

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Testování nové konstrukce Minijetu pro odhad kritického
tečného napětí v erozním výzkumu**

**Testing new Minijet device to assess critical shear stress in soil
erosion research**

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.

Praha, 2021

Bc. Michal Vrána

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Vrána</u>	Jméno: <u>Michal</u>	Osobní číslo: <u>438947</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Inženýrství životního prostředí</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:	<u>Testování nové konstrukce Minijetu pro odhad kritického tečného napětí v erozním výzkumu</u>		
Název diplomové práce anglicky:	<u>Testing new Minijet device to assess critical shear stress in soil erosion research</u>		
Pokyny pro vypracování:	<p>Proveďte sérii pokusů se zařízením Minijet na zemědělském pozemku s cílem kalibrace zařízení pro určování kritického tečného napětí na povrchu půdy. Popište zařízení a postup kalibrace Minijetu a nastavení tlaku a průtoku. Vyhodnoťte provedené pokