastěji je tato rovnoměrnost popisována koeficientem rovnoměrnosti podle Christiansena (1942). Nedílnou součástí měření charakteristik deště je měření **kinetické energie** dopadajících kapek spolu s jejich průměrnou velikostí. Tyto charakteristiky se zaznamenávají pomocí různých typů disdrometrů, které dokáží zároveň vyhodnotit i intenzitu deště (Zambon et al., 2020b). Dle Johannsen et al., (2020b) však může mezi jednotlivými typy disdrometrů docházet k rozdílům až 29 % oproti srážkoměrným údajům, a proto je nutné v prvé řadě provést kalibraci používaných zařízení.

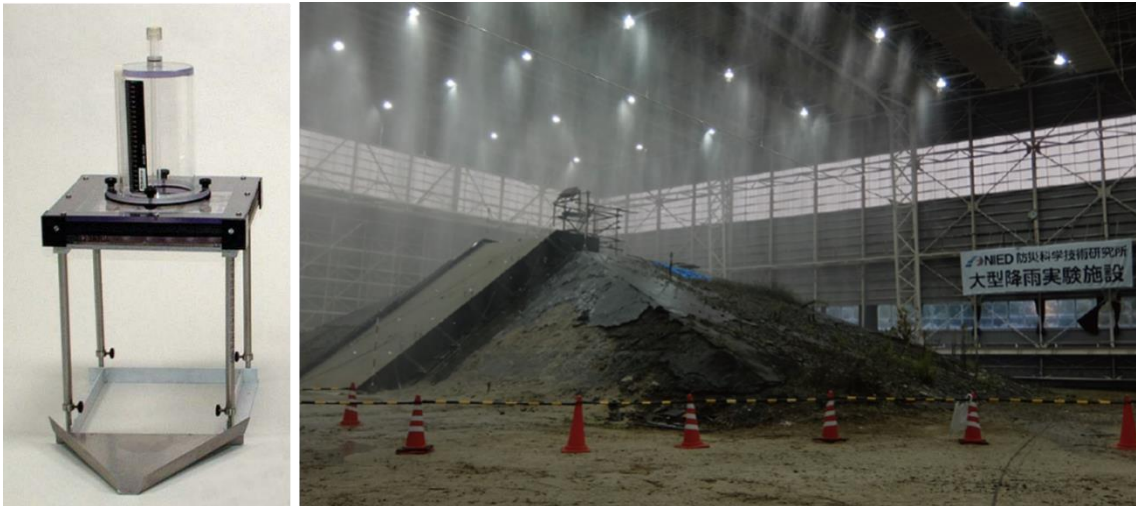
Často diskutované téma ve studiích zaměřených na dešťové simulátory je schopnost simulátorů produkovat dostatečně reprezentativní déšť s odpovídajícími parametry kinetické energie srovnatelné s přirozenými dešti. Ve většině případů bývá proto povrchový odtok a půdní smyv podhodnocen oproti simulacím prováděných ve venkovním prostředí s přirozeným deštěm (Calvo-Cases et al., 2005; Chaplot and Le Bissonnais, 2000; Hamed et al., 2002). Nicméně v některých studiích se tento problém podařil vyřešit, a i za pomoci dešťových simulátorů bylo dosaženo velmi vysokých hodnot kinetické energie převyšující hodnoty přirozených dešťů (Schlesinger et al., 2000).

Již od počátku využívání dešťových simulátorů vznikala celá řada technických řešení pro vytvoření umělého deště. Tato zařízení lze proto základně rozdělit z několika hledisek podle různých kritérií (Rodrigo Comino, 2021):

Podle typu tvorby kapek

Kapkové simulátory využívají k tvorbě kapek vláken (bavlněných), trubiček (ocelových, skleněných) nebo jehel bez dodatečného vyvinutí tlaku. Tlak vody je v tomto případě určen pouze hydrostatickým tlakem vytvořeným hladinou v zásobníku (Obrázek 8 – snímek vlevo). Tím je dosaženo jednoduché a spolehlivé konstrukce s homogenní velikostí kapek v přibližném rozsahu od 1,8 do 2,8 mm a s konstantní kinetickou energií a plošnou rovnoměrností. Obvyklá zadešťovaná plocha má u tohoto typu dešťového simulátoru obsah do 1 m² (Grismer, 2011). Nevýhodou však představuje to, že pádová rychlost kapky je závislá na výšce umístění zadešťovacího zařízení, a proto je technicky velmi obtížné dosáhnout dostatečně velké dopadové rychlosti (Ricks et al., 2019).

Tryskové simulátory byly vyvinuty s ohledem na nedostatky kapkových simulátorů, mezi které patří zejména nízká kinetická energie dopadajících kapek, omezená velikost zadeštěné experimentální plochy (Obrázek 8 – snímek vpravo). Především iniciálním dodáním tlaku lze velmi snadno zvýšit dopadovou rychlost a tím i kinetickou energii dešťových kapek dopadajících na půdní povrch (Moore and Barfield, 1983). Tento typ simulátoru může být mnohem účinnější, může snáze dosahovat větší zadešťované plochy a také může být kompaktnější. Technicky složitější je však řídicí systém ovládající tlak vody a rozptyl dešťových kapek zajištěný pomocí tvaru trysky, pulzace (solenoidový typ) (Kavka et al., 2018), za pomoci kyvného pohybu trysky (Koláčková, 2005) nebo aktivním pohybem trysky (tzv. „rotating booms“) či zakrýváním trysky (tzv. „rotating disc“) (Hudson, 1993).



Obrázek 8 Miniaturní kapkový dešťový simulátor s experimentální plochou $0,0625 \text{ m}^2$ (obrázek vlevo – převzato od (Eijkelkamp Soil & Water, 2018)) a jeden z největších dešťových tryskových simulátorů NIED v Japonsku s experimentální plochou až 3170 m^2 (obrázek vpravo – převzato od (NIED, 1974)).

Podle mobility/umístění

Laboratorní (stabilní) dešťové simulátory představují velmi sofistikované řešení, které nabízí řadu výhod i nevýhod. Jako hlavní výhody lze zmínit především velmi vysokou míru kontroly charakteristik deště a počátečních podmínek a vlastností testovaného půdního vzorku. To vše lze provádět velmi často s vysokou mírou reprodukovatelnosti. Nevýhoda těchto zařízení spočívá především v omezené velikosti jak zadešťované plochy, tak především v mocnosti půdního vzorku, který nikdy nemůže obsáhnout celý půdní horizont jako je tomu v terénu na přirozeném půdním profilu. Velká většina laboratorních dešťových simulátorů pracuje s experimentální zadešťovanou plochou do 20 m^2 a s intenzitami do 200 mm.hod^{-1} (Kalibová et al., 2016; Pan et al., 2010; Zambon et al., 2020a). Nicméně existují výjimky, jako například největší laboratorní dešťový simulátor, který je schopen experimentálně testovat velké vzorky s plochou až 3000 m^2 a při velmi vysokých intenzitách až 300 mm.hod^{-1} (NIED, 1974). Toto zařízení je velmi specifické a je mimo standardních erozních experimentů orientováno více na sesuvy půdy a jiné extrémní jevy.

Mobilní (přenosné) typy dešťových simulátorů byly vytvořeny z důvodu potřeby testování neporušených půdních vzorků, tzn. přímo na místě – *in situ*. Často jsou využívány například pro testování rychlosti a množství infiltrace či vlivu vegetace, což jsou experimenty, které jsou velmi obtížně proveditelné v laboratorních podmínkách (Cerdá, 1999). Dále jsou často využívány také pro měření iniciální fáze erozního procesu – kapkové eroze v terénních podmínkách (Iserloh et al., 2013), pro specifický výzkum výmolné eroze (Strauss et al., 2000) či díky své mobilitě mohou být aplikovány také při výzkumu eroze na strmých svazích (Rodrigo Comino et al., 2016). Nevýhodou těchto typů může představovat vliv počasí na průběh experimentu a počáteční podmínky z hlediska různé teploty či vlhkosti půdy. Výhoda naopak spočívá v měření na neporušených půdních vzorcích, čímž lze simulovat veškeré erozní procesy.

V rámci této disertační práce byla využita data naměřená pomocí těchto zařízení:

- Laboratorní DS ČVUT v Praze
- Venkovní stabilní DS na lokalitě Jirkov

Laboratorní DS (Fakulta stavební, ČVUT v Praze)

Laboratorní dešťový simulátor Katedry hydromeliorací a krajinného inženýrství se nachází ve Vodohospodářském experimentálním centru Fakulty stavební, ČVUT v Praze. Tento simulátor byl zkonstruován mezi lety 1998 až 2000 z komponentů dodaných z USA podle předlohy podobného zařízení univerzity BOKU ve Vídni. Ve své době se jednalo o čistě tryskový dešťový simulátor konstrukce typu „Norton Ladder Rainfall Simulator“ (pojmenovaný podle autora Dr. Darrela Nortona z USDA-ARS). Laboratorní dešťový simulátor se využívá k experimentálnímu měření erozních procesů na porušených půdních vzorcích, kde se monitoruje a odebírá množství povrchového odtoku, perkolace, měří se rychlost povrchového odtoku a z odebraných vzorků odtoku se následně se vyhodnocuje půdní smyv (Koláčková, 2005).

Původní verze 2000 – 2017

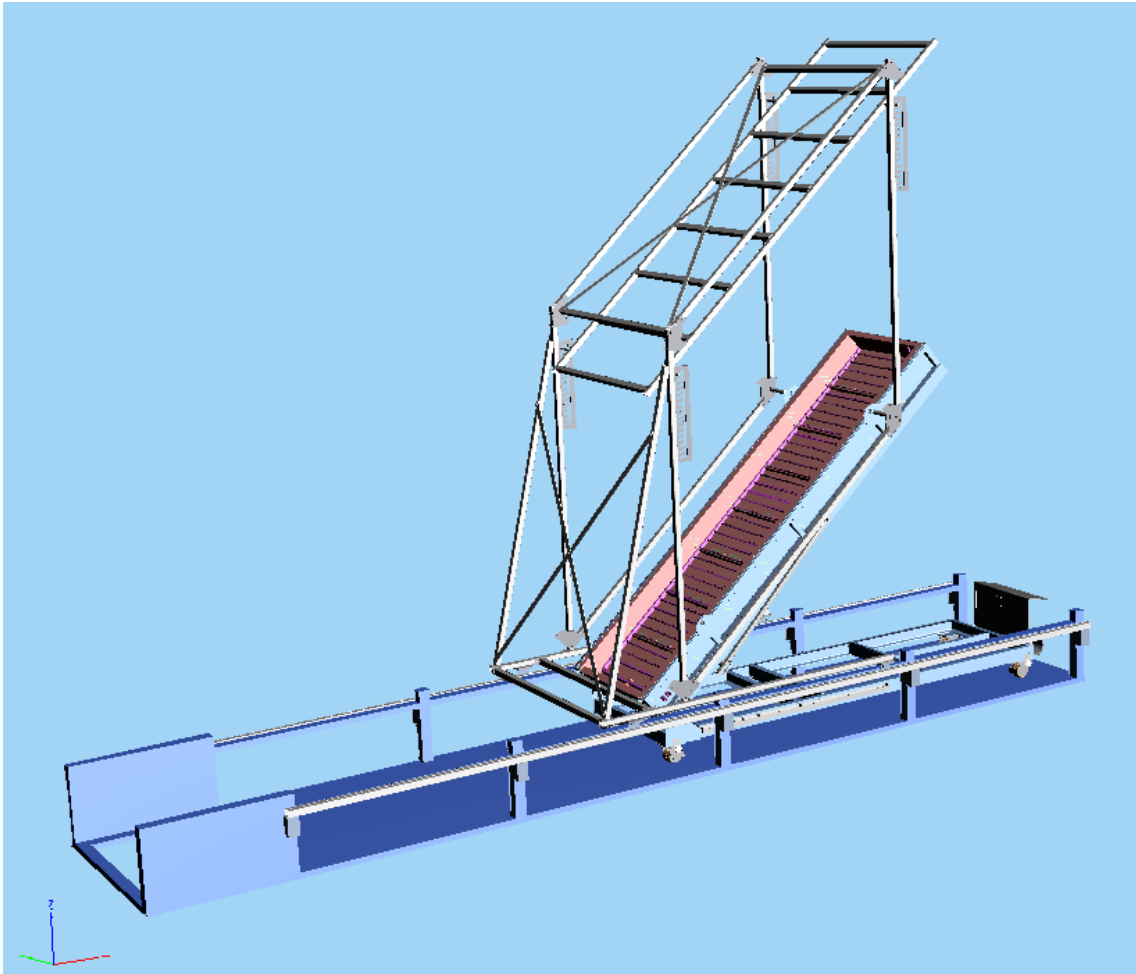
Samotné zařízení dešťového simulátoru bylo od svého počátku umístěno na hydraulicky sklopném žlabu, pomocí kterého bylo možné nastavit požadovaný sklon experimentální plochy v rozmezí od 0 do 8° (Obrázek 9 – snímek vlevo). Zadešťovaná plocha byla tvaru obdélníku o půdorysných rozměrech 4 x 0,9 m s delší stranou ve směru sklonu a hloubkou 0,2 m. Kontejner měl dno vybavené 30 otvory seskupenými do 5 sekcí pro postupné sledování infiltrovaného množství vody. Nad tímto kontejnerem byla konstrukce z ohýbaných trubek, na které byly umístěny plastové rozvody vody ve dvou paralelních sekcích, každá se 4 tryskami typu VeeJet 80100 firmy Spraying System. Tyto dvě sekce byly řízeny pomocí elektromotorů, pomocí nichž docházelo ke střídavému kyvnému pohybu jednotlivých sekcí. Krycí boxy okolo trysek s průzorem kolmo dolů k experimentální ploše vytvářely rovnoměrné zadeštění odpovídající plochy půdy. Vzdálenost mezi jednotlivými tryskami byla 1,37 m v podélném směru a 0,8 m v příčném směru. Výška trysek nad půdním povrchem byla konstantně 2,4 m. Charakteristiky deště bylo možné nastavit pomocí řídicího počítače na základě rychlosti kývavého pohybu sekcí, tlaku vody a případně typu vyměnitelné trysky. Standardně vytvořená schémata těchto parametrů umožňovala testování při intenzitách deště od 20 do 80 mm.hod⁻¹ (Koláčková, 2005). Erozní data z let 2000 až 2008 byla využita při kalibraci erozního modelu SMODERP vyvíjeným Ing. Kavkou v rámci jeho disertační práce (Kavka, 2011) a následně dále Ing. Neumannem v rámci jeho bakalářské práce (Neumann, 2013). Celkový přehled všech naměřených dat byl vyhodnocen v rámci článků a diplomové práce autora této disertační práce, ve kterých zhodnotil erozní charakteristiky testovaných půd (Laburda, 2013; Laburda et al., 2015).



Obrázek 9 Srovnání laboratorního DS ČVUT v Praze před rekonstrukcí na hydraulicky sklopném žlabu s maximálním sklonem do 10° (snímek vlevo) a celkově rekonstruovaným DS se samostatně sklopným erozním žlabem s maximálním sklonem do 40° (snímek vpravo)

Modernizovaná verze od 2018

Dlouholeté využívání laboratorního dešťového simulátoru přineslo potřebu moderní rekonstrukce pro splnění nových požadavků daných novými metodami experimentálního měření a možností dalšího nastavení potřebných parametrů. Na původní konstrukci bylo omezujícím faktorem především malý rozsah nastavení sklonu experimentální plochy, malá variabilita nastavení charakteristik deště a nízké procento automatizovaného měření dílčích veličin. Z těchto důvodů došlo v roce 2017 k návrhu nové konstrukce od společnosti MZK Chomutov s.r.o., která měla tyto nedostatky vyřešit. V roce 2018 došlo k rekonstrukci, která spočívala v nezávisle pohyblivém podvozku s erozním kontejnerem a k němu napojitelném systému se zadešťovací konstrukcí (Obrázek 9 – snímek vpravo). Velikost experimentální plochy zvětšila svoji půdorysnou rozlohu na 4 x 1 m, přičemž zůstaly zachovány otvory ve dně pro měření infiltrace. Největší změnu představuje zabudování hydraulického pístu mezi podvozek a erozní kontejner, který dovoluje nastavení sklonu v rozmezí od 0 do 40° (Obrázek 10). Tento rozsah je plně využitelný i na testování eroze a stability svahu silničních náspů a zářezů.



Obrázek 10 3D model laboratorního DS po celkové rekonstrukci se samostatně a nezávisle sklopným erozním kontejnerem určeným pro vysoké sklony až do 40°.

Kontejner je navíc tepelně izolovaný a na jeho dně se nachází výkonný tepelný/chladicí okruh napojený na klimatizační jednotku, který umožňuje nastavení teploty půdního vzorku v rozmezí od -15 °C do $+40\text{ °C}$. Další modifikace byla provedena u zadešťovacího zařízení, které bylo v nové verzi zdvojeno. Systém kyvných trysek VeeJet na dvou sekcích byl zrekonstruován pomocí nového materiálu, avšak se zachováním původních rozměrů a parametrů. Nově však byl do prostoru mezi dvěma sekcemi přidán druhý zadešťovací systém sestavený pomocí pevných pulzních trysek WSQ 40 ovládaných solenoidovými ventily. V tomto uspořádání je možné simulovat i silné srážkové události s maximální intenzitou až 160 mm.hod^{-1} . Oba tyto systémy zadešťování jsou umístěny na pohyblivém roštu, který umožňuje nastavení výšky nad povrchem půdy v rozmezí od 2,0 do 2,8 m v 0,1 m kroku. Všechny tyto konstrukční vylepšení jsou doplněny sensory a čidly pro kontinuální monitorování tlaku vody, teploty, intenzity deště, infiltrace a vlhkosti půdy (Kavka et al., 2019). Po skončení rekonstrukce samotného zařízení DS následovala kompletní modernizace Vodohospodářského experimentálního centra, kde je toto zařízení umístěno. Z tohoto důvodu bylo po celý rok 2019 toto zařízení nepřístupné. Na začátku roku 2020 byla dodělána modernizace DS v podobě kompletního přemístění na jinou pozici ve Vodohospodářském experimentálním centru, které je vhodnější pro prováděné experimenty.

Zařízení bylo nově umístěno v úrovni podlaží se zajištěním snazší přístupnosti a snadnějšího měření srážko-odtokových parametrů a získávání fotogrammetrických dat.

Venkovní stabilní DS (stavební společnosti Strix s.r.o. v Jirkově)

Venkovní dešťový simulátor patří společnosti Strix s.r.o. a je umístěn v zázemí společnosti v Jirkově v Ústeckém kraji (Obrázek 11). Jedná se o jednoduchý dešťový simulátor tryskového typu a svým zatříděním ho lze považovat za laboratorní typ. Konstrukce simulátoru je tvořena lešenářskými trubkami, které jsou pevně připevněny přímo k experimentální ploše tvořené ocelovým kontejnerem o půdorysné ploše 4 x 2,2 m a výšce 1,6 m. Celkem jsou takto připraveny 3 jedinečné plochy se zadešťovacími zařízeními, které jsou umístěny ve 3 různých sklonech, které odpovídají běžně používaným sklonům při tvorbě silničních násypů a zářezů (1:1,5, 1:1,75 a 1:2,5). Samotné zadešťovací zařízení je na každé ploše tvořeno dvěma tryskami upevněnými na horní konstrukci a vytvářející požadované charakteristiky deště na základě tvaru trysek a nastaveném tlaku vody. Běžně využívanou intenzitou byla hodnota mezi 120 a 160 mm.hod⁻¹.



Obrázek 11 Venkovní stabilní dešťový simulátor tryskového typu na experimentální lokalitě společnosti Strix v Jirkově.

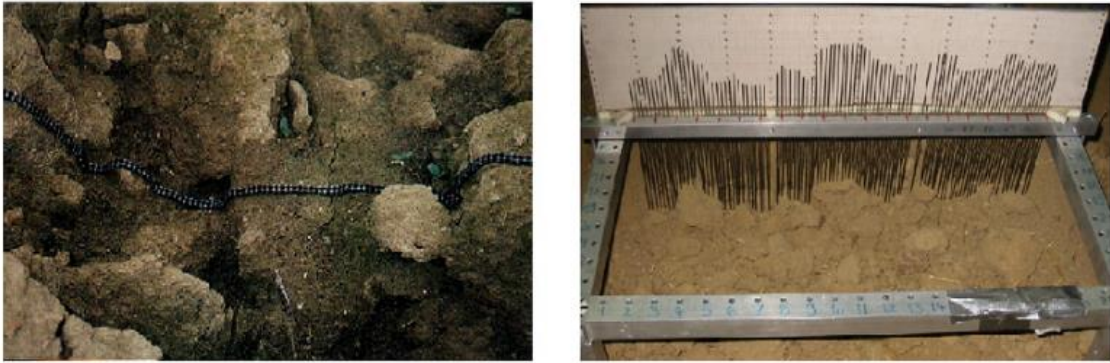
2.3.2 Nepřímé měření erozních procesů – monitoring erozních projevů

Oproti přímým měřením procesů eroze v reálném čase se v tomto případě jedná o následné nepřímé měření projevů eroze po skončení samotného erozního procesu. Pro tyto účely jsou vhodné metody, které dokáží zaznamenat změny, které nastaly v zájmovém území, ať už se jedná o celé povodí nebo pouze o menší erozní plochu. Ve všech případech je zapotřebí mít k dispozici data vztahující se k ploše před samotnou erozní událostí a po ní. Díky těmto dvěma sadám dat je poté možné analyzovat změny, které na daném území nastaly.

Tyto metody lze rozdělit podle několika různých kritérií podle způsobu získání dat na (**tučně** jsou vyznačeny varianty, které byly využity v případových studiích v kapitole 3 a 4):

- kontaktní (profilometry, reliéf metry, pin metry, roller chain)
- **bezkontaktní (DPZ)**

Kontaktní metody zaznamenávání tvaru povrchu půdy a s ním i projevů erozních procesů byly nejstaršími metodami, které se pro tyto účely používaly a jejichž počátky lze vysledovat do 50. let 20. století (Hudson, 1993). Mezi nevýhody kontaktních metod patří deformace, poničení či možnost ovlivnění měřeného povrchu pomocí měřicích zařízení či samotným přístupem na měřicí stanoviště, a to především při monitorování sypkých a suchých půd či při zaznamenávání velkoplošných erozních projevů. Další nevýhodou představuje časová a logistická náročnost spolu s omezeným rozlišením výsledných dat (Jester and Klik, 2005). Mezi tyto metody patří měření tvaru povrchu pomocí profilometrů, reliéf metrů a pin metrů (Kuipers, 1957), které v každém jednotlivém místě měří výškovou hodnotu povrchu ve zvoleném měřítku či zaznamenávají úbytek půdy (měření pomocí kolíků – tzv. „pinů“). Tyto metody byly využity například při měření povrchové půdní drsnosti v závislosti na použité agrotechnické operaci jakožto vstupní hodnoty pro využití v erozních modelech (Allmaras et al., 1966; Currence and Lovely, 1970). V té době již nebyly výjimkou ani automatizované profilometry, které byly schopny plně automatizovaného měření výškových bodů ve vymezeném prostoru. Například přístroj používaný Currence and Lovely (1971) byl schopen na ploše 203,2 x 152,4 cm provádět automatické odečty výšek v kroku po 2,54 cm s výškovou přesností 0,127 cm. Takto byl schopen odečíst celkem 4800 bodů v průběhu 3 až 4 hodin. Přehled reliéf metrů používaných od roku 1957 do 1985 ve studii od Zobeck and Onstad (1987) udává pro většinu podobných zařízení výškové rozlišení v rozsahu od 1 do 3 mm, což jsou hodnoty standardně získávané i pomocí moderních fotogrammetrických metod (Snapir et al., 2014). Další metodou představují řetězové měřicí zařízení (tzv. „roller chain“), které naopak fungují na principu změny délky řetězu při průchodu terénní nerovností oproti rovnému povrchu (Obrázek 12) (Saleh, 1993).



Obrázek 12 Ukázka kontaktních metod měření tvaru povrchu pomocí řetězu (roller chain) (snímek vlevo) a pomocí pin metrů (snímek vpravo) (převzato od Jester and Klik, 2005).

Dále lze aplikovat rozdělení, které se týká již pouze modernějších bezkontaktních metod DPZ (Žížala and Krása, 2016) dle následujících kritérií rozdělení podle:

- Technologie pořízení obrazu na konvenční (**fotografické**) a nekonvenční (skenery, radary, termokamery, lasery)
- Zdroje energie na aktivní (lasery) a pasivní (**odraz slunečního záření**)
- Druhu nosiče (satelitní, letecké, UAV, **pozemní**)
- Spektra využívaného elektromagnetického záření (**RGB**, multispektrální data, termosnímký)
- Metody zpracování dat na 2D (jednotlivé ploché snímky) a 3D (**fotogrammetrie**, laser skenery)

Z uvedeného rozdělení jednotlivých metod se obecně mezi nejpoužívanější bezkontaktní metody řadí konvenční fotografické metoda založená na snímání objektů a povrchů z různých úhlů, tzn. **fotogrammetrie**, ať už pozemní (terrestrial), standardní letecká nebo za využití bezpilotních prostředků (UAV). Druhý nejčastější typ bezkontaktní metody rekonstrukce objektů a povrchů je metoda založená na aktivním zdroji energie, většinou laserového paprsku, tzn. pomocí **laser skenerů**, neboli LiDAR (Hänsel et al., 2016). Tyto metody jsou stejně jako u fotogrammetrie běžně využívané jako pozemní (terrestrial laser scanning - TLS), letecké (airborne laser scanning - ALS) a v posledních letech s rozvojem technologie také již v kombinaci s UAV (Amon et al., 2015; Mandlbürger et al., 2020). Tyto dvě odlišné metody rekonstrukce povrchů jsou často porovnávány z hlediska přesnosti výsledných dat, vhodnosti použití dané technologie, ale i finanční, časové a materiální nákladnosti. Obecně platí, že fotogrammetrická metoda dokáže být dostatečně přesná s využitím běžné fotografické techniky, dosahuje velmi dobrého poměru mezi výsledky a náklady, avšak není obecně vhodná pro snímání složitých tvarů s lesklými povrchy, jako je například vegetace nebo povrchy tvořené vodní hladinou (Cook, 2017). Naopak metoda založená na laserovém skenování je finančně náročnější a také je složitější manipulace velkých laser skenerů v porovnání s běžnou fotografickou technikou. I proto bývá často měření také časově náročnější pro dosažení srovnatelného rozlišení (Eltner et al., 2018). Výhodou naopak představuje to, že nedochází k ovlivnění výsledků na základě různých

odrazivosti povrchů, a že lze detekovat i skryté povrchy (Nouwakpo et al., 2015). Pro obecné použití jsou v ČR běžně dostupná data leteckého laserového skenování pro celou Českou republiku pod označením digitální model reliéfu ČR 5. generace (DMR 5G) pro popis přirozeného terénu a digitální model povrchu ČR 1. generace (DMP 1G) pro popis terénu včetně budov a vegetace. Tato data byla pořízena při leteckých pracích v letech 2009 až 2013 a publikována od roku 2016. Výšková přesnost DMR 5G dosahuje střední chyby 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu. V případě DMP 1G dosahuje výšková přesnost chyby 0,4 m pro budovy a 0,7 m pro vegetaci jako je les a další prvky rostlinného pokryvu (ČÚZK: Geoportál, 2016). V případě nutnosti využití přesnějších a aktuálnějších dat je nutné využít samostatného či komerčního měření pomocí pozemního či leteckého skenování.

Na základě obecné definice o nutnosti mít dvě sady dat pro stav bez erozního projevu a s erozním projevem vyplývají z tohoto způsobu monitoringu výhody i nevýhody. Mezi výhody lze zařadit fakt, že aktuálně pořízená data lze díky archivním leteckým nebo satelitním snímkům porovnávat se stavem mnoho let zpátky. Tímto způsobem lze, s omezenou přesností a kvalitou dat, porovnávat změny využití území i odhadovat množství eroze půdy v průběhu vývoje krajiny (Báčová and Krása, 2016; Žížala et al., 2019). Nevýhoda spočívající v nutnosti mít zaznamenaný stav před erozní událostí je tedy spíše marginální a týká se spíše kvality a rozlišení, než proveditelnosti.

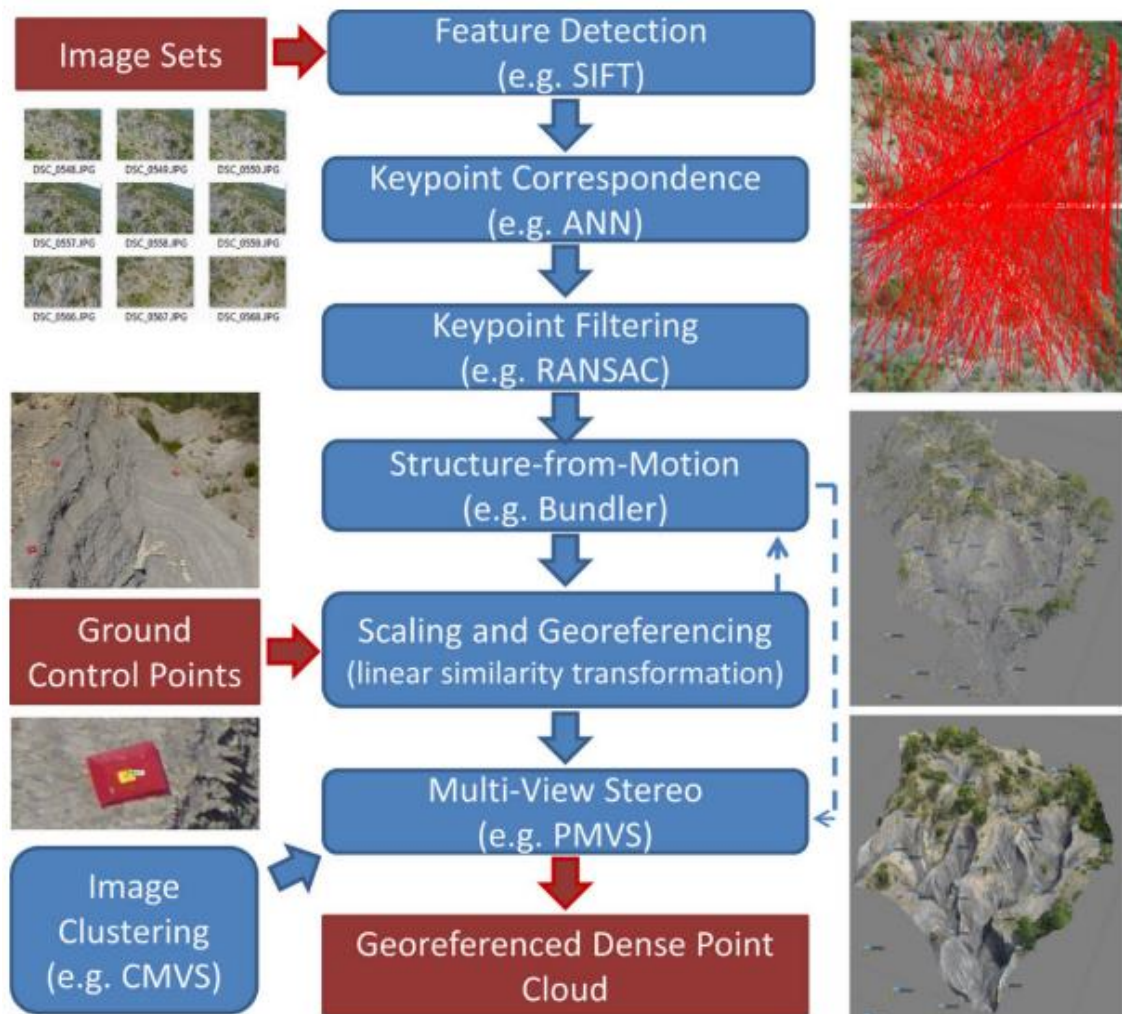
Detailně je popsána v následující kapitole 2.3.2.1 pouze **fotogrammetrická metoda SfM-MVS**, která byla využita při prováděných experimentech rámci případových studií v kapitole 3 a 4.

2.3.2.1 Fotogrammetrická metoda SfM-MVS

V rámci této disertační práce byla využita data získaná pomocí fotogrammetrické metody Structure from Motion – Multi-View Stereo (SfM-MVS). Fotogrammetrie obecně je obor, který se zabývá rekonstrukcí tvarů objektů pomocí fotografických snímků. Základ pojmu fotogrammetrie pochází z řeckých slov „photos“ znamenající světlo, „gramma“ znamenající záznam a „metron“ odpovídající slovu měřit (Žížala and Krása, 2016). Využití principů fotogrammetrie v souvislosti s výzkumem půdy se začalo rozvíjet již od 80. let, kdy byly prováděny první pokusy o měření drsnosti povrchu půdy pomocí stereofotogrammetrie (Peter Heng et al., 2010). Od té doby se dá hovořit o postupném vývoji fotogrammetrické metody při parametrizaci půdního povrchu a kvantifikaci povrchových změn. Ačkoliv se až do konce 90. let využívali především analogové fotografické přístroje (Warner, 1995), postupem času byly přibližně od roku 2000 s překotným vývojem digitálních fotoaparátů využívány právě tyto modernější přístroje (Abd Elbasit et al., 2009; Báčová et al., 2019a; Jester and Klik, 2005). Následný vývoj na poli fotoaparátů v mobilních telefonech znamenal, že i tyto přístroje se staly schopným nástrojem při vytváření digitálních modelů terénu (Prosdociami et al., 2017; Vinci et al., 2017; Wróżyński et al., 2017). Použitá technologie a fotografická technika má vliv na výslednou **přesnost** a **rozlišení** výsledných produktů. Z tohoto pohledu jsou důležitými faktory rozlišení snímače, ohnisková vzdálenost a optická kvalita objektivu, vzdálenost přístroje od snímaného povrchu a dále vlastnosti týkající se povrchu jako je například morfologická složitost povrchu, textura a odrazivost povrchu a v neposlední řadě také klimatické podmínky včetně osvětlení v době snímání.

Postup zpracování dat

SfM-MVS je fotogrammetrická metoda založená na průsekové fotogrametrii, pomocí které se provádí rekonstrukce objektů či povrchu na základě jeho snímání z různých úhlů a pozic. Postupnými kroky (Obrázek 13) pomocí společných kontrolních bodů identifikovaných na každém snímku (Feature Detection) dochází k jejich třídění, spojení a získání dat potřebných k určení vnitřní orientace snímků vůči poloze snímače (Keypoint Correspondence a Keypoint Filtering). Pomocí odhadu vnitřní orientace a polohy těchto bodů (Bundle adjustment) je vytvořeno finální bezrozměrné mračno 3D bodů (3D Point Cloud) reprezentující povrch objektu. Tento krok vytváří hlavní rozdíl mezi metodou SfM-MVS a tradiční fotogrammetrickou metodou, která vyžaduje samostatnou kalibraci parametrů vnitřní orientace pomocí předem známých souřadnic referenčních bodů viditelných na každém snímku (Smith et al., 2016). Toto mračno bodů je v dalším kroku referencováno pomocí minimálně 3 referenčních bodů (GCP) se souřadnicemi XYZ. Další výhodou metody SfM je ta, že není nutné, aby všechny snímky obsahovaly alespoň jeden referenční bod (James and Robson, 2012). Výsledné georeferencování lze provést i bez GCP za využití známé pozice a orientace kamery na základě měření RTK či PPK (viz dále). Posledním krokem zpracování snímků je aplikování algoritmu Multi-View Stereo (MVS), které dále zvýší hustotu výsledných bodů, čímž se eliminuje tvorba chybějících míst na výsledném digitálním modelu terénu či povrchu 3D modelu (Furukawa and Hernández, 2015; Furukawa and Ponce, 2010).



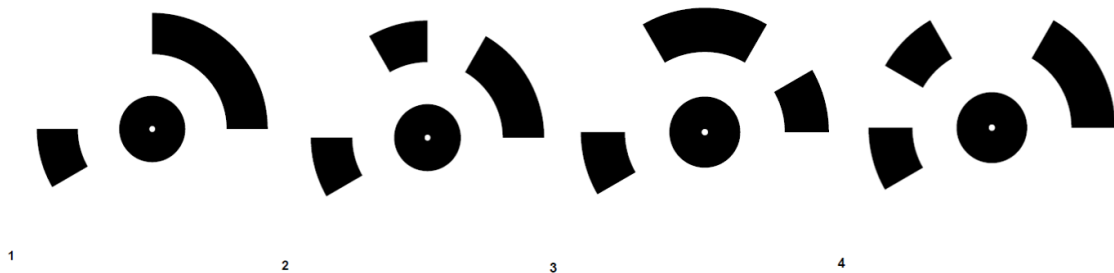
Obrázek 13 Obecný postup při zpracování snímků pomocí fotogrammetrické metody SfM-MVS. Červeně jsou znázorněny vstupní a výstupní data, modře jsou znázorněny procesní kroky. (Převzato od Smith et al., 2016).

Přesnost a rozlišení fotogrammetrických dat

Popisované kroky jsou obecným postup, které v principu využívají všechny softwarové programy pracující s metodou SfM-MVS. Na základě finálního produktu dle Obrázek 13 (Dense Point Cloud) se nejčastěji generují digitální modely terénu (DEM) a ortofoto snímky, se kterými se následně pracuje v dalších analýzách. Pro zajištění dostatečné podrobnosti neboli **rozlišení** je důležitým parametrem především rozlišení použitého snímače, ohnisková vzdálenost objektivu a vzdálenost snímání. Hodnota rozlišení se nejčastěji udává jako délka na zemském povrchu, kterou reprezentuje 1 pixel na výsledném digitálním produktu a označuje se jako GSD (Ground Sampling Distance). Například ortofoto ČR poskytované ČÚZK dosahuje rozlišení 20 cm na pixel (ČÚZK: Geoportál, 2016), což je běžná hodnota při využití leteckého snímání, ale i satelitních dat (Turner et al., 2012). Při využití moderních metod UAV lze dosáhnout vysokého rozlišení kromě možností ovlivnění snímačem především podle výšky letu. Běžné hodnoty výsledného rozlišení se díky tomu zvýšily z řádově desítek centimetrů na jednotky centimetrů GSD. Od počátků využití UAV, kdy bylo běžně dosahováno rozlišení okolo 20 cm (Johnson et al., 2003) bylo postupným

vývojem běžně dosahováno hodnot GSD například okolo 1,6 cm při výšce náletu 160 m (Liu et al., 2018) až k přibližně 1 cm na pixel (Turner et al., 2012) či dokonce pod centimetr při nízkých výškách náletu (Mancini et al., 2013). Při monitoringu s využitím pozemní fotogrammetrie se lze dostat na řádově ještě vyšší, tzv. sub-milimetrové rozlišení. Například výsledné digitální modely terénu při experimentech prováděné týmem v čele Hänsel et al. (2016) dosahovaly hodnoty GSD až 0,4 mm při vzdálenosti snímání 1,5 m. Jakýmsi standardem při pozemní fotogrammetrie je rozlišení 1 mm, kterého je dosahováno poměrně již dlouhou dobu, a to při využití fotogrammetrie i laser skenerů (Rieke-Zapp et al., 2001).

Pro zajištění **přesnosti** se využívají dvě metody. Nejčastěji se používají vlíčovací body v podobě referenčních terčů neboli GCP (Ground Control Points), (Obrázek 14), které jsou součástí snímané plochy. U letecké či UAV fotogrammetrie se nejčastěji jedná o samostatné terče, které se umísťují do plochy a následně se pomocí totální stanice nebo častěji pomocí stanic satelitních navigačních systémů GNSS (Global Navigation Satellite Systems) zaměřuje jejich poloha v odpovídajícím souřadnicovém systému a s odpovídající přesností vůči požadované výsledné přesnosti DEM (Polidori and El Hage, 2020). Stejně tak to lze provést i u pozemní fotogrammetrie, avšak v případě snímání malých ploch lze využít referenčních terčů umístěných na tuhé a pevné konstrukci s přesně vymezeným lokálním souřadnicovým systémem. Tento přístup byl využit při experimentech v kapitole 3 a 4.



Obrázek 14 Ukázka použitých referenčních vlíčovacích terčů (GCP) vygenerovaných softwarem Agisoft Metashape použitých v rámci vytvořené referencování jednotlivých experimentálních ploch.

Dalšími způsoby referencování snímků je využití metody RTK (Real-Time Kinematic) a PPK (Post-Processed Kinematic), které se však využívají pouze při využití modernějších typů UAV či modernějších totálních a GNSS stanic. Při RTK je využívána pozemní GNSS stanice pro výpočet orientace snímků v reálném čase, zatímco u PPK je tento proces proveden až při vyhodnocování dat po ukončení letu a měření. Obě tyto metody umožňují monitoring rozlehlých území s časovou úsporou získanou na úkor rozmístování a zaměřování GCP, přičemž lze dosáhnout stejné nebo i větší přesnosti ve srovnání s metodou využívající GCP (Shi and Chen, 2017; Tomašík et al., 2019). Menší přesnost této metody může nastat v případě geomorfologicky složitějšího území s většími výškovými rozdíly, kde může docházet k výpadkům spojení s GNSS stanicí. Avšak i tato problematika se řeší pomocí plánovacích softwarů, které dokáží odhadnout výslednou kvalitu dat na základě charakteristiky snímaného území (Cledat et al., 2020).



Obrázek 15 Schématické znázornění různých způsobů georeferencování dat získaných pomocí UAV: GCP - metoda využívající referenční zaměřené vlíčovací body (nejběžnější způsob i u pozemní fotogrammetrii) a metody RTK a PPK využitelné pro UAV fotogrammetrii (převzato od Blake, 2020).

Z hlediska hodnocení kvality přesnosti je nejběžnějším ukazatelem střední chyba RMSE (Root Mean Square Error), která popisuje odchylky vlíčovacích bodů GCP nebo kontrolních spojovacích bodů v ose x, y a z. Tyto chyby by měly být za všech okolností co nejnižší a v každém případě by neměly být násobně vyšší než je výsledné rozlišení GSD. Dle Sanz-Ablanedo et al. (2018) se v některých případech ve studiích vyskytují velké rozdíly mezi výsledným rozlišením a dosaženou přesností vyjádřenou poměrem RMSE vůči GSD. Tento poměr se u některých studií pohybuje například až k hodnotě 57, což značí vysoké rozlišení v kombinaci s velmi nízkou polohovou přesností (Mian et al., 2016). Optimální hodnota tohoto poměru je přitom okolo 1–2. Rozdíly jsou běžné také mezi odchylkou v ose xy (polohová přesnost) a v ose z (výšková přesnost), u které bývá odchylka často vyšší. Obecně lze zvýšit celkovou přesnost výsledného modelu pomocí vhodného počtu správně umístěných GCP. Dle Báčová (2018), která prováděla analýzu vlivu počtu referenčních vlíčovacích bodů na výsledné odchylky RMSE, je nejvhodnějším počtem 8-14 referenčních terčů. Nicméně je nutno dodat, že vždy záleží na velikosti snímání plochy, výšce snímání, geomorfologické složitosti, rozmístění bodů v ploše a odchylek u jednotlivých bodů. Právě manuální korekce v podobě vyřazení bodů s nejvyšší odchylkou podstatně zvýší výslednou přesnost. Dle ostatních studií, které zkoumaly vliv počtu a rozmístění referenčních vlíčovacích bodů vyplynulo, že obecně je za minimální počet nutný pro dostatečně přesné výsledky považováno alespoň 5 vlíčovacích bodů, v ideálním případě však 7-8 (Agüera-Vega et al., 2017; Carrivick et al., 2016; Tonkin and Midgley, 2016). Důležité pravidlo, které je potřeba dodržovat vždy při jakémkoliv počtu vlíčovacích bodů je to, že všechny body potřeba rozmístit rovnoměrně do celé snímání plochy a tvořit shluky těchto bodů v jedné části. Dále je důležité, aby byly body rozmístěny jak po obvodu plochy, tak i v jejím středu (Báčová, 2018). Podobná pravidla je potřeba dodržovat i při samotném snímání, kdy je ideálním předpokladem dosáhnout překryvu sousedních snímků minimálně z 80 % a zároveň, aby se úhel snímání mezi sousedními snímky nelišil o více než 25 - 30°, tzn. byl v ideálním případě v rozmezí 10 - 20° (Smith et al., 2016).

Všechna tato pravidla byla brána v potaz při vytváření referenčních systémů v této práci. V případě studie kapkové eroze v kapitole 3 bylo použito 16 referenčních bodů rovnoměrně rozmístěných po obvodu vzorku s pevně daným souřadnicovým systémem. Přesnost a stálost toho souřadnicového systému byla zajištěna vygenerováním a tiskem těchto terčů v jednom kuse na teplotně a mechanicky stabilní materiál. V případě studie zaměřené na střední měřítko erozních procesů v kapitole 4 bylo v případě erozních ploch na lokalitě Jirkov použito 11 referenčních bodů umístěných po obvodu i ve středu plochy a v případě experimentální plochy na laboratorním DS bylo použito 24 referenčních terčů rozmístěných pravidelně po obvodu v předem vytvořeném lokálním souřadnicovém systému.

Softwary

V dnešní době je na výběr široká škála softwarů pro zpracování fotogrammetrických dat metodou SfM-MVS od komerčních po open-source až po webové služby provádějící veškeré zpracování v cloudovém rozhraní. Nejpoužívanějším komerčním softwarem pro zpracování snímků je v současné době Agisoft Metashape (dříve pod názvem Agisoft Photoscan) (Agisoft LLC, 2018), který nabízí uživatelsky přívětivé prostředí, vysoký výkon a velké možnosti nastavení. Z tohoto důvodu je tento software jedním z nejčastěji využívaným v erozních i jiných obdobných studiích (Cândido, 2019; Eltner et al., 2015; Ngadiman et al., 2018; Prosdociami et al., 2017; Smith et al., 2016). Na vzestupu je také komerční software Pix4D Mapper, který spolu s dalšími aplikacemi (Pix4Dfields, Pix4Dcapture, Pix4Dcloud) nabízí komplexní řešení pro pořizování, zpracovávání a analyzování dat v oblasti zemědělství, stavebnictví, strojíního inženýrství a dalších příbuzných oborů včetně studií eroze půdy (Meinen and Robinson, 2020; Pricope et al., 2019). Eos PhotoModeler je také jeden z komerčně často využívaných softwarů, který dokáže kompletně zpracovávat fotogrammetrická data a je využíván ve studiích zaměřených na erozi půdy a změny krajiny (Bauer et al., 2014; Dunn, 2009).

Kromě výše zmíněných komerčních softwarů je na výběr i široké spektrum volně dostupných open source programů (Eltner et al., 2016). VisuaSFM je jedním z nejčastěji využívaných open-source nástrojů, který využívá dva nástroje – SiftGPU pro kalibraci snímků a výpočet vnitřní orientace a PMVS pro následnou 3D rekonstrukci. Výstup však končí u 3D mračna bodů, které je dále nutné zpracovat v dalším softwaru (Szabó et al., 2016). Na podobném principu pracují i další open-source softwary. Python Photogrammetry Toolbox (PPT GUI) je nástroj, který pomocí skriptů kombinuje samostatný open-source software Bundler pro kalibraci a opět PMVS pro následnou rekonstrukci 3D modelu. Na podobném principu pracuje i další open-source nástroj COLMAP a Regard3D. Na základě srovnání těchto open-source softwarů lze říci, že všechny tyto softwary jsou využitelné a srovnatelné s komerčními softwary, avšak za cenu složitějšího řešení a nastavení, které si vyžaduje vždy specifické úpravy na základě prováděné úlohy (Rahaman and Champion, 2019). Specificky zaměřeným open-source softwarem pro data z UAV je Open Drone Map (ODM), který pokrývá všechny výše zmíněné procesní kroky včetně výsledného generování digitálních modelů terénu a ortofoto snímků na základě nereferecovaných snímků (Park et al., 2016).

Vztah fotogrammetrických dat k erozi půdy

Pomocí bezkontaktní fotogrammetrické metody SfM-MVS se v dnešní době vyhodnocují v podstatě stejná data jako v dřívějších dobách pomocí kontaktních metod. Odlišný je pouze způsob získávání těchto dat, přesnost, časová náročnost a kvalita těchto dat. V rámci této práce bylo prováděna analýza dat na základě dvou typů získaných výsledků. Jedním z nejčastěji analyzovaných výsledků na sledovaném území či ploše je **změna objemu**. Ta může u srážko-odtokových experimentů dosahovat kladných hodnot v případě sedimentace půdy (zvýšení povrchu, tzn. zvětšení objemu) či záporných hodnot v případě eroze půdy (snížení povrchu, tzn. snížení objemu). Výpočet změny objemu půdního vzorku se nejčastěji provádí pomocí prostého rozdílu DEM před sledovanou událostí (DEM₁) a po sledované události (DEM₂), (Rovnice 1). V případě erozních experimentů je touto sledovanou událostí nejčastěji srážková událost. Odečtem DEM vzniká rozdílová model (Digital Elevation Model of Difference – DoD) (Williams, 2012), který v sobě zahrnuje výškové rozdíly obou DEM ve stejném měřítku jako vstupní data.

$$DoD = DEM_2 - DEM_1 \quad (1)$$

Výsledný objem tvoří průměrná hodnota rozdílového modelu vynásobená plochou, pro kterou byl tento rozdíl počítán. Tento obecný postup se uplatňuje ve většině erozních studií zabývajících se analýzou DEM při erozních experimentech (Bačová et al., 2019b; Eltner et al., 2013; Grims et al., 2014; Hänsel et al., 2016) či souvisejících oborech jako je například geomorfologie (Lane et al., 2003).

Druhým typem dat, která vycházejí z analýzy DEM jsou data vztahující se k povrchu z hlediska jeho morfologické členitosti, neboli **drsnosti povrchu půdy**. Popisu drsnosti půdy se věnovali již nejstarší studie pracující s kontaktními metodami uvedenými v kapitole 2.3.2 výše. Drsnosti povrchu mnohé studie přisuzují velký vliv, který ovlivňuje porozitu půd a tím celkovou infiltrační schopnost a následně i množství odtoku a eroze při srážkových událostech (Zobeck and Onstad, 1987). Pomocí fotogrammetrické metody se tato data získávají a analyzují až do dnešní doby za účelem jejich využití v erozních modelech. Samotné drsnosti půdního povrchu se věnuje mnoho studií, ať již za účelem prostého popisu a získání hodnot na základě různé agrotechnické úpravy a porovnání různých indexů drsnosti (Allmaras et al., 1966; Bauer et al., 2015; Currence and Lovely, 1970) či odvozením vztahů pro množství odtoku a ztráty půdy (Bertuzzi et al., 1990; Vinci et al., 2020). V literatuře se často objevuje vyjádření drsnosti povrchu pomocí různých indexů drsnosti. Ty se liší podle způsobu měření a podle způsobu výpočtu získaných dat. Nejstarší studie zabývajících se drsností půdy pracovaly s jedním indexem drsnosti R, který se počítal jako 100-násobek dekadického logaritmu směrodatné odchylky výšek určených pomocí reliéf metru (Kuipers, 1957). Od té doby se začaly objevovat studie, které vyjadřovaly drsnosti povrchu pomocí mnoha dalších indexů. Allmaras et al., (1966) zavedl index náhodné drsnosti, který odděluje složku, která se vztahuje pouze ke sklonu svahu a k drsnosti vytvořené agrotechnickou úpravou. Currence and Lovely, (1970) porovnával již celkem 5 různých indexů. Mezi nimi je index na základě sklonu jednotlivých bodových odečtů výšek (RM), (na základě nepublikované disertační práce Luttrell, D.H., 1963), upravený index na základě výpočtu od Allmaras et al., (1966), (RL), jednoduchý index vyjádřený jako směrodatná odchylka neupravených výšek (RS), index upravený podle umělé roviny (plane of best fit) pro eliminaci efektu sklonu svahu (RR)

a poslední index taktéž eliminující vliv sklonu v podélném i příčném směru (RC). Ačkoliv další studie pracovaly se stejnými indexy, začaly se objevovat rozdíly v jejich označení. Například studie popisující jednotlivé drsnosti indexu od Zobeck and Onstad (1987), popisuje jako základní vyjádření drsnosti index RR, který však byl ve studii od Currence and Lovely (1970) vyjádřen jako RL. Tyto rozpory v označení indexů vedly k velmi těžké orientaci při porovnávání hodnot těchto indexů v různých studiích, na což upozorňovaly mnohé další studie zabývající se porovnáním drsností půdy (Hansen et al., 1999; Planchon et al., 2001). Například Hansen et al., (1999) popisoval tento problém takto:

„Many authors claim to calculate RR according to Allmaras et al. (1966) or Burwell et al. (1963). However, it seems that RR has often been computed as the standard deviation among height measurements, that the height measurements have not been converted to natural logarithms or that the adjustments for slope, unusually high or low values, or oriented roughness have not been made.“

V roce 1986 byly zavedeny indexy LS (Limiting Slope) a LD (Limiting Elevation Difference) založené na plošné variabilitě (Linden and van Doren, 1986). Jako další indexy byl zaveden a používán index TB (tortuosity index), který je založen na sklonech jednotlivých pixelů jako poměr celkové plochy a průmětu (Helming, 1992; Taconet and Ciarletti, 2007). V některých studiích bylo naopak pracováno s drsností půdy pouze na základě její zrnitostní struktury (Meshkat et al., 2019; Römkens et al., 2002), což se dá považovat za zcela opačný přístup nezohledňující reálné podmínky se zahrnutím tvorby a rozpadu půdních agregátů.

Nicméně v rámci této disertační práce bylo pracováno s drsností povrchu pouze jako s doplňujícím parametrem objemových změn. S ohledem zaměření práce na porovnání různých metod měření eroze půdy a s ohledem na obtížnou porovnatelnost výsledných hodnot, bylo v této disertační práci pracováno pouze s jedním vyjádřením drsnosti. V této práci je drsnost povrchu vyjádřena na základě výpočtu směrodatné odchylky výšek jednotlivých bodů – pixelů DEM (v této práci označeno jako DEM_std). Tento výpočet a přístup odpovídá jednoduchému a nezaměnitelnému vyjádření drsnosti pomocí indexu RS počítaného dle Currence and Lovely (1970) a běžně používaného i v jiných studiích, jako například od Eltner et al., (2018). Index založený pouze na směrodatné odchylce výšek DEM byl využit i při tvorbě softwaru na výpočet různých indexů drsnosti (SFM_r), kde byl považován dle Gilliot et al., (2017) za jeden nejrepresentativnějších.

3 Monitoring kapkové eroze (experimentální plocha < 1 m²)

Tato studie zabývající se procesem kapkové eroze (splash erosion) byla součástí řešení projektu GF17-33751L s názvem „Vliv kinetické energie deště na uvolňování a transport půdních částic“. Tento projekt byl řešen ve spolupráci s rakouskými institucemi, univerzitou BOKU ve Vídni a institutem BAW v Petzenkirchenu. V rámci tohoto projektu bylo prováděno simultánní měření na třech lokalitách, v rámci kterého byly publikovány impaktované články s různým zaměřením. Jedna z publikací se věnovala vývoji a popisu měřicího zařízení, tzv. splash cupu, který byl v rámci projektu vyvinut a používán (Zumr et al., 2020). Dále byl zkoumán vliv různých měřicích zařízení pro monitorování parametrů deště – disdrometrů, používaných na jednotlivých pracovištích, které byly v rámci experimentu porovnány a byl odvozen vztah pro zajištění validovaných dat ze všech stanovišť (Johannsen et al., 2020b, 2020a). Další dva impaktované články byly publikovány v rámci analýzy vlivu počáteční vlhkosti vzorku na množství kapkové eroze (Zambon et al., 2020a) a dále analýzy vlivu parametrů deště na kapkovou erozi (Zambon et al., 2020b). V neposlední řadě byl publikován článek autora této disertační práce s názvem „SfM-MVS Photogrammetry in Splash Erosion Monitoring under Natural Rainfall“, který ve stručnější formě shrnuje analýzy popisované dále v této kapitole, týkající se měření množství kapkové eroze s využitím bezkontaktního měření pomocí fotogrammetrie (Laburda et al., 2021).

3.1 Motivace experimentu

Kapková eroze je prvotní fází dešťové eroze půdy, při které dochází k přímé interakci dešťových kapek s půdním povrchem, čímž dochází k rozbíjení půdních agregátů a přemísťování půdních částic do okolí (Fernández-Raga et al., 2017). Tato vzdálenost může v závislosti na charakteristice deště a půdních vlastnostech dosahovat až 5 metrů v horizontálním směru (Erpul et al., 2009). Tento počáteční proces eroze tak otevírá cestu k mnohem intenzivnější části vodní eroze pomocí odnosu půdních částic povrchovým odtokem. Při tomto procesu navíc dochází ke změnám vlhkosti půdy, čímž se mění také objemová hmotnost, dochází celkově k objemovým změnám, mění se drsnost povrchu postupným zahlazováním a zmenšováním půdních agregátů. Dle principu působení kapkové eroze je zřejmé, že nejnáchylnější půdou na tento typ eroze je půda holá, tzv. úhor. Dále záleží na pokryvnosti povrchu vegetací či plodinami či agrotechnickou úpravou půdy (Brant et al., 2017). Motivací tohoto typu experimentu bylo to, že ačkoliv existuje mnoho studií zabývajících se erozí půdy měřenou pomocí konvenčních metod a zároveň i pomocí moderních bezkontaktních metod jako je fotogrammetrie (Eltner et al., 2017; Grims et al., 2014; Ryzak et al., 2015), nevyskytuje se žádná studie, která by se pomocí fotogrammetrie zabývala pouze kapkovou erozí v takovémto rozsahu.



Obrázek 16 Typická ukázka kapkové eroze v laboratorních podmínkách při experimentech na halovém DS ČVUT v Praze.

3.2 Popis a metody experimentu

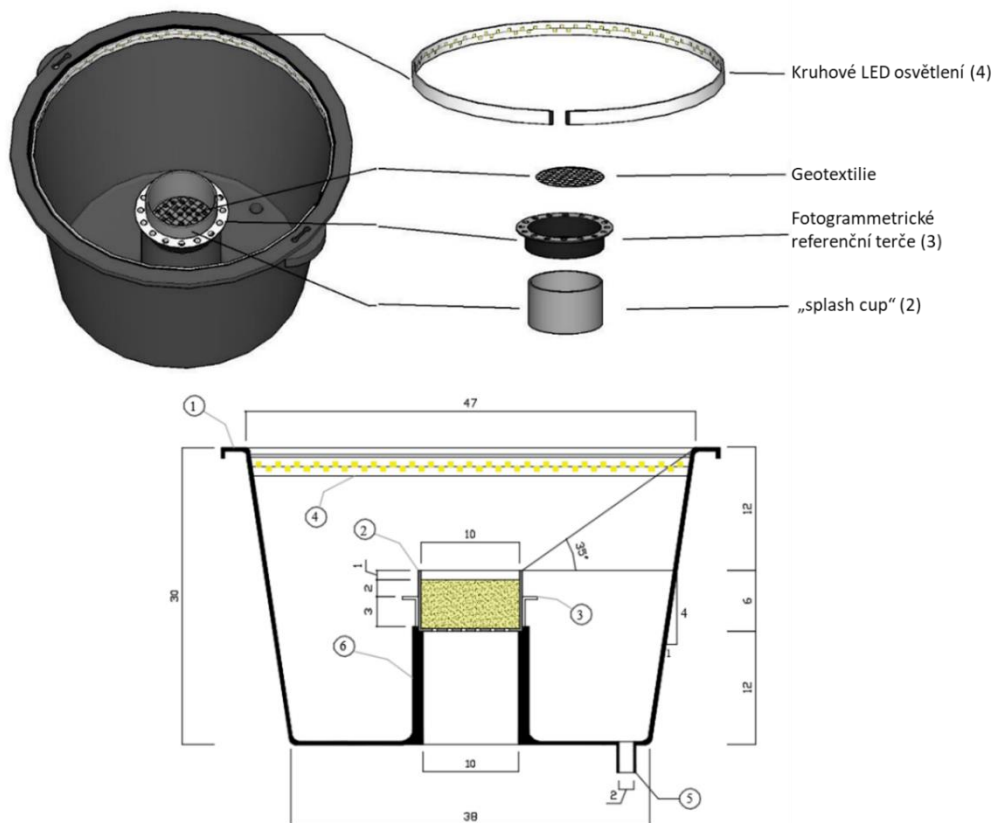
Pro testování kapkové (splash) eroze byl vytvořen experiment, který zahrnoval testování 3 různých půd na 3 různých venkovních lokalitách s částečným ověřením pomocí laboratorního DS. Testování bylo prováděno v průběhu 3 let od roku 2017 do. Princip experimentu spočíval ve vystavování půdních vzorků umístěných v tzv. splash cupech (SC) působení přirozeného i umělého deště. Při každém experiment byla každá varianta půdy testována vždy ve 3 replikacích. Při experimentech byla monitorována intenzita deště a kinetická energie. Po skončení experimentu byl sbírán erodovaný materiál ze sběrné nádoby a následně bylo vyhodnocováno jeho množství. Před experimentem a po experimentu byl povrch vzorku fotogrammetricky snímán pro následnou analýzu změn povrchu v závislosti na kapkové erozi.

3.2.1 Konstrukce „splash cupu“ (SC)

Provedení experimentu bylo založeno na vývoji sběrné nádoby s centrálně umístěným vzorkem v SC (Obrázek 17). Tato celá nádoba byla založena na originálním řešení od Morgan (1981), avšak upravena tak, aby ji bylo možné zkonstruovat z běžně dostupných produktů. Tímto způsobem byl vytvořen plastový SC se samotným půdním vzorkem s tvarem válce o výšce 5 cm a průměru 10 cm s perforovaným dnem. Na dně byla umístěna geotextilie, aby docházelo pouze k výtoku vody a nebyl ztracen půdní vzorek. SC byl umístěn uprostřed větší sběrné kruhové plastové nádoby ve výšce 12 cm nade dnem. Tato sběrná nádoba měla průměr horní kruhové hrany 47 cm. Hrana SC byla umístěna níže než hrana sběrné nádoby a svírala s ní úhel 35°. Tato konstrukce zajišťovala sběr erodovaného materiálu z uprostřed umístěného SC v rozmezí 360° (Zumr et al., 2020). Ačkoliv je SC hluboký 5 cm, půdní vzorek se plnil pouze do výšky 4 cm tak, aby nedocházelo k přelití SC v případě plného nasycení vzorku, kterému mělo zamezovat perforované dno. Záchytný objem sběrné nádoby byl určen pouze pro zachycení půdních částic v důsledku kapkové eroze.

MODELOVÁNÍ EROZE PŮDY S VYUŽITÍM DAT PODROBNÉHO MONITORINGU

Kapitola 3: Monitoring kapkové eroze (experimentální plocha < 1 m²)



Obrázek 17 Schéma součástí monitorovacího zařízení pro sledování kapkové eroze (rozměry v centimetrech). Součásti zařízení: 1 – sběrná nádoba, 2 – „splash cup“ (SC), 3 – fotogrammetrické referenční terče, 4 – kruhové LED osvětlení, 5 – výtoková trubice pro odtok erodovaného materiálu do transportní nádoby, 6 – držák SC (převzato od Zumr et al., 2020).

3.2.2 Příprava půdních vzorků

Experiment probíhal celkem na třech vzorcích půd, jejichž vlastnosti jsou uvedeny v Tabulka 1. Půdní vzorky se liší svými fyzikálními i chemickými vlastnostmi, které byly určeny v certifikované laboratoři v Rakousku (Zambon et al., 2020a). Půdní vzorky byly odebrány v první polovině roku 2017 v rakouském Zwerbachu poblíž Petzenkirchenu (půda A) (48°8'22"N, 15°14'46"E), rakouském Mistelbachu (půda B) (48°35'3"N, 16°35'16"E), a poblíž obce Býkovice v České republice (půda C) (49°45'41.5"N, 14°50'20.0"E). Ve všech případech byl půdní vzorek odebrán ze svrchní obdělávané vrstvy půdy (10 cm) ve stavu před setím. Půda byla na hrubo přeseta skrze 10 mm síta a každý typ půdy byl převezen na každé ze tří pracovišť (Tabulka 2).

Standardní příprava vzorku zahrnovala naplnění SC přibližně 10 mm pod horní okraj a případné odstranění velkých kusů organických zbytků či hornin. Dbáno bylo na to, aby vzorek nebyl příliš zhutnělý a aby odpovídal přirozeným podmínkám stavu před setím. Takto byla připravena převážná většina všech vzorků pro testování s přirozenými srážkami. Celkem bylo tímto způsobem provedeno 75 experimentů, přičemž byly vždy testovány 3 půdní vzorky po 3 replikacích, což znamenalo 675 vzorků. Při 40 experimentech bylo navíc testováno naplnění SC až po samotný okraj vždy pro jeden typ půdy, avšak také při 3 replikacích. Toto testování přidalo dalších 120 vzorků, čímž se celkový počet testovaných vzorků zvýšil na výsledných 795

v případě venkovních experimentů. Dodatečné provedení laboratorních experimentů pomocí laboratorního DS (viz kapitola 2.3.1.2) znamenalo provedení dalších 5 experimentů s jedním typem půdy (půda C – Býkovice). V případě laboratorních experimentů však byla metodika odlišná než v případě venkovních experimentů. Při každém laboratorním experimentu bylo testováno vždy 11 vzorků. Každý vzorek byl umístěn v jiné části zadešťované plochy, čímž byly simulovány různé parametry deště. Celkových 5 laboratorních experimentů bylo prováděno při stejném nastavení dešťového simulátoru, a proto je těchto 5 simulací možné považovat zároveň za 5 replikací pro těchto 11 srážkových událostí. Celkový počet připravených a vyhodnocených vzorků byl tudíž v tomto případě 55.

Každý jednotlivý experiment probíhal tak, že se takto připravené vzorky v SC usadily doprostřed sběrné nádoby a nechal se na ně působit přirozený déšť ve venkovních experimentálních lokalitách anebo umělý déšť v laboratoři pomocí dešťového simulátoru. Po skončení srážkové události byla sběrná nádoba vymyta do přepravní nádoby, čímž se získal vzorek, který obsahoval půdní smyv z kapkové eroze. Tyto vzorky byly laboratorně zpracovány filtrační skrz filtrační papír s velikostí filtrace 6 μm a dále byly sušeny po dobu 24 hodin při teplotě 40°C. Poté byly vzorky zváženy, byla odečtena hmotnost předem zváženého filtračního papíru, a tím byla získána hmotnost půdy z kapkové eroze. Tato hodnota v gramech, případně přepočítána pomocí objemové hmotnosti na objem v centimetrech krychlových, byla dále porovnávána ve všech případech s fotogrammetricky získanou hodnotou ztráty půdy (viz kapitola 3.3.5).

Tabulka 1 Fyzikální a chemické parametry testovaných půd.

Půda	Lokalita	Jíl %	Prach %	Písek %	Půdní textura -	AS %	CaCO ₃ %	pH -	TOC %	Objem. hm. g.cm ⁻³
A	AT - Petzenkirchen	25,8	60,2	14,0	prachovitá hlína	41,4	3,90	7,50	1,50	1,09
B	AT - Mistelbach	18,4	70,4	11,2	prachovitá hlína	18,3	10,30	8,20	1,60	1,01
C	CZ - Býkovice	12,1	46,3	41,6	hlinitý písek	63,3	< 0,92	6,90	1,70	1,26

3.2.3 Monitoring deště

Při experimentech byly monitorovány srážkové úhrny pomocí srážkoměrů, charakteristiky deště pomocí disdrometrů, teplota vzduchu pomocí teploměrů a částečně také rychlost větru pomocí anemometru. Nejdůležitější byly v tomto ohledu srážkoměry, které byly sledovány v online přenosu, neboť podle nich se rozhodovalo o tom, zda nastala a zda již skončila srážková událost. Jedna srážková událost byla charakterizována podle celkového úhrnu většího než 5 mm nebo podle akumulovaného úhrnu většího než 2,5 mm během 15 minut (Zambon et al., 2020b). Disdrometry byly využity pro popis charakteristik deště z pohledu velikosti, počtu a rozložení dešťových kapek a jejich kinetické energie. Nicméně disdrometry nebyly přítomny po celou dobu na všech stanovištích, a proto byly v některých případech chybějící hodnoty dopočteny podle typu disdrometru na základě odvozených regresních rovnic pro dané lokality a dané přístroje (Johannsen et al., 2020a). Přehled základních parametrů popisující jednotlivá experimentální

MODELOVÁNÍ EROZE PŮDY S VYUŽITÍM DAT PODROBNÉHO MONITORINGU

Kapitola 3: Monitoring kapkové eroze (experimentální plocha < 1 m²)

stanoviště je uveden v následující Tabulka 2. Na základě uvedených podmínek pro odlišení jedné srážkové události byl celkový počet zaznamenaných a vyhodnocených událostí 75, tj. 25 v Petzenkirchenu, 23 v Mistelbachu a 27 v Praze.

Tabulka 2 Charakteristické hodnoty experimentálních lokalit dle dlouhodobých pozorování (Harris et al., 2020) a naměřených dat v průběhu výzkumu. PG značí fotogrammetrické vyhodnocení a KE značí kinetickou energii.*

Experimentální lokality	Dlouhodobé průměry (1971-2016*)		Zaznamenané parametry deště v rámci projektu (2017-2019)				
	Průměrná roční teplota	Průměrné množství srážek	Počet hodnocených událostí (PG)	Celkový úhrn	Celková KE	Max. srážkový úhrn v jedné události	Max. KE v jedné události
	°C	mm	#	mm	J.m ⁻²	mm	J.m ⁻²
AT - Petzenkirchen	9,0	770,0	25	410	7433	41	768
AT - Mistelbach	9,8	530,6	23	604	1645	100	2713
CZ - Praha	9,1	506,6	27	600	8932	121	2014

3.2.4 Fotogrammetrické měření

Mimo konvenční způsob získání erozních dat pomocí přímého sběru erodovaného materiálu bylo prováděno systematické měření erozních projevů pomocí fotogrammetrické metody SfM-MVS. Pro potřeby experimentálního měření byla zvolena jednotná fotografická technika napříč všemi pracovišti, aby byla zajištěna jednotná kvalita získaných dat. Na všech stanovištích byl používán bezzrcadlový fotoaparát Sony A6000 s objektivem Sony 16-50 mm nastaveným na nejširší ohnisko 16 mm, respektive 24 mm v přepočtu na kinofilm nebo tzv. „full-frame“. Postup fotogrammetrické sběru dat sestával z nasnímání půdního vzorku z několika pozic. Jedno snímání obsahovalo vždy 12 snímků z různých pozic. Vždy se jednalo o 8 šikmých snímků rovnoměrně okolo celého vzorku pod úhlem přibližně 60° a dále dva na sebe kolmé stereofotopáry se vzdáleností mezi sebou přibližně 10 cm z pozice ze shora. Vzdálenost fotoaparátu a půdního vzorku byly při každé pozici přibližně 50 cm. Pozice jsou názorně zobrazeny na Obrázek 18a. Všechny vzorky byly tímto způsobem snímány po nasypání do SC a umístění do sběrné nádoby a ještě před srážkovou událostí (Dataset 1) a podruhé stejným způsobem po srážkové události (Dataset 2). Tento způsob získávání fotogrammetrických dat znamenal zdvojnásobení počtu fotogrammetrických měření oproti počtu standardních měření pomocí konvenčních metod. Celkový počet 795 experimentů znamenal v případě fotogrammetrického zpracování výsledných 1590 měření při venkovních experimentech a 110 fotogrammetrických měření při laboratorních experimentech. Vzhledem k počtu 12 snímků při jednom měření bylo tímto způsobem pořízeno přibližně 20 tisíc snímků o celkové velikosti přibližně 182 GB surových dat.

Další nezbytnou výbavou pro zajištění kvality a přesnosti fotogrammetrických dat byl referenční souřadný systém, který je nutný pro správné a přesné referencování získaných dat v časové posloupnosti. Pro tyto účely byl experimentálně vyvinut přesný systém sestávající z plastové obroučky s připevněným mezikružím ze sendvičového materiálu (Dibond), na kterém byly vytištěny vlíčovací referenční terče vygenerované ze softwaru Agisoft Metashape. Celkem 16 terčů bylo předem umístěno do připraveného souřadnicového systému rovnoměrně v rozsahu 360° (Obrázek 18b). Toto rozvržení bylo vytvořeno pomocí vektorového software Inkscape a již takto vcelku bylo vytištěno na zmíněné mezikružím. Sendvičový materiál Dibond je složen z plastové střední vrstvy a dvou okrajových hliníkových vrstev a jeho teplotní stálost je výrobcem garantována v rozsahu od - 50 °C do + 90 °C. Tento materiál je tak pro dané použití vhodný, neboť by měl zaručit přesnost a stálost souřadnicového systému i při dlouhodobém použití v horkých letních dnech na přímém slunečním záření. Další důležitá výbava při fotogrammetrickém měření se vztahovala k osvětlení snímaných vzorků, neboť tento aspekt je pro účely zajištění kvality dat ve fotogrammetrii velice důležitý. Pro tyto účely bylo počítáno se dvěma variantami. Při přímém slunečním záření často vznikají velké rozdíly mezi osvětlenými částmi a zastíněnými částmi. Z tohoto důvodu bylo v tomto případě přikročeno ke stínění a rozptýlu světla pomocí světlého deštníku. V případě přirozeného denní světla při oblačnosti nebylo potřeba využívat žádný způsob stínění. Naopak při laboratorních experimentech bylo světla nedostatek, a proto bylo za tímto účelem sestrojeno Ing. Janem Devátým speciální osvětlení. Toto osvětlení sestávalo z LED pásku (60 LED.m⁻¹, výkon 12 W.m⁻¹, teplota 4250 K, světelný tok 1050 lm.m⁻¹) nalepeného na hliníkové obruči, která přesně pasovala k hornímu okraji sběrné nádoby SC (Obrázek 18c). Toto osvětlení tímto způsobem zajišťovalo rovnoměrné osvětlení půdního vzorku v rozsahu 360°.



Obrázek 18 Půdní vzorek v SC při fotogrammetrickém měření: a) pozice fotoaparátu při snímání vzorku, b) půdní vzorek v SC s referenčními terči, c) SC se sběrnou nádobou vybavenou kruhovým LED osvětlením.

3.2.5 Zpracování a analýza naměřených dat

Po rozřídění získaných fotografií se další zpracování odehrává ve specializovaném fotogrammetrickém softwaru. V tomto případě byl využit ověřený software Agisoft Metashape (Agisoft LLC, 2018), který byl testován již v předchozích pracích na katedře hydromeliorek a krajinného inženýrství (Báčová, 2018). Proces zpracování naměřených dat spočíval v prvotním spojení daných fotografií (Align photos), automatickým detekováním referenčních terčů s případnou manuální korekcí špatně rozpoznávaných terčů a přiřazením souřadnicového systému k těmto terčům. Dále bylo možné přistoupit k automatizaci procesu pomocí vytvořeného hromadného „batch“ souboru, který obsahoval další určené kroky. V těchto krocích byl

provizorní 3D model nejdříve optimalizován pomocí určených souřadnic terčů (Optimize alignment), bylo vytvořeno bodové mračno (Build Dense Cloud) a následně byl vytvořen DEM (Build DEM) a ortofoto (Build orthophoto). Finálním krokem byl export DEM (Export DEM), ortofoto (Export orthophoto) a výsledného reportu (Export report) obsahující detailní informace o přesnosti výsledných DEM a ortofota. Export DEM a ortofoto snímků byl proveden s rozlišením 0,1 mm na pixel, zatímco maximální rozlišení se pohybovalo okolo 0,06-0,09 mm. Střední velikost chyby pro referenční kontrolní body byla ve směru osy z (RMSE_z) průměrně 0,076 mm se směrodatnou odchylkou 0,035 mm a v rovině os xy (RMSE_{xy}) průměrně 0,113 mm se směrodatnou odchylkou 0,085 mm. Průměrná hodnota minimální detekce (Level of Detection - LoD) byla vypočtena dle Williams (2012) na 0,109 mm.

Další zpracování výsledných DEM probíhalo pouze v prostředí geografických informačních systému, konkrétně softwaru ArcGIS. Analýza DEM spočívala v substrakci DEM získaného před deštěm (DEM1) od DEM získaného po dešti (DEM2) pomocí rovnice 1. Tímto způsobem byly získány rozdílové modely DoD, které vyjadřovaly změnu povrchu v důsledku dopadu dešťových kapek. Ačkoliv plocha SC měla kruhový tvar s průměrem 10 cm, do výpočtu byla zahrnuta pouze část s průměrem 9 cm. Tento 0,5 cm široký okraj byl vynechán z důvodu nepřesností vzniklých na samotném okraji SC, který je ve většině případů zastíněný samotným okrajem SC. Z rozdílových modelů byly následně vypočteny určité charakteristiky, se kterými bylo pracováno v dalších krocích. Celý tento postup odečítání DEM byl za přispění Ing. Jana Devátého již od počátku automatizován pomocí výpočetního skriptu pro ArcGIS, který tyto modely odečítal a zároveň z nich vypočítával požadované parametry. Mezi základní parametry, které byly z rozdílových modelů získávány a dále s nimi bylo pracováno jsou:

- Průměrná hodnota bodů DEM před simulací (DEM1_mean), po simulaci (DEM2_mean) a jejich průměrný rozdíl (DEMd_mean), která je uvažována jako hodnota konsolidace a eroze v důsledku dopadu dešťových kapek (Bauer et al., 2015).
- Směrodatná odchylka výšek DEM před simulací (DEM1_std), po simulaci (DEM2_std) a jejich průměrný rozdíl (Diff_std), jež jsou považovány jako vyjádření drsnosti povrchu a jejich změny na základě vyjádření drsnosti dle Currence and Lovely, (1970).
- Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky vrstvy „slope“ získaných DEM a jejich rozdíl (slp1_mean, slp2_mean, slp1_std, slp2_std), které je také možné považovat za vyjádření morfologie terénu (Grohmann et al., 2011).

DEM1_mean a DEM2_mean vyjadřuje průměrnou výškovou hodnotu všech bodů, která je vztažena k hodnotě 0, která je umístěna v rovině referenčních terčů. Nicméně v dalším porovnání týkající se vlivu výšky nasypání vzorku do SC byla tato hodnota přepočítána tak, aby vyjadřovala skutečnou hloubku povrchu půdy vzhledem k hraně SC. Hodnota DEMd_mean, která udává průměrný výškový rozdíl, byla z důvodu porovnatelnosti přepočítána pomocí plochy kruhu o průměru 9 cm na objemovou jednotku v centimetrech krychlových. Na stejnou jednotku byla přepočítána také výsledná hodnota vysušené hmotnosti odebraného půdního vzorku

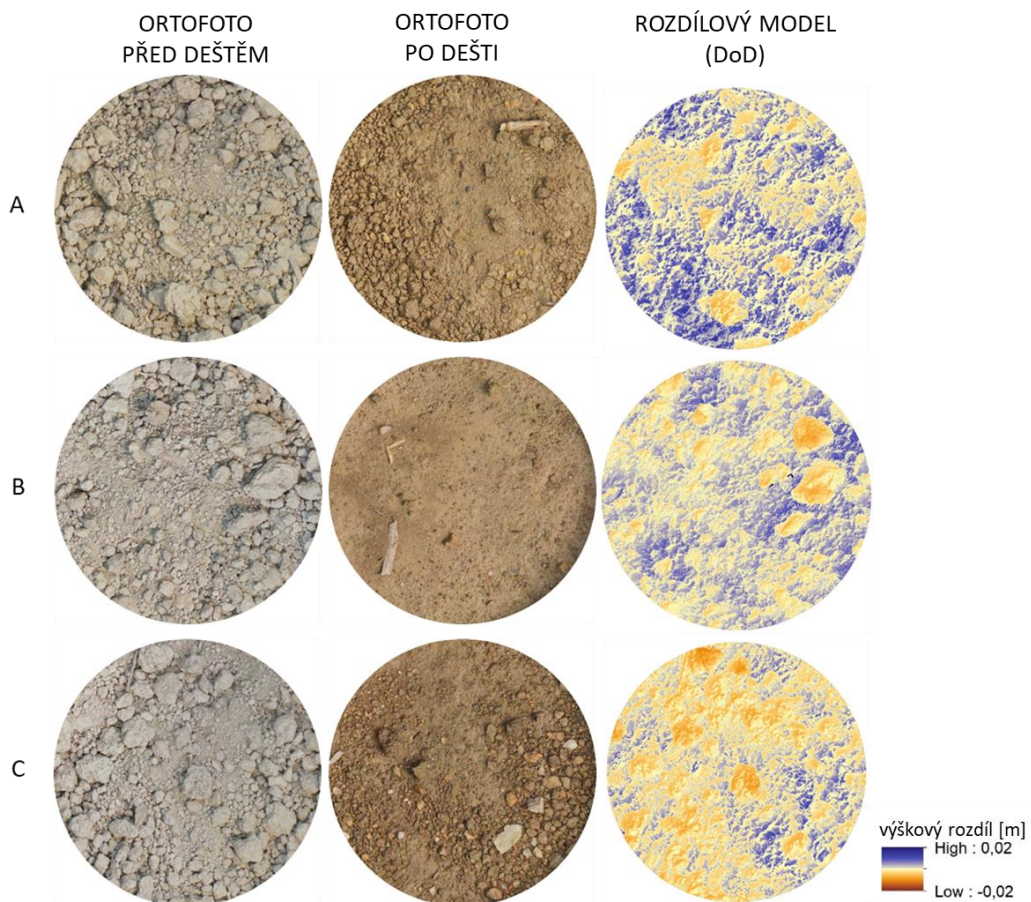
pomocí známé objemové hmotnosti. Takto bylo možné porovnat hodnoty získané pomocí fotogrammetrie i pomocí odebraných vzorků ve stejných objemových jednotkách.

3.3 Výsledky

Výsledky všech experiment byly vyhodnoceny z hlediska analyzovaných a porovnávaných veličin na základě DEM a jejich rozdílových modelů a včetně vizuálního srovnání vytvořených ortofoto snímků.

3.3.1 Vizuální porovnání povrchu půdy

Všechna fotogrammetrická měření zahrnovala mimo vytvoření výsledného DEM, také vytvoření ortofotosnímku vytvořeného pomocí všech 12 jednotlivých snímků. Ukázka finálních výstupů v podobě ortofotosnímku před deštěm, po dešti a včetně výsledného rozdílového modelu je zobrazena na následujícím Obrázek 19.



Obrázek 19 Počáteční a finální ortofotosnímky jednoho vybraného experimentu (srážková událost s celkovým úhrnem 47,3 mm a celkovou kinetickou energií 596,6 J.m⁻²) pro půdy A, B, C s výsledným rozdílovým model terénu (DoD) s hodnotami v metrech.

MODELOVÁNÍ EROZE PŮDY S VYUŽITÍM DAT PODROBNÉHO MONITORINGU

Kapitola 3: Monitoring kapkové eroze (experimentální plocha < 1 m²)

Tabulka 3 Odpovídající hodnoty vybraných parametrů na základě fotogrammetrického vyhodnocení a odběru vzorku.

Půda	Počáteční hodnoty DEM		Výsledné hodnoty kapkové eroze		
	DEM1_mean mm	DEM1_std mm	Půdní eroze g	Konsolidace (DEMd_mean) mm	Změna drsnosti (Diff_std) mm
A	8,5	2,3	9,6	-1,1	-1,2
B	7,3	2,3	13,1	-3,3	-1,3
C	11,9	1,9	10,9	-4	-1

Toto ilustrativní porovnání ortofotosnímků půdního povrchu zobrazuje základní rozdíly mezi půdami v rámci jedné konkrétní srážkové události s celkovým úhrnem 47,3 mm a celkovou kinetickou energií 596,6 J.m⁻². Zatímco na půdě A (Petzenkirchen) a C (Býkovice) lze rozeznat půdní agregáty i po srážkové události, půda B (Mistelbach) vykazuje mnohem vyšší stupeň rozbití půdních agregátů a vyšší stupeň vyhlazení povrchu. Na základě závěrů jiných studií (Legout et al., 2005) je možné tyto rozdíly přisoudit k odlišným fyzikálním a chemickým vlastnostem půd, které mohou obecně ovlivnit chování půd při srážkových událostech. Na základě zmíněných studií se lze domnívat, že hlavní rozdíl půdního povrchu půdy B lze přisoudit k relativně vysokému podílu obsahu jílu (18,4 %), hlinitých částic (70,4 %) a zároveň nejnižší hodnotě stability agregátů mezi všemi třemi testovanými půdními vzorky (18,3 %). Tento obecný předpoklad plně koresponduje i s obecnými předpoklady, že vysoký obsah jílovitých a hlinitých částic má zásadní vliv na infiltrační kapacitu z důvodu slití povrchu (Bradford et al., 1987; Truman and Bradford, 1990). Všechny tyto hypotézy však budou dále analyzovány pomocí statisticky významných hodnot na základě analýzy rozdílovým modelů.

3.3.2 Variabilita přípravy vzorku

Vzhledem k zapojení různých týmů na různých místech byla provedena analýza, která zjišťovala variabilitu přípravy půdních vzorků, tj. jejich počátečních hodnot na základě analýzy DEM1. Mezi tyto hodnoty byla zařazena výška povrchu půdy v SC, která byla pro tyto účely definována jako vzdálenost povrchu půdy od horní hrany SC (DEM1_mean) a dále počáteční drsnost povrchu půdy reprezentovaná směrodatnou odchylkou výšek DEM (DEM1_std).

MODELOVÁNÍ EROZE PŮDY S VYUŽITÍM DAT PODROBNÉHO MONITORINGU

Kapitola 3: Monitoring kapkové eroze (experimentální plocha < 1 m²)

Tabulka 4 Počáteční průměrné hodnoty povrchu půdy (DEM1_mean a DEM1_std) skrze celý experiment pro jednotlivé půdy a jednotlivá pracoviště spolu s výslednými průměrnými hodnotami, směrodatnou odchylkou (SD) a koeficientem variability (CV). * značí průměrnou hodnotu pro jednotlivá stanoviště a ** pro jednotlivé půdy.

Půda	Počáteční DEM1_mean a DEM1_std mm	Experimentální stanoviště			Výsledné hodnoty (Půdy)	
		Petzenkirchen	Mistelbach	Praha	Průměr ± SD mm	CV %
A	DEM1_mean	10,7	8,9	9,6	9,8 ± 1,6	16,2
	DEM1_std	1,8	2,0	1,8	1,8 ± 0,2	13,3
B	DEM1_mean	7,9	8,8	9,9	8,9 ± 2,0	21,9
	DEM1_std	1,8	2,2	1,8	1,9 ± 0,3	17,9
C	DEM1_mean	11,8	10,3	10,2	10,8 ± 1,7	15,5
	DEM1_std	1,5	1,7	1,6	1,6 ± 0,2	14,0
Výsledné hodnoty (Stanoviště)	DEM1_mean Průměr ± SD [mm]	10,1 ± 2,4	9,3 ± 1,3	9,9 ± 1,7		
	DEM1_mean CV [%]	23,4	14,2	17,5	18.4*	17.9**
	DEM1_std Průměr ± SD [mm]	1,7 ± 0,2	2,0 ± 0,3	1,7 ± 0,3		
	DEM1_std CV [%]	12,4	17,0	17,2	15.5*	15.1**

Tabulka 4 zobrazuje počáteční hodnoty vztahující se k povrchu půdy před provedením experiment, tj. před srážkovou událostí a tedy popisující hodnot vzniklé přípravou půdního vzorku v SC. V tabulce jsou hodnoty rozděleny na jednotlivé půdy a jednotlivá pracoviště, čímž se dá zjistit, jak se počáteční hodnoty lišily v rámci jednotlivých pracovišť a jednotlivých půd. Výsledky ukazují, že průměrná výška půdního povrchu v SC a průměrná drsnosti půdního povrchu se liší pro jednotlivé půdy v rámci pracovišť a zároveň pro stejnou půdy napříč pracovišti. Průměrná hodnota výšky povrchu v SC se pohybuje od 8,9 mm do 10,7 mm pod hranou SC s hodnotou koeficientu variability (CV) 18,4 % pro jednotlivá stanoviště a 17,9 % pro jednotlivé půdy. Průměrná hodnota výšky povrchu půdy v SC dosahuje pro všechny vzorky hodnoty 9,8 mm, což plně koresponduje se všeobecným záměrem plnění SC přibližně 10 mm pod okraj (viz kapitola 3.2.2). Hodnota CV pro drsnost půdního povrchu byla 15,5 % pro jednotlivá stanoviště a 15,1 % pro jednotlivé půdy. Hodnoty CV se dají považovat za dobré, a to z jak z hlediska různých půd na různých stanovištích, tak i naopak (Gomez and Gomez, 1985). Na základě těchto hodnot lze konstatovat, že variabilita hodnot dosahuje podobného rozsahu jak z hlediska jednotlivých půdy i jednotlivých stanovišť, a proto lze všechny výsledky pro jednu půdu považovat za srovnatelné ať byla měření prováděna na jakémkoliv pracovišti.

3.3.3 Vliv počáteční výšky povrchu půdy

Kromě variability počátečních parametrů standardně připravených půdních vzorků napříč jednotlivými pracovišti a jednotlivými půdami byl zkoumán také vliv těchto počátečních parametrů na výsledné hodnoty naměřené kapkové eroze. Regresní analýzou počáteční výšky vzorků (DEM1_mean) nebyla zjištěna významná závislost ($p > 0,05$) s manuálně odebraným množstvím půdní eroze (koeficient determinace pro půdy A, B, C od 0,003 do 0,03) ani s fotogrammetricky naměřenou objemovou změnou (koeficient determinace pro půdy A, B, C od 0,003 do 0,023).

Další analýza byla provedena se zahrnutím vzorků připravených nasypáním půdy do SC „téměř“ po okraj. Tato speciální příprava se týkala celkem 120 vzorků, při kterých byla průměrná výška povrchu půdy 3,5 mm pod hranou SC (SD 1,6 mm a CV 45 %). Nicméně ani v tomto případě nebyla regresní analýzou zjištěna významná závislost mezi výškou půdy v SC a naměřeným množstvím kapkové eroze (koeficient determinace 0,0005 a $p > 0,05$).

3.3.4 Vliv počáteční drsnosti povrchu půdy

Stejně jako v předchozím případě byl zkoumán také vliv počáteční hodnoty drsnosti povrchu půdy vyjádřené pomocí směrodatné odchylky výšek DEM1 (DEM1_std). Tento parametr je částečně daný kompozicí půdy a množstvím půdních agregátů, ale částečně může být ovlivněn také přípravou vzorku. Na rozdíl od počáteční výšky povrchu půdy byl při analýze DEM1_std a naměřeného množství eroze půdy zjištěna statisticky významná lineární pozitivní závislost ($p < 0,05$), avšak s velmi nízkou hodnotou koeficientu determinace pro všechny tři půdní vzorky od 0,065 do 0,093.

Další analýza byla provedena se stejným parametrem DEM1_std v závislosti na celkové změna drsnosti povrchu, vyjádřené rozdílem drsnosti před deštěm a po dešti (Diff_std). Tato závislost se ukázala být statisticky významná ($p < 0,01$) s nízkým koeficientem determinace pro všechny 3 půdy; pro půdu A je 0,13, pro půdu B 0,15 a pro půdu C 0,28. Trend závislosti je negativně lineární, což znamená, že s vyšší počáteční drsností dochází k větší změna drsnosti po srážkové události.

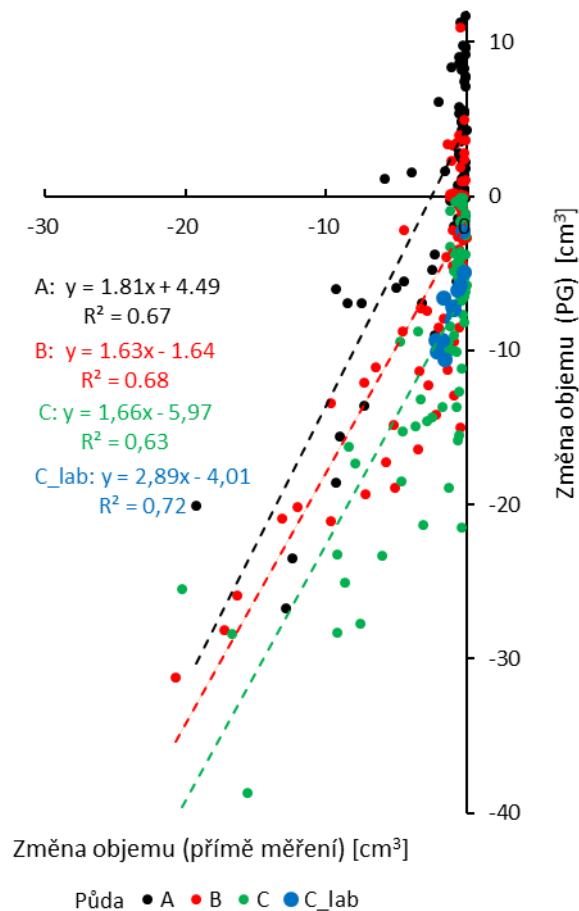
Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že na výslednou kapkovou erozi půdy má z těchto dvou zkoumaných parametrů větší vliv počáteční drsnosti povrchu půdy než jeho průměrná výška v SC.

3.3.5 Objemové změny vzorku

Jedním z hlavních cílů těchto experimentů bylo porovnání hodnot množství kapkové eroze získaných pomocí odebraných vzorků erodované půdy a pomocí vypočteného odhadu erodované půdy na základě fotogrammetrického měření. Cílem bylo obě tyto metody porovnat a zjistit jejich vzájemnou korelaci. Pro tyto účely byly výsledné hodnoty naměřené eroze půdy i vypočítané hodnoty změny výšky povrchu půdy v důsledku srážkové události přepočteny na stejné jednotky dle popsané metodiky v kapitole 3.2, tj. na centimetry krychlové.

MODELOVÁNÍ EROZE PŮDY S VYUŽITÍM DAT PODROBNÉHO MONITORINGU

Kapitola 3: Monitoring kapkové eroze (experimentální plocha < 1 m²)

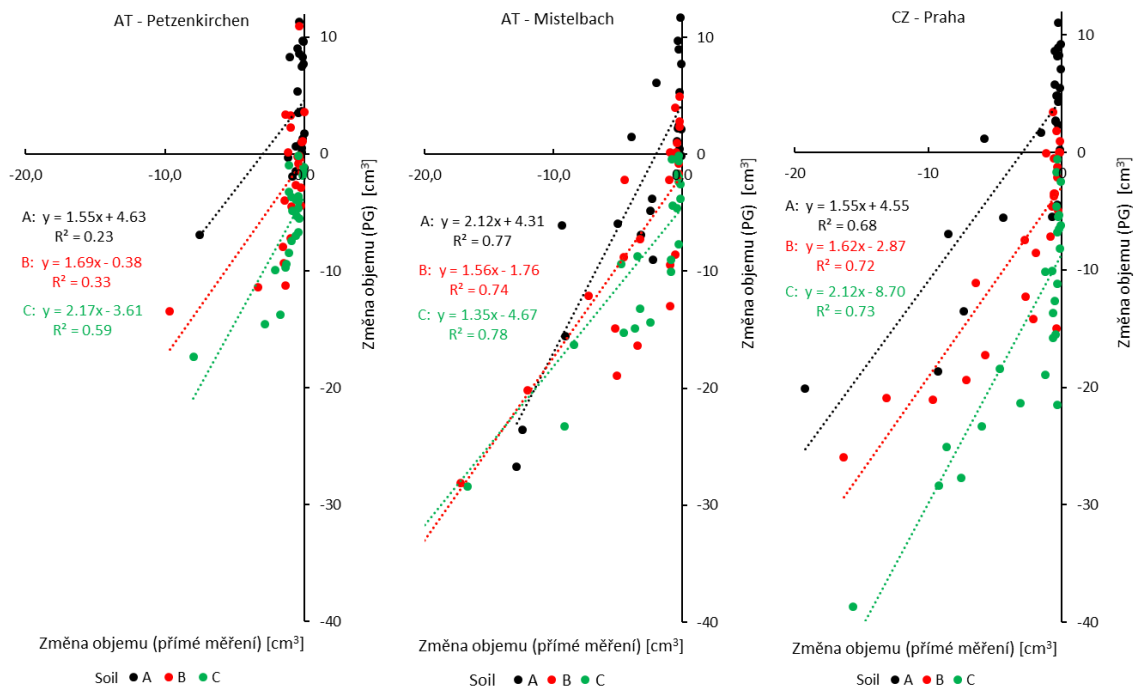


Obrázek 20 Souhrnný graf závislosti mezi změnou objemu vypočítanou pomocí přímého měření odběrem vzorků a nepřímého měření pomocí fotogrammetrické metody (PG). Záporné hodnoty značí erozi půdy, kladné hodnoty zvýšení povrchu, tj. bobtnání půdy.

Pomocí regresní analýzy byl mezi těmito dvěma sadami hodnot nalezen statisticky významný lineární trend ($p < 0,001$) pro všechny 3 půdní vzorky, včetně kontrolního měření pomocí laboratorního DS (Obrázek 20). Výsledný koeficient determinace pro půdu A je 0,67, pro půdu B 0,68 a pro půdu C 0,63. Vzorky půdy C měřené v laboratorních podmínkách dosáhly koeficientu determinace 0,72. V případě agregace dat vzorku půdy C a C_lab by se finální koeficienty regresní přímky s rovnicí $y = 1,66x - 5,97$ změnilo z 1,66 na 1,68, resp. z - 5,97 na - 5,87 s výsledným koeficientem determinace 0,63. Nicméně z důvodu malého počtu testovaných vzorků a absence dat ze stejné srážkové události pro půdu A a B, nejsou tato měření dále zahrnuta do finálního vyhodnocení. Hlavní rozdíly mezi jednotlivými půdami jsou především v posunu v ose y , což je dle mínění autora způsobeno odlišnými fyzikálními vlastnostmi jednotlivých půd, především odlišným zastoupením jednotlivých zrnitostních frakcí (viz kapitola 3.2.2).

MODELOVÁNÍ EROZE PŮDY S VYUŽITÍM DAT PODROBNÉHO MONITORINGU

Kapitola 3: Monitoring kapkové eroze (experimentální plocha < 1 m²)

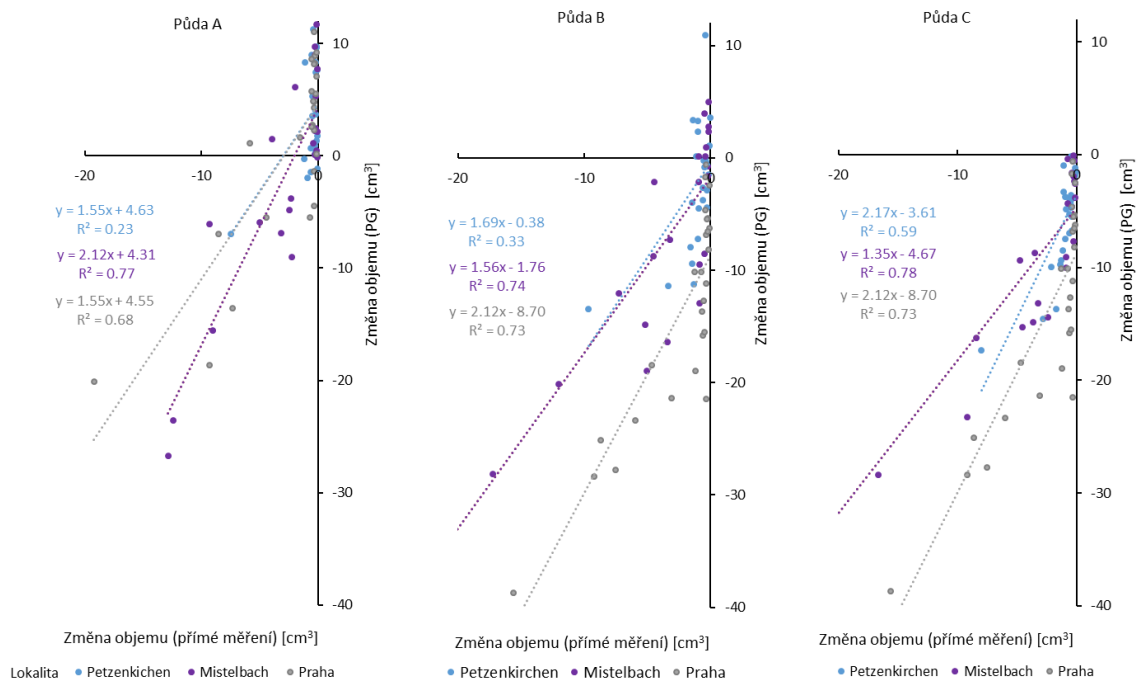


Obrázek 21 Souhrnný graf závislosti mezi změnou objemu vypočítanou pomocí přímého měření odběrem vzorků a nepřímého měření pomocí fotogrammetrické metody (PG) v závislosti na jednotlivých pracovištích. Záporné hodnoty značí erozi půdy, kladné hodnoty zvýšení povrchu, tj. bobtnání půdy.

Při další analýze byl zkoumán vliv jednotlivých měřicích pracovišť (Obrázek 21). Například na stanovišti v rakouském Petzenkirchenu byl zaznamenán menší počet srážkových událostí s vysokými úhrny deště a kinetickou energií, a proto lze na tomto stanovišti pozorovat nižší hodnoty výsledné kapkové eroze i výsledného koeficientu determinace pro jednotlivé půdy v rozmezí od 0,23 do 0,59. Naopak relativně silné srážkové události na lokalitě v Praze a Mistelbachu znamenaly zároveň relativně vysoké hodnoty výsledného koeficientu determinace nad 0,7 pro všechny 3 půdy. Pozitivním výsledkem je také to, že všechny půdy vykazují srovnatelné trendy nezávisle na jednotlivých lokalitách. Oproti tomu další Obrázek 22 ukazuje rozdíly z hlediska jednotlivých půd, kde jsou mnohem zřetelněji vidět rozdíly mezi jednotlivými typy, především v posunu v ose y. Tento posun do kladných hodnot lze v případě půdy A přisoudit k bobtnání půdy, které se také částečně vyskytuje i u půdy B, zatímco u půdy C s nízkým obsahem jílovitých částic se tento jev prakticky nevyskytuje (všechny hodnoty změny objemu jsou záporné).

MODELOVÁNÍ EROZE PŮDY S VYUŽITÍM DAT PODROBNÉHO MONITORINGU

Kapitola 3: Monitoring kapkové eroze (experimentální plocha < 1 m²)



Obrázek 22 Souhrnný graf závislosti mezi změnou objemu vypočítanou pomocí přímého měření odběrem vzorků a nepřímého měření pomocí fotogrammetrické metody (PG) v závislosti na jednotlivých půdách. Záporné hodnoty značí erozi půdy, kladné hodnoty zvýšení povrchu, tj. bobtnání půdy.

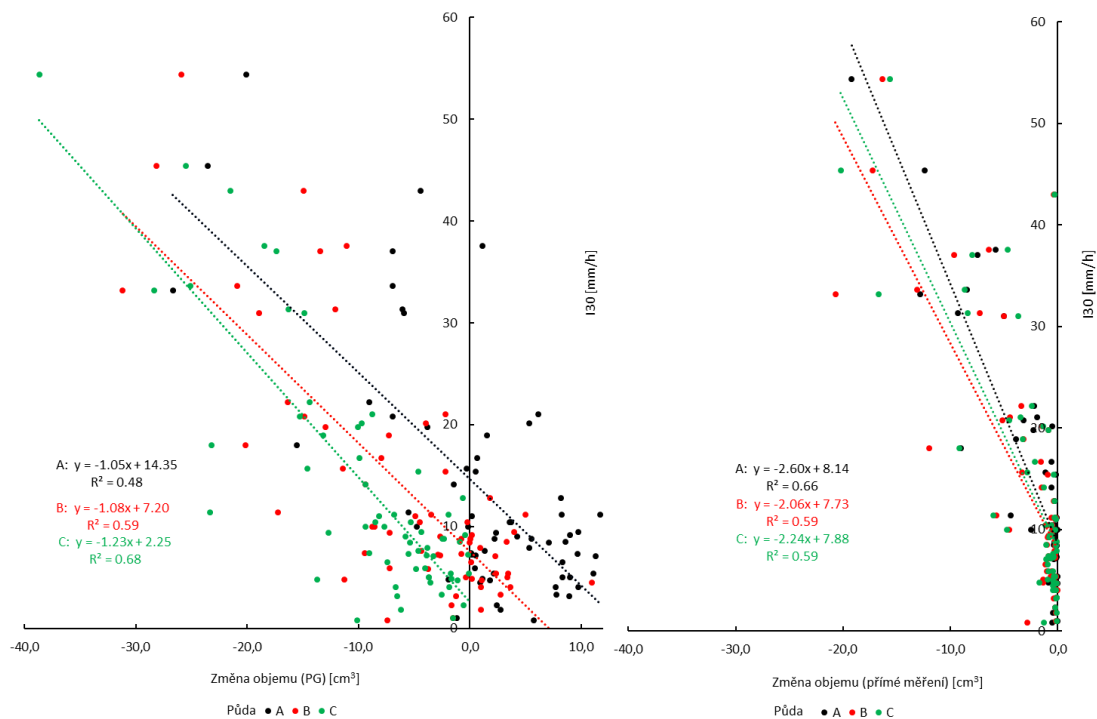
Nestandardní měření

Dalším zkoumaným jevem bylo to, zda se v průběhu experimentu vyskytly podmínky, které mohly ovlivnit získané výsledky. Mezi tyto podmínky byly zařazeny experimenty, při kterých došlo k nadměrně dlouhému ponechání vzorků po srážkové události ve venkovních podmínkách. Na základě vizuálního posouzení byla vybrána ta měření, u který byl vzorek při fotogrammetrickém snímání již zcela vysušen a dokonce v důsledku extrémního úbytku vlhkosti také popraskán. Pro tyto případy byla provedena nová analýza s vyloučením těchto experimentů. Výsledkem bylo to, že ačkoliv trend zůstal statisticky významný s hodnotou ($p < 0,001$), výsledný koeficient determinace se zvýšil v případě půdy A (z 0,67 na 0,75) a půdy C (z 0,63 na 0,67) a nepatrně snížil u půdy B (z 0,68 na 0,67). Jelikož ale tímto krokem významně poklesl počet zahrnutých měření o více než polovinu (z 222 na 99), nebyl tento krok s vyloučením suchých vzorků na konci aplikován ve finální analýze.

Dále by zkoumán také vliv možnosti vyhodnocení extrémně malého množství půdní eroze pomocí přímé metody. Postupně byla provedena stejná analýza jako v předchozím případě, avšak s nezahrnutím experimentů, kde byl půdní smyv menší než 1 g a dále menší než 2 g. Nicméně výsledky analýzy ukázaly, že ani v tomto případě není vytvoření těchto okrajových podmínek zásadní pro zvýšení výsledné závislosti. Výsledný koeficient determinace se v těchto případech změnil u půdy A z 0,67 na 0,65 (> 1 g) a 0,59 (> 2 g), u půdy B z 0,68 na 0,71 (> 1 g) a 0,70 (> 2 g) a u půdy C z 0,63 na 0,65 (> 1 g) a 0,56 (> 2 g).

Závislost na parametrech deště

Série analýz byla provedena také při porovnávání fotogrammetrických dat s parametry deště, jako je celkový srážkový úhrn, celková kinetická energie a maximální 30-minutové intenzity (I_{30}). Všechny tyto 3 parametry se ukázaly býti statisticky významné ($p < 0,05$), nicméně nejvyšších hodnot koeficientu determinace bylo dosaženo při vztahu mezi fotogrammetricky naměřenou změnou objemu a hodnotou I_{30} , které nejlépe vypovídá o průběhu a intenzitě deště při dlouhotrvajících srážkových událostech. Tento vztah reprezentuje graf na Obrázek 23 vlevo, kde je dosaženo koeficientu determinace ($p < 0,001$) pro půdu A 0,48, pro půdu B 0,59 a pro půdu C 0,68. Pro srovnání je na stejném Obrázek 23 vpravo vyobrazen vztah hodnoty I_{30} s naměřenou změnou objemu vypočítanou pomocí přímé metody měření eroze půdy.



Obrázek 23 Vztah mezi naměřenou změnou objemu pomocí fotogrammetrické metody (obrázek vlevo) a přímé metody (obrázek vpravo) s hodnotami naměřené maximální 30-minutové intenzity zaznamenaného deště I_{30} .

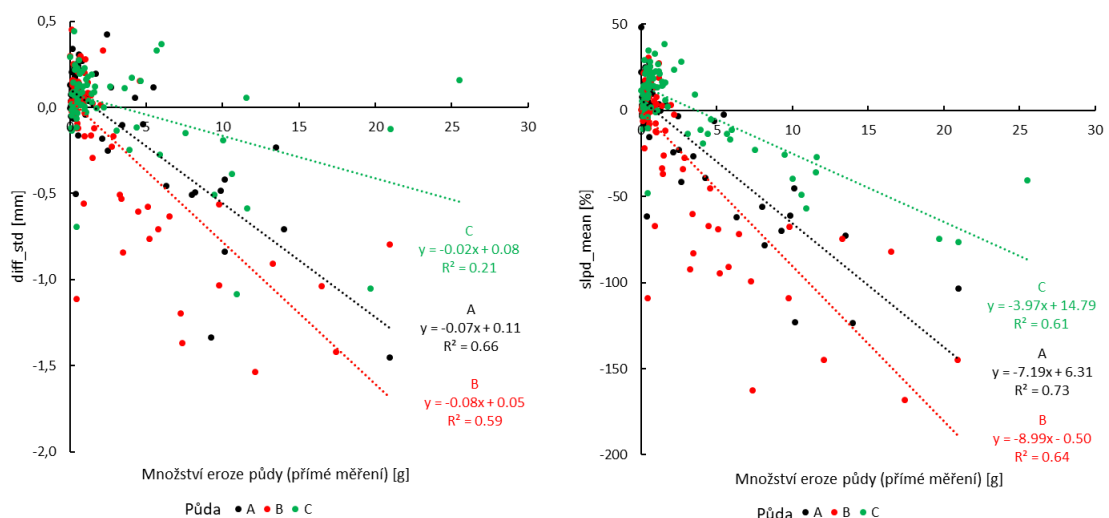
Nepřekvapujícím faktem je to, že koeficienty determinace jsou v případě srovnání s hodnotami přímého měření eroze půdy vyšší než v případě srovnání s fotogrammetrickými daty. Koeficient determinace vychází v těchto případech pro půdu A 0,66, pro půdu B 0,59 a pro půdu C 0,59 ($p < 0,001$). Ostatní sledované a analyzované parametry deště jako celkový srážkový úhrn a celková kinetická energie deště se ukázaly býti jako statisticky významné ($p < 0,001$), avšak s významně nižší korelací v rozmezí hodnot od 0,25 do 0,38 pro půdy A, B a C.

3.3.6 Změna povrchové drsnosti

Mimo hlavních fotogrammetrických hodnot popisující změnu objemu půdy byl sledován také parametr odpovídající drsnosti povrchu, respektive změně povrchu v důsledku dopadu

dešťových kapek. Pomocí skriptu v prostředí ArcGIS byla automatizovaně počítána směrodatná odchylka výšek digitálního modelu terénu před deštěm (DEM1_std) a po dešti (DEM2_std) a následně jejich rozdíl (Diff_std), reprezentující změnu povrchové drsnosti. Na Obrázek 24 vlevo je zobrazen vztah mezi touto hodnotou změny drsnosti a skutečně naměřenou hodnotou eroze půdy pomocí přímé metody odběru vzorku.

Mimo vyjádření drsnosti povrchu pomocí směrodatné odchylky výšek bodů digitálního modelu terénu lze vyjádřit drsnost povrchu také na základě hodnot sklonu jednotlivých pixelů digitálního modelu terénu, respektive jejich průměrné hodnoty a směrodatné odchylky. Tento postup aplikovaný například týmem vědců z pod vedením Grohmann et al. (2011) ukázal, že je pomocí parametru založeném na sklonu jednotlivých pixelů možné identifikovat změny drsnosti povrchu půdy v různých měřících. V případě analýzy popisovaných experimentů však nebyla nalezena významná korelace mezi rozdíly směrodatných odchylek sklonů jednotlivých pixelů s naměřenou erozí půdy pomocí přímé metody. V tomto případě byl výsledný koeficient determinace v rozmezí 0,08 až 0,31 pro jednotlivé půdy A, B a C. Naproti tomu hodnoty funkce sklonu vykazaly ve vztahu s hodnotami přímo měřené eroze půdy statisticky významný lineární trend ($p < 0,001$) s výsledným koeficientem determinace 0,73 pro půdu A, 0,64 pro půdu B a 0,61 pro půdu C (Obrázek 24).



Obrázek 24 Vztah mezi naměřeným množstvím eroze půdy přímou metodou a vyjádřením změny drsnosti pomocí fotogrammetrie na základě rozdílu směrodatných odchylek výšek digitálního modelu terénu diff_std (graf vlevo) a průměrného rozdílu hodnot sklonu pixelů digitálního modelu terénu slpd_mean (graf vpravo).

Na základě uvedených grafů lze konstatovat, že nejmenší změny z hlediska drsnosti povrchu se odehrávají na půdních vzorcích půdy C, tzn. že v tomto případě dochází k nejmenšímu vyhlazování povrchu a nejmenšímu rozpadu půdních agregátů. Naproti tomu nejvyšší změny jsou zaznamenány na půdním vzorku B, což plně koresponduje se závěry z kapitoly 3.3.1, kde je názorná ukázka vizuální změny povrchu v důsledku srážkové události. Na základě vysvětlení pomocí nízké hodnoty stability agregátů a zároveň vysokého obsahu hlinitých částic je tento

efekt v podobě vysokých hodnot změny drsnosti povrchu jednoznačný. Vyjádření změny drsnosti pomocí těchto dvou prezentovaných veličin na základě fotogrammetrického měření lze považovat za vypovídající i z toho důvodu, že oba tyto parametry zobrazují stejný trend z hlediska všech 3 půd A, B a C.

3.3.7 Odvození regresního modelu

Na základě dílčích analýz jednotlivých vztahů založených na datech z fotogrammetrických měření a datech z přímého měření eroze půdy byl v posledním kroku odvozen výsledný vztah pro odhad množství eroze půdy. Tento vztah byl odvozen na prostém výškovém rozdílu digitálního modelu před deštěm a po dešti. Výsledkem je lineární trend závislým na půdních vlastnostech, v tomto případě konkrétně na obsahu jílovitých částic (%). Vztahy na základě jednotlivých testovaných půd A, B a C jsou uvedeny v následujících rovnicích a Obrázek 25.

Pro půdu A má rovnice tvar (koeficient determinace 0,67, $p = 9,05E-19$):

$$S = -2,57 \times DD + 2,52 \quad (2)$$

Pro půdu B má rovnice tvar (koeficient determinace 0,68, $p = 1.04E-19$):

$$S = -2,70 \times DD + 0,14 \quad (3)$$

Pro půdu C má rovnice tvar (koeficient determinace 0,63, $p = 5,04E-17$):

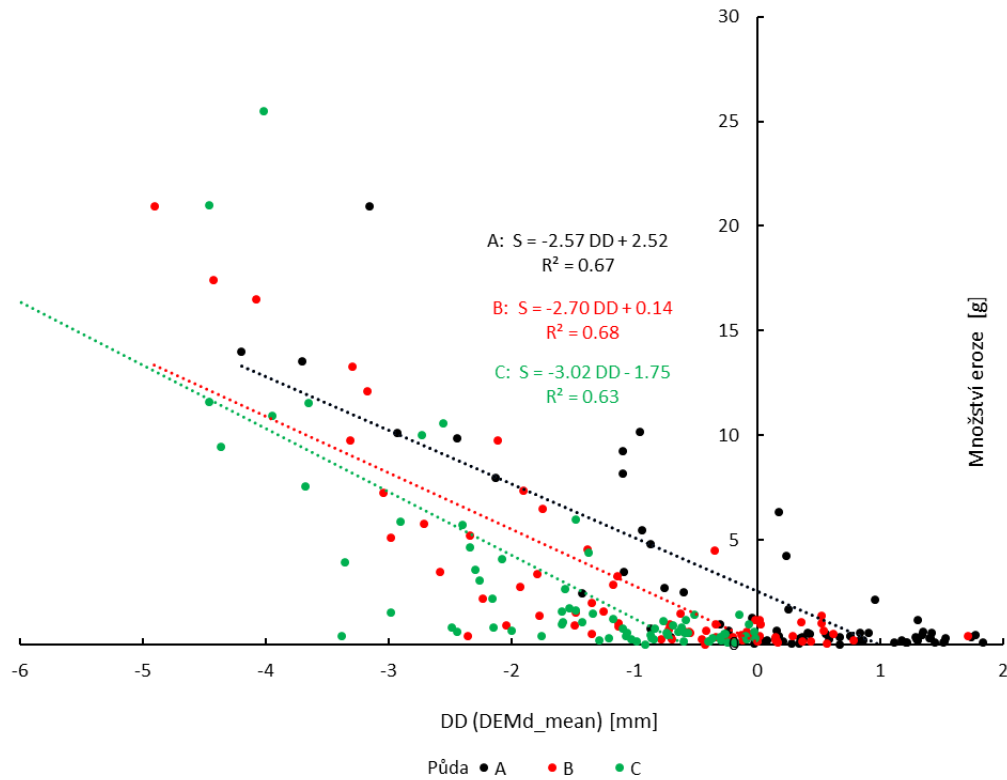
$$S = -3,02 \times DD - 1,75 \quad (4)$$

,kde

S = množství eroze půdy v důsledku kapkové („splash“) eroze (g),

DD = DEMd_mean.....průměrný výškový rozdíl mezi digitálním modelem terénu před deštěm a po dešti (mm).

MODELOVÁNÍ EROZE PŮDY S VYUŽITÍM DAT PODROBNÉHO MONITORINGU
 Kapitola 3: Monitoring kapkové eroze (experimentální plocha < 1 m²)



Obrázek 25 Odvozený lineární vztah mezi fotogrammetricky naměřeným výškovým rozdílem digitálního modelu terénu před deštěm a po dešti v závislosti na naměřených hodnotách eroze půdy.

Na základě velmi podobných sklonů jednotlivých trendů pro jednotlivé půdy byl v konečná fázi vyloučen vliv počátečního bobtnání. Výsledná obecná rovnice má tedy následující tvar:

$$S = a \times DD + b \quad (5)$$

,kde

S = množství eroze půdy v důsledku kapkové („splash“) eroze (g),

DD = DEMd_mean.....průměrný výškový rozdíl mezi digitálním modelem terénu před deštěm a po dešti (mm).

a = -2,76 (průměrná hodnota pro testované půdy v rámci jejich fyzikálně-chemických vlastností)

b = lineárně závislý člen závislý na obsahu jílovitých částic nabývající hodnoty od -1,75 pro obsah jílu 12,1 % až po hodnotu 2,52 pro půdu s obsahem jílovitých částic 25,8 %. Člen b je počítán pomocí následující lineární rovnice s koeficientem determinace 0,9995:

$$b = 0,31 \times CC - 5,54 \quad (6)$$

,kde

CC = obsah jílovitých částic (%) v rozsahu od 12 % do 26 %.

Na základě těchto doplňujících výpočtu, lze výslednou výsledný vztah popsat následující rovnicí:

$$S = -2,76 \times DD + 0,31 \times CC - 5,54 \quad (7)$$

,kde

S = množství eroze půdy v důsledku kapkové („splash“) eroze (g),

DD = DEMd_mean.....průměrný výškový rozdíl mezi digitálním modelem terénu před deštěm a po dešti (mm)

CC = obsah jílovitých částic (%) v rozsahu od 12 % do 26 %.

3.4 Souhrn výsledků a diskuze

V rámci dlouhodobého experimentu se podařilo vyvinout a zrealizovat sérii měření na 3 nezávislých pracovištích ve dvou zemích. Rozdíly v provádění experimentů na jednotlivých pracovištích byly minimalizovány pomocí společných setkání, při kterých byla jednotná metodologie schválena a trénována. V ojedinělých případech však nebylo možné dodržet všechny nastavené postupy. Například měřicí stanoviště v rakouském Mistelbachu bylo od hlavního zázemí pracoviště vzdáleno několik kilometrů. Jelikož půda byla uchovávána v krytém zázemí, na měřicí stanoviště muselo být dováženo autem. Tato cesta a vyvolané vibrace mohly mít například částečný vliv na distribuci půdních agregátů a odlišných zrnitostních frakcí skrze půdní vzorky. Dalším aspektem, který odlišoval jednotlivé lokality byl vliv počtu a intenzity srážkových událostí, který však není možné ničím ovlivnit. Tento aspekt se týká hlavně lokality Petzenkirchen, kde byly zaznamenány především srážkové události o nižší intenzitě, celkovém srážkovém úhrnu a kinetické energii. Při srovnání celkového počtu zaznamenaných událostí lze hovořit o vyrovnaném počtu ve všech lokalitách. Nicméně je nutno říci, že výsledné počty vyhodnocených událostí (25 v Petzenkirchenu, 23 v Mistelbachu a 27 v Praze) je nižší, než byl celkový počet zaznamenaných událostí. Tento počet musel být snížen z toho důvodu, že ne na všech stanovištích byly již od samého počátku instalovány fotogrammetrické referenční terče. Z tohoto důvodu nebylo možné do vyhodnocení zahrnout počáteční experimenty provedené bez těchto terčů. Toto se týkalo především prvních experimentů v rakouských lokalitách. Dalším nutným zásah představoval fakt, že na každém pracovišti byl využíván jiný typ disdrometru, případně při malém počtu měření nebyl na místě k dispozici disdrometr vůbec. Tento problém byl vyřešen společnou simulací a kalibrací všech disdrometrů (Johannsen et al., 2020a) a následným odvozením regresních rovnic pro výpočet kinetické energie (Johannsen et al., 2020b). Odlišnosti počátečního stavu půdních vzorků v podobě počáteční parametrů analyzovaných pomocí fotogrammetrie byly dány různým typem použitých půd a různými lidmi, kteří přípravu prováděli. Nicméně na základě provedených analýz vlivu přípravy vzorku a počátečních parametrů se ukázalo, že tento vliv se dá považovat za zanedbatelný a není statisticky významný. Předem stanovená výška nasypání půdního vzorku do SC na přibližnou hodnotu 10 mm pod okraj SC se ukázala být dobrým kompromisem mezi náchylností půdy na kapkovou erozi a odolností proti přetečení v případě plného nasycení vzorku a vystoupaní

hladiny k okraji SC. Při analýze počátečních parametrů se ukázal jako statisticky významnější parametr povrchové drsnosti než výška povrchu. Tento fakt tak koresponduje s závěry jiné studie, která také nachází závislost mezi počáteční drsností a erozí půdy, ač se jedná o velmi nízkou korelaci (Römkens et al., 2002).

Z dalších vlivů, které mohou mít ovlivnit finální výsledky, byl zkoumán efekt vysychání půdních vzorků po skončení srážkové události. V ideálním případě byly všechny půdní vzorky fotogrammetricky nasnímány co nejdříve po konci stanovené srážkové události. Nicméně ve výjimečných případech došlo ke snímání vzorku až po několika dnech. V případě horkého a slunného počasí došlo na těchto vzorcích k silnému vysušení půdy a popraskání půdního vzorku. V rámci analýzy zkoumající korelaci mezi erozí půdy naměřenou přímou a nepřímou metodou byly proto tyto vzorky vyřazeny z analýzy. Výsledkem nicméně nebylo významné zlepšení korelace a navíc došlo ke snížení počtu vzorků ve výsledné analýze. Tento krok proto nebyl aplikován. Ačkoliv je v řadě zahraničních studií zkoumán vliv půdní vlhkosti, objemové hmotnosti a objemových změn (Bauer et al., 2014; Håkansson and Lipiec, 2000), v této studii nebylo toto měření z důvodu velkého počtu vyhodnocených vzorků prováděno. Z tohoto důvodu není možné ve výsledných hodnotách odlišit vliv kapkové eroze od změny objemové hmotnosti v důsledku konsolidace půdního vzorku po dopadu dešťových kapek.

Při dalších analýzách byla zkoumána korelace mezi naměřenou erozí půdy a zaznamenanými parametry srážkové události. Překvapivě byla zjištěna sice statisticky významná závislost množství eroze půdy s celkovým srážkovým úhrnem i s celkovou kinetickou energií, avšak s velmi nízkým koeficientem determinace okolo 0,3. Nejvyšší hodnotu koeficientu determinace naopak prokázala lineární závislost mezi naměřeným množstvím eroze půdy s maximální 30-minutovou intenzitou I_{30} , což je podpořeno i zjištěním studie popisující rovnicí USLE, která přisuzuje silný erozní účinek deště právě hodnotě I_{30} (Wischmeier and Smith, 1978). Vysvětlením této skutečnosti je pravděpodobně to, že celkové úhrny a celkové hodnoty kinetické energie mají nízkou vypovídající hodnotu při dlouhotrvajících deštích s nízkou intenzitou, při které nedochází k významné kapkové erozi, jako je tomu v případě silných a krátkých přívalových dešťů.

Jedním z hlavních cílů experimentů bylo zjištění chování odlišných půd při přirozených srážkových událostech. Na základě mnoha zahraničních studií bylo pracováno s předpokladem, že na odlišném chování jednotlivých půd se s největší mírou podílí kombinace zrnitostního složení a stability agregátů, která je však také závislá na variabilitě zastoupení jednotlivých zrnitostních frakcí (Fernández-Raga et al., 2017; Hänsel et al., 2016; Legout et al., 2005; Römkens et al., 2002; Ryzak et al., 2015). Na základě těchto studií a výsledných rozdílů v chování jednotlivých půd byl přisouzen hlavní vliv právě odlišnému zrnitostnímu složení, konkrétně obsahu jílu (Wei et al., 2015). Tento vliv je patrný již při porovnání kladných hodnot množství kapkové eroze změřené pomocí fotogrammetrie. Kladná hodnota v tomto případě znamená, že dochází k pozitivní objemové změně, tj. bobtnání půdy v důsledku změny půdní vlhkosti na úkor ztráty půdy v důsledku kapkové eroze. Právě tyto hodnoty indikující bobtnání půdy korelují s podílem jílovitých částic v půdách A, B a C. Z tohoto důvodu lze největší přírůstky objemu pozorovat u půdy A (obsah jílu 25,8 %), méně u půdy B (18,4 %). U půdy C s obsahem

jílu 12,1 % k bobtnání v podstatě nedochází vůbec nebo je tento vliv vyrušen kapkovou erozí půdy. I tyto závěry korespondují s jinou studií přikládající obsahu jílu hlavní vliv při bobtnání půdy a následnému slévání půdního povrchu (tzv. „sealing effect“) s výsledným snížením náchylnosti půdy na kapkovou erozi (Kalantari, 2012). Jiné studie naopak s vlivem jílu používají pojem cementace (tzv. „cementation“) povrchu s následným zvýšením mechanické odolnosti povrchu půdy proti rozrušení (Wei et al., 2015). Jiné studie reportují podobný vliv slévání povrchu také s hlinitými částicemi (Truman and Bradford, 1990). Naopak v jiných studiích se objevuje jako zásadní parametr ovlivňující množství kapkové eroze střední velikost zrna a stabilita agregátů, která je popisována jako limitní faktor pro odnos půdních částic pomocí kapkové eroze (Legout et al., 2005). V této disertační práci je stabilitě agregátů přisouzena hlavní role při ovlivnění počáteční drsnosti povrchu půdy, neboť právě půdní agregáty mají největší vliv při tvorbě drsnosti povrchu v podobě hodnoty směrodatné odchylky výšek DEM. V tomto případě je nejvyšší hodnoty stability agregátů dosaženo u půdy C (63,3 %), následované půdou B (41,4 %) a nejnižší hodnotou u půdy B s 18,3 %. Tyto hodnoty lze považovat za korespondující s trendem poklesu drsnosti (Obrázek 24), který je nejvíce patrný pro půdu B. Nejnižší hodnota stability agregátů vede ke slévání povrchu a tím pádem i k nejvyššímu poklesu povrchové drsnosti.

Největší část analýzy změn povrchu byla zaměřena především na porovnání s ohledem na přímé měření kapkové eroze pomocí manuálního odběru půdních vzorků. Z tohoto důvodu lze považovat získané výsledky za přínosné, neboť právě porovnání fotogrammetrické metody odhadu množství eroze spolu s hodnotami přímo měřeného množství eroze, přineslo statisticky významný trend s vysokým koeficientem determinace v rozmezí od 0,63 do 0,68 v závislosti na půdě. V případě získaných a analyzovaných dat byly hodnoty pomocí fotogrammetrické metody nadhodnoceny oproti hodnotám získaných pomocí přímého odběru. Tento trend se však vyskytuje i v jiných studiích, kde například data získaná pomocí fotogrammetrie byla oproti přímému měření nadhodnocena o 14,7 % (Hänsel et al., 2016), zatímco v případě našich experimentů bylo toto nadhodnocení 46,6 %. Takto vysoká hodnota však může být vysvětlena efektem změny objemové hmotnosti a následné konsolidace nebo naopak bobtnání v kombinaci s různým zastoupením jílovitých částic či různému zatížení deštěm. Tento vliv by měl být při dalších studiích ošetřen maximálním možným intervalem, kdy je nutno provést fotogrammetrické měření po skončení srážkové události či zahrnutím měření vlivu objemových změn na základě rozdílné vlhkosti půdního vzorku (Bauer et al., 2014).

Hlavním výsledkem těchto experimentů bylo odvození regresní rovnice, na základě které je možné odhadnout množství kapkové eroze pouze z porovnání digitálních modelů terénu. Odvozený vztah je samozřejmě aplikovatelný pouze v rámci okrajových podmínek zahrnující fyzikálně-chemické vlastnosti testovaných půd, velikost půdního vzorku s plochou o kruhovém půdorysu s průměrem 10 cm a srážkové události s maximální hodnotou I_{30} do 60 mm.hod⁻¹, maximální hodnotou kinetické energie do 2800 J.m⁻² a maximálního celkového úhrnu deště do 130 mm pro jednu srážkovou událost.

MODELOVÁNÍ EROZE PŮDY S VYUŽITÍM DAT PODROBNÉHO MONITORINGU

Kapitola 3: Monitoring kapkové eroze (experimentální plocha < 1 m²)

Tabulka 5 Porovnání časové a materiální náročnosti pro přípravu a otestování jednoho vzorku půdy v rámci experimentu kapkové eroze.

Jednotlivé kroky	Přímá metoda		Nepřímá metoda	
	Manuální odběr vzorků	čas (min)	Fotogrammetrická metoda SfM-MVS	čas (min)
Příprava vzorku	Naplnění SC vzorkem půdy a umístění do sběrné nádoby.	0,5	Naplnění SC vzorkem půdy a umístění do sběrné nádoby.	0,5
Počáteční sběr dat	-	-	Upevnění referenčních terčů a fotogrammetrické nasnímaní vzorku.	0,6
Finální sběr dat	Odběr půdních vzorků z kapkové eroze a jejich umístění do transportní nádoby.	5	Fotogrammetrické nasnímaní.	0,5
Zpracování a analýza dat	Laboratorní zpracování: transport získaných vzorků do laboratoře, filtrování vodní suspenze přes filtrační papír, sušení vzorků v peci při 105 ° C po dobu 24 hodin a následné vážení na laboratorních vahách.	5	Počítačové zpracování: třídění snímků, fotogrammetrické zpracování (Agisoft Metashape) a následná analýza rozdílových modelů (ArcGIS) (čas je závislý na využití hromadného zpracování pomocí hromadných příkazů a skriptů).	3
Celkový čas		10,5		6,6
Materiální vybavení	Sběrné a transportní nádoby pro odebrané půdní vzorky, laboratorní vybavení: filtrační papíry, odměrné válce, pec, váhy.		Referenční vlíčovací terče, fotoaparát, výkonný počítač s odpovídajícím SW a HW.	

Mimo porovnání výsledných hodnot eroze půdy bylo provedeno také porovnání obou metod z hlediska její časové a materiální náročnosti (Tabulka 5). Na základě hodnot uvedených v tabulce výše lze zjistit, že průměrná doba provedení a vyhodnocení jednoho měření kapkové eroze je 10,5 minuty v případě přímé metody a 6,6 minuty u nepřímé metody pomocí SfM-MVS, tzn. 63 % času přímé metody. Ačkoliv rozdíl činí pouhých 3,9 minuty na jeden vzorek, v rámci celého 3-letého experimentu a celkového množství 850 vyhodnocených vzorků, činí tento rozdíl 3315 minut, neboli 55,25 hodin. Při případném pokračování experimentů by připadalo v úvahu maximalizovat počet fotogrammetrických měření a ponechat pouze menší část vzorků pro kombinaci obou metod pro získání referenčních hodnot. Tímto způsobem by bylo možné provést vyšší počet měření a zahrnout do experimentů více půdních vzorků s odlišnými fyzikálně-chemickými vlastnostmi.

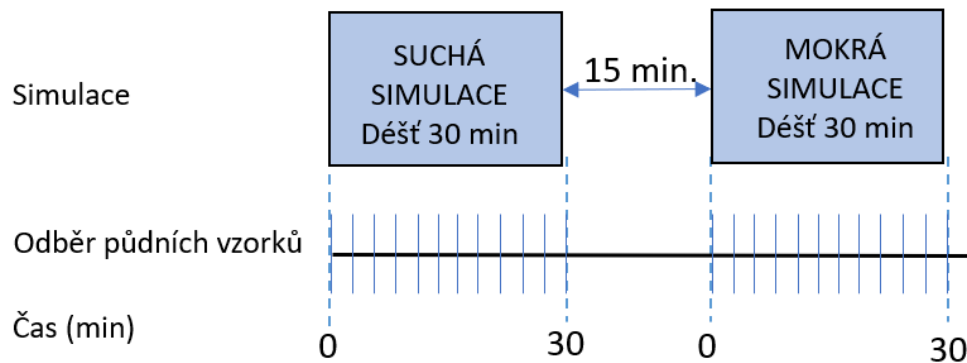
4 Monitoring středně velkých erozních ploch (plocha < 10 m²)

Další případová studie byla zaměřena na větší měřítko než v předchozím případě kapkové eroze. Při těchto experimentech se jednalo o standardní erozní experimenty s experimentální plochou o rozloze do 10 m². Oproti předchozím experimentům se tyto simulace odlišují kromě měřítka také tím, že zahrnují navíc erozní procesy spojené s povrchovým odtokem. Svojí charakteristikou je možné je považovat za nejběžnější typ erozních experimentů podobných v ostatních studiích zaměřených na výzkum srážko-odtokových vztahů (Bradford et al., 1987; Hsieh et al., 2009; Hudson, 1993). Tyto provedené experimenty byly součástí řešení projektu TH02030428 s názvem “Navrhování technických opatření pro stabilizaci a ochranu svahů před erozí”, který se primárně zabývá vlivem efektivity ochranných opatření proti erozi půdy na strmých svazích. Součástí řešení tohoto projektu byla také kompletní rekonstrukce a modifikace laboratorního DS popsáná v kapitole 2.3.1.2 a v publikaci od Kavka et al. (2019). Dále byl součástí výstupů projektu prototyp kotvícího systému ochranných materiálů, aby docházelo k co nejmenšímu dopadu na půdní povrch a vyšší efektivitě pracovníků provádějící kotvení. Dále byla součástí výstupu také modifikovaná verze softwarového nástroje SMODERP Line, který jakožto fyzikálně orientovaný model určuje míru erozního ohrožení na základě hydrologické bilance a výpočtu proudění povrchového odtoku. Ačkoliv velká část řešení projektu se týká ochranných opatření (geotextilie, geomatrace, přírodní sítě, atd.), v rámci disertační práce bylo využito pouze dat týkajících se fotogrammetrického měření na experimentálních plochách s holou půdou.

4.1 Popis a metody experimentu

Pro účely tohoto typu experimentu byly zvoleny stejně jako v předchozím případě venkovní a laboratorní experimenty. Venkovní experimenty byly prováděny mezi lety 2017 až 2020 v lokalitě Jirkov na experimentálních plochách společnosti Strix s.r.o. a laboratorní byly prováděny mezi lety 2018 až 2020 na laboratorním dešťovém simulátoru ve Vodohospodářském experimentálním centru Fakulty stavební, ČVUT v Praze. Zařízení, která byla využita pro tyto experimenty jsou podrobně popsány v kapitole 2.3.1.2.

Samotné experimenty probíhaly na upravených plochách v podobě úhoru. Jeden experiment zahrnoval vždy 2 srážkové epizody a měření 1 a 2 (Obrázek 26). První epizoda začínala simulací deště na suchém povrchu (tzv. suchá simulace) a trvala 30 minut. Po skončení suché simulace byla zařazena 15-minutová pauza, po které následovala druhá srážková epizoda na již mokřém povrchu (tzv. mokrá simulace) s dobou trvání také 30 minut. Při každé simulaci byl odebrán povrchový odtok ve 2,5-minutových intervalech (celkem 12 vzorků) pro následnou analýzu množství erodovaných půdních částic. V některých případech (lokalita Jirkov) bylo toto schéma experimentu opakováno po přibližně 10 dnech s neupraveným povrchem po simulaci 1 a 2. V těchto případech se jednalo o další dvojici experimentů 3 a 4.



Obrázek 26 Schéma suché a mokré simulace v rámci jednoho experimentu na lokalitě Jirkov a ČVUT.

Analýza vzorků povrchového odtoku byla prováděna v laboratoři stejnou metodou jako případě zpracování odebraných půdních vzorků při experimentech kapkové eroze popsané v kapitole 3.2.2. Vysušením vzorků se získala hmotnost erodovaného materiálu v gramech v jednotlivých časových intervalech. Oproti kapkové erozi, kde jeden vzorek odpovídal celkovému množství eroze při jednom experimentu, bylo v tomto případě nutné tyto intervalové hodnoty přepočítat na základě celkové délky simulace (30 minut) na celkovou kumulativní hodnotu ztráty půdy tak, aby výsledné hodnoty odpovídaly změnám povrchu půdy zjištěným pomocí fotogrammetrického snímání (viz kapitola 4.1.3). Pro analýzu a porovnání této přímé metody měření s fotogrammetrickou metodou (viz kapitola 4.2.1) SfM-MVS byly kumulativní hmotnosti smyvu půdy přepočítány pomocí známe objemové hmotnosti (Tabulka 6) na objemovou změnu v cm³.

4.1.1 Experimentální plochy

Při experimentech byly využity erozní plochy dvojího typu podle jednotlivých stanovišť. Na lokalitě společnosti Strix. s.r.o. v Jirkově se jednalo celkem o 3 samostatné erozní kontejnery o půdorysném rozměru 4 x 2,2 m a výšce 1,6 m. Tyto 3 kontejnery byly pevně nastaveny do 3 různých sklonů: 1:1,5 (34°), 1:1,75 (30°) a 1:2,5 (22°) (Obrázek 27). Každý kontejner měl plochu rozdělenou podélně na dvě poloviny s tím, že jedna polovina byla určena pro testování protierozních ochranných opatření a druhá polovina sloužila pro referenční testování holé půdy – úhore. V tomto případě byla využita pouze data vztahující se k ploše bez ochranných opatření, tzn. pouze plochy s úhorem. Toto bylo provedeno z toho důvodu, že metoda fotogrammetrického snímání není průkazná a vypovídající při posuzování eroze půdy u ploch zakrytých ochrannými geotextiliemi.



Sklon
1:1,5 (34°)

Sklon
1:1,75 (30°)

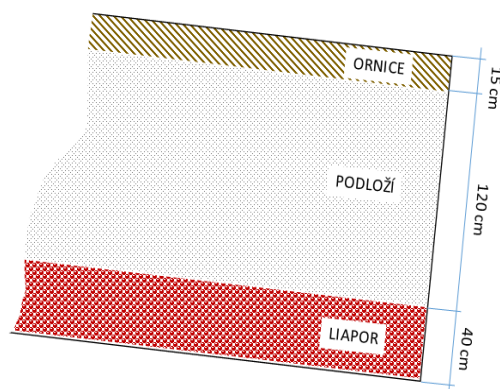
Sklon
1:2,5 (22°)

Obrázek 27 Jednotlivé experimentální plochy s různým sklonem na lokalitě Jirkov.

Díky velké hloubce erozního kontejneru bylo možné přiblížit vlastnosti půdního vzorku co nejvíce přirozeným charakteristikám půdy v zemědělské krajině. V erozním kontejneru byly vytvořeny celkem 3 různé vertikální vrstvy (Obrázek 28). Spodní vrstvu přibližně 40 cm tvořil Liapor pro zajištění propustnosti profilu. Druhá vrstva byla tvořena 120 cm zeminy, která byla vždy po 30 cm hutněna hutnicí deskou a čímž reprezentuje zhutnělý profil běžně se vyskytující při stavební činnosti v odhalených zářezech nebo na zemědělských pozemcích v rámci zhutnělého podorničí. Obě tyto vrstvy byly takto ponechány po celou dobu experimentů. Poslední svrchní vrstvu tvořila ohumusovaná ornice – půda A (Tabulka 6), která byla pro každý experiment dosypávána a hutněna pouze ručním válcem. Tato úprava povrchu holé orné půdy je běžně využívána při standardních erozních experimentech (Kavka et al., 2018).

MODELOVÁNÍ EROZE PŮDY S VYUŽITÍM DAT PODROBNÉHO MONITORINGU

Kapitola 4: Monitoring středně velkých erozních ploch (plocha < 10 m²)



Obrázek 28 Schéma půdního profilu na experimentální lokalitě Jirkov.

Na stanovišti laboratorního DS byla využívána experimentální plocha, která je součástí konstrukce laboratorního DS. Popis tohoto zařízení, včetně erozního kontejneru na půdní vzorek, je součástí kapitoly 2.3.1.2. V principu se jedná o kontejner o půdorysném rozměru 4 x 1 m s hloubkou 0,2 m. Na perforovaném dně je 5 cm vrstva písku pro zajištění perkolace. Samotný půdní vzorek má mocnost 15 cm a je připravován stejným způsobem jako na lokalitě Jirkov, tzn. nasypáním čerstvé půdy a zaválcováním pomocí ručního válce, čímž se vytvoří standardizovaný povrch úhuru.

Tabulka 6 uvádí základní fyzikální parametry testovaných půd. Půda A byla odebrána v areálu společnosti Strix s.r.o. v Jirkově jakožto skrývka ornice běžně využívaná společností při stavebních pracích. Tato půda byly využívána na měřicím stanovišti v Jirkově a v 90 % případů také na laboratorním dešťovém simulátoru ČVUT. Druhá půda byla zakoupena v kompostárně Jena v Úhličkách u Prahy, kde se prodává jako půda pro ohumusování svrchních vrstev půdy. Tato půda byla testována pouze na experimentální ploše na laboratorním dešťovém simulátoru v přibližně posledních 10 % provedených simulací od listopadu roku 2020.

Tabulka 6 Fyzikální vlastnosti testované půdy na lokalitě Jirkov a ČVUT v Praze.

Půda	Lokalita	Jíl %	Prach %	Písek %	Půdní textura -	Pórovitost %	Objemová hmotnost g.cm ⁻³
A – Skrývka ornice	Jirkov + ČVUT	39,5	32,2	28,3	jílovitá hlína	61,9	0,98
B – Kompostovaná ornice	ČVUT	8,0	45,7	46,3	hlína	52,2	1,28

4.1.2 Fotogrammetrické měření

Pro potřeby fotogrammetrického zpracování byly v případě experimentálních ploch na lokalitě Jirkov i v případě halové dešťového simulátoru ČVUT v Praze instalovány referenční vlíčovací terče (GCP) 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

MODELOVÁNÍ EROZE PŮDY S VYUŽITÍM DAT PODROBNÉHO MONITORINGU

Kapitola 4: Monitoring středně velkých erozních ploch (plocha < 10 m²)

umístěných po obvodu a 2 terče byly umístěny na dělicím prkně uprostřed. Všechny terče byly následně zaměřeny pomocí totální stanice a výsledné souřadnice byly poté přiřazeny k odpovídajícím bodům při zpracování dat (Obrázek 29 – snímek vlevo).

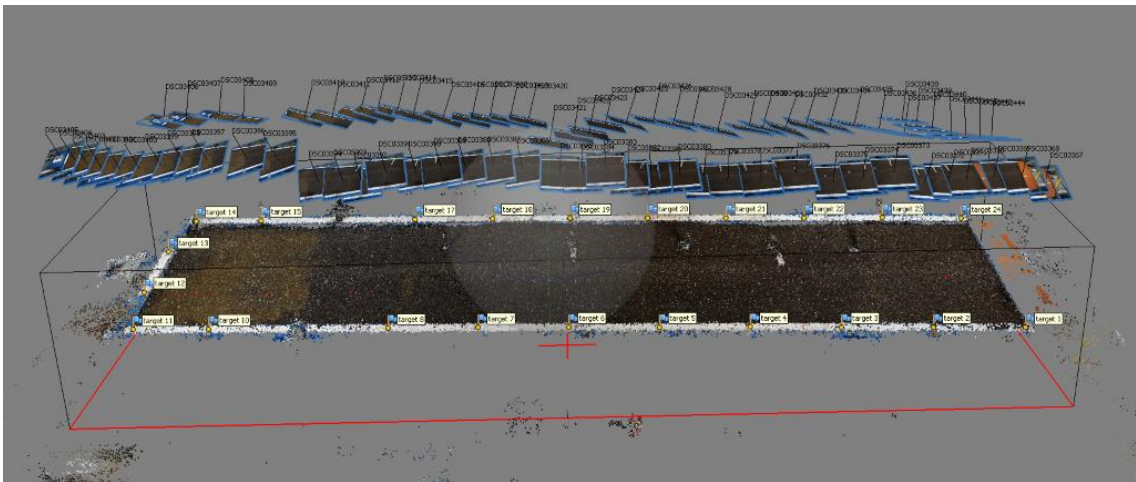
Experimentální plocha na halovém DS byla vybavena celkem 24 terči rovnoměrně umístěnými po obvodu plochy. Tyto terče byly vyrobeny potiskem na 1 metru dlouhých páskách z měkkčeného PVC v již předem definovaném souřadném systému. Instalovány byly nalepením na okraj erozní plochy s kontrolou předem definovaných vzdáleností mezi jednotlivými terči. Porovnání obou systémů je názorně zobrazeno pomocí ortofoto snímků na následujícím Obrázek 29.



Obrázek 29 Ortofoto snímky experimentálních ploch v lokalitě Jirkov (snímek vlevo) a na halovém DS ČVUT v Praze (snímek vpravo) s vyznačenými referenčními terči.

Takto připravené experimentální plochy byly při každém měření snímány pomocí bezzrcadlového fotoaparátu Sony s velikostí čipu APS-C. V případě lokality Jirkov byl použit fotoaparát Sony NEX-5N s rozlišením snímáče 16,1 Mpx v kombinaci se širokoúhlým objektivem Samyang s ohniskem 12 mm, resp. 18 mm v přepočtu na kinofilm. Při experimentech na laboratorním DS byl využit fotoaparát Sony A6000 s rozlišením snímáče 24,1 Mpx v kombinaci s objektiv Sony 16-50 mm nastaveným na 16 mm, resp. 24 mm v přepočtu na kinofilm. Každé jedno snímkování 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 terči a menší vzdálenosti fotoaparátu od povrchu stačil menší počet snímků. Z hlediska polohy fotoaparátu při snímání bylo prováděno kolmé snímání ve dvou řadách při okrajích kontejneru s co největším překryvem sousedních snímků v podélném i příčném směru (přibližně 80% překryv). Ukázka polohy fotoaparátu pro jednotlivé snímky při snímání plochy laboratorního dešťového simulátoru je na následujícím Obrázek 30. Při snímkování plochy je nastavený režim priority clony s hodnotou okolo F8 a citlivostí okolo hodnoty ISO 800 (max. 1600), aby bylo docíleno co největší hloubky ostrosti snímků, ale zároveň, aby dopočítaný expoziční čas nebyl kratší než přibližně 1/80 sekundy z důvodu zajištění dostatečné ostrosti snímků.



Obrázek 30 Zobrazení pozice fotoaparátu vůči jednotlivým snímkům plochy.

4.1.3 Zpracování a analýza naměřených dat

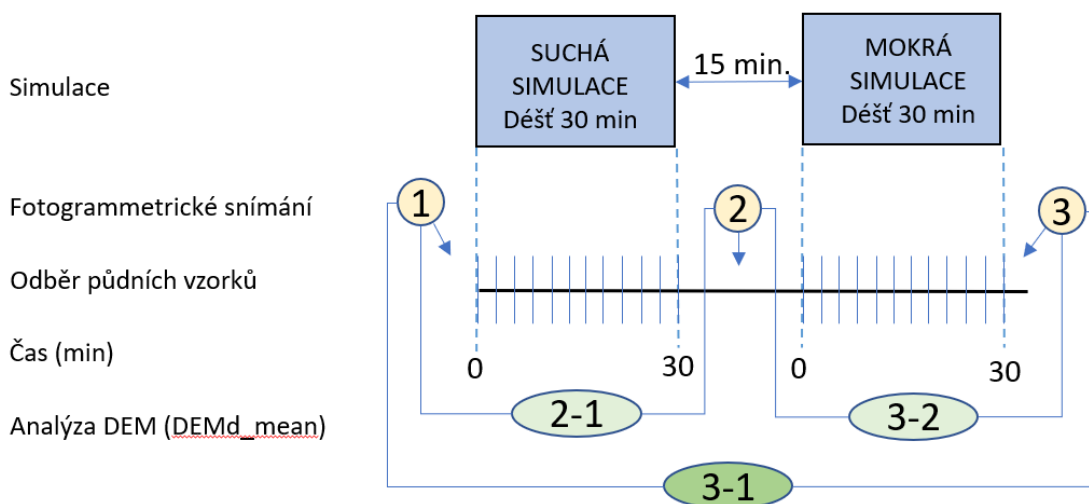
Zpracování a vyhodnocení snímků se provádí po roztříděných všech fotografiích podle lokality, úpravy povrchu a čísla simulace. Postup zpracování probíhá na stejném principu jako v případě studie kapkové eroze, který je popsán v kapitole 3.2.5. Prvním krokem fotogrammetrického zpracování je nahrání odpovídajících 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. Při tomto typu experimentu, kde nejsou na všech snímcích zobrazeny všechny terče, jako je tomu v případě experimentu kapkové eroze, Dále se k těmto terčům přiřadí odpovídající souřadnice z připraveného souboru pro jednotlivé plochy dle zaměření pomocí totální stanice (Jirkov) či definovaném a instalovaném souřadném systému (Laboratorní DS). Oproti experimentu kapkové eroze, který pracoval vždy s jedním stejným souřadnicovým systémem jsou zde 4 varianty – 3 pro lokalitu Jirkov podle 3 různých sklonů a 1 pro laboratorní DS. Další kroky jsou spuštěny automaticky pomocí vytvořeného hromadného „batch“ souboru. Tento soubor automaticky vytváří bodové mračno a výsledné ortofoto snímky a digitální modely terénu (DEM) a následně provádí jejich exportu do určených adresářů s pevně nastaveným rozlišením s hodnotou 1 mm. Z hlediska rozlišení a kvality výsledných dat v bylo dosaženo celkově nižšího rozlišení i přesnosti než v případě studie kapkové eroze. Vzhledem k odlišnostem mezi venkovní experimentální lokalitou Jirkov a laboratorním stanovištěm ČVUT, byly zaznamenány rozdíly v rozlišení i přesnosti mezi těmito

MODELOVÁNÍ EROZE PŮDY S VYUŽITÍM DAT PODROBNÉHO MONITORINGU

Kapitola 4: Monitoring středně velkých erozních ploch (plocha < 10 m²)

dvěma sadami dat. Ačkoliv byly v obou případech výsledné DEM i ortofoto snímky exportovány se shodným rozlišením 1 mm, maximální rozlišení u dat z lokality Jirkov bylo průměrně 0,34 mm s průměrnou výškou snímání 1,4 m nad povrchem půdy, u dat z lokality ČVUT bylo dosaženo průměrného rozlišení 0,24 mm s průměrnou výškou snímání 98 cm nad povrchem půdy. V rámci zjištění přesnosti výsledných modelů byly zjištěny vertikální a horizontální střední velikosti chyb pro referenční kontrolní body $RMSE_z$ a $RMSE_{xy}$. V lokalitě Jirkov bylo dosaženo $RMSE_z$ 6,28 mm se směrodatnou odchylkou 1,61 mm a $RMSE_{xy}$ 5,94 mm se směrodatnou odchylkou 2,18 mm. Na měřicím stanovišti laboratorního DS ČVUT v Praze bylo dosaženo hodnoty $RMSE_z$ 2,77 mm se směrodatnou odchylkou 1,61 mm a hodnoty $RMSE_{xy}$ 1,72 mm se směrodatnou odchylkou 0,70 mm. Stejně jako v případě kapkové eroze byla vypočítána hodnota LoD dle Williams (2012), která pro data z lokality Jirkov je 8,78 mm a pro data z lokality ČVUT je 3,92 mm.

V následujících krocích se pracuje již pouze s vygenerovaným ortofoto snímkem a DEM. Tyto kroky probíhají v softwaru ArcGIS pomocí vytvořeného skriptu stejně jako při experimentech s kapkovou erozí. Z podstaty experimentů, kdy jsou prováděny fotogrammetrická měření pro několik stavů povrchu experimentální plochy (snímání 1-3), je důležité, aby byla získaná data obsahově a kvalitativně přibližně stejná při všech 3 snímkování v řadě (Obrázek 31). Z jednoho standardního experimentu obsahujícího dvě zadešťování (suchá + mokrá simulace) je teoreticky možné získat maximálně 3 rozdílové modely porovnávající stavy 2-1, 3-2 a celkový rozdíl 3-1. V případě, že ze 3 snímkování nejsou dostatečně kvalitní DEM z jednoho snímkování, lze získat místo 3 rozdílových modelů pouze 1. V případě, že se nepodaří zajistit dostatečně kvalitní data ze 2 snímkování, potom nelze vytvořit žádný rozdílový model.



Obrázek 31 Schéma fotogrammetrického snímání 1-3 v závislosti na provedených simulacích v rámci jednoho experimentu.

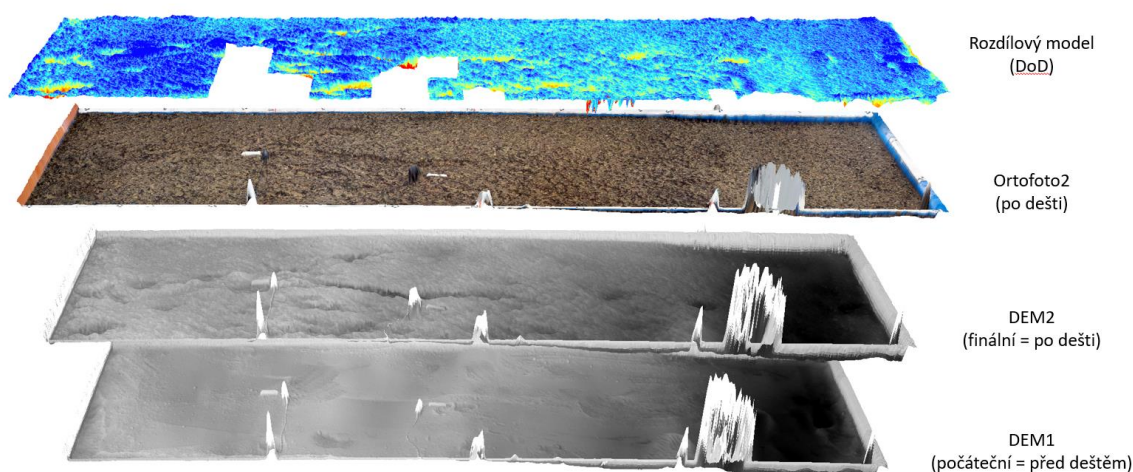
V případě chybějící části experimentální plochy na výsledném DEM je zapotřebí oříznout výpočtový polygon, čímž se ale významně snižuje kvalita dat. Pro vyhodnocení erozních jevů je totiž důležité, aby byly porovnávány plochy vždy ve stejném a celém rozsahu tak, aby byly v ploše dlouhodobě a rovnoměrně zahrnuta místa kde dochází k erozi materiálu (horní strana plochy) a zároveň i místa kde dochází k sedimentaci materiálu (spodní strana plochy). Tento aspekt je

MODELOVÁNÍ EROZE PŮDY S VYUŽITÍM DAT PODROBNÉHO MONITORINGU

Kapitola 4: Monitoring středně velkých erozních ploch (plocha < 10 m²)

velmi důležitý a omezující z hlediska využitelného počtu provedených simulací a fotogrammetrických měření. Z tohoto důvodu je proto ve finálním vyhodnocení podstatně nižší počet měření, než bylo skutečně provedeno. Pokud by ve výpočtovém polygonu chyběla horní část experimentální plochy, potom by výsledky změny objemu byly podhodnocené, tzn. výsledkem by mohl být převládající přírůstek půdy z důvodu chybějící části obsahující převážně erozi půdy místo sedimentace. Naopak v případě chybějící spodní části experimentální plochy by mohl být celkový odhadnutý objem eroze podstatně nadhodnocen z důvodu chybějící části s převládající sedimentací. Tyto chybějící části DEM mohou vzniknout špatným způsobem snímkování, nedostatečným počtem snímků, malým překryvem snímků, špatným nastavením snímkování či špatným osvětlením v podobě ostrého slunce a hlubokých stínů v kombinaci s příliš osvětlenými částmi plochy v případě venkovních experimentů na lokalitě Jirkov. Chybějící části výpočtového polygonu jsou však často vyloučeny z výpočtu i kvůli nežádoucím vlivům, které mohou způsobovat například vlhkostní čidla na povrchu půdy, tzn. usazování půdních částic na jejich povrchu či jejich pohyb (nebo např. přírodního kabelu) během experimentu.

Oříznutí výpočtových polygonů se provádí na základě ortofoto snímků či chybějících částí DEM. Obecně je zapotřebí polygon upravit tak, aby zahrnoval plochu, která je k dispozici na všech třech DEM z jednoho měření, tzn. suchý stav před simulací (1), po suché simulaci (2) a po mokré simulaci (3) (Obrázek 31). V případě dat z laboratorního DS, kde jsou umístěna vlhkostní čidla na povrchu půdy, se polygon upravuje tak, aby v sobě neobsahoval místa, kde jsou umístěna tato čidla a k nim vedoucí kabely, případně část srážkoměru, neboť tyto předměty by mohly ovlivnit výsledná data z důvodů změny polohy mezi jednotlivými měřeními či z důvodů zašpinění erodovaným materiálem. Ukázka vstupních DEM1 a DEM2, ortofoto snímku a výsledného oříznutého DoD je na Obrázek 32.

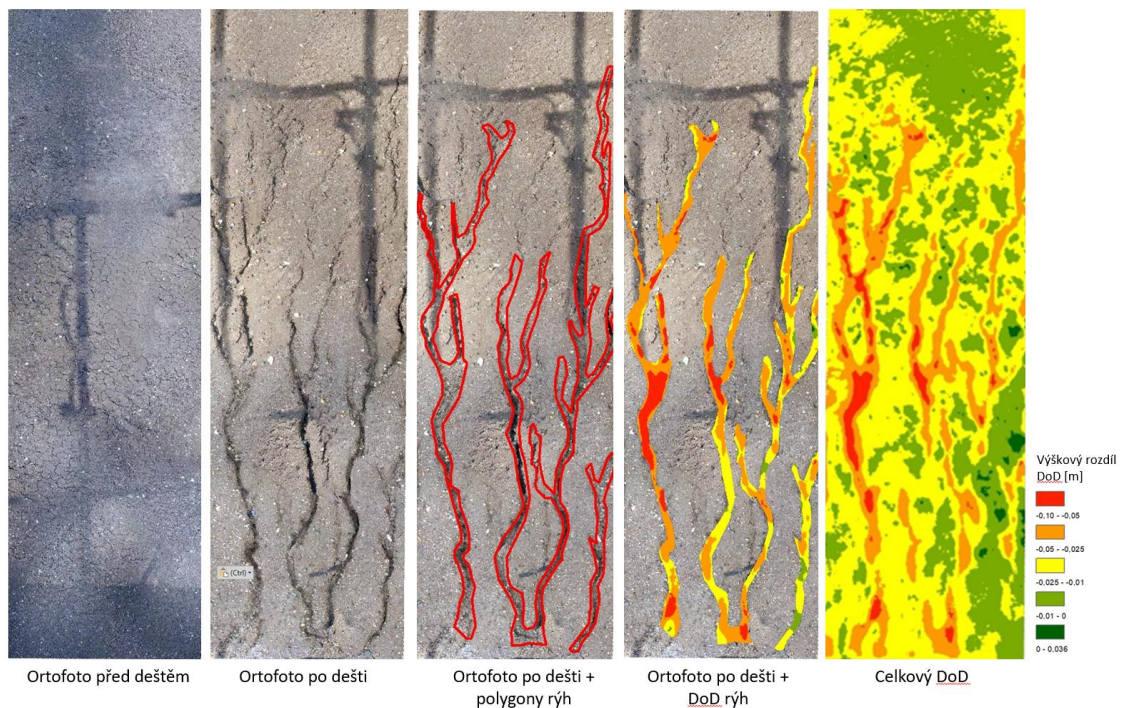


Obrázek 32 Datové sady využívané k analýze změn objemu vzorku: DEM1, DEM2, ortofoto a rozdílový model DoD s odstraněnými částmi v místech vlhkostních čidel a srážkoměru.

Další část zpracování se provádí již pouze pomocí stejného skriptu jako v případě kapkové eroze popsaného v kapitole 3.2.5. Ten odečítá vždy kombinaci dvou DEM před simulací (DEM1) a po simulaci (DEM2). Každá tato kombinace DEM vygeneruje rozdílový model DoD

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_mean) od DEM po simulaci (DEM2_mean). Pomocí známé plochy výpočtového polygonu a výškové změně DEMd_mean je prostým součinem vypočítána celková změna objemu.

Speciálním případem vyhodnocení získaných DEM bylo vyhodnocení vlivu rýhové eroze na celkové množství půdního smyvu. V tomto případě bylo nutné vytvořit polygony, které určují plošný rozsah rýh v rámci experimentální plochy. Tyto polygony byly vytvořeny manuálně podle ortofoto snímků neboť dle jiných studií není automatická detekce takovýchto útvarů dostatečně reprezentativní (Báčová et al., 2019b; Cândido, 2019). Procesní postup vytvoření polygonů rýh je graficky znázorněn na následujícím Obrázek 33 a kvantifikován v kapitole 4.2.2.



Obrázek 33 Procesní postup analýzy vlivu rýhové eroze na celkovém půdním smyvu.

Celkem bylo v rámci této analýzy zpracováno celkem 11 experimentů (suchá + mokrá simulace) s celkově zahrnutým počtem 33 DoD. Vždy se jednalo o experimenty na lokalitě Jirkov v rámci všech 3 testovaných sklonů 22°, 30° a 34°. Metodika zpracování byla omezena na analýzu změny objemu v rámci celé plochy v porovnání se změnou objemu pouze v rámci polygonu rýhy. Cílem bylo zjistit, jaký poměr množství eroze tvoří rýhová eroze a jaký poměr plošná eroze.

4.1.4 Vstupní data

Experimentální plochy Jirkov

V průběhu projektu bylo v letech 2017 až 2020 provedeno v rámci 78 erozních experimentů (vždy kombinace suché a mokré simulace) celkem 234 fotogrammetrických snímkování (snímkování 1 – 3 při každé simulaci). 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 ploch (například ostré sluneční osvětlení), které způsobuje velké rozdíly mezi stíny a světlými, 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 výsledných dat. Ve finálním vyhodnocení je z těchto všech důvodů využito 95 jednotlivých rozdílových modelů DoD, která splňují kvalitativní požadavky v dostatečném rozsahu.

Laboratorní DS

V průběhu let 2018 – 2020 bylo provedeno celkem 31 erozních experimentů (vždy kombinace suché a mokré simulace) v kombinaci přímého a nepřímého měření. Při těchto experimentech bylo provedeno celkem 77 úspěšně vyhodnocených fotogrammetrických snímání, tzn. vytvořených DEM. Bohužel 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 v podobě tvorby rozdílového modelu DoD. 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. Tento případ nastal u 4 simulací. Z těchto důvodů 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 DoD.

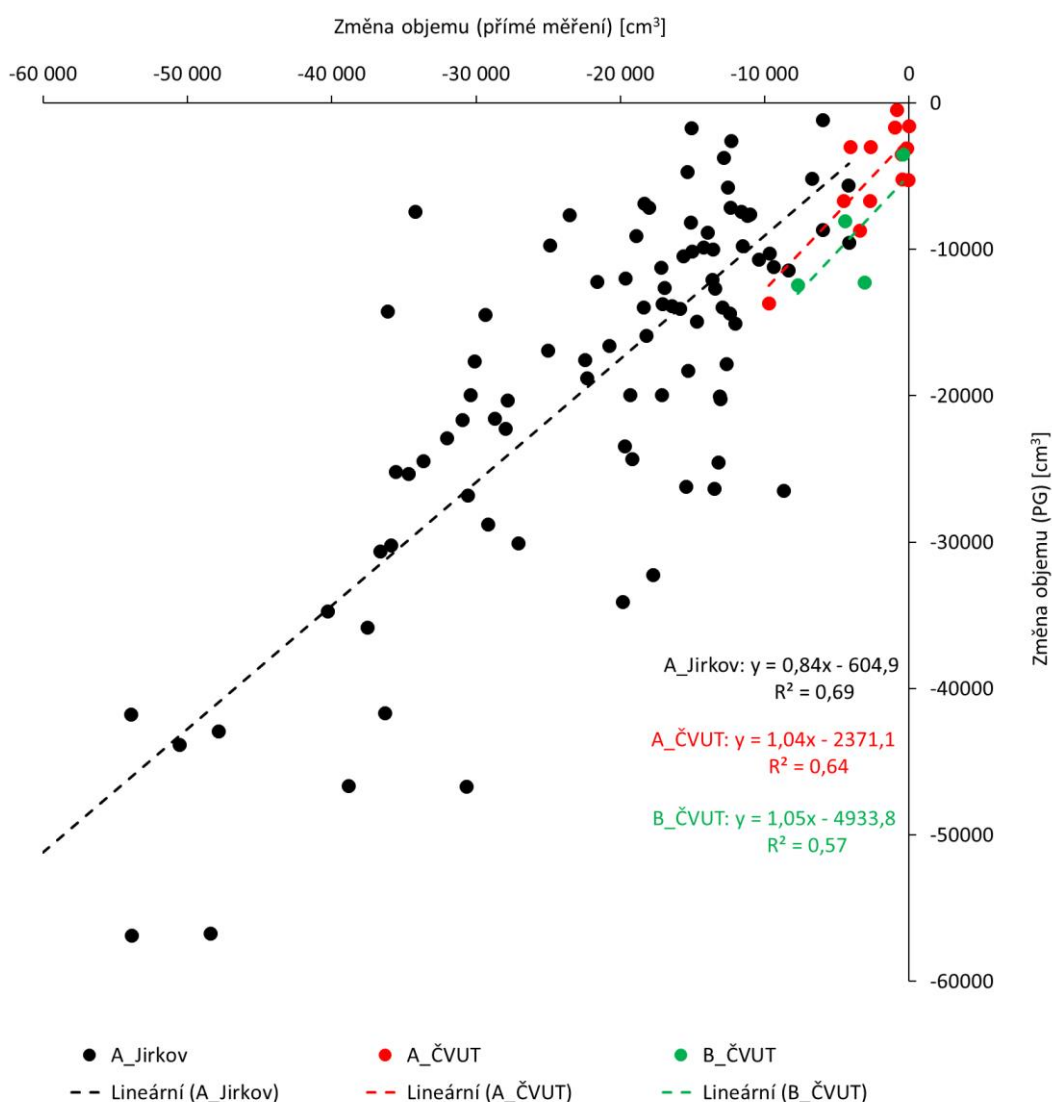
4.2 Výsledky

4.2.1 Objemové změny vzorku

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 Obrázek 34 zobrazuje závislost změny objemu následkem erozního smyvu naměřeného přímou metodou na ose x a změnou objemu vypočítaného pomocí fotogrammetrické metody SfM-MVS 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 laboratorním DS na ČVUT v Praze.

MODELOVÁNÍ EROZE PŮDY S VYUŽITÍM DAT PODROBNÉHO MONITORINGU

Kapitola 4: Monitoring středně velkých erozních ploch (plocha < 10 m²)



Obrázek 34 Graf závislosti naměřeného smyvu půdy na vypočítané objemové změně povrchu při experimentech na úhoru na experimentálních plochách na lokalitě Jirkov a laboratorním DS ČVUT v Praze.

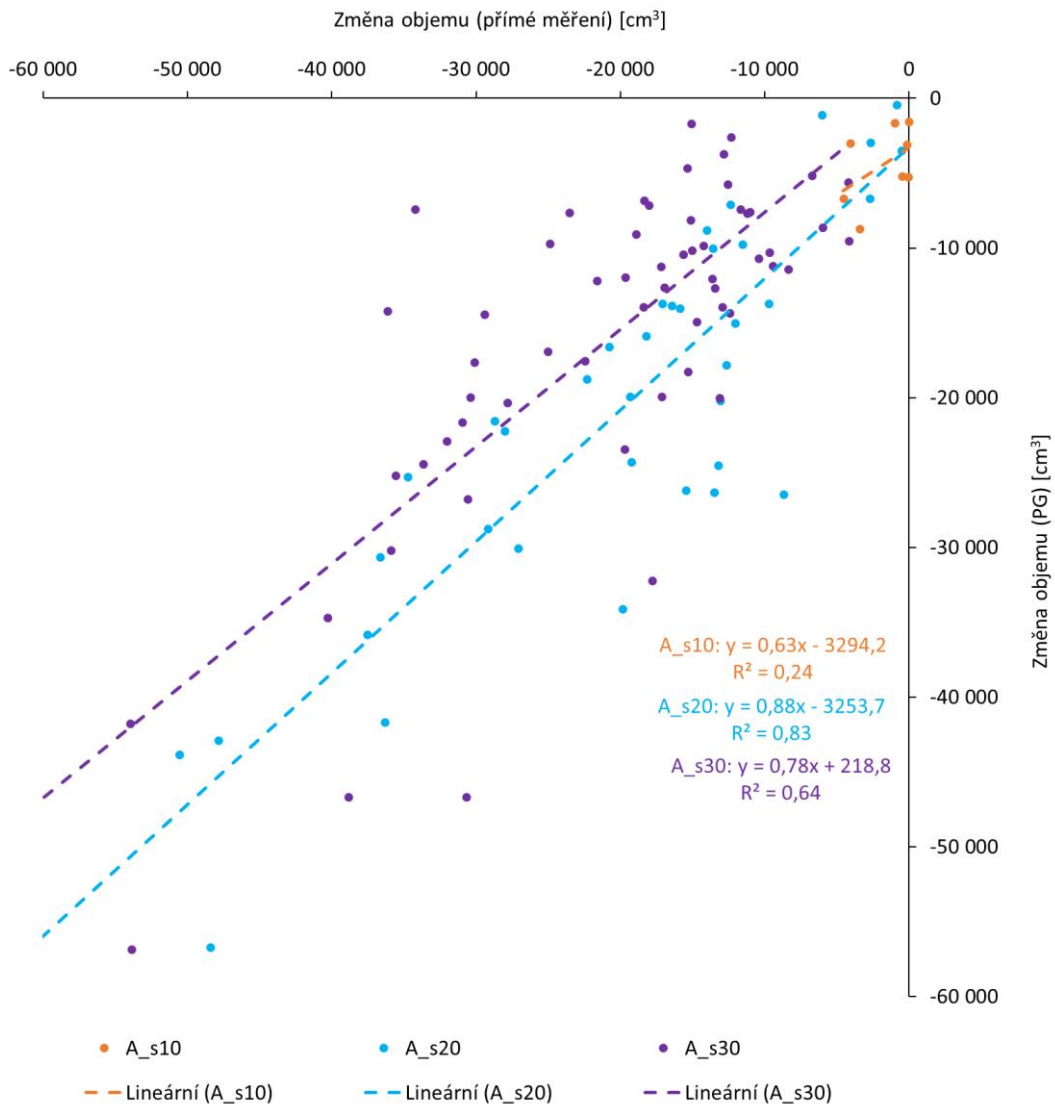
Z grafu na Obrázek 34 je patrný významný lineární trend mezi porovnávanými veličinami. V případě půdy A měřené na lokalitě Jirkov dosahuje tato závislost koeficientu determinace 0,69 ($n = 95$, $p < 0,05$) a v případě stejné půdy měřené na lokalitě ČVUT dosahuje koeficientu determinace 0,64 ($n = 13$, $p < 0,05$). Měření na vzorku půdy B bylo provedeno velmi malé množství ($n = 4$) u kterých nebyla potvrzena významná závislost ($p > 0,05$) s koeficientem determinace 0,57. Z tohoto důvodu není možné analyzovat vliv půdních vlastností na získané výsledky, jako tomu bylo v případě experimentů s kapkovou erozí. V případě spojení datových sad z lokality Jirkov a ČVUT ($n = 108$) na půdním vzorku A, došlo k zvýšení koeficientu determinace na 0,73. Z důvodu stejné testované půdy na lokalitě Jirkov a ČVUT a přibližně shodným rozměrům zahrnuté testované plochy v podobě vytvořeného polygonu v Jirkově (3,57 m²) a ČVUT (3,88 m²), lze tyto datové sady vyhodnocovat v rámci jedné testované sady. To lze říci i na základě toho, že v obou případech se podařilo dosáhnout velmi blízkých trendů nezávisle pro obě lokality. Hlavní rozdíl mezi jednotlivými sadami spočívá

v celkově nižších zaznamenaných změnách objemu, tzn. nižším erozním smyvům, na laboratorním DS ČVUT v Praze, kde se podařilo dosáhnout nižší intenzity deště znamenající i nižší výsledné hodnoty ztráty půdy.

Vliv sklonu svahu

Data zobrazená na Obrázek 34 vyjadřují naměřené hodnoty objemové změny pouze na základě rozdělení dle jednotlivých stanovišť Jirkov a ČVUT a testovaných půdních vzorků A a B. V tomto případě byla získaná data segregována na základě testovaného sklonu, ať již na pevně ustavených plochách na lokalitě Jirkov, tak na variabilně nastavitelné experimentální ploše na laboratorním DS ČVUT v Praze (Obrázek 35). Z tohoto hlediska byly porovnány 3 kategorie sklonů od nízkého, tj. pouze laboratorní měření na lokalitě ČVUT se sklonem 10° („s10“), přes střední sklony na lokalitě Jirkov i ČVUT, tj. sklony v rozmezí od 20 do 22° („s20“), až po vysoké sklony taktéž z obou lokalit v rozmezí od 30 do 34° („s30“).

MODELOVÁNÍ EROZE PŮDY S VYUŽITÍM DAT PODROBNÉHO MONITORINGU
 Kapitola 4: Monitoring středně velkých erozních ploch (plocha < 10 m²)

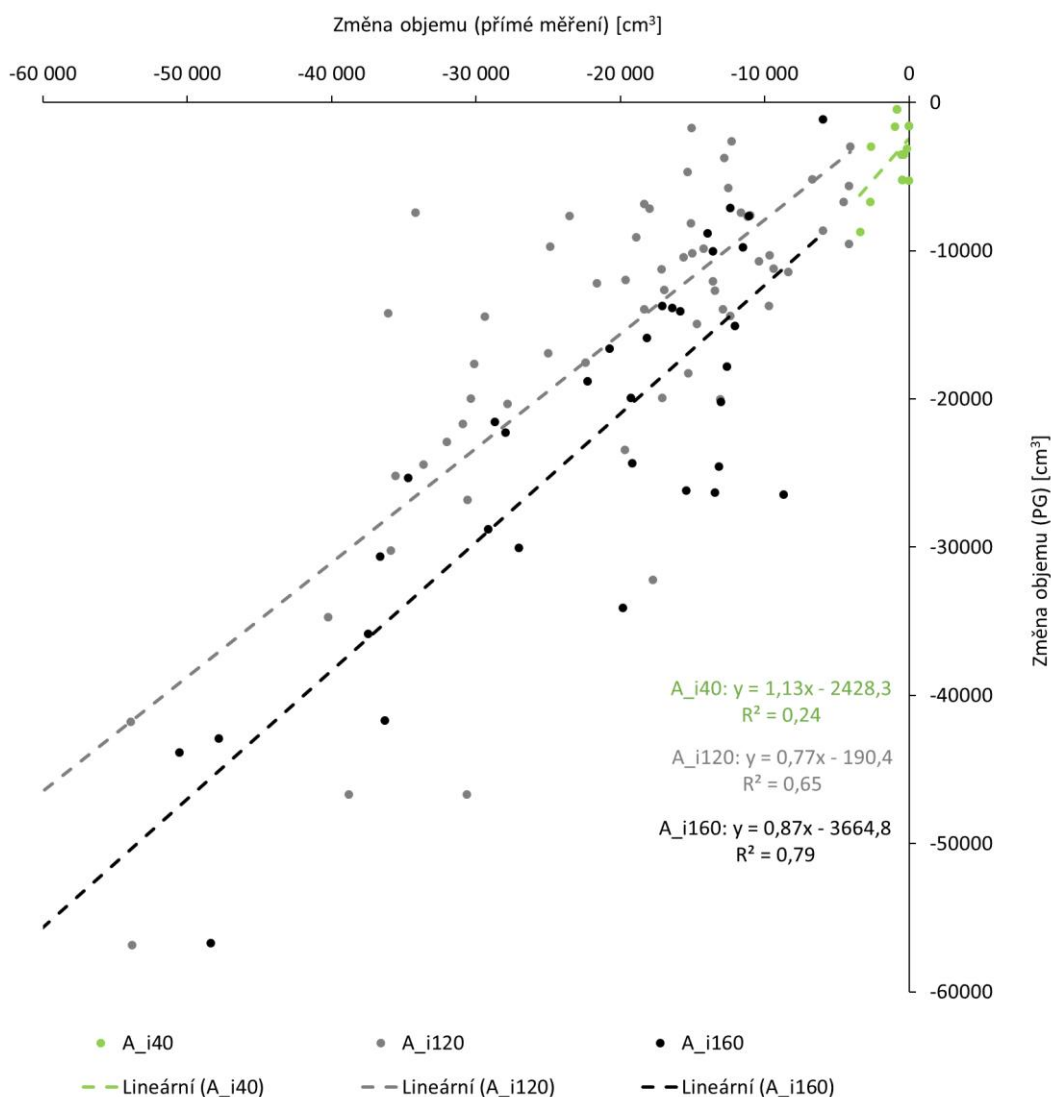


Obrázek 35 Graf závislosti změny objemu na základě přímého a nepřímého měření pro různé testované sklony ("A" značí půdní vzorek, "s10" značí sklon 10°, "s20" značí sklon od 20° a "s30" značí sklon od 30° do 34°).

Data vyhodnocená v rámci kategorií zohledňující podélný sklon experimentální plochy byla testována pomocí regresní analýzy. Nejnižší sklon 10° byl testován pouze na laboratorním DS ČVUT v Praze, avšak pouze při malém počtu opakování ($n = 8$). Zřejmě i z tohoto důvodu tato data nevykazovala statisticky významnou korelaci v uvažované hladině pravděpodobnosti ($p > 0,05$). Na větších sklonech s20 a s30 se prokázala statisticky významná závislost ($p < 0,05$) s koeficientem determinace 0,83 pro sklon s20 a 0,64 pro sklon s30.

Vliv intenzity deště

Získaná data byla dále segregována podle intenzity simulovaného deště na 3 skupiny, tzn. nízkou intenzitu v rozsahu od 40 do 60 mm/hod („i40“), střední intenzitu od 113 do 130 mm/hod („i120“) a vysokou intenzitu o hodnotě 160 mm/hod („i160“) (Obrázek 36).

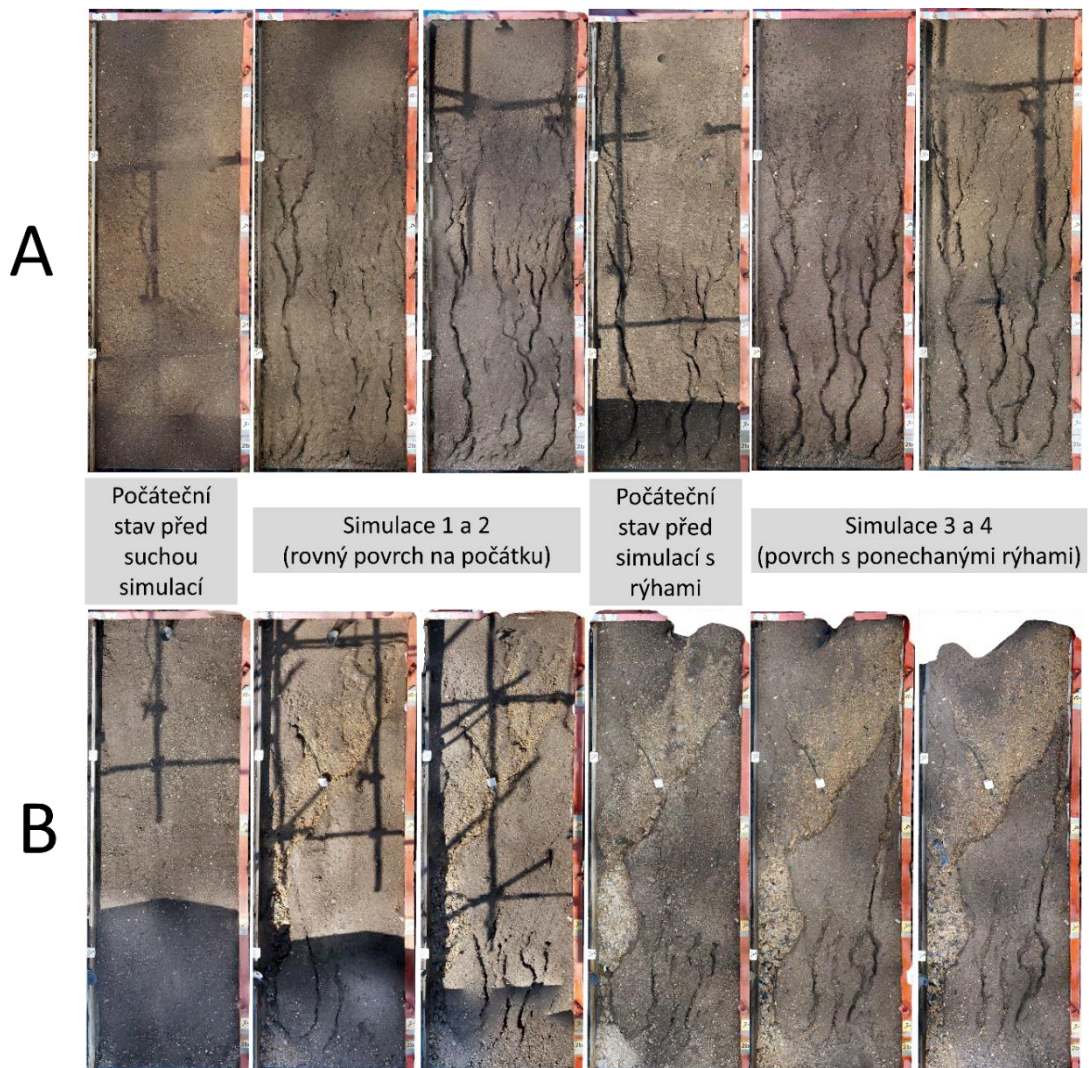


Obrázek 36 Graf závislosti změny objemu na základě přímého a nepřímého měření pro různé testované intenzity deště ("A" značí půdní vzorek, "i40" značí intenzitu od 40 do 60 mm/hod, "i120" značí intenzitu od 113 do 130 mm/hod a "i160" značí intenzitu 160 mm/hod).

Na základě vyhodnocených dat lze konstatovat, že ačkoliv vztah mezi oběma datovými sadami je statisticky významný ve všech třech kategoriích intenzit ($p < 0,05$), tak lze konstatovat, že malý počet měření s nízkou intenzitou ($n = 20$) znamenal velmi nízký koeficient determinace s hodnotou 0,24. Při vyšších intenzitách docházelo k významnějším změnám objemu půdy v důsledku většího erodovaného množství půdy, čímž došlo postupně ke zvýšení vzájemného koeficientu determinace z 0,65 na 0,79 pro nejvyšší intenzitu 160 mm/hod.

4.2.2 Vliv rýhové a mezirýhové eroze

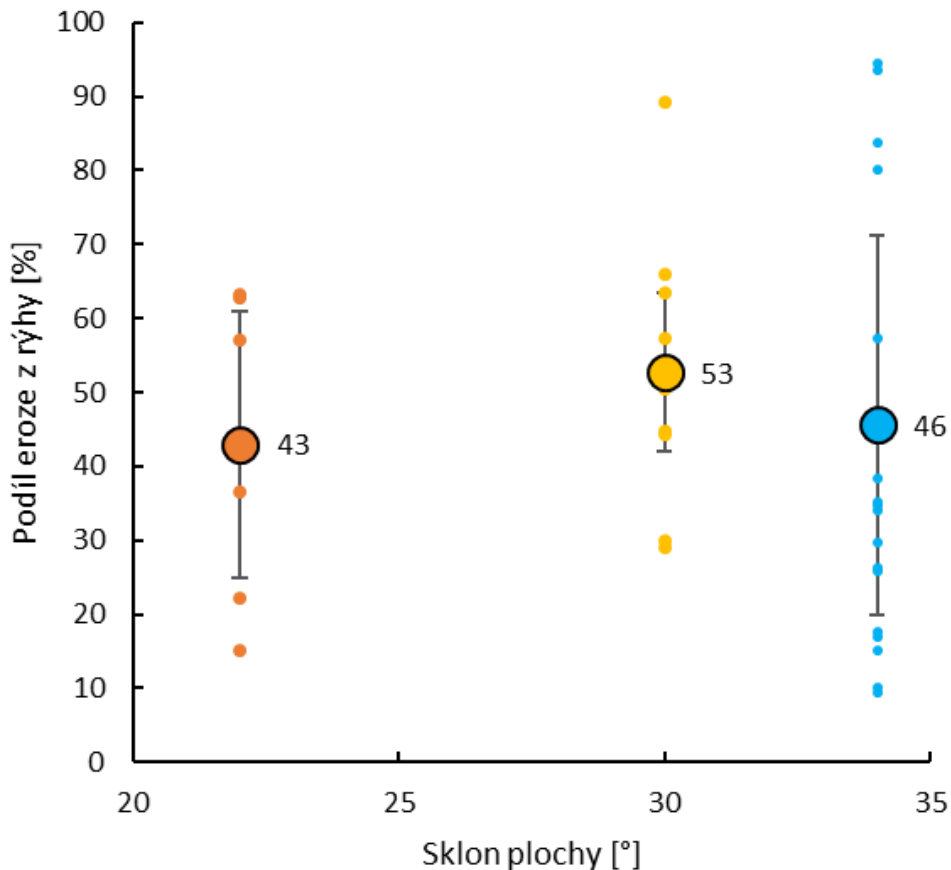
V rámci vyhodnocování objemových změn povrchu půdy byla provedena analýza vlivu vytvořených erozních rýh na celkový smyv půdy. Obrázek 37 je ukázkou postupného vývoje povrchu (ortofoto) včetně tvorby erozních rýh při dvou na sobě nezávislých sériích experimentů od simulace č. 1 po simulaci č. 4. V obou případech se jedná o totožný sklon 34° a stejnou půdu při experimentu na lokalitě Jirkov.



Obrázek 37 Ukázka vývoje povrchu a rozdílné tvorby rýhové eroze na experimentální ploše Jirkov se sklonem 34° při dvou různých měřeních A a B.

Vývoj povrchu půdy v těchto dvou případech ukazuje na odlišnou tvorbu erozních rýh. V sérii měření označené jako A je tvorba rýh postupná a rovnoměrná s postupným prohlubováním již vytvořených rýh. Při druhé sérii měření označené jako B dochází k velkému odnosu půdy a vytvoření větší ploché rýhy v horní části plochy, čímž dochází k většímu poškození celého svahu.

Tyto poznatky zobrazené na pořízených ortofoto snímcích se projevily při porovnání hodnot smyvu z celé plochy a pouze v rámci polygonu rýhy. Zatímco v případě A byl poměr plošné versus rýhové eroze průměrně 72:28, v případě B byl poměrně zcela opačný 26:74 ve prospěch rýhové eroze, což koresponduje s ortofoto snímky, které ukazují na mnohem větší tvorbu erozních rýh v případě B. Hodnoty poměrného zastoupení změny objemu v rámci rýhy na celkové změně objemu v rámci celé plochy jsou pro všechny vyhodnocené experimenty znázorněny na grafu na Obrázek 38.



Obrázek 38 Podíl zastoupení změny objemu v rámci rýhy na celkové změně objemu v rámci celé plochy (velký kruhový symbol znázorňuje průměrnou hodnotu se směrodatnou odchylkou).

Na základě vyhodnocených experimentů bylo zjištěno procentuální zastoupení změny objemu v rámci rýhy v poměru k celkové změně objemu v celé ploše pro 3 testované sklony experimentálních ploch v lokalitě Jirkov. Na sklonu 22° činila průměrná hodnota podílu rýhové eroze 43 % (SD 18), na sklonu 30° průměrně 53 % (SD 11) a na sklonu 34° průměrně 46 % (SD 26).

4.2.3 Odvození regresní modelu

Stejně jako v případě studie kapkové eroze byl i na základě těchto analyzovaných dat odvozen lineární regresní model pro zjištění množství erodovaného materiálu v gramech na základě hodnoty výškové změny DEM před deštěm a po dešti. Oproti studii kapkové eroze byl z důvodu malého počtu měření s půdním vzorkem B (n = 4), odvozen tento regresní model pouze pro půdu

MODELOVÁNÍ EROZE PŮDY S VYUŽITÍM DAT PODROBNÉHO MONITORINGU
Kapitola 4: Monitoring středně velkých erozních ploch (plocha < 10 m²)

s fyzikálně-chemickými vlastnostmi odpovídající půdnímu vzorku A (Tabulka 6). V tomto vztahu není zohledněno to, zda byl povrch ovlivněn rýhovou erozí či nikoliv.

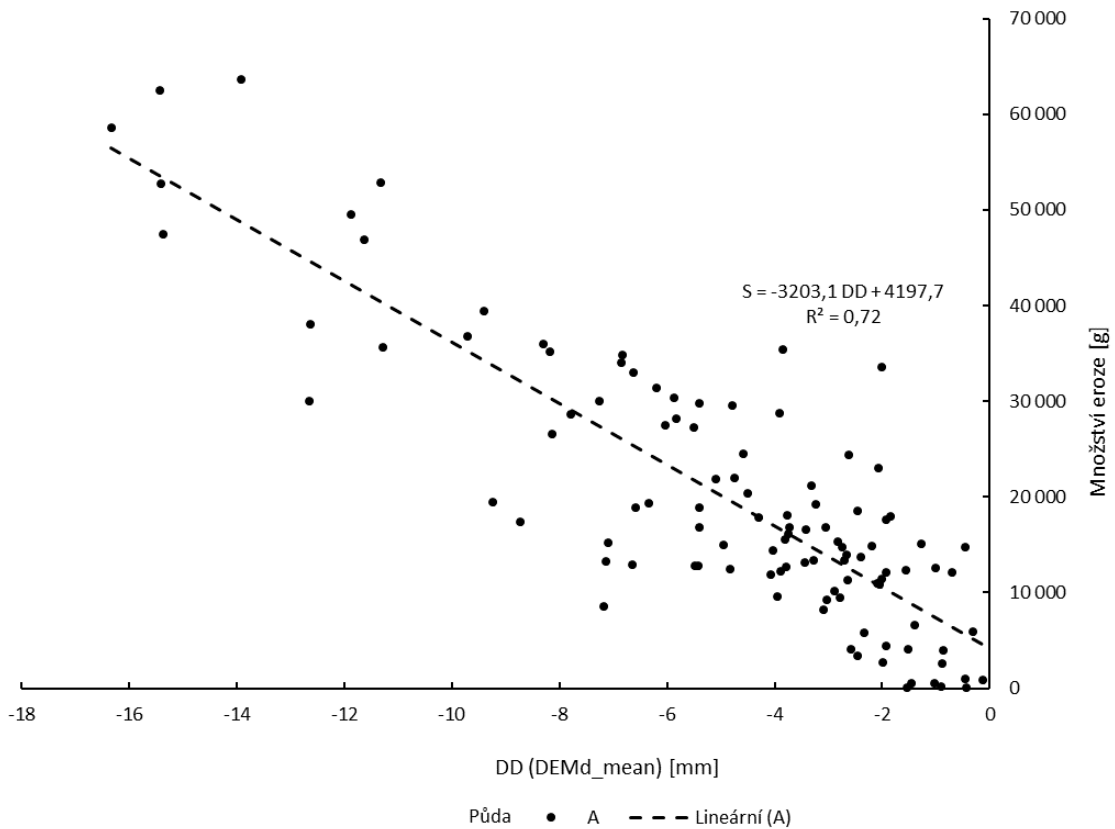
Odvozená rovnice má tvar (koeficient determinace 0,72, $p = 2,16E-31$), (Obrázek 39):

$$S = -3203,1 \times DD + 4197,7 \quad (8)$$

,kde

S = množství eroze půdy v gramech,

DD = DEMd_mean.....průměrný výškový rozdíl mezi digitálním modelem terénu před deštěm a po dešti (mm).



Obrázek 39 Odvozený lineární vztah mezi fotogrammetricky naměřeným výškovým rozdílem digitálního modelu terénu před deštěm a po dešti v závislosti na naměřených hodnotách eroze půdy.

Výsledný regresní model lze aplikovat pouze při podmínkách odvození modelu, tzn. v rámci použité metodiky a v rámci rozlohy a typu testovaných experimentálních ploch. Využití tohoto modelu lze tudíž snadno aplikovat při pokračování výzkumu na stejných plochách s cílem minimalizování počtu experimentů s plně provedeným přímým měřením a naopak s maximalizováním počtu experimentů pouze s měřením SfM-MVS.

4.3 Souhrn výsledků a diskuze

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 naměřeným půdním smyvem a menší časová náročnost provádění experimentů (měření pouze před experimentem a po skončení experimentu). Nevýhody této metody však zůstávají z hlediska absence podrobných dat průběhu odtoku a smyvu v detailních časových krocích či absence dat rychlosti povrchového odtoku. Ačkoliv je v současné době zkoumána i problematika fotogrammetrického intervalového měření erozních procesů (Eltner et al., 2017), není tato metoda ve výsledku prozatím příliš vhodná při detailním snímání mokrého povrchu s povrchovým odtokem.

Výsledné porovnání hodnot měřených pomocí dvou různých metod vykazovalo významnou lineární závislost s koeficientem determinace v podobném rozsahu jako v případě studie kapkové eroze, tzn. výsledný koeficient determinace v rozmezí od 0,57 do 0,69. Průměrná hodnota vypočtené ztráty půdy přepočítaná na stejné jednotky pomocí objemové hmotnosti činila v případě přímého měření 20 105 cm³ a pomocí SfM-MVS 17 824 cm³. Běžnější jednotka vyjadřující ztrátu půdy v erozních studiích jsou tuny na hektar. V této jednotce se jedná o 53,5 t.ha⁻¹ u přímého měření a 47,4 t.ha⁻¹ u metody SfM-MVS.

Ačkoliv problematika rýhové a plošné eroze nebyla hlavním předmětem této disertační práce, v rámci experimentálního testování dat na erozních plochách z lokality Jirkov bylo při 11 experimentech provedeno základní vyhodnocení změny objemu (odhadu množství smyvu) z těchto dvou různých erozních procesů. Velká výhoda fotogrammetrické metody je ta, že pomocí ní lze odlišit erozi půdy z rýhové a plošné eroze. Toto odlišení těchto dvou různých erozních procesů není pomocí přímého měření erodovaného materiálu možné. Při této analýze byly kromě standardních rozdílových modelů DoD zahrnující celou společnou plochu dvou DEM, vytvořeny speciálně DoD pouze pro oblasti v rámci vytvořeného polygonu rýhy. Pro tyto účely bylo nutné nejdříve tyto rýhy identifikovat, což bylo provedeno manuálním vytvořením polygonů rýh nad ortofoto snímkem. Ačkoliv existuje řada nástrojů v GIS aplikacích na automatickou detekci hran, na základě závěrů a doporučení z práce Ing. Báčové (Báčová, 2018) či (Cândido, 2019) byla zvolena metoda spočívající na manuálním vytvořením polygonů na základě vizuálního porovnání s ortofoto snímkem. Dle analýzy zkoumající vliv umístění hrany polygonu nad vytvořenou rýhou se v rámci 8 různých polygonů lišící se vzdáleností až několika centimetrů potvrdilo, že výsledný objem rýhy se sice liší, ale pouze přibližně do 6 % celkového objemu rýhy (Báčová, 2018). Poměr objemové změny pocházející z polygonu rýhy vůči celkové objemové změně z celé plochy byl porovnán na Obrázek 38 z hlediska sklonu testované plochy. Intenzita deště byla ve všech případech vždy stejná. Z výsledků bylo zjištěno poměrné zastoupení změny objemů v rámci rýhy od 9 do 94 % s průměrnou hodnotou 47 % (SD 22 %). Na základě výsledků pro jednotlivé sklony nebyla zjištěna statisticky významná závislost ($p > 0,05$). Výsledky odlišného poměru zastoupení rýhové eroze tudíž nelze indikovat na základě odlišného testovaného sklonu. Vzhledem k ortofoto snímkům na Obrázek 37, které zobrazují odlišný způsob tvorby rýh při parametrově stejných experimentech, se lze domnívat, že proces tvorby rýhové eroze je významně ovlivněn nehomogenitami v povrchové vrstvě půdy

MODELOVÁNÍ EROZE PŮDY S VYUŽITÍM DAT PODROBNÉHO MONITORINGU

Kapitola 4: Monitoring středně velkých erozních ploch (plocha < 10 m²)

či nerovnoměrností zadešťování s možným ovlivněním díky tvorbě úkapů z trysek či zadešťovací konstrukce, a následnou tvorbou preferenčních cest. Stejnou problematikou se zabýval například Cândido, (2019), který zjistil vliv rýhové eroze na stejném principu, tzn. pomocí fotogrammetrického měření povrchů, a pomocí poměrů odnosu z rýhy na celkovém odnosu z celé plochy. Výsledky z této studie ukazují, že podíl rýhové eroze na celkovém smyvu je velmi variabilní a může se pohybovat od 25 do 82 % v závislosti na množství povrchového odtoku a sklonu. Rozsah těchto hodnot přibližně odpovídá rozsahu hodnot poměru rýhové eroze zjištěné v této disertační práci. Ačkoliv holá orná půda je nejnáchylnější pro tvorbu rýhové eroze, na základě leteckých snímků a jejich analýz lze konstatovat, že stačí i menší plocha pokrytá vegetací a rázem dochází snížením rychlosti odtoku a zvýšením infiltrace k omezení nebo zastavení tvorby rýhové eroze (Eltner et al., 2015). Ze stejného důvodu se lze domnívat, že i velké rozdíly mezi poměrem rýhové a plošné eroze mohou být způsobeny nehomogenitami v povrchové vrstvě půd.

Tabulka 7 Porovnání časové a materiální náročnosti přípravy a provedení jednoho experimentu v rámci standardního erozního experimentu..

Jednotlivé kroky	Přímá metoda		Nepřímá metoda	
	Manuální odběr vzorků	čas (min)	Fotogrammetrická metoda SfM-MVS	čas (min)
Příprava vzorku	Nakypření povrchu, urovnání a finální uválcování půdy.	10	Nakypření povrchu, urovnání a finální uválcování půdy.	10
Počáteční sběr dat	-	-	Kontrola a vyčištění referenčních terčů a fotogrammetrické nasnímání.	5
Měření v průběhu experimentu	Měření množství povrchového odtoku a jejich odběr.	2x30	-	-
Finální sběr dat	-	0	Kontrola a vyčištění referenčních terčů a fotogrammetrické nasnímání.	2x5
Zpracování a analýza dat	Laboratorní zpracování: transport získaných vzorků do laboratoře, filtrování vodní suspenze přes filtrační papír, sušení vzorků v peci při 105 ° C po dobu 24 hodin a následné vážení na laboratorních vahách.	30	Počítačové zpracování: třídění snímků, fotogrammetrické zpracování (Agisoft Metashape) a následná analýza rozdílových modelů (ArcGIS) (čas je závislý na využití hromadného zpracování pomocí hromadných příkazů a skriptů).	6
Celkový čas		75		28
Materiální vybavení	Sběrné a transportní nádoby pro odebrané půdní vzorky, laboratorní vybavení: filtrační papíry, odměrné válce, pec, váhy.		Referenční vlíčovací terče, fotoaparát, výkonný počítač s odpovídajícím SW a HW.	

Stejně jako v případě kapkové eroze bylo provedeno porovnání obou metod z hlediska časové a materiální náročnosti pro provedení a vyhodnocení jednoho měření (Tabulka 7). Z uvedených dat je zřetelná velká časová náročnost provedení a vyhodnocení erozních experimentů pomocí přímého měření (75 minut) oproti metodě SfM-MVS (28 minut), která potřebuje pouze 37 % času přímé metody. Při zahrnutí všech 109 provedených experimentů činí celkový rozdíl mezi oběma metodami nezanedbatelných 171 hodin. Stejně jako v předchozím případě kapkové eroze, monitorování erozních procesů pomocí fotogrammetrické metody SfM-MVS může přinést časovou úsporu s cílem maximalizovat počet provedených měření.

5 Diskuze

5.1 Výběr použitých metod

Při výběru vhodných metod měření erozních procesů a projevů byl brán ohled na standardně využívané metody při podobných experimentech. Přímé měření erozních procesů pomocí experimentálních elementárních ploch v kombinaci s odběrem vzorků povrchového odtoku pro následnou analýzu množství erodovaného materiálu je spojeno se samými začátky erozního výzkumu (Wischemeier and Smith, 1978). Tato metoda se stala standardním procesem při získávání erozních dat a obecně se na ni dá spoléhat jako na referenční metodu pro porovnání s dalšími metodami.

Nepřímé měření erozních projevů pomocí fotogrammetrické metody dlouhodobě vychází ze srovnatelných metod (kontaktní metody či laser skenery) jako nejlepší metoda z hlediska poměru kvality výsledných dat, proveditelnosti a časové a materiální náročnosti (Jester and Klik, 2005; Smith et al., 2016). Eltner et al., (2018) dokázala, že pomocí metody SfM lze dosáhnout kvalitativně stejných dat jako v případě využití TLS, avšak s výhodou menší časové i finanční náročnosti. Nicméně při dlouhodobě sledovaných experimentálních plochách (2 roky) se ukázalo, že výškové změny na sledované ploše nemohou být jednoduše prohlášeny za erozi půdy nebo sedimentaci, ale že při takto dlouhých sledovacích obdobích hrají velkou roli i další procesy jako je rozpínání, smršťování a přirozená kompakce půdy závislá na klimatických podmínkách. Se stejným závěrem pracovala i studie od Bauer et al., (2015), která přisuzovala vlivům objemové změny z hlediska vlhkosti půdy značný vliv. Nicméně tyto procesy jsou při experimentech v této disertační práci minimalizovány z důvodu, že se jedná o krátkodobá měření, při kterých je hlavním činitelem srážková událost. Ačkoliv se lze domnívat, že i výše zmiňované procesy se na těchto experimentálních plochách odehrávají, tvoří minimální vliv na výsledné hodnoty stejně jako v jiných podobných studiích (Davidová et al., 2015; Hänsel et al., 2016). Porovnání metody SfM-MVS oproti TLS při erozních experimentech podobného typu provedl například El-Din Fawzy et al. (2020), který fotogrammetrickou metodu označil za srovnatelnou z hlediska přesnosti a kvality dat v porovnání s TLS, avšak pouze s přibližně desetinovými finančními náklady. Ke stejnému závěr ohledně srovnatelnosti obou metod dospěla i studie od Cook, (2017). Nedávné studie dokonce metodu SfM-MVS neváhají využít ani v kombinaci s opticky méně kvalitními fotoaparáty zabudovanými do mobilních telefonů. Studie pracující s využitím fotoaparátů v běžných mobilních telefonech (Prosdociami et al., 2017; Vinci et al., 2017; Wróżyński et al., 2017) potvrdily, že výsledky při standardních podmínkách s dobrým osvětlením jsou srovnatelné s výsledky získanými s běžnou fotografickou technikou. Nevýhoda malého a opticky méně kvalitního objektivu v mobilním telefonu je v tomto případě vyvážena větší hloubkou ostrosti i při nízkých clonových číslech. Samozřejmě velkou výhodou představuje malá prostorová a finanční náročnost takového řešení. Zřejmá nevýhoda fotogrammetrické metody je fakt, že pomocí ní lze odhadovat pouze kumulativní hodnoty vztahující se ke stavu před deštěm a po dešti. V praxi se však začínají vyskytovat první studie snažící se eliminovat tuto nevýhodu, pomocí snímání povrchu pomocí několika různých kamer nahrazujících jednotlivé pozice při snímání jedním přístrojem. Tímto způsobem byla provedena

například studie od Eltner et al., (2017), která za využití 3 fotoaparátů získala DEM v časovém kroku 10 a 15 vteřin během simulace s dešťovým simulátorem i pomocí přirozené srážky. Nicméně vzhledem k použité technologii bylo zjištěno, že snímání stojící či tekoucí vody v povrchových depresích způsobuje značné problémy při finálním vyhodnocení dat. Na druhou stranu pomocí této metody intervalového snímání a vytváření DoD lze zaznamenávat průběh procesů jako je například rozpínání a konsolidace téměř v reálném čase.

Obecně však lze konstatovat, že na základě výše zmíněných studií lze fotogrammetrickou metodu prohlásit za velmi vhodnou metodu pro měření standardních erozních projevů bezkontaktním způsobem s dostatečně kvalitními výsledky a s dobrým poměrem časové, materiální a tím i finanční náročnosti.

5.2 Kvalitativní hodnocení SfM-MVS dat

Z hlediska přesnosti pořízených dat lze říci, že bylo dosaženo srovnatelných výsledků jako v jiných obdobných studiích. Porovnání parametrů experimentálního měření a fotogrammetrické metody obdobných studií je uvedeno v Tabulka 8. Rozlišení výsledných DEM se při většině erozních experimentech s plochou větší než 1 m² pohybuje často okolo 1 mm na pixel (Hänsel et al., 2016). Tohoto rozlišení bylo dosaženo i v případě studie erozních ploch v kapitole 4. Naopak v případě kapkové eroze bylo díky malé velikosti experimentální plochy (< 1 m²) dosaženo sub-milimetrového rozlišení 0,1 mm.

Tabulka 8 Srovnání parametrů SfM měření v ostatních podobných studiích.

Případové studie	Typ snímání	Experimentální plocha m	Srážky	Rozlišení DEM (GSD) mm	RMSE _z mm	RMSE _{xy} mm	LoD mm	GCP počet	Výška snímání m
Kapková eroze	pozemní	0,1	přirozené + umělé	0,1	0,1	0,1	0,1	16	0,5
Erozní plochy									
Jirkov	pozemní	4 x 1	umělé	1	6,3	5,9	8,8	11	1,4
ČVUT	pozemní	4 x 1	umělé	1	2,8	1,7	3,9	24	1,0
Ostatní studie									
(Hänsel et al., 2016)	pozemní	3 x 1	umělé	1	-	-	3,5	15	1,5
(Prosdocimi et al., 2017)	pozemní	0,25	umělé	10	10	10	-	5	1
(Vinci et al., 2017)	pozemní	1 x 0,9	umělé	2	-	-	-	12	-
(Eltner et al., 2018)	UAV	50 x 20	přirozené	10	5,3	-	12	20	10-18
(Cândido et al., 2020)	UAV	12 x 4	přirozené	4	1,9	2,4	4,4	14	4

V případě vertikálních a horizontálních odchylek kontrolních bodů (GCP) je v erozních studiích často dosahováno velkého rozptylu hodnot. Dle Sanz-Ablanedo et al., (2018) se dokonce vyskytují rozdíly až 57-násobku mezi odchylkou $RMSE_{xy}$ a $RMSE_z$ oproti výslednému rozlišení GSD. V ideálním případě by tyto odchylky měly být co nejmenší, nanejvýš v jednotkách násobku. V obou případových studiích se tyto hodnoty podařilo udržet v rozumném rozsahu od 1 až 6-násobku výsledného rozlišení. Rozdíl mezi výslednými parametry u kapkové eroze a erozních ploch je způsoben odlišným použitým měřítkem experimentální plochy. Zatímco u kapkové eroze byl na všech snímcích viditelný celý vzorek včetně všech referenčních terčů okolo, tzn. snímky měly 100% překryv, u erozních ploch většího měřítka byla na snímcích pouze část plochy a snímky měly překryv pouze se sousedními snímky. Navíc jeden snímek pokrýval vždy pouze omezenou část referenčních bodů. Z těchto důvodů jsou i výsledné odchylky větší než v případě kapkové eroze.

Z hlediska vlivu použitých metod georeferencování bylo vycházeno ze závěrů ostatních studií, které doporučují využití dostatečného počtu referenčních bodů umístěných rovnoměrně skrze celou plochu, tzn. při okrajích a ideálně i ve středu (Báčová, 2018; Polidori and El Hage, 2020). V tomto ohledu byly tímto způsobem vybaveny všechny experimentální plochy po okrajích a v případě erozních ploch na lokalitě Jirkov také uprostřed plochy. Ačkoliv se v různých studiích objevují odlišné metody zjišťování souřadnic referenčních bodů, jakýmsi standardem se stalo zaměření bodů pomocí totálních nebo GNSS stanic, případně se využívají lokální souřadnicové systémy vytvořené pomocí pevného rámu (Grims et al., 2014; Jester and Klik, 2005; Laburda et al., 2021). I přesto se lze setkat s odlišným přístupem, jako například ve studii od Hänsel et al., (2016), ve které bylo prováděno porovnání 3 různých metod georeferencování získaných DEM. Postupně bylo zjištěno, že nejpřesnější výsledky poskytuje umístění terčů přímo do plochy pomocí dlouhých hřebů. Nicméně zjištění souřadnic jednotlivých bodů bylo provedeno prostým měřením vzdáleností mezi nimi při počátečním stavu a následným vygenerováním souřadnic z ortofoto snímků. Tyto souřadnice byly dále použity i pro stav po simulovaném dešti. Obecně je tento přístup možný, nicméně obecně se mnohem častěji využívá přístup, kdy jsou referenční body umístěny mimo experimentální plochu při okraj, aby nemohlo dojít k jejich posunu při měření, a zároveň jsou zaměřovány pomocí totálních nebo GNSS stanic. Poznatkem z této studie bylo, že právě nevhodně referencované vlíčovací body mohli negativně ovlivnit výsledné porovnání ztráty půdy pomocí přímého a nepřímého měření.

Na základě odlišného měřítka experimentálních ploch v případových studiích byl volen také odlišný počet a velikost použitých referenčních bodů. Zatímco u kapkové eroze byl průměr terče velký 7 mm s průměrnou výškou snímání 0,5 m, u erozních ploch byla z důvodů vyšší výšky snímání zvolena větší velikost, tj. terče měli průměr 40 mm na laboratorním DS s průměrnou výškou snímání 1,0 m a 50 mm na lokalitě Jirkov s průměrnou výškou snímání 1,4 m (viz Tabulka 8).

5.1 Vliv vlastností testovaných půd

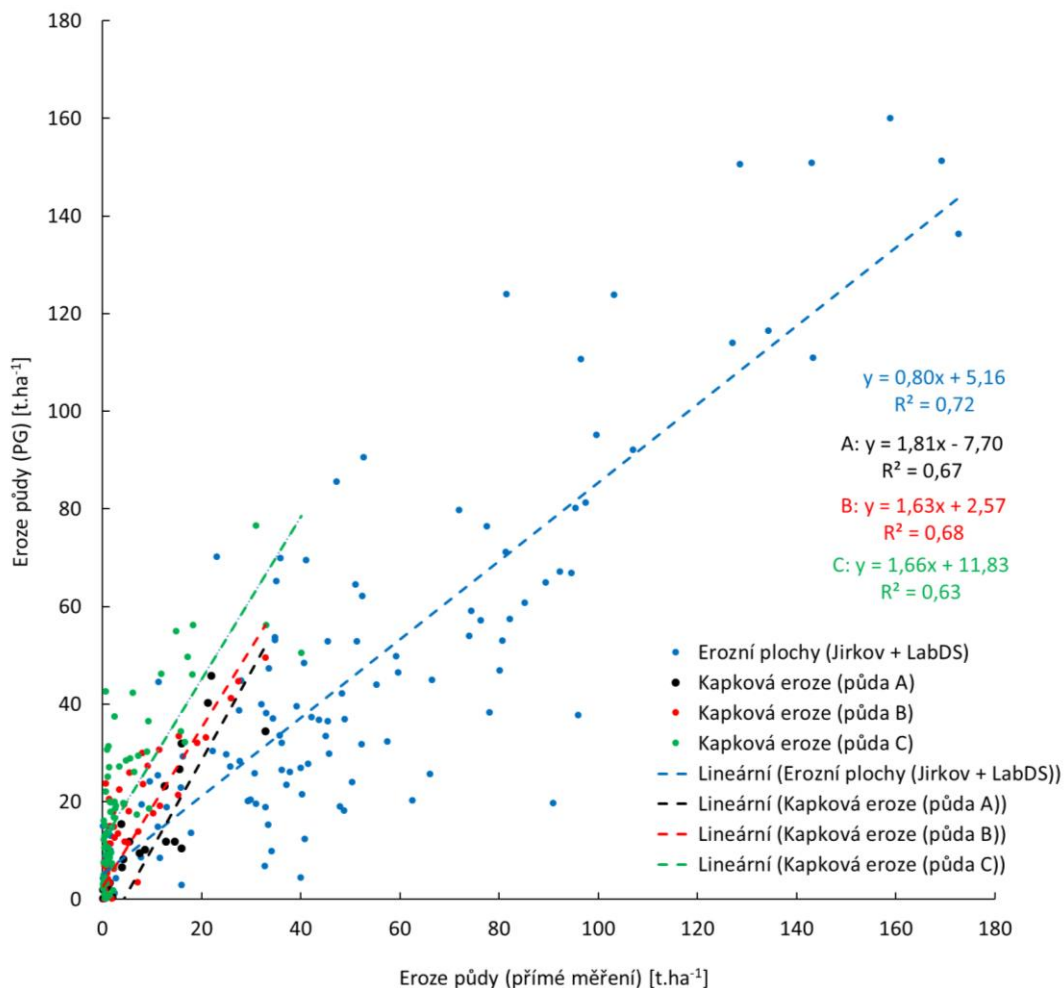
Při analýze kapkové eroze bylo možné díky velkému souboru dat pro 3 odlišné půdní vzorky lišící se fyzikálně-chemickými vlastnostmi analyzovat vliv zrnitostního složení na výsledné hodnoty ztráty půdy. Ačkoliv byly 2 různé půdní vzorky použity i při experimentech s erozními

plochami na větším měřítku v kapitole 4, kvůli absenci většího počtu výsledných dat pro druhý půdní vzorek (půda B), nebylo možné analyzovat rozdílné hodnoty na základě zrnitostního složení ani dalších fyzikálně-chemických vlastností. Odlišné výsledky pro jednotlivé půdy, které byly součástí studie kapkové eroze, byly interpretovány s ohledem na jejich odlišnou texturu, neboť právě zrnitostní složení má dle jiných studií zásadní vliv na chování půd při srážkových událostech (Fernández-Raga et al., 2017; Legout et al., 2005; Römkens et al., 2002; Ryzak et al., 2015; Wei et al., 2015). Přestože byl mezi jednotlivými půdami velký rozdíl i například z hlediska stability agregátů, tento parametr je taktéž závislý částečně na zrnitostním složení (Almajmaie et al., 2017). Právě z tohoto důvodu byl výsledný vztah odvozen právě s ohledem na zrnitostní složení, konkrétně v závislosti na procentuálním zastoupení jílovitých částic. Stabilita agregátů ovlivňuje celou řadu erozních procesů. Rozpad agregátů znamená velké množství volných částic, které následně přispívají k zaplnění volných pórů a mezer a k tzv. slití povrchu (tzv. „sealing effect“), čímž dochází ke snížení infiltrace a zvýšení odtoku (Thomaz and Pereira, 2017). Právě tento vliv byl pozorován při porovnání jednotlivých půd při experimentu s kapkovou erozí v kapitole 3. Mimo vlivu obsahu jílovitých částic na stabilitu agregátů a infiltrační schopnost půdy lze zařadit také samotnou drsnost povrchu půdy. Tento efekt byl zkoumán již od samého počátku měření povrchové drsnosti (Kuipers, 1957) či později z hlediska hydraulické vodivosti a maximální retenční schopnosti půdy (Onstad et al., 1984)

Diskuzi ohledně výsledků může vyvolávat také fakt, že pro experimenty byly využity porušené půdní vzorky s omezenou mocností oproti neporušeným půdním vzorkům. Navíc půdy byly testovány jak při uměle generovaném dešti, tak i s využitím přirozených srážek. Nicméně efekt vlivu využití porušených a neporušených půdních vzorků a různých příčinných srážek byl analyzován i v jiných studiích, jak například od Szabó et al., (2020). Tato studie se zabývá vlivem měření na porušených a neporušených půdních vzorcích pomocí dvou odlišných simulátorů. Závěrem je to, že data získaná na těchto dvou naprosto odlišných experimentálních stanovištích jsou porovnatelná. Nicméně v případě laboratorních experimentů na porušených půdních vzorcích bylo zjištěno, že hlavní roli hraje nastavení sklonu a intenzita deště, v případě venkovních experimentů na neporušených půdních vzorcích to jsou především půdní vlastnosti. Neporušené půdní vzorky dosahují mnohem větší variability, co se týče prostorových nehomogenit, a tudíž tyto jejich vlastnosti působí dominantněji než v případě porušených půdních vzorků s omezenou mocností v laboratorních podmínkách. Obecně se dá říci, že laboratorní experimenty často mají nevýhodu v těžko dosažitelné vysoké kinetické energii odpovídající přirozeným přivalovým srážkám. Stejně, jako v případě provedených simulací na laboratorním DS i na lokalitě Jirkov, je však nižších hodnot kinetické energie dosahováno běžně i v jiných studiích (Hamed et al., 2002). Ačkoliv se nepodařilo při experimentech kapkové eroze dosáhnout kinetických energií přirozených přivalových srážek, na výsledcích je vidět, že trend i výsledný koeficient determinace je velmi blízký pro experimenty provedené pomocí laboratorního DS i při přirozených srážkách (viz Obrázek 20).

5.2 Porovnání metody přímého a nepřímého měření

V rámci této práce bylo provedeno přímé srovnání výstupů získaných na základě dvou různých metod a přístupů. Pomocí přímého měření erozních procesů odběrem erodovaného materiálu a pomocí využití moderní bezkontaktní metody SfM-MVS. Ačkoliv se obě metody podstatně liší ve způsobu provedení, lze shrnout základní poznatky vyvozené z těchto různých měřítek a použitých metod. Na základě naměřených a analyzovaných dat byla mezi těmito dvěma metodami zjištěna statisticky významná závislost ($p < 0,05$) s koeficientem determinace, který vyšel v případě kapkové eroze i v případě erozních odtokových ploch v podobném rozsahu. V případě kapkové eroze byl tento koeficient 0,56 - 0,69 a v případě erozních ploch se pohyboval v rozmezí od 0,63 do 0,72, vždy v závislosti na půdě či způsobu zadešťování. Tyto závislosti tedy dosáhly podobných parametrů, ať už se jednalo o experimenty kapkové eroze bez zahrnutí sklonu a tím i povrchového odtoku, tak i erozních ploch zahrnujících povrchový odtok včetně tvorby rýhové eroze. Kromě odvození regresních vztahů byly vypočteny a porovnány také průměrné hodnoty ztráty půdy přepočítané na běžně používanou jednotku v erozních studiích, kterou jsou tuny na hektar (Obrázek 40).



Obrázek 40 Orientační hodnoty množství eroze půdy přepočítané na jednotku $t \cdot ha^{-1}$ bez zahrnutí vlivu bobtnání.

V případě kapkové studie byla průměrná hodnota ztráty půdy měřená pomocí přímé metody $4,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ a pomocí fotogrammetrické metody SfM-MVS to bylo $9,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Při erozních experimentech prováděných na lokalitě Jirkov a ČVUT s využitím uměle generovaného deště byly tyto hodnoty v případě přímého měření $53,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ a v případě SfM-MVS $47,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Z uvedených hodnot je zřejmé, že měřítko experimentu a zahrnutí procesu povrchového odtoku spolu s rýhovou erozí dokáže akcelarovat erozi půdy z jednotek na desítky $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Mimo průměrných hodnot byl vytvořen i graf na Obrázek 40, který orientačně porovnává jednotlivé hodnoty z obou experimentů přepočítané na $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Toto srovnání je nicméně nutno brát s rezervou, neboť hodnoty kapkové eroze získané na experimentální kruhové ploše o průměru 0,1 m nelze takto jednoduše vztáhnout na rozlohu celého hektaru. Tento graf však názorně zobrazuje porovnání naměřených hodnot alespoň z hlediska řádů odnosu půdy.

Porovnání s ostatními studii

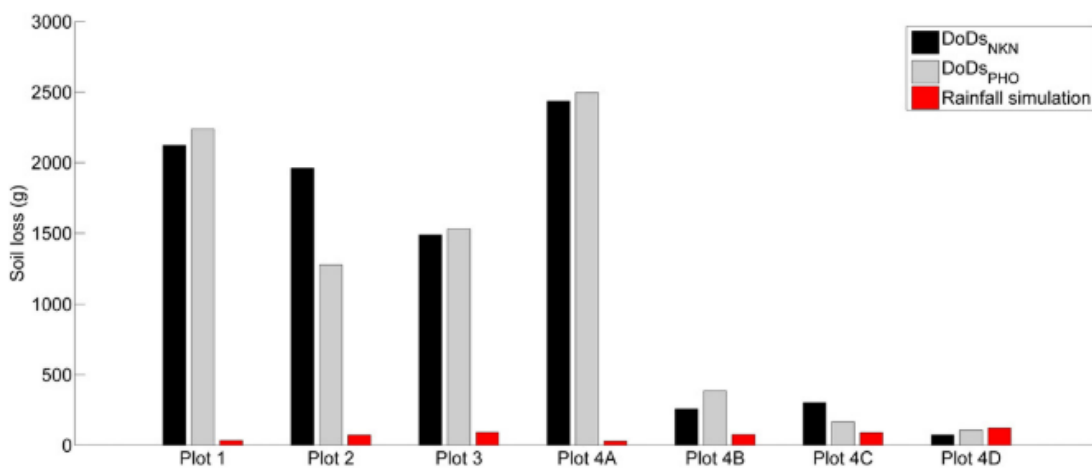
V neposlední řadě bylo provedeno porovnání s podobnými studii zabývajícími se měřením erozních projevů pomocí fotogrammetrické metody SfM-MVS. Srovnání podobných studií z hlediska typu a kvality analyzovaných dat, typu snímání a experimentálních ploch je uvedeno v Tabulka 8. Na základě nejenom výše zmíněných studií lze konstatovat, že se v praxi nevyskytují žádné standardizované studie, které by bylo možné porovnat ve všech ohledech. Variabilita testovaných parametrů skrze jednotlivé studie je příliš velká. Jednotlivé studie se liší z v rámci experimentálních ploch z hlediska velikosti, sklonu, provedení, testovaných půdy z hlediska fyzikálně-chemických vlastností, testovaných srážek z hlediska využití přirozených či umělých srážek. Při porovnávání fotogrammetricky získaných výsledků lze jen těžko najít studii, při které by bylo využito stejných fotografických přístrojů v kombinaci se shodným počtem a kvalitou GCP, či vyhodnocovaných stejným softwarem se stejným nastavením. Navíc přímé srovnání těchto dvou porovnávaných metod je i v dnešní době poměrně vzácné a často ve studiích není odvozen výsledný vztah popisující závislost těchto dvou metod.

Ucelená studie popisující měření eroze půdy pomocí přímé metody měření eroze půdy v kombinaci s nepřímým měřením eroze půdy pomocí fotogrammetrické metody je od Hänsel et al., (2016). V tomto případě byl odhad eroze pomocí metody SfM průměrně o 14,7 % vyšší než pomocí referenčního přímého měření eroze půdy. Nutno dodat, že velká část nejistoty byla přisouzena nevhodnému způsobu georeferencování referenčních vlíčovacích bodů. Na druhou stranu, v této práci byl navíc u některých experimentů zahrnut vliv přirozené kompakce půdy, která může tvořit značnou část nejistoty na straně fotogrammetricky zjištěné změny objemu. Závěrem z této studie je však to, že kompakce měřena pomocí zjišťování objemové hmotnosti odebraných půdních vzorků by měla být prováděna do větších hloubek než pouze v obdělávané vrstvě na povrchu. Tento přístup by však vyžadoval poměrně značnou modifikaci již tak časově náročného měření.

Výsledné hodnoty ztráty půdy ve studii od Hänsel et al., (2016) se pohybovaly v rozmezí od $3,4$ do $24 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, což je přibližně na pomezí výsledných průměrných hodnot z této disertační práce mezi kapkovou erozí a erozními plochami středního měřítka. Ve studii byl dále analyzován vliv kapkové eroze, který však ve výsledku tvořil pouze 0,35 % celkového smyvu, neboli $0,07 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$

při zahrnutí celé plochy o rozloze 3 m². Při takto velké ploše se drtivá většina půdních částic přemístěných díky kapkové erozi pohybuje pouze v rámci experimentální plochy a pouze malá část se dostane mimo plochu. Z toho důvodu lze vliv kapkové eroze u takto velkých experimentálních ploch zanedbat. Stejný přístup byl zvolen i v případě erozních ploch v kapitole 4 a naopak ze stejného důvodu byl pro výzkum kapkové eroze v kapitole 3 zvolen pouze vzorek o rozloze do 0,1 m². Pro srovnání, smyv půdy odhadnutý v práci od Báčová, (2018) dosahoval na pozemcích poškozených rýhovou erozí extrémních hodnot až 238 t.ha⁻¹ (pozemek s rozlohou 125 tis. m²) a 131 t.ha⁻¹ (pozemek s rozlohou 274 m²).

Jiná studie založená na podobném principu byla publikována od Prosdociami et al., (2017), který naopak zjistil, že metoda SfM není při jejich experimentech porovnatelná s přímým měření erodovaného materiálu (Obrázek 41). Jako důvod byl uváděn velký rozdíl mezi oběma metodami fungujícími na jiných principech a zahrnující různé procesy jako například přirozenou kompakci a konsolidaci. Avšak stejně jako v ostatních zmiňovaných studiích a částečně této disertační práci, i v této studii byl odnos materiálu podstatně vyšší při metodě SfM.

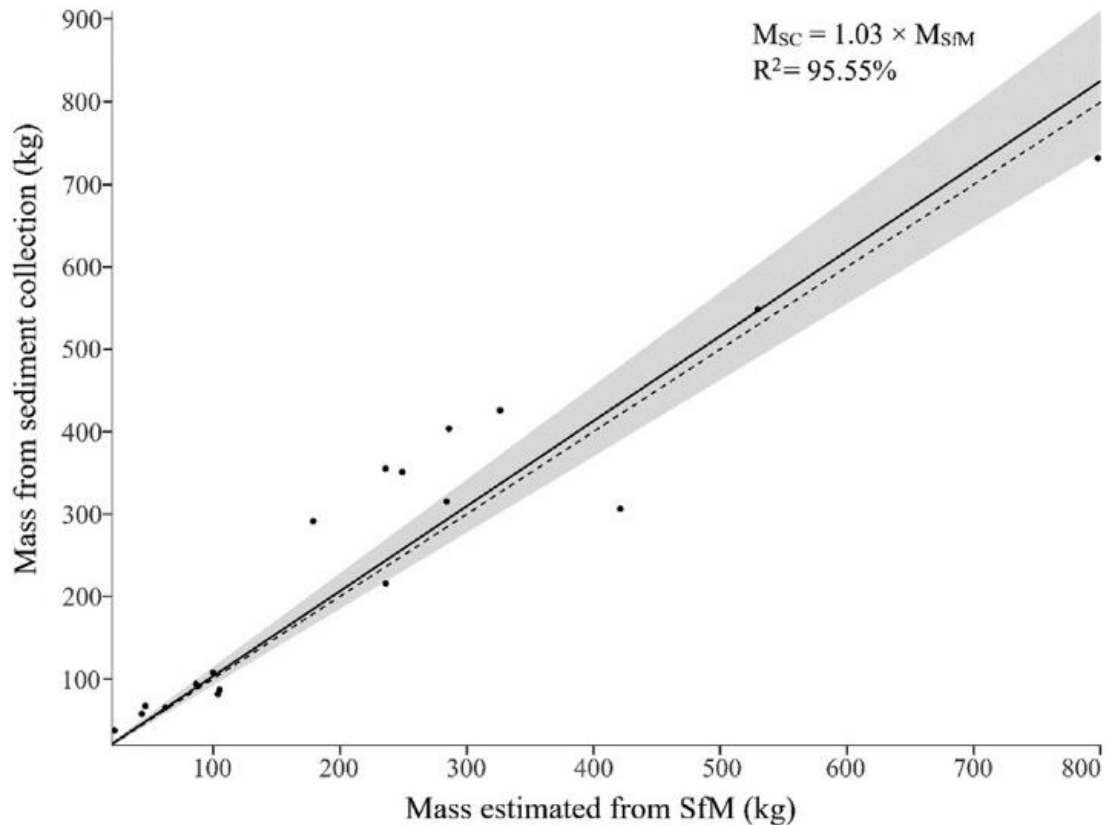


Obrázek 41 Porovnání metod založených na SfM (DoDs_{NKN} jsou data získaná pomocí SfM pomocí zrcadlového fotoaparátu Nikon, DoDs_{PHO} jsou data získaná pomocí SfM pomocí mobilního telefonu) a na přímém měření množství erodovaného materiálu (Rainfall simulation) (převzato od Prosdociami et al., 2017).

Ačkoliv se výsledné hodnoty mezi jednotlivými metodami ukázaly být řádově odlišné, v grafu na Obrázek 41 je navíc zobrazeno i porovnání využití zrcadlového fotoaparátu Nikon (černé sloupce) s výsledky získanými pomocí mobilního telefonu (šedé sloupce). Alespoň tato dvě různá snímací zařízení prokázala dle autora studie silnou závislost a poskytla srovnatelné hodnoty.

K pozitivním závěrům naopak došel Cândido et al., (2020), jehož výsledky mezi metodou UAV-SfM a odběrem vzorků dosáhly statisticky významné závislosti s koeficientem determinace 0,96. Experimenty byly v tomto případě prováděny v Brazílii na 3 různých plochách o velikosti 12 x 4 m a byly snímány pomocí UAV. Výsledné rozlišení byly interpolováno na 4 mm na pixel a ke georeferencování bylo využito celkem 14 bodů na každé ploše. Plochy byly snímány po přirozených srážkových událostech v průběhu 3 let, kdy bylo postupně zaznamenáno

7 srážkových událostí s úhrnem od 92 do 1121 mm. Graf na Obrázek 42 zobrazuje výslednou závislost výsledných hodnot vypočítané ztráty půdy pomocí obou metod.



Obrázek 42 Závislost mezi ztrátou půdy naměřenou pomocí zachytávání sedimentu (osa y) a pomocí odvození metodou SfM (osa x), (převzato od Cândido et al., 2020).

Podobná metodologie jako byla použita v této disertační práci, avšak při odlišně zaměřených experimentech, byla aplikována týmem vědců pod vedením Tran et al., (2018). V této studii zkoumali vztah mezi fotogrammetricky naměřenou drsností půdního vzorku v kombinaci s měřeným smyvem půdy. Rozdíl oproti této disertační práci však je ten, že v citované studii nebylo využito přímého měření množství smyvu půdy pomocí odběru a analýzy půdních vzorků, nýbrž pomocí měření zákalu odtoku pomocí turbidimetru. Ačkoliv v této studii nebyl odvozen výsledný vztah, lze očekávat, že toto nepřímé měření erozního smyvu pomocí turbidimetru přispěje k celkové nejistotě výsledného vztahu oproti využití přímo měřeného množství smyvu jako v této disertační práci.

Vztah mezi drsností povrchu a ztrátou půdy zkoumal ve své studii také Vinci et al., (2020). Ten se zabýval naopak především porovnáním různých metod určení drsnosti povrchu v závislosti na simulovaném dešti, odtoku a smyvu půdy. Pomocí fotogrammetrické metody se mu podařilo dosáhnout významné závislosti mezi poměrem snížení drsnosti povrchu RRR a ztrátou půdy s koeficientem determinace od 0,3 do 0,96 v závislosti na způsobu použité metody vyhodnocení. Naopak při využití kontaktní metody pomocí pin metrů byl tento koeficient pouze 0,01. V jeho případě byly využity experimentální plochy o velikosti 1 x 0,92 m s celkem 5 referenčními

vlícovacími terči. Výsledné vyhodnocení proběhlo na ploše 0,8 x 0,8 m kvůli odstranění hraničních míst, která mohla být negativně ovlivněna ohraničením plochy. Stejný přístup byl zvolen i u experimentů uvedených v kapitole 3 a 4.

Častou odlišností výše uvedených studií je fakt, že značná část z nich pracuje s nepoměrně malým počtem provedených experimentů a často bez žádné replikace. V případě studie od Hänsel et al., (2016) byl celkový počet provedených experimentů 5, Prosdociami et al., (2017) provedl celkem 7 simulací, avšak pouze na 4 plochách, Tran et al., (2018) zpracoval celkem 12 experimentů, tj. 4 experimenty provedené na 3 různých vzorcích, Cândido et al., (2020) zpracoval celkem 21 experimentů, tj. experimenty na 3 různých plochách při 7 přirozených srážkových událostech (Obrázek 42), Vinci et al., (2020) zpracoval ve své studii pouze 2 experimenty, každý zahrnující 3 srážkové události.

Naproti tomu v této disertační práci bylo v případě kapkové eroze vyhodnoceno celkem 795 jednotlivých erozních experimentů, tzn. rozdílových modelů a analyzovaných půdních vzorků erodovaného materiálu. V případě experimentů na erozních plochách na lokalitě Jirkov a ČVUT to bylo dohromady dalších 112 rozdílových modelů a kumulativních hodnot erozního smyvu. Z tohoto pohledu lze hodnotit počet zahrnutých a analyzovaných experimentálních měření jako nadprůměrný ve srovnání s podobnými studii.

5.3 Problémy

V rámci experimentálního měření bylo nutné překonávat řadu problémů především technického charakteru. Například využití dat naměřených pomocí laboratorního DS bylo neplánovaně omezené z důvodu dvou prováděných rekonstrukcí. Nejprve došlo k rozsáhlé rekonstrukci a modernizaci samotného zařízení laboratorního DS, které trvalo od konce roku 2017 do konce roku 2018. Druhá rekonstrukce se týkala Vodohospodářského experimentálního centra, kde je laboratorní DS umístěn. Tato rekonstrukce a modernizace, která trvala prakticky po celý rok 2019 znemožnila přístup k zařízení a jeho využívání. Po dokončení modernizace centra byl na začátku roku 2020 laboratorní DS rozebrán, přemístěn na jiné místo, znovu složen a zprovozněn spolu s další modifikací dílčích částí. Na tomto novém místě bylo po jeho znovu zprovoznění prováděno systematické testování dešťových charakteristik a testování automatizovaného měření odtokových veličin. Tato fáze trvala od ledna do července roku 2020, kdy teprve bylo možné začít s pravidelným měřením erozních charakteristik s půdním vzorkem. Z těchto dvou důvodů spojených s rekonstrukcemi, byl laboratorní DS v letech 2018-2020 v reálném provozu celkem pouze 9 měsíců. Z tohoto důvodu byla v rámci vyhodnocení využita pouze malá část experimentálních erozních dat, která byla původně plánována k analýze. Větší část vyhodnocených dat proto pochází z venkovních experimentů s využitím přirozeného deště v rámci testování kapkové eroze či pomocí umělého deště na lokalitě Jirkov. Ačkoliv byl laboratorní DS využíván řadu let před rekonstrukcí, k systematickému měření erozních projevů pomocí metody SfM-MVS došlo až v součinnosti s jeho rekonstrukcí, při které byl erozní kontejner vybaven referenčními terči a výkonnějším osvětlením.

6 Závěr

Tato disertační práce je zaměřená na erozní problematiku z hlediska získávání dat pomocí dvou různých metod. Pomocí přímého měření erozních procesů odběrem erodovaného materiálu a pomocí bezkontaktní fotogrammetrické metody SfM-MVS. V rámci doktorského studia autor této práce pracoval na několika odlišných typech experimentů, které však využívaly společné metody při získávání dat, jejich zpracování a následné analýze. Díky tomu bylo možné vyhodnotit velké množství různorodých experimentálních měření a pokusit se je propojit s cílem vyvození obecnějšího vztahu mezi přímým a fotogrammetrickým měřením smyvu.

Struktura práce je rozčleněna na několik částí od obecně pojatého úvodu popisujícího všeobecnou problematiku vodní eroze půdy po přesněji cílenější popis základních metod kvantifikace eroze pomocí empirických a simulačních modelů. Tato kapitola popisuje v základním pojetí obecně používané modely sloužící k odhadu erozní ohroženosti, které ve své podstatě využívají data získávaná pomocí experimentálních měření a monitoringu erozních jevů. Právě to je cílem další kapitoly, která je hlavním obsahovým tématem této disertační práce. Tato kapitola představuje a především rozčleňuje různé metody experimentálního měření erozních procesů a jejich monitoringu na dvě hlavní skupiny – přímé a nepřímé metody. V této kapitole je provedeno základní rozdělení a popis všech běžně používaných dílčích metod erozního monitoringu. Tato kapitola je základem pro definování jednotlivých metod, které jsou následně využívány a aplikovány. Díky rešerši těchto metod mohla být v rámci experimentálního měření zvolena optimální kombinace metody experimentálního měření (přímé měření odběrem vzorků + fotogrammetrická metoda SfM-MVS) a metody vyhodnocení a analýzy dat pomocí vhodných postupů a softwaru (postup v Agisoft Metashape + ArcGIS).

V rámci kapitol 3 a 4 jsou představeny jednotlivé případové studie při dvou měřících experimentálních ploch, které využívají metody popisované v předešlých kapitolách. První případová studie popisující měření kapkové eroze je hlavním dlouhodobým experimentem této disertační práce. Experimenty byly provedeny v rámci projektu GA ČR (GF17-33751L) s názvem „Vliv kinetické energie deště na uvolňování a transport půdních částic“. Při experimentech bylo využito simultánního měření kapkové eroze, a to pomocí přímé a nepřímé metody. Právě využití nepřímé metody měření v podobě fotogrammetrické metody SfM-MVS bylo aplikováno z důvodu téměř neexistujících studií, které by tímto způsobem a v takovémto rozsahu zkoumaly toto počáteční stádium jakéhokoliv typu vodní eroze. Z tohoto důvodu bylo provedeno porovnání těchto metod a odvození regresního modelu s cílem snazšího vyhodnocení budoucích podobných experimentů s minimalizováním počtu prováděných časově náročnějších měření pomocí přímého měření a naopak s maximalizováním počtu měření pouze za pomoci bezkontaktní nepřímé metody SfM-MVS. Na základě výsledné regresní rovnice a při vymezených podmínkách experimentu, lze odhadnout množství erodovaného materiálu při procesu kapkové eroze s mírou kvality regresního modelu v rozmezí od 63 % do 68 % v závislosti na testované půdě. Pomocí velkého množství provedených experimentů se třemi různými půdními vzorky s různými fyzikálními parametry bylo možné zohlednit zrnitostní složení půdy, přičemž zásadním se ukázal být obsah jílu, který byl promítnut i do výsledného vztahu.

Experimentální měření na malém měřítku bez procesu povrchového odtoku ($< 1 \text{ m}^2$) byla doplněna o měření na větším měřítku experimentální plochy ($< 10 \text{ m}^2$) při standardních erozních experimentech na skloněných plochách s povrchovým odtokem. Ty byly součástí projektu TA ČR (TH02030428) s názvem „Navrhování technických opatření pro stabilizaci a ochranu svahů před erozí“, jehož širším cílem bylo mimo jiné i testování protierozních ochranných materiálů. Experimenty byly prováděny s využitím umělého deště generovaného pomocí dvou dešťových simulátorů. Hlavní odlišností od předchozích experimentů bylo měřítko rozlohy testovaných ploch i výsledné rozlišení analyzovaných DEM, a dále zahrnutí procesů souvisejících s povrchovým odtokem. I přes tyto odlišnosti dosahuje výsledný odvozený vztah lineárního regresního modelu míry kvality 72 %. Doplnující analýza zkoumala vliv rýhové eroze na celkové množství odhadnuté eroze na základě fotogrammetrických dat. Výsledkem bylo zjištění, že tento poměr je velice variabilní v širokém rozsahu s průměrnou hodnotou podílu rýhové eroze 47 % z celkového množství eroze.

Výsledné shrnutí poznatků z této disertační práce je to, že byly porovnány dvě odlišné metody kvantifikace erozního procesu a byl mezi nimi odvozen vztah, který je platný v rámci podmínek provedených experimentů. Na základě poznatků získaných během experimentálního měření lze vyvodit doporučení pro provádění podobných typů experimentů:

- zajištění dostatečně přesného zaměření odpovídajícího počtu referenčních vlíčovacích bodů GCP (10 – 20 bodů) vzhledem k testované ploše a požadovanému rozlišení výsledného DEM ($GSD \approx RMSE_{xy}$ a $RMSE_z$)
- zajištění dostatečné kvality správně komponovaných, exponovaných a zaostřených snímků pokrývajících rovnoměrně celou experimentální plochu (minimální překryv ze 70 %) bez nutnosti ořezu výsledného DEM, například z důvodu chybějících snímků či umístěných čidel.

Pomocí odvozených rovnic lze v budoucnu analyzovat množství eroze při obdobných experimentech s větší časovou efektivitou, jelikož mohou být prováděny přímé odběry vzorků v menším rozsahu než doposud, a naopak mohou být doplněny o větší množství experimentů prováděných pouze s využitím bezkontaktní fotogrammetrické metody SfM-MVS. Celková průměrná doba provedení a vyhodnocení experimentu pomocí metody SfM-MVS činila průměrně 50 % času potřebného pro provedení a vyhodnocení experimentu přímou metodou.

Závěrem lze říci, že není pochyb o tom, že fotogrammetrická metoda SfM má při obdobných studiích minimálně v současné době svoji pozici jistou, což lze shrnout i slovy od James et al., (2019):

„There can be no doubt that structure-from-motion (SfM) photogrammetry has emerged as one of those once-in-a-generation methodological leaps which transforms practice within a scientific discipline. Geomorphology’s focus upon land surface shape, and its quantification to infer process, to estimate process rates, and to provide information for further analysis (e.g. for the application of landscape evolution models), means that any method able to deliver topographic information both inexpensively and rapidly, is going to have significant appeal.“

7 Seznamy

7.1 Seznam použité literatury

- Abd Elbasit, M.A.M., Anyoji, H., Yasuda, H., Yamamoto, S., 2009. Potential of low cost close-range photogrammetry system in soil microtopography quantification. *Hydrol. Process.* 23, 1408–1417. <https://doi.org/10.1002/hyp.7263>
- Agisoft LLC, 2018. Agisoft PhotoScan Professional (Version 1.4.0) (Software).
- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P., 2017. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 98, 221–227. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.002>
- Aksoy, H., Kavvas, M.L., 2005. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. *Catena* 64, 247–271. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.008>
- Allmaras, R.R., Burwell, R.E., Larson, W.E., Holt, R.F., 1966. Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. *USDA Conserv. Res. Rep* 7, 1–22.
- Almajmaie, A., Hardie, M., Doyle, R., Birch, C., Acuna, T., 2017. Influence of soil properties on the aggregate stability of cultivated sandy clay loams. *J. Soils Sediments* 17, 800–809. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1568-1>
- Amon, P., Riegl, U., Rieger, P., Pfennigbauer, M., 2015. UAV-based laser scanning to meet special challenges in lidar surveying. *Geomatics Indaba Proceedings*.
- Arata, L., Alewell, C., Frenkel, E., A'Campo-Neuen, A., Iurian, A.R., Ketterer, M.E., Mabit, L., Meusburger, K., 2016. Modelling Deposition and Erosion rates with RadioNuclides (MODERN) - Part 2: A comparison of different models to convert ²³⁹⁺²⁴⁰Pu inventories into soil redistribution rates at unploughed sites. *J. Environ. Radioact.* 162–163, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.05.009>
- Báčová, M., 2018. Monitoring projevů vodní eroze na zemědělských půdách. *Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze.*
- Báčová, M., Krása, J., 2016. Application of historical and recent aerial imagery in monitoring water erosion occurrences in Czech highlands. *Soil Water Res.* 11, 267–276. <https://doi.org/10.17221/178/2015-SWR>
- Báčová, M., Krása, J., Devátý, J., Kavka, P., 2019a. A GIS method for volumetric assessments of erosion rills from digital surface models. *Eur. J. Remote Sens.* 52, 96–107. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1543556>
- Báčová, M., Krása, J., Devátý, J., Kavka, P., 2019b. A GIS method for volumetric assessments of erosion rills from digital surface models. *Eur. J. Remote Sens.* 52, 96–107. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1543556>
- Bagarello, V., Ferro, V., 2004. Plot-scale measurement of soil erosion at the experimental area of Sparacia (southern Italy). *Hydrol. Process.* 18, 141–157. <https://doi.org/10.1002/hyp.1318>
- Bagarello, V., Ferro, V., Keesstra, S., Comino, J.R., Pulido, M., Cerdà, A., 2018. Testing simple

- scaling in soil erosion processes at plot scale. *Catena* 167, 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.035>
- Batista, P.V.G., Davies, J., Silva, M.L.N., Quinton, J.N., 2019. On the evaluation of soil erosion models: Are we doing enough? *Earth-Science Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102898>
- Bauer, T., Strauss, P., Grims, M., Kamptner, E., Mansberger, R., Spiegel, H., 2015. Long-term agricultural management effects on surface roughness and consolidation of soils. *Soil Tillage Res.* 151, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.01.017>
- Bauer, T., Strauss, P., Murer, E., 2014. A photogrammetric method for calculating soil bulk density. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 177, 496–499. <https://doi.org/10.1002/jpln.201400010>
- Beasley, D.B., Huggins, L.F., Monke, E.J., 1980. ANSWERS: A Model for Watershed Planning. *Trans. ASAE* 23, 0938–0944. <https://doi.org/10.13031/2013.34692>
- Bertuzzi, P., Rauws, G., Courault, D., 1990. Testing roughness indices to estimate soil surface roughness changes due to simulated rainfall. *Soil Tillage Res.* 17, 87–99. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(90\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0167-1987(90)90008-2)
- Blake, M., 2020. GCPs vs RTK vs PPK: When to Use What and Why | senseFly [WWW Document]. senseFly. URL <https://waypoint.sensefly.com/gcps-rtk-ppk-when-what-why/> (accessed 2.4.21).
- Blanco-Canqui, H., Gantzer, C.J., Anderson, S.H., Alberts, E.E., Ghidry, F., 2002. Saturated Hydraulic Conductivity and Its Impact on Simulated Runoff for Claypan Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 1596–1602. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1596>
- Boix-Fayos, C., Martínez-Mena, M., Arnau-Rosalén, E., Calvo-Cases, A., Castillo, V., Albaladejo, J., 2006. Measuring soil erosion by field plots: Understanding the sources of variation. *Earth-Science Rev.* 78, 267–285. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.05.005>
- Borrelli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Oost, K. Van, Montanarella, L., Panagos, P., 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nat. Commun.* 8. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Bradford, J.M., Ferris, J.E., Remley, P.A., 1987. Interrill Soil Erosion Processes: I. Effect of Surface Sealing on Infiltration, Runoff, and Soil Splash Detachment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51, 1566–1571. <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100060029x>
- Brant, V., Kroulík, M., Pivec, J., Zábranský, P., Hakl, J., Holec, J., Kvíz, Z., Procházka, L., 2017. Splash Erosion in Maize Crops under Conservation Management in Combination with Shallow Strip-tillage before Sowing. *Orig. Pap. Soil Water Res* 12, 106–116. <https://doi.org/10.17221/147/2015-SWR>
- Calvo-Cases, A., Boix-Fayos, C., Arnau-Rosalén, E., 2005. Patterns and thresholds of runoff generation and sediment transport on some Mediterranean hillslopes. *Catchment Dyn. River Process. Mediterr. Other Clim. Reg.*
- Cândido, B.M., 2019. Use of ground and air-based photogrammetry for soil erosion assessment. Lancaster University.
- Cândido, B.M., Quinton, J.N., James, M.R., Silva, M.L.N., de Carvalho, T.S., de Lima, W., Beniaich, A., Eltner, A., 2020. High-resolution monitoring of diffuse (sheet or interrill) erosion using

- structure-from-motion. *Geoderma* 375, 114477.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114477>
- Carrivick, J.L., Smith, M.W., Quincey, D.J., 2016. Structure from Motion in the Geosciences, Structure from Motion in the Geosciences. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.
<https://doi.org/10.1002/9781118895818>
- Cerdá, A., 1999. Simuladores de lluvia y su aplicación a la Geomorfología : Estado de la cuestión. *Cuad. Investig. Geográfica* 25, 45. <https://doi.org/10.18172/cig.1036>
- Chaplot, V., Le Bissonnais, Y., 2000. Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. *Earth Surf. Process. Landforms* 25, 145–153.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(200002\)25:2<145::AID-ESP51>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(200002)25:2<145::AID-ESP51>3.0.CO;2-3)
- Choi, J., Choi, Y.-H., Lim, K.-J., Shin, Y.-C., 2005. Soil erosion measurement and control techniques. *Food Fertil. Technol. Center*. 12.
- Christiansen, J.E., 1942. Irrigation by sprinkling. University of California, College of Agriculture, Berkeley, California.
- Cledat, E., Jospin, L. V., Cucci, D.A., Skaloud, J., 2020. Mapping quality prediction for RTK/PPK-equipped micro-drones operating in complex natural environment. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 167, 24–38. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.05.015>
- Cook, K.L., 2017. An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection. *Geomorphology* 278, 195–208.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.009>
- Currence, H.D., Lovely, W.G., 1971. An Automatic Soil Surface Profilometer. *Trans. ASEA* 3.
- Currence, H.D., Lovely, W.G., 1970. Analysis of Soil Surface Roughness. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 13, 710–714.
- ČÚZK: Geoportál [WWW Document], 2016. URL [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(ncjOukxiddhfppaju1luavxg\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302](https://geoportal.cuzk.cz/(S(ncjOukxiddhfppaju1luavxg))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302) (accessed 2.3.21).
- Davidová, T., Dostál, T., David, V., Strauss, P., 2015. Determining the protective effect of agricultural cropson the soil erosion process using a field rainfall simulator. *Plant, Soil Environ.* 61, 109–115. <https://doi.org/10.17221/903/2014-PSE>
- De Roo, A.P.J., Wesseling, C.G., Ritsema, C.J., 1996. LISEM: A SINGLE-EVENT PHYSICALLY BASED HYDROLOGICAL AND SOIL EROSION MODEL FOR DRAINAGE BASINS. I: THEORY, INPUT AND OUTPUT. *Hydrol. Process.* 10, 1107–1117. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199608\)10:8<1107::AID-HYP415>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199608)10:8<1107::AID-HYP415>3.0.CO;2-4)
- Dostál, T., Váška, J., Vrána, K., 2000. SMODERP — A Simulation Model of Overland Flow and Erosion Processes, in: *Soil Erosion*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 135–161.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-04295-3_8
- Dunn, M.L., 2009. RECENT DEVELOPMENTS IN CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRY FOR MINING AND RECLAMATION 390–399. <https://doi.org/10.21000/JASMR09010390>
- Eijkelpamp Soil & Water, 2018. Rainfall Simulator. Rainfall simulator - Oper. Instr. <https://doi.org/10.4135/9781446247501.n3200>

- El-Din Fawzy, H., Basha, A.M., Botross, M.N., 2020. Estimating a mathematical formula of soil erosion under the effect of rainfall simulation by digital close range photogrammetry technique. *Alexandria Eng. J.* <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.09.039>
- Eltner, A., Baumgart, P., Maas, H.G., Faust, D., 2015. Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil. *Earth Surf. Process. Landforms* 40, 741–755. <https://doi.org/10.1002/esp.3673>
- Eltner, A., Kaiser, A., Abellan, A., Schindewolf, M., 2017. Time lapse structure-from-motion photogrammetry for continuous geomorphic monitoring 2253, 2240–2253. <https://doi.org/10.1002/esp.4178>
- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F., Abellán, A., 2016. Image-based surface reconstruction in geomorphometry-merits, limits and developments. *Earth Surf. Dyn.* 4, 359–389. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-359-2016>
- Eltner, A., Maas, H.G., Faust, D., 2018. Soil micro-topography change detection at hillslopes in fragile Mediterranean landscapes. *Geoderma* 313, 217–232. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.034>
- Eltner, A., Mulsow, C., Maas, H.-G., 2013. Quantitative Measurement of Soil Erosion From Tls and Uav Data. *ISPRS - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. XL-1/W2*, 119–124. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-1-w2-119-2013>
- Erpul, G., Gabriels, D., Cornelis, W.M., Samray, H., Guzelordu, T., 2009. Average sand particle trajectory examined by the Raindrop Detachment and Wind-driven Transport (RD-WDT) process. *Earth Surf. Process. Landforms* 34, 1270–1278. <https://doi.org/10.1002/esp.1814>
- Fernández-Raga, M., Palencia, C., Keesstra, S., Jordán, A., Fraile, R., Angulo-Martínez, M., Cerdà, A., 2017. Splash erosion: A review with unanswered questions. *Earth-Science Rev.* 171, 463–477. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.009>
- Flanagan, D.C., Gilley, J.E., Franti, T.G., 2007. Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development History, Model Capabilities, and Future Enhancements. *Trans. ASABE* 50, 1603–1612. <https://doi.org/10.13031/2013.23968>
- Florian, M., 2016. Popis povrchu orné půdy s využitím stereofotogrammetrie. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- Foster, G.R., Lane, L.J., Nowlin, J.D., Laflen, J.M., Young, R.A., 1981. Estimating Erosion and Sediment Yield on Field-Sized Areas. *Trans. ASAE* 24, 1253–1262. <https://doi.org/10.13031/2013.34429>
- Furukawa, Y., Hernández, C., 2015. Multi-View Stereo: A Tutorial. *Found. Trends® Comput. Graph. Vis.* 9, 1–148. <https://doi.org/10.1561/06000000052>
- Furukawa, Y., Ponce, J., 2010. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 32, 1362–1376. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2009.161>
- Gilliot, J.M., Vaudour, E., Michelin, J., 2017. Soil surface roughness measurement : A new fully automatic photogrammetric approach applied to agricultural bare fields. *Comput. Electron. Agric.* 134, 63–78. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.010>
- Gippel, C.J., 1989. The use of turbidimeters in suspended sediment research. *Hydrobiologia* 176–177, 465–480. <https://doi.org/10.1007/BF00026582>

- Gomez, K.A., Gomez, A.A., 1985. Statistical Procedures for Agricultural Research. *J. Am. Stat. Assoc.* 80, 486. <https://doi.org/10.2307/2287932>
- Grims, M., Atzberger, C., Bauer, T., Strauss, P., 2014. Low-cost Terrestrial Photogrammetry as a Tool for a Sample-Based Assessment of Soil Roughness Preiswerte terrestrische Photogrammetrie als Werkzeug zur Bestimmung der Rauigkeit von Böden. *Photogramm. - Fernerkundung - Geoinf.* 2014, 313–323. <https://doi.org/10.1127/1432-8364/2014/0226>
- Grismer, M., 2012. Standards vary in studies using rainfall simulators to evaluate erosion. *Calif. Agric.* 66. <https://doi.org/10.3733/ca.v066n03p102>
- Grismer, M.E., 2011. Rainfall Simulation Studies - A Review of Designs, Performance and Erosion Measurement Variability. *Dep. Hydrol. Sci. Biol. Agric. Eng.*
- Grohmann, C.H., Smith, M.J., Riccomini, C., 2011. Multiscale analysis of topographic surface roughness in the Midland Valley, Scotland. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 49, 1200–1213. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2053546>
- Håkansson, I., Lipiec, J., 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Tillage Res.* 53, 71–85. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00095-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00095-1)
- Hamed, Y., Albergel, J., Pépin, Y., Asseline, J., Nasri, S., Zante, P., Berndtsson, R., El-Niazy, M., Balah, M., 2002. Comparison between rainfall simulator erosion and observed reservoir sedimentation in an erosion-sensitive semiarid catchment. *Catena* 50, 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00089-9](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00089-9)
- Hänsel, P., Schindewolf, M., Eltner, A., Kaiser, A., Schmidt, J., 2016. Feasibility of High-Resolution Soil Erosion Measurements by Means of Rainfall Simulations and SfM Photogrammetry. *Hydrology* 3, 1–16. <https://doi.org/10.3390/hydrology3040038>
- Hansen, B., Schjønning, P., Sibbesen, E., 1999. Roughness indices for estimation of depression storage capacity of tilled soil surfaces. *Soil Tillage Res.* 52, 103–111. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00061-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00061-6)
- Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P., Lister, D., 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci. data* 7, 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Helming, K., 1992. Die Bedeutung des Mikroreliefs für die Regentropfenerosion.
- Holý, M., Váška, J., Vrána, K., 1988. SMODERP: A Simulation Model for Determination of Surface Runoff and Prediction of Erosion Processes [WWW Document]. *Tech. Pap. Fac. Civ. Eng.* URL [https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=SMODERP%3A A Simulation Model for Determination of Surface Runoff and Prediction of Erosion Processes. Technical papers of the Faculty of Civil Engineering&author=M. Holy&author=J. Váška&author=K. Vrána&publ](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=SMODERP%3A+A+Simulation+Model+for+Determination+of+Surface+Runoff+and+Prediction+of+Erosion+Processes.+Technical+papers+of+the+Faculty+of+Civil+Engineering&author=M.+Holy&author=J.+V%C3%A1%C5%A1ka&author=K.+V%C3%9A%20r%C3%A1na&publ) (accessed 1.8.21).
- Holz, D.J., Williard, K.W.J., Edwards, P.J., Schoonover, J.E., 2015. Soil Erosion in Humid Regions: A Review. *J. Contemp. Water Res. Educ.* 154, 48–59. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704x.2015.03187.x>
- Horton, R.E., 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Union* 14, 446. <https://doi.org/10.1029/TR014i001p00446>
- Hsieh, Y.P., Grant, K.T., Bugna, G.C., 2009. A field method for soil erosion measurements in

- agricultural and natural lands. *J. Soil Water Conserv.* 64, 374–382.
<https://doi.org/10.2489/jswc.64.6.374>
- Hudson, N.W., 1993. *Field Measurement of Soil Erosion and Runoff*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Iserloh, T., Ries, J.B., Arnáez, J., Boix-Fayos, C., Butzen, V., Cerdà, A., Echeverría, M.T., Fernández-Gálvez, J., Fister, W., Geißler, C., Gómez, J.A., Gómez-Macpherson, H., Kuhn, N.J., Lázaro, R., León, F.J., Martínez-Mena, M., Martínez-Murillo, J.F., Marzen, M., Mingorance, M.D., Ortigosa, L., Peters, P., Regüés, D., Ruiz-Sinoga, J.D., Scholten, T., Seeger, M., Solé-Benet, A., Wengel, R., Wirtz, S., 2013. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. *Catena* 110, 100–112.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.05.013>
- James, M.R., Chandler, J.H., Eltner, A., Fraser, C., Miller, P.E., Mills, J.P., Noble, T., Robson, S., Lane, S.N., 2019. Guidelines on the use of structure-from-motion photogrammetry in geomorphic research. <https://doi.org/10.1002/esp.4637>
- James, M.R., Robson, S., 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 117.
<https://doi.org/10.1029/2011JF002289>
- Janeček, M., Dostál, T., Kozlovsky-Dufková, J., Dumbrovský, M., Hůla, J., Kadlec, V., Konečná, J., Kovář, P., Krása, J., Kubátová, E., Kobzová, D., Kudrnáčová, M., Novotný, I., Podhrázká, J., Pražan, J., Procházková, E., Středová, H., Toman, F., Vopravil, J., Vlasák, J., 2012. Ochrana zemědělské půdy před erozí. *Metodika* 113.
- Jester, W., Klik, A., 2005. Soil surface roughness measurement - Methods, applicability, and surface representation. *Catena* 64, 174–192.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.005>
- Joel, A., Messing, I., Seguel, O., Casanova, M., 2002. Measurement of surface water runoff from plots of two different sizes. *Hydrol. Process.* 16, 1467–1478.
<https://doi.org/10.1002/hyp.356>
- Johannsen, L.L., Zambon, N., Strauss, P., Dostal, T., Neumann, M., Zumr, D., Cochrane, T.A., Blöschl, G., Klik, A., 2020a. Comparison of three types of laser optical disdrometers under natural rainfall conditions. *Hydrol. Sci. J.* 65, 524–535.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1709641>
- Johannsen, L.L., Zambon, N., Strauss, P., Dostal, T., Neumann, M., Zumr, D., Cochrane, T.A., Klik, A., 2020b. Impact of Disdrometer Types on Rainfall Erosivity Estimation. *Water* 12, 963.
<https://doi.org/10.3390/w12040963>
- Johnson, L.F., Herwitz, S., Dunagan, S., Lobitz, B., Sullivan, D., Slye, R., 2003. Collection of ultra high spatial and spectral resolution image data over California vineyards with a small UAV. *Proc. 30th Int. Symp. Remote Sens. Environ.* 3–5.
- Kalantari, B., 2012. Engineering significant of swelling soils. *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.* 4, 2874–2878.
- Kalibová, J., Jačka, L., Petru, J., 2016. The effectiveness of jute and coir blankets for erosion control in different field and laboratory conditions. *Solid Earth* 7, 469–479.
<https://doi.org/10.5194/se-7-469-2016>
- Kavka, P., 2011. Kalibrace a validace modelu SMODERP. Disertační práce. České vysoké učení

technické v Praze.

- Kavka, P., Dvořáková, T., Zumr, D., David, V., Krása, J., 2011. Měření povrchového odtoku a eroze sedimentů na terénních plochách. *Stavební Obz.*
- Kavka, P., Neumann, M., Laburda, T., Zumr, D., 2019. Developing of the laboratory rainfall simulator for testing the technical soil surface protection measures and droplets impact. *Proc. XVII ECSMGE-2019*. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0392>
- 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 Obz. - Civ. Eng. J.* 27, 183–194. <https://doi.org/10.14311/cej.2018.02.0015>
- Kolářková, J., 2005. Stanovení erodovatelnosti půdy experimentálními metodami. České vysoké učení technické v Praze.
- Kuipers, H., 1957. A RELIEFMETER FOR SOIL CULTIVATION STUDIES 5, 255–262.
- Laburda, T., 2013. Vyhodnocení experimentálních erozních dat z Laboratorního dešťového simulátoru. České vysoké učení technické v Praze.
- Laburda, T., Krása, J., Florian, M., Macháčková, M., 2017. Vývoj povrchu holé orné půdy s využitím stereofotogrammetrie. *Vodohospodářské Tech. Inf.* 59, 33. <https://doi.org/10.46555/VTEI.2016.11.005>
- Laburda, T., Krása, J., Zumr, D., Devátý, J., Vrána, M., Zambon, N., Johannsen, L.L., Klik, A., Strauss, P., Dostál, T., 2021. SfM-MVS photogrammetry in splash erosion monitoring under natural rainfall. *Earth Surf. Process. Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.5087>
- Laburda, T., Schwarzová, P., Krása, J., 2015. Long-term research of soil erosion using the laboratory rainfall simulator CTU in Prague, in: *Juniorstav*.
- Lane, S.N., Westaway, R.M., Hicks, D.M., 2003. Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing. *Earth Surf. Process. Landforms* 28, 249–271. <https://doi.org/10.1002/esp.483>
- Lanza, L.G., Vuerich, E., Gnecco, I., 2010. Analysis of highly accurate rain intensity measurements from a field test site. *Adv. Geosci.* 25, 37–44. <https://doi.org/10.5194/adgeo-25-37-2010>
- Legout, C., Leguédois, S., Le Bissonnais, Y., Malam Issa, O., 2005. Splash distance and size distributions for various soils. *Geoderma* 124, 279–292. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.05.006>
- Linden, D.R., van Doren, D.M., 1986. Parameters for Characterizing Tillage-induced Soil Surface Roughness.
- Liu, Y., Zheng, X., Ai, G., Zhang, Y., Zuo, Y., 2018. Generating a high-precision true digital orthophoto map based on UAV images. *ISPRS Int. J. Geo-Information* 7. <https://doi.org/10.3390/ijgi7090333>
- Macháčková, M., 2015. Popis vývoje povrchu zemědělské půdy s využitím stereofotogrammetrie. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- Mancini, F., Dubbini, M., Gattelli, M., Stecchi, F., Fabbri, S., Gabbianelli, G., 2013. Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments. *Remote Sens.* 5, 6880–6898.

<https://doi.org/10.3390/rs5126880>

- Mandlbürger, G., Pfennigbauer, M., Schwarz, R., Flöry, S., Nussbaumer, L., 2020. Concept and performance evaluation of a Novel UAV-Borne Topo-Bathymetric LiDAR sensor. *Remote Sens.* 12. <https://doi.org/10.3390/rs12060986>
- Megahan, W.F., 1974. Erosion over time on severely disturbed granitic soils: a model.
- Meinen, B.U., Robinson, D.T., 2020. Mapping erosion and deposition in an agricultural landscape: Optimization of UAV image acquisition schemes for SfM-MVS. *Remote Sens. Environ.* 239, 111666. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111666>
- Meshkat, M., Amanian, N., Talebi, A., Kiani-Harchegani, M., Rodrigo-Comino, J., 2019. Effects of Roughness Coefficients and Complex Hillslope Morphology on Runoff Variables under Laboratory Conditions. *Water* 11, 2550. <https://doi.org/10.3390/w11122550>
- Mian, O., Lutes, J., Lipa, G., Hutton, J.J., Gavelle, E., Borghini, S., 2016. Accuracy assessment of direct georeferencing for photogrammetric applications on small unmanned aerial platforms, in: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 77–83. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W4-77-2016>
- Miller, S., 1994. Handbook for agrohydrology, in: *Handbook for Agrohydrology*. NATURAL RESOURCES INSTITUTE.
- Moore, I.D.M.C.H., Barfield, B.J., 1983. Kentucky Rainfall Simulator. *Trans. ASAE* 26, 1085–1089. <https://doi.org/10.13031/2013.34081>
- Moreno, R.G., Requejo, A.S., Altisent, J.M.D., Álvarez, M.C.D., 2011. Significance of soil erosion on soil surface roughness decay after tillage operations. *Soil Tillage Res.* 117, 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.08.006>
- Morgan, R.P.C., 1981. Field measurement of splash erosion. *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ.* 133, 373–382.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M.E., 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surf. Process. Landforms* 23, 527–544. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199806\)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199806)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5)
- Nakamura, R., 1971. Runoff analysis by electrical conductance of water. *J. Hydrol.* 14, 197–212. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(71\)90035-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(71)90035-7)
- Nearing, M.A., Hairsine, P.B., 2011. The Future of Soil Erosion Modelling. *Handb. Eros. Model.* 387–397. <https://doi.org/10.1002/9781444328455.ch20>
- Neumann, M., 2013. Vyhodnocení simulací na dešťovém simulátoru a jejich využití pro verifikaci modelu SMODERP. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.
- Ngadiman, N., Kaamin, M., Sahat, S., Mokhtar, M., Ahmad, N.F.A., Kadir, A.A., Razali, S.N.M., 2018. Production of orthophoto map using UAV photogrammetry: A case study in UTHM Pagoh campus. *AIP Conf. Proc.* 2016. <https://doi.org/10.1063/1.5055514>
- NIED, 1974. Large-Scale Rainfall Simulator.
- Nouwakpo, S.K., Weltz, M.A., Mcgwire, K., 2015. Assessing the performance of structure-from-

- motion photogrammetry and terrestrial LiDAR for reconstructing soil surface microtopography of naturally vegetated plots. <https://doi.org/10.1002/esp.3787>
- Novotný, I., 2017. Příručka ochrany proti erozi zemědělské půdy.
- Onstad, C.A., Wolfe, M.L., Larson, C.L., Slack, D.C., 1984. Tilled soil subsidence during repeated wetting. *Trans. - Am. Soc. Agric. Eng.* 27, 733–736.
- Osuagwu, J., Nwachukwu, A.N., Nwoke, H., Agbo, K.C., 2014. Effects of Soil Erosion and Sediment Deposition on Surface Water Quality: A Case Study of Otamiri River. *Asian J. Eng. Technol.* 02.
- Osunbitan, J.A., Oyedele, D.J., Adekalu, K.O., 2005. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. *Soil Tillage Res.* 82, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.05.007>
- Pan, C., Ma, L., Shangguan, Z., 2010. Effectiveness of grass strips in trapping suspended sediments from runoff. *Earth Surf. Process. Landforms* 35, 1006–1013. <https://doi.org/10.1002/esp.1997>
- Park, J.W., Jeong, H.H., Kim, J.S., Choi, C.U., 2016. Development of Open source-based automatic shooting and processing UAV imagery for Orthoimage Using Smart Camera UAV SpS10-FOSS4G: FOSS4G Session (coorganized with OSGeo). *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B7-941-2016>
- Peter Heng, B.C., Chandler, J.H., Armstrong, A., 2010. Applying close range digital photogrammetry in soil erosion studies. *Photogramm. Rec.* 25, 240–265. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2010.00584.x>
- Pilgrim, D.H., Huff, D.D., 1978. A field evaluation of subsurface and surface runoff. I. Tracer studies, *Journal of Hydrology*. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(78\)90076-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(78)90076-8)
- Planchon, O., Esteves, M., Silvera, N., 2001. Micro-relief induced by tillage. Measurement, modelling, and consequences on overland flow and erosion. *Catena* 46, 141–157. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00163-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00163-1)
- Polidori, L., El Hage, M., 2020. Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review. *Remote Sens.* 12, 3522.
- Právělie, R., Patriche, C., Borrelli, P., Panagos, P., Roșca, B., Dumitrașcu, M., Nita, I.A., Săvulescu, I., Birsan, M.V., Bandoc, G., 2021. Arable lands under the pressure of multiple land degradation processes. A global perspective. *Environ. Res.* 194, 110697. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110697>
- Pricope, N.G., Mapes, K.L., Woodward, K.D., Olsen, S.F., Britton Baxley, J., 2019. Multi-sensor assessment of the effects of varying processing parameters on uas product accuracy and quality. *Drones* 3, 1–17. <https://doi.org/10.3390/drones3030063>
- Prosdociami, M., Burguet, M., Di Prima, S., Sofia, G., Terol, E., Rodrigo Comino, J., Cerdà, A., Tarolli, P., 2017. Rainfall simulation and Structure-from-Motion photogrammetry for the analysis of soil water erosion in Mediterranean vineyards. *Sci. Total Environ.* 574, 204–215. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.036>
- Rahaman, H., Champion, E., 2019. To 3D or Not 3D: Choosing a Photogrammetry Workflow for Cultural Heritage Groups. *Heritage* 2, 1835–1851. <https://doi.org/10.3390/heritage2030112>

- Ramos, J.C., Bertol, I., Barbosa, F.T., Bertól, C., Mafra, Á.L., Miquelluti, D.J., Júnior, J.M., 2016. Water erosion in surface soil conditions: Runoff velocity, concentration and D50 index of sediments in runoff. *Sci. Agric.* 73, 286–293. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0110>
- Renard, K., Foster, G., Weesies, G., McCool, D., Yoder, D., 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agric. Handb. No. 703*. <https://doi.org/DC0-16-048938-5> 65–100.
- Ricks, M.D., Horne, M.A., Faulkner, B., Zech, W.C., Fang, X., Donald, W.N., Perez, M.A., 2019. Design of a pressurized rainfall simulator for evaluating performance of erosion control practices. *Water (Switzerland)* 11. <https://doi.org/10.3390/w11112386>
- Rieke-Zapp, D., Wegmann, H., Santel, F., Nearing, M., 2001. Digital photogrammetry for measuring soil surface roughness. *Proc. Am. Soc. Photogramm. Remote Sens. 2001 Conf. Gatew. to New Millenn.* 1–8.
- Rodrigo Comino, J., 2021. *Precipitation: Earth Surface Responses and Processes*. Elsevier.
- Rodrigo Comino, J., Iserloh, T., Morvan, X., Malam Issa, O., Naisse, C., Keesstra, S., Cerdà, A., Prosdociami, M., Arnáez, J., Lasanta, T., Ramos, M., Marqués, M., Ruiz Colmenero, M., Bienes, R., Ruiz Sinoga, J., Seeger, M., Ries, J., 2016. Soil Erosion Processes in European Vineyards: A Qualitative Comparison of Rainfall Simulation Measurements in Germany, Spain and France. *Hydrology* 3, 6. <https://doi.org/10.3390/hydrology3010006>
- Römken, M.J.M., Helming, K., Prasad, S.N., 2002. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. *Catena* 46, 103–123. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00161-8)
- Rüttimann, M., Schaub, D., Prasuhn, V., Riiegg, W., 1995. CATENA Measurement of runoff and soil erosion on regularly cultivated fields in Switzerland some critical considerations, *Catena*.
- Ryzak, M., Bieganowski, A., Polakowski, C., 2015. Effect of soil moisture content on the splash phenomenon reproducibility. *PLoS One* 10, 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119269>
- Saleh, A., 1993. Soil roughness measurement: Chain method. *J. Soil Water Conserv.* 48.
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J.H., Rodríguez-Pérez, J.R., Ordóñez, C., 2018. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sens.* 10. <https://doi.org/10.3390/rs10101606>
- Sartori, M., Philippidis, G., Ferrari, E., Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L., Panagos, P., 2019. A linkage between the biophysical and the economic: Assessing the global market impacts of soil erosion. *Land use policy* 86, 299–312. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.05.014>
- Schlesinger, W., Ward, T.J., Anderson, J., 2000. Nutrient losses in runoff from grassland and shrubland habitats in southern New Mexico: II. Field plots | Request PDF. *Biogeochemistry*.
- Senanayake, S., Pradhan, B., Huete, A., Brennan, J., 2020. A review on assessing and mapping soil erosion hazard using geo-informatics technology for farming system management. *Remote Sens.* 12, 1–25. <https://doi.org/10.3390/rs12244063>

- Shi, D., Chen, L., 2017. Do RTK/PPK drones give you better results than GCPs?
- Shi, Z.H., Yan, F.L., Li, L., Li, Z.X., Cai, C.F., 2010. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China. *Catena* 81, 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.04.007>
- Smith, M.W., Carrivick, J.L., Quincey, D.J., 2016. Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Prog. Phys. Geogr. Earth Environ.* 40, 247–275. <https://doi.org/10.1177/0309133315615805>
- Snapir, B., Hobbs, S., Waine, T.W., 2014. Roughness measurements over an agricultural soil surface with Structure from Motion. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 96, 210–223. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.07.010>
- Strauss, P., Pitty, J., Pfeffer, M., Mentler, A., 2000. Rainfall Simulation for Outdoor Experiments, in: *Current Research Methods to Assess the Environmental Fate of Pesticides*. INRA Editions.
- Szabó, B., Seeger, M., Brings, C., Gronz, O., Comino, J.R., Iserloh, T., Ries, J.B., 2016. Detection of linear soil erosion forms with Structure from Motion (SfM) technique in a Waldrach vineyard (Ruwer Valley, Germany), in: *Geophysical Research Abstracts*. pp. 2016–6202.
- Szabó, J.A., Centeri, C., Keller, B., Hatvani, I.G., Szalai, Z., Dobos, E., Jakab, G., 2020. The use of various rainfall simulators in the determination of the driving forces of changes in sediment concentration and clay enrichment. *Water (Switzerland)* 12. <https://doi.org/10.3390/w12102856>
- Taconet, O., Ciarletti, V., 2007. Estimating soil roughness indices on a ridge-and-furrow surface using stereo photogrammetry. *Soil Tillage Res.* 93, 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.03.018>
- Thomas, N.P., El Swaify, S.A., 1989. Construction and calibration of a rainfall simulator. *J. Agric. Eng. Res.* 43, 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(89\)80001-0](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(89)80001-0)
- Thomaz, E.L., Pereira, A.A., 2017. Misrepresentation of hydro-erosional processes in rainfall simulations using disturbed soil samples. *Geomorphology* 286, 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.03.001>
- Tomaščík, J., Mokroš, M., Surový, P., Grznárová, A., Merganič, J., 2019. UAV RTK/PPK method—An optimal solution for mapping inaccessible forested areas? *Remote Sens.* 11. <https://doi.org/10.3390/RS11060721>
- Tonkin, T.N., Midgley, N.G., 2016. Ground-control networks for image based surface reconstruction: An investigation of optimum survey designs using UAV derived imagery and structure-from-motion photogrammetry. *Remote Sens.* 8. <https://doi.org/10.3390/rs8090786>
- Tran, T. V., Tucker-Kulesza, S.E., Bernhardt, M., 2018. Soil Surface Roughness and Turbidity Measurements in Erosion Testing 506–515. <https://doi.org/10.1061/9780784481585.049>
- Truman, C., Bradford, J.M., 1990. Effect of antecedent soil moisture on splash detachment under simulated rainfall. *Soil Sci.* 150, 787–798.
- Turner, D., Lucieer, A., Watson, C., 2012. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery, based on Structure from Motion (SfM) point clouds. *Remote Sens.* 4, 1392–1410.

<https://doi.org/10.3390/rs4051392>

- Vinci, A., Todisco, F., Brigante, R., Mannocchi, F., Radicioni, F., 2017. A smartphone camera for the structure from motion reconstruction for measuring soil surface variations and soil loss due to erosion. *Hydrol. Res.* 48, 673–685. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.075>
- Vinci, A., Todisco, F., Vergni, L., Torri, D., 2020. A comparative evaluation of random roughness indices by rainfall simulator and photogrammetry. *Catena* 188, 104468. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104468>
- Vopravil, J., Khel, T., Vrabcová, T., Havelková, L., Procházková, E., Novotný, I., Novák, P., 2010. Vliv činnosti člověka na krajinu českého venkova s důrazem na vodní režim a zadržování vody v krajině. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.
- Vrána, M., 2019. Fotogrammetrické vyhodnocení kapkové eroze. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- Warner, W.S., 1995. Mapping a three-dimensional soil surface with hand-held 35 mm photography. *Soil Tillage Res.* 34, 187–197. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00462-2](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00462-2)
- Wei, Y., Wu, X., Cai, C., 2015. Splash erosion of clay-sand mixtures and its relationship with soil physical properties: The effects of particle size distribution on soil structure. *Catena* 135, 254–262. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.08.003>
- Whelan, D.E., Miller, L.E., Cavallero, J.B., 1952. A Method of Determining Surface Runoff by “Routing” Infiltrated Water through the Soil Profiles.
- Wicks, J.M., Bathurst, J.C., 1996. SHESED: A physically based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE hydrological modelling system. *J. Hydrol.* 175, 213–238. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)80012-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)80012-6)
- Williams, J.R., Berndt, H.D., 1977. Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology. *Trans. ASAE* 20, 1100–1104. <https://doi.org/10.13031/2013.35710>
- Williams, R., 2012. DEMs of Difference. *Geomorphol. Tech.* 2, 1–17.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses. *Agric. Handb.* no. 537 285–291. <https://doi.org/10.1029/TR039i002p00285>
- Woodward, J., Foster, I., 1997. Erosion and Suspended Sediment Transfer in River Catchments: Environmental controls, processes and problems on JSTOR. *Geogr. Assoc.* 82, 353–376.
- Wróżyński, R., Pyszny, K., Sojka, M., Przybyła, C., Murat-Błazejewska, S., 2017. Ground volume assessment using “Structure from Motion” photogrammetry with a smartphone and a compact camera. *Open Geosci.* 9, 281–294. <https://doi.org/10.1515/geo-2017-0023>
- Yakubu, M.L., Yusop, Z., 2017. Adaptability of rainfall simulators as a research tool on urban sealed surfaces – a review. *Hydrol. Sci. J.* 62, 996–1012. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1267355>
- Zambon, N., Johannsen, L.L., Strauss, P., Dostál, T., Zumr, D., Cochrane, T.A., Klik, A., 2020a. Splash erosion affected by initial soil moisture and surface conditions under simulated rainfall. *Catena*.
- Zambon, N., Johannsen, L.L., Strauss, P., Dostál, T., Zumr, D., Neumann, M., Cochrane, T.A., Klik, A., 2020b. Rainfall Parameters Affecting Splash Erosion under Natural Conditions. *Appl. Sci.*

- 10, 4103. <https://doi.org/10.3390/app10124103>
- Zhang, X.C., 2019. Determining and Modeling Dominant Processes of Interrill Soil Erosion. *Water Resour. Res.* 55, 4–20. <https://doi.org/10.1029/2018WR023217>
- Zhao, K., Li, S.Q., Xu, B.C., Lu, H.L., Li, S.X., 2010. Comparative study on disturbed and undisturbed soil sample incubation for estimating soil nitrogen-supplying capacity. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 41, 2371–2382. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.511370>
- Zhuang, Y., Du, C., Zhang, L., Du, Y., Li, S., 2015. Research trends and hotspots in soil erosion from 1932 to 2013: a literature review. *Scientometrics* 105, 743–758. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1706-3>
- Žížala, D., Juřicová, A., Zádorová, T., Zelenková, K., Minařík, R., 2019. Mapping soil degradation using remote sensing data and ancillary data: South-East Moravia, Czech Republic. *Eur. J. Remote Sens.* 52, 108–122. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1482524>
- Žížala, D., Krása, J., 2016. Monitoring erozního poškození půd v ČR nástroji dálkového průzkumu Země. Praha.
- Zobeck, T.M., Onstad, C.A., 1987. Tillage and rainfall effects on random roughness: A review. *Soil Tillage Res.* 9, 1–20. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(87\)90047-X](https://doi.org/10.1016/0167-1987(87)90047-X)
- Zumr, D., Mützenberg, D.V., Neumann, M., Jeřábek, J., Laburda, T., Kavka, P., Johannsen, L.L., Zambon, N., Klik, A., Strauss, P., Dostál, T., 2020. Experimental setup for splash erosion monitoring-study of silty loamsplash characteristics. *Sustain.* 12, 1–13. <https://doi.org/10.3390/SU12010157>

7.2 Seznam publikací autora

Následující seznam byl vygenerován z aplikace V3S ke dni 24.2.2021 a obsahuje všechny publikace, na kterých se autor osobně podílel.

LABURDA, T. et al. SfM-MVS photogrammetry in splash erosion monitoring under natural rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2021, ISSN 0197-9337. DOI [10.1002/esp.5087](https://doi.org/10.1002/esp.5087).

KAVKA, P. et al. ZÁVĚREČNÁ ODBORNÁ ZPRÁVA Z PROJEKTU O POSTUPU PRACÍ A DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ ZA PROJEKT Č. TH02030428. [Výroční zpráva] 2020.

NEUMANN, M. et al. Swiping/pulse portable nozzle rainfall simulator. In: *EGU General Assembly 2020*. European Geosciences Union General Assembly 2020, online, 2020-05-04/2020-05-08. Göttingen: Copernicus Publications, 2020.

NEUMANN, M. et al. Efficiency of geotextile soil surface cover against soil erosion on the steep slopes. In: ZUMR, D. et al., eds. *2nd Workshop on soil physics and landscape hydrology*. Praha - Dejvice, 2020-12-01. Praha: ČVUT FSV. Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, 2020.

TEJKL, A., M. BÁČOVÁ a P. KAVKA, eds. *Sborník Hydrologie, GIS a životní prostředí 2020*. Hydrologie, GIS a životní prostředí 2020, online, 2020-12-09. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2020. ISBN 978-80-01-06800-7.

NEUMANN, M. et al. Erosion experiments on the steep slopes in laboratory. In: TEJKL, A., M. BÁČOVÁ a P. KAVKA, eds. *Sborník Hydrologie, GIS a životní prostředí 2020*. Hydrologie, GIS a životní prostředí 2020, online, 2020-12-09. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2020. ISBN 978-80-01-06800-7.

LABURDA, T. et al. Photogrammetrically measured sheet and rill erosion on steep slopes. In: *EGU General Assembly 2020*. European Geosciences Union General Assembly 2020, online, 2020-05-04/2020-05-08. Göttingen: Copernicus Publications, 2020. Dostupné z: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2020/EGU2020-17539.html>

LABURDA, T., D. ZUMR a T. DOSTÁL. Grass strips as a tool for erosion controls. In: ZUMR, D. et al., eds. *2nd Workshop on soil physics and landscape hydrology*. Praha - Dejvice, 2020-12-01. Praha: ČVUT FSv. Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, 2020.

JERÁBEK, J. et al. Surface runoff connectivity during rainfall simulation experiments. In: ZUMR, D. et al., eds. *2nd Workshop on soil physics and landscape hydrology*. Praha - Dejvice, 2020-12-01. Praha: ČVUT FSv. Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, 2020.

LABURDA, T., T. DOSTÁL a D. ZUMR. Vliv travních pásů na erozi půdy a transport sedimentu. In: TEJKL, A., M. BÁČOVÁ a P. KAVKA, eds. *Sborník Hydrologie, GIS a životní prostředí 2020*. Hydrologie, GIS a životní prostředí 2020, online, 2020-12-09. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2020. s. 28. ISBN 978-80-01-06800-7.

NEUMANN, M. et al. Raindrop Influence on the Soil Surface. *Proceedings*. 2020, **1** ISSN 2504-3900. DOI [10.3390/proceedings2019030061](https://doi.org/10.3390/proceedings2019030061). Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2504-3900/30/1/61>

KUBÍNOVÁ, R. et al. Particle and aggregates size distribution of soil transported due to rainsplash, surface runoff and rill erosion. In: *AGU100 - Fall Meeting 2019*. San Francisco, 2019-12-09/2019-12-13. Baltimore: AGU, 2019.

KAVKA, P. et al. Developing of the laboratory rainfall simulator for testing the technical soil surface protection measures and droplets impact. In: *XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering - Reykjavík, Iceland*. The XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Reykjavik Iceland, Reykjavik, 2019-09-01/2019-09-06. Reykjavik: University of Iceland, 2019. ISBN 978-9935-9436-1-3. DOI [10.32075/17ECSMGE-2019-392](https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-392).

NEUMANN, M. et al. Vlastnosti uměle generovaných srážek využívaných pro studium eroze půdy. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2019, **61**(4), 10-17. ISSN 0322-8916.

NEUMANN, M. et al. Influence of rain drops to the soil surface. In: *Terra envision 2019*. Barcelona, 2019-09-02/2019-09-07. Terra envision, 2019.

ZUMR, D. et al. Experimental Setup for Splash Erosion Monitoring—Study of Silty Loam Splash Characteristics. *SUSTAINABILITY*. 2020, **12**(1), ISSN 2071-1050. DOI [10.3390/su12010157](https://doi.org/10.3390/su12010157). Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/1/157/html>

LABURDA, T. et al. Protecting Steep Slopes Against Soil Erosion: Geotextiles and its Effectiveness Under Heavy Rainfall. In: *AGU100 - Fall Meeting 2019*. San Francisco, 2019-12-09/2019-12-13. Baltimore: AGU, 2019.

LABURDA, T. et al. Sledování plošné a rýhové eroze na strmých svazích pomocí fotogrammetrie. In: TEJKL, A., M. BÁČOVÁ a P. KAVKA, eds. *SBORNÍK ABSTRAKTŮ KONFERENCE HYDROLOGIE, GIS A ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ 2019*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2019. s. 8. 1. ISBN 978-80-01-06591-4.

ZUMR, D. et al. Rainsplash erosion characteristics induced by natural and simulated rainfall. In: *5th Biohydrology - Humans and Nature*. Biohydrology 2019, Valencie, 2019-07-24/2019-07-27. Valencia: University of Valencia, 2019. s. 84.

NEUMANN, M. et al. Soil particle size distribution in surface runoff under artificial rainfall. In: *EGU General Assembly 2019*. European Geosciences Union General Assembly 2019, Vienna, 2019-04-08/2019-04-12. Vienna: European Geosciences Union, 2019. sv. vol. 21. ISSN 1607-7962. Dostupné z: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/EGU2019-10961-1.pdf>

TEJKL, A. et al. Research of technical measures for artificial slopes stabilization and soil erosion prevention. In: *EGU General Assembly 2019*. European Geosciences Union General Assembly 2019, Vienna, 2019-04-08/2019-04-12. Vienna: European Geosciences Union, 2019. sv. vol. 21. ISSN 1607-7962. Dostupné z: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/EGU2019-17555-2.pdf>

KAVKA, P. et al. Effect of rainfall intensity and energy on the protective technical measures under heavy storm. In: PELEG, N. a P. MOLNAR, eds. *Rainfall monitoring, modelling and forecasting in urban environments. UrbanRain18: 11th International Workshop on Precipitation in Urban Areas. Conference Proceedings*. UrbanRain18: 11th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, Pontresina, 2018-12-05/2018-12-07. Zurich: ETH Zurich, 2019. s. 53-54. DOI [10.3929/ethz-b-000347539](https://doi.org/10.3929/ethz-b-000347539). Dostupné z: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000347539>

LABURDA, T. et al. Close-range photogrammetric measurement of the splash and rill soil erosion.

In: *EGU General Assembly 2019*. European Geosciences Union General Assembly 2019, Vienna, 2019-04-08/2019-04-12. Vienna: European Geosciences Union, 2019. sv. vol. 21. ISSN 1607-7962. Dostupné z: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/EGU2019-15246.pdf>

LABURDA, T. et al. The effects of rain drop impact on soil surface microtopography. In: PELEG, N. a P. MOLNAR, eds. *Rainfall monitoring, modelling and forecasting in urban environments. UrbanRain18: 11th International Workshop on Precipitation in Urban Areas. Conference Proceedings*. UrbanRain18: 11th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, Pontresina, 2018-12-05/2018-12-07. Zurich: ETH Zurich, 2019. s. 57-58. DOI [10.3929/ethz-b-000347541](https://doi.org/10.3929/ethz-b-000347541). Dostupné z: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000347541>

LABURDA, T. et al. Posouzení vlivu protierozních ochranných technologií na strmých svazích za pomoci fotogrammetrie. In: PAVELKA, K., ed. *Sborník SVK (workshop fotogrammetrie, DPZ a laserového skenování, Telč 2018)*. Workshop fotogrammetrie, DPZ a laserového skenování, Telč, 2018-11-12/2018-11-14. Praha: ČVUT FSV, Katedra geotechniky, 2018. ISBN 978-80-01-06512-9.

KAVKA, P. et al. Posuzování účinnosti ochranných technologií před účinky eroze na strmých svazích. In: BÁČOVÁ, M. a P. KAVKA, eds. *Sborník abstraktů konference Hydrologie, GIS a životní prostředí 2018*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2018. s. 21. ISBN 978-80-01-06432-0.

NEUMANN, M. et al. Porovnání měření kinetické energie různými typy distrometrů. In: BÁČOVÁ, M. a P. KAVKA, eds. *Sborník abstraktů konference Hydrologie, GIS a životní prostředí 2018*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2018. s. 27. ISBN 978-80-01-06432-0.

ZUMR, D. et al. Measuring the kinetic energy of rainfall and the soil particles splash. In: *Terra envision 2018*. terra envision, Barcelona, 2018-01-27/2018-02-02. Terra envision, 2018. s. 35.

KAVKA, P. et al. Experimental evaluation of the effect of the protective technical measures against rill erosion. In: *Terra envision 2018*. terra envision, Barcelona, 2018-01-27/2018-02-02. Terra envision, 2018. s. 128.

NEUMANN, M. et al. Measuring splash erosion initiated by simulated rainfall. In: *Terra envision 2018*. terra envision, Barcelona, 2018-01-27/2018-02-02. Terra envision, 2018. s. 129.

LABURDA, T. et al. Photogrammetric measurement of soil surface properties after splash erosion under natural and artificial rainfall. In: *EGU General Assembly 2018*. Munich: European Geosciences Union, 2018. sv. Vol. 20. ISSN 1607-7962.

KAVKA, P. et al. How we the can measure impact of artificial protection on slopes of linear structures to the connection with surroundings. In: *EGU General Assembly 2018*. European Geosciences Union General Assembly 2018, Vídeň, 2018-04-08/2018-04-13. Munich: European

Geosciences Union, 2018. sv. Vol. 20.

DOSTÁL, T. et al. Methodology of determination of revised C-factor values using field rainfall simulator. In: *EGU General Assembly 2018*. European Geosciences Union General Assembly 2018, Vídeň, 2018-04-08/2018-04-13. Munich: European Geosciences Union, 2018. sv. Vol. 20.

NEUMANN, M. et al. Comparison of the rainfall kinetic energy measured by different distrometers. In: *EGU General Assembly 2018*. European Geosciences Union General Assembly 2018, Vídeň, 2018-04-08/2018-04-13. Munich: European Geosciences Union, 2018. sv. Vol. 20.

STAŠEK, J. et al. Vliv pěstovaných plodin na formování povrchového odtoku. In: *Hospodaření s vodou v krajině. Třeboň 21. - 22. 6. 2018*. Hospodaření s vodou v krajině, Třeboň, 2018-06-21/2018-06-22. Brno: Česká bioklimatologická společnost z.s., 2018. ISBN 978-80-87361-83-2.

BALENOVIC, N. et al. Splash erosion of three soils under natural rainfall conditions in Central Europe and New Zealand. In: *EGU General Assembly 2018*. European Geosciences Union General Assembly 2018, Vídeň, 2018-04-08/2018-04-13. Munich: European Geosciences Union, 2018. sv. Vol. 20.

ZUMR, D. et al. Laboratorní monitorování vztahu mezi kinetickou energií deště a rozpadem půdních agregátů. In: ČELKOVÁ, J.Č., ed. *TRANSPORT VODY, CHEMIKÁLIÍ A ENERGIE V SYSTÉME PŮDA-RASTLINA-ATMOSFÉRA*. 25th International Poster Day and Institute of Hydrology Open Day - TRANSPORT OF WATER, CHEMICALS AND ENERGY IN THE SOIL-PLANT-ATMOSPHERE SYSTEM, Bratislava, 2018-11-07. Bratislava: Institute of Hydrology SAS, 2018. s. 216-223. ISBN 978-80-89139-42-2.

NEUMANN, M. et al. Field measurement of surface runoff and soil loss on agricultural land using rainfall simulator. In: *17th Biennial Conference ERB2018 - Book of Abstracts*. 17th Biennial Conference ERB2018, Darmstadt, 2018-09-11/2018-09-14. Technical University of Darmstadt, 2018. Euromediterranean Network of Experimental and Representative Basins.

KAVKA, P. et al. Double size fulljet field rainfall simulator for complex interrill and rill erosion studies. *The Civil Engineering Journal*. 2018, **2** 183-194. ISSN 1805-2576. DOI [10.14311/CEJ.2018.02.0015](https://doi.org/10.14311/CEJ.2018.02.0015). Dostupné z: [http://www.civilengineeringjournal.cz/archive/issues/2018/2018_2/2-2018-0015-\(183-194\).pdf](http://www.civilengineeringjournal.cz/archive/issues/2018/2018_2/2-2018-0015-(183-194).pdf)

LABURDA, T. et al. Vliv přirozených procesů na vývoj povrchu holé orné půdy s využitím fotogrammetrie. In: *JUNIORSTAV 2018 Sborník příspěvků*. Juniorstav 2018, Brno, 2018-01-25. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2018. s. 730-735. ISBN 978-80-86433-69-1.

KAVKA, P. et al. STABILIZACE A OCHRANU SVAHŮ PŘED EROZÍ. In: HAVLÍČEK, J. et al., eds. *Sborník abstraktů konference GIS a životní prostředí 2017*. GIS a životní prostředí 2017, Karlov, Josefův Důl, 2017-05-29/2017-05-30. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2017. 1. ISBN 978-80-01-06129-9.

ZUMR, D. et al. Experimentální sledování deformace půdních agregátů při přívalové srážce. In: BRYCH, Karel a Miroslav TESAŘ, eds. *HYDROLOGIE MALÉHO POVODÍ 2017*. Hydrologie malého povodí 2017, Praha, 2017-04-18/2017-04-20. Praha: Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v. v. i., 2017. s. 305-310. ISBN 978-80-87117-15-6.

LABURDA, T. et al. SLEDOVÁNÍ VÝVOJE POVRCHU ORNÉ PŮDY V PODMÍNKÁCH ČR A RAKOUSKA. In: HAVLÍČEK, J. et al., eds. *Sborník abstraktů konference GIS a životní prostředí 2017*. GIS a životní prostředí 2017, Karlov, Josefův Důl, 2017-05-29/2017-05-30. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2017. s. 15. 1. ISBN 978-80-01-06129-9.

LABURDA, T. et al. Vývoj povrchu holé orné půdy s využitím stereofotogrammetrie. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2017, **59**(1), 33-37. ISSN 0322-8916.

SCHWARZOVÁ, P. et al. ZTRÁTA ORNÉ PŮDY NA SVAZÍCH PŘI PŘÍVALOVÝCH SRÁŽKÁCH. In: BRDKOVÁ, P. et al., eds. *Sborník příspěvků ze Semináře Adolfa Patery 2016*. Seminář Adolfa Patery 2016 - Úloha nádrží při zvládnání extrémních hydrologických jevů v povodích, Praha, 2016-11-16. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2016. s. 170-177. ISBN 978-80-01-06048-3.

LABURDA, T. et al. VÝVOJ POVRCHU HOLÉ ORNÉ PŮDY S VYUŽITÍM STEREOFOTOGRAMMETRIE. In: *Voda a krajina 2016*. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, posluchárna C223, 2016-10-13. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2016. s. 151-161. ISBN 978-80-01-06024-7.

SCHWARZOVÁ, P. et al. VLIV POČÁTEČNÍCH PODMÍNEK NA EROZNÍ CHARAKTERISTIKY PŮD TESTOVANÝCH NA LABORATORNÍM DEŠŤOVÉM SIMULÁTORU. In: *Voda a krajina 2016*. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, posluchárna C223, 2016-10-13. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2016. s. 205-216. ISBN 978-80-01-06024-7.

ŽÍŽALA, D. et al. *Monitoring erozního poškození půd v ČR nástroji dálkového průzkumu Země*. [Uplatněná certifikovaná metodika (do RIV)] 2016.

SCHWARZOVÁ, P. et al. Erozní charakteristiky půd při proměnlivých počátečních podmínkách experimentálního vzorku. In: ROŽNOVSKÝ, J. a J. VOPRAVIL, eds. *PŮDNÍ A ZEMĚDĚLSKÉ SUCHO*. Kutná Hora, 2016-04-28/2016-04-29. Praha-Zbraslav: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., 2016. s. 364-376. ISBN 978-80-87361-55-9.

LABURDA, T., P. SCHWARZOVÁ a J. KRÁSA. Variable rainfall intensity during soil erosion experiments at the laboratory rainfall simulator. In: *Geophysical Research Abstracts*. European Geosciences Union General Assembly 2016, Vienna, 2016-04-17/2016-04-22. Göttingen: Copernicus GmbH, 2016.

LABURDA, T. et al. Vývoj povrchu zemědělské půdy s využitím stereofotogrammetrie. In: HAVLÍČEK, J. et al., eds. *GIS a životní prostředí 2016*. Český Šternberk, 2016-06-06/2016-06-07. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2016. s. 16. ISBN 978-80-01-05920-3.

NOVOTNÝ, I. et al. *4a Podklady pro návrhy opatření v řešeném území na zemědělské půdě*. [Výzkumná zpráva] Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 2015.

SCHWARZOVÁ, P. et al. Ztráta půdy při proměnných intenzitách deště na laboratorním dešťovém simulátoru. In: FOŠUMPAUR, P., P. NEŠVAROVÁ CHVOJKOVÁ a M. ZUKAL, eds. *Seminář Adolfa Patery 2015 Extrémní hydrologické jevy v povodích*. Praha, 2015-12-16. Praha: Česká vědeckotechnická vodohospodářská společnost, 2015. s. 85-92. Rok 2015. ISBN 978-80-01-05856-5.

ŽÍŽALA, D., J. KRÁSA a T. LABURDA. Monitoring erozního poškození půd pomocí DPZ. In: HAVLÍČEK, J. et al., eds. *GIS a životní prostředí 2015*. Týnec nad Sázavou, 2015-06-09/2015-06-10. 2015. s. 21. 1. vydání. ISBN 978-80-01-05717-9.

LABURDA, T., P. SCHWARZOVÁ a J. KRÁSA. Experimental research of soil erosion using laboratory rainfall simulator. In: *Geophysical Research Abstracts, Volume 17, (Memory stick)*. European Geosciences Union General Assembly 2015, Wien, 2015-04-12/2015-04-17. Göttingen: Copernicus Publications, 2015. ISSN 1607-7962.

LABURDA, T. et al. Měření na laboratorním dešťovém simulátoru s konstantní a proměnnou intenzitou deště. In: DOČKAL, M. et al., eds. *Voda a krajina 2015*. Praha, 2015-09-23. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného hospodářství, 2015. s. 57-66. ISBN 978-80-01-05794-0.

SCHWARZOVÁ, P. et al. Výuka závlah a testování půd na Laboratorním dešťovém simulátoru ČVUT v Praze. In: *Závlahy a jejich perspektiva*. Mikulov, 2015-03-18/2015-03-19. Praha: Česká bioklimatologická společnost, 2015. ISBN 978-80-87577-47-9.

DOČKAL, M. et al., eds. *Voda a krajina 2015*. Praha, 2015-09-23. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného hospodářství, 2015. ISBN 978-80-01-05794-0.

LABURDA, T., P. SCHWARZOVÁ a J. KRÁSA. Dlouhodobý výzkum eroze půdy pomocí laboratorního dešťového simulátoru ČVUT v Praze. In: *Juniorstav 17. odborná konference*

doktorského studia, fakulta stavební. Juniorstav 2015 17. odborná konference doktorského studia, Brno, 2015-01-29. VUT v Brně, Fakulta stavební, 2015. ISBN 978-80-214-5091-2.

LABURDA, T. et al. Využití laboratorního dešťového simulátoru ČVUT v dlouholetém výzkumu eroze půdy. In: FOŠUMPAUR, P., P. KOPECKÁ a V. BEČVÁŘ, eds. *Sborník příspěvků ze semináře Adolfa Patery 2014 na téma "Extrémní hydrologické jevy v povodích"*. Seminář Adolfa Patery 2014 na téma "Extrémní hydrologické jevy v povodích", Praha, 2014-11-19. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2014. s. 97-104. ISBN 978-80-02-02574-0.

SCHWARZOVÁ, P. et al. Testování hlinité půdy na laboratorním dešťovém simulátoru ČVUT. In: *Voda a krajina 2014*. Praha, 2014-09-17. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného hospodářství, 2014. s. 145-154. ISBN 978-80-01-05533-5.

LABURDA, T. et al. 12 let experimentálního výzkumu eroze půdy na laboratorním dešťovém simulátoru ČVUT. In: *Voda a krajina 2014*. Praha, 2014-09-17. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného hospodářství, 2014. s. 103-113. ISBN 978-80-01-05533-5.

LABURDA, T. et al. 12 let měření na Laboratorním dešťovém simulátoru. In: KAVKA, P. et al., eds. *GIS A ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ 2014 - sborník odborné konference. GIS a životní prostředí 2014, Sázava, 2014-05-22/2014-05-23*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2014. s. 22. ISBN 978-80-01-05498-7.

SCHWARZOVÁ, P. et al. Porovnání erozních vlastností půd z Experimentálních povodí Nučice a Třebešice II. In: LIPTÁK, M. et al., eds. *Voda a krajina 2013*. Praha, 2013-09-18. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2013. s. 271-280. ISBN 978-80-01-05318-8.

LABURDA, T. et al. Experimentální stanovování ztráty půdy pro přívalové srážky na zemědělských půdách ČR. In: FOŠUMPAUR, P. a P. KOPECKÁ, eds. *Sborník příspěvků ze semináře Adolfa Patery 2013 na téma "Extrémní hydrologické jevy v povodích"*. Seminář Adolfa Patery 2013 na téma "Extrémní hydrologické jevy v povodích", Praha, 2013-11-13. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra hydrotechniky, 2013. s. 153-160. ISBN 978-80-02-02501-6.

LABURDA, T. et al. Výzkum eroze půdy na Laboratorním dešťovém simulátoru ČVUT. In: BOLOM, J. et al., eds. *Voda a krajina 2012*. Praha, 2012-09-19. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2012. s. 175-182. ISBN 978-80-01-05107-8.

Vygenerováno z aplikace <https://v3s.cvut.cz>; 24.02.2021 19:34; uživatel: Ing. Tomáš Laburda (laburtom)

7.3 Seznam výzkumných projektů

V rámci doktorského studia se doktorand aktivně podílel na řešení následujících výzkumných projektů a v jednom případě jej také **osobně vedl**. Díky těmto projektům bylo možné provést a vyhodnotit velké množství experiment zahrnutých v této disertační práci.

GF17-33751L - Vliv kinetické energie deště na uvolňování a transport půdních částic, 2017 - 2019 (doc. Dr. Ing. Tomáš Dostál).

LTAUSA19019 - Konektivita transportu sedimentu v povodích s intenzivním zemědělským využitím, 2020 – 2022 (doc. Dr. Ing. Tomáš Dostál).

LTC18030 – Vliv změny využití území na erozní ohroženost, transport splavenin, kvalitu vody a odtokový režim, 2018 - 2020 (doc. Dr. Ing. Tomáš Dostál).

QJ1330118 - Monitoring erozního poškození půd a projevů eroze pomocí metod DPZ, 2013 – 2016 (Mgr. Daniel Žížala, doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.).

QJ1530181 - Stanovení aktuálních hodnot ochranného účinku vegetace za účelem kvantifikace a zefektivnění protierozní ochrany zemědělské půdy v České republice, 2015 – 2018 (doc. Dr. Ing. Tomáš Dostál).

QK1720289 - Vývoj automatizovaného nástroje pro optimalizaci monitoringu eroze zemědělské půdy pomocí distančních metod, 2017 - 2019 (doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.).

QK1910029 - Předchozí nasycenost a návrhové srážkové intenzity jako faktory odtokové odezvy na malých povodích, 2019 – 2022 (Ing. Petr Kavka, Ph.D.).

QK1920224 - Možnosti řešení protierozní ochrany v zemědělských podnicích při vyloučení používání glyfosátu, 2019 – 2022 (doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.).

SGS11/148/OHK1/3T/11 - Experimentální výzkum srážko-odtokových a erozních procesů, 2011 – 2013 (Bauer Miroslav Ing.).

SGS14/180/OHK1/3T/11 - Srážko-odtokové, erozní a transportní procesy - experimentální výzkum, 2014-2016 (Bauer Miroslav Ing.).

SGS17/173/OHK1/3T/11 - Experimentální výzkum erozních a transportních procesů v zemědělsky využívané krajině, 2017 – 2019 (Laburda Tomáš Ing.).

SGS20/156/OHK1/3T/11, Monitoring, experimentální výzkum a matematické modelování srážko-odtokových a erozních procesů, 2020 – 2022 (Neumann Martin Ing.).

SS01020366 - Využití dat dálkového průzkumu Země pro posouzení negativních dopadů příválových srážek, 2020 – 2024 (doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.).

TH02030428 - Navrhování technických opatření pro stabilizaci a ochranu svahů před erozí, 2017 – 2020 (Ing. Petr Kavka, Ph.D.).

TITSMZP809 - Vliv malých vodních nádrží na hladinu podzemních vod a celkovou hydrologickou bilanci s důrazem na suchá období, 2019 – 2021 (Ing. Václav David, Ph.D.).

TJ02000234 - Fyzikální a hydropedologické vlastnosti půd ČR, 2019 – 2021 (Ing. Luděk Strouhal, Ph.D.).

7.4 Seznam obrázků

Obrázek 1 Ukázka vodní eroze půdy na zemědělském pozemku ve Středočeském kraji na experimentálním povodí Býkovického potoka (foto autor).....	10
Obrázek 2 Vývoj výzkumných publikací zabývajících se erozním výzkum ve světě (převzato od Zhuang et al., 2015).	13
Obrázek 3 Vztahy mezi jednotlivými aspekty a činiteli v erozních modelech. Barva, vzdálenost a tloušťka spojení naznačuje sílu vazby mezi jednotlivými aspekty (převzato od Batista et al., 2019).	14
Obrázek 4 Měření povrchového odtoku pomocí ultrazvukového čidla ve žlabu (snímek vlevo) a pomocí manuálního odběru povrchového odtoku s měřením času (snímek vpravo).	19
Obrázek 5 Ukázka zachytávání půdních částic z kapkové eroze do sběrné nádoby okolo vzorku (snímek vlevo) a zachytávání půdních částic v terénu na neohraničeném pozemku pomocí speciálních textilních vaků – tzv. mesh bag (převzato od Hsieh et al., 2009) (snímek vpravo). .	20
Obrázek 6 Ukázka experimentální erozní plochy s využitím neporušeného vzorku v terénu na experimentálním povodí Býkovického potoka (snímek vlevo) a porušeného půdního vzorku při měření pomocí laboratorního dešťového simulátoru ČVUT v Praze (snímek vpravo).	21
Obrázek 7 Porovnání různých velikostních měřítek testovaných experimentálních ploch: a - kapková eroze (kruh o průměru 0,1 m), b - erozní experimenty na laboratorním DS, ČVUT v Praze (plocha 4x1 m), c - erozní experimenty na venkovním DS v areálu společnosti Strix (2 plochy 4x1 m).	22
Obrázek 8 Miniaturní kapkový dešťový simulátor s experimentální plochou 0,0625 m ² (obrázek vlevo – převzato od (Eijkelkamp Soil & Water, 2018)) a jeden z největších dešťových tryskových simulátorů NIED v Japonsku s experimentální plochou až 3170 m ² (obrázek vpravo – převzato od (NIED, 1974)).	25
Obrázek 9 Srovnání laboratorního DS ČVUT v Praze před rekonstrukcí na hydraulicky sklopném žlabu s maximálním sklonem do 10° (snímek vlevo) a celkově rekonstruovaným DS se samostatně sklopným erozním žlabem s maximálním sklonem do 40° (snímek vpravo)	27
Obrázek 10 3D model laboratorního DS po celkové rekonstrukci se samostatně a nezávisle sklopným erozním kontejnerem určeným pro vysoké sklony až do 40°.	28
Obrázek 11 Venkovní stabilní dešťový simulátor tryskového typu na experimentální lokalitě společnosti Strix v Jirkově.	29
Obrázek 12 Ukázka kontaktních metod měření tvaru povrchu pomocí řetězu (roller chain) (snímek vlevo) a pomocí pin metrů (snímek vpravo) (převzato od Jester and Klik, 2005).	31
Obrázek 13 Obecný postup při zpracování snímků pomocí fotogrammetrické metody SfM-MVS. Červeně jsou znázorněny vstupní a výstupní data, modře jsou znázorněny procesní kroky.(Převzato od Smith et al., 2016).	34

Obrázek 14 Ukázka použitých referenčních vlíčovacích terčů (GCP) vygenerovaných softwarem Agisoft Metashape použitých v rámci vytvořené referencování jednotlivých experimentálních ploch.....	35
Obrázek 15 Schématické znázornění různých způsobu georeferencování dat získaných pomocí UAV: GCP - metoda využívající referenční zaměřené vlíčovací body (nejběžnější způsob i u pozemní fotogrammetrii) a metody RTK a PPK využitelné pro UAV fotogrammetrii (převzato od Blake, 2020).....	36
Obrázek 16 Typická ukázka kapkové eroze v laboratorních podmínkách při experimentech na halovém DS ČVUT v Praze.	41
Obrázek 17 Schéma součástí monitorovacího zařízení pro sledování kapkové eroze (rozměry v centimetrech). Součásti zařízení: 1 – sběrná nádoba, 2 – „splash cup“ (SC), 3 – fotogrammetrické referenční terče, 4 – kruhové LED osvětlení, 5 – výtoková trubice pro odtok erodovaného materiálu do transportní nádoby, 6 – držák SC (převzato od Zumr et al., 2020). 42	42
Obrázek 18 Půdní vzorek v SC při fotogrammetrickém měření: a) pozice fotoaparátu při snímání vzorku, b) půdní vzorek v SC s referenčními terči, c) SC se sběrnou nádobou vybavenou kruhovým LED osvětlením.....	45
Obrázek 19 Počáteční a finální ortofotosnímky jednoho vybraného experimentu (srážková událost s celkovým úhrnem 47,3 mm a celkovou kinetickou energií 596,6 J.m ⁻²) pro půdy A, B, C s výsledným rozdílovým model terénu (DoD) s hodnotami v metrech.	47
Obrázek 20 Souhrnný graf závislosti mezi změnou objemu vypočítanou pomocí přímého měření odběrem vzorků a nepřímého měření pomocí fotogrammetrické metody (PG). Záporné hodnoty značí erozi půdy, kladné hodnoty zvýšení povrchu, tj. bobtnání půdy.....	51
Obrázek 21 Souhrnný graf závislosti mezi změnou objemu vypočítanou pomocí přímého měření odběrem vzorků a nepřímého měření pomocí fotogrammetrické metody (PG) v závislosti na jednotlivých pracovištích. Záporné hodnoty značí erozi půdy, kladné hodnoty zvýšení povrchu, tj. bobtnání půdy.....	52
Obrázek 22 Souhrnný graf závislosti mezi změnou objemu vypočítanou pomocí přímého měření odběrem vzorků a nepřímého měření pomocí fotogrammetrické metody (PG) v závislosti na jednotlivých půdách. Záporné hodnoty značí erozi půdy, kladné hodnoty zvýšení povrchu, tj. bobtnání půdy.	53
Obrázek 23 Vztah mezi naměřenou změnou objemu pomocí fotogrammetrické metody (obrázek vlevo) a přímé metody (obrázek vpravo) s hodnotami naměřené maximální 30-minutové intenzity zaznamenaného deště I ₃₀	54
Obrázek 24 Vztah mezi naměřeným množstvím eroze půdy přímou metodou a vyjádřením změny drsnosti pomocí fotogrammetrie na základě rozdílu směrodatných odchylek výšek digitálního modelu terénu diff_std (graf vlevo) a průměrného rozdílu hodnot sklonu pixelů digitálního modelu terénu slpd_mean (graf vpravo).	55
Obrázek 25 Odvozený lineární vztah mezi fotogrammetricky naměřeným výškovým rozdílem digitálního modelu terénu před deštěm a po dešti v závislosti na naměřených hodnotách eroze půdy.	57
Obrázek 26 Schéma suché a mokré simulace v rámci jednoho experimentu na lokalitě Jirkov a ČVUT.....	63

Obrázek 27 Jednotlivé experimentální plochy s různým sklonem na lokalitě Jirkov.	64
Obrázek 28 Schéma půdního profilu na experimentální lokalitě Jirkov.	65
Obrázek 29 Ortofoto snímky experimentálních ploch v lokalitě Jirkov (snímek vlevo) a na halovém DS ČVUT v Praze (snímek vpravo) s vyznačenými referenčními terči.	66
Obrázek 30 Zobrazení pozice fotoaparátu vůči jednotlivým snímkům plochy.	67
Obrázek 31 Schéma fotogrammetrického snímání 1-3 v závislosti na provedených simulacích v rámci jednoho experimentu.	68
Obrázek 32 Datové sady využívané k analýze změn objemu vzorku: DEM1, DEM2, ortofoto a rozdílový model DoD s odstraněnými částmi v místech vlhkostních čidel a srážkoměru.	69
Obrázek 33 Procesní postup analýzy vlivu rýhové eroze na celkovém půdním smyvu.	70
Obrázek 34 Graf závislosti naměřeného smyvu půdy na vypočítané objemové změně povrchu při experimentech na úhoru na experimentálních plochách na lokalitě Jirkov a laboratorním DS ČVUT v Praze.	72
Obrázek 35 Graf závislosti změny objemu na základě přímého a nepřímého měření pro různé testované sklony ("A" značí půdní vzorek, "s10" značí sklon 10°, "s20" značí sklon od 20 do 22° a "s30" značí sklon od 30 do 34°).	74
Obrázek 36 Graf závislosti změny objemu na základě přímého a nepřímého měření pro různé testované intenzity deště ("A" značí půdní vzorek, "i40" značí intenzitu od 40 do 60 mm/hod, "i120" značí intenzitu od 113 do 130 mm/hod a "i160" značí intenzitu 160 mm/hod).	75
Obrázek 37 Ukázka vývoje povrchu a rozdílné tvorby rýhové eroze na experimentální ploše Jirkov se sklonem 34° při dvou různých měřeních A a B.	76
Obrázek 38 Podíl zastoupení změny objemu v rámci rýhy na celkové změně objemu v rámci celé plochy (velký kruhový symbol znázorňuje průměrnou hodnotu se směrodatnou odchylkou). .	77
Obrázek 39 Odvozený lineární vztah mezi fotogrammetricky naměřeným výškovým rozdílem digitálního modelu terénu před deštěm a po dešti v závislosti na naměřených hodnotách eroze půdy.	78
Obrázek 40 Orientační hodnoty množství eroze půdy přepočítané na jednotku t.ha ⁻¹ bez zahrnutí vlivu bobtnání.	86
Obrázek 41 Porovnání metod založených na SfM (DoD _{S_{NKN}} jsou data získaná pomocí SfM pomocí zrcadlového fotoaparátu Nikon, DoD _{S_{PHO}} jsou data získaná pomocí SfM pomocí mobilního telefonu) a na přímém měření množství erodovaného materiálu (Rainfall simulation) (převzato od Prosdociami et al., 2017).	88
Obrázek 42 Závislost mezi ztrátou půdy naměřenou pomocí zachytávání sedimentu (osa y) a pomocí odvození metodou SfM (osa x), (převzato od Cândido et al., 2020).	89

7.5 Seznam tabulek

Tabulka 1 Fyzikální a chemické parametry testovaných půd.	43
Tabulka 2 Charakteristické hodnoty experimentálních lokalit dle dlouhodobých pozorování (* Harris et al., 2020) a naměřených dat v průběhu výzkumu. PG značí fotogrammetrické vyhodnocení a KE značí kinetickou energii.	44

Tabulka 3 Odpovídající hodnoty vybraných parametrů na základě fotogrammetrického vyhodnocení a odběru vzorku.....	48
Tabulka 4 Počáteční průměrné hodnoty povrchu půdy (DEM1_mean a DEM1_std) skrze celý experiment pro jednotlivé půdy a jednotlivá pracoviště spolu s výslednými průměrnými hodnotami , směrodatnou odchylkou (SD) a koeficientem variability (CV). * značí průměrnou hodnotu pro jednotlivá stanoviště a ** pro jednotlivé půdy.	49
Tabulka 5 Porovnání časové a materiální náročnosti pro přípravu a otestování jednoho vzorku půdy v rámci experimentu kapkové eroze.....	61
Tabulka 6 Fyzikální vlastnosti testované půdy na lokalitě Jirkov a ČVUT v Praze.....	65
Tabulka 7 Porovnání časové a materiální náročnosti přípravy a provedení jednoho experimentu v rámci standardního erozního experimentu..	80
Tabulka 8 Srovnání parametrů SfM měření v ostatních podobných studiích.....	83

7.6 Seznam použitých zkratk

CV – koeficient variability

DEM – digital elevation model

DoD - Digital Elevation Model of Difference

DPZ – dálkový průzkum Země

DS – dešťový simulátor

DZES – Dobrý zemědělský a environmentální stav půdy

GIS – geografické informační systémy

GNSS - Global Navigation Satellite Systems

LoD – level of detection

MUSLE - Modified Universal Soil Loss Equation

PPK - Post-Processed Kinematic

RMSE – root mean square error

RTK - Real-Time Kinematic

RUSLE – Revised Universal Soil Loss Equation

SC – splash cup

SfM-MVS – Structure from Motion – Multi View Stereo

SMODERP - Simulační model povrchového odtoku a erozních procesů

USDA-ARS - United States Department of Agriculture – Agriculture Research Service

USLE – Universal Soil Loss Equation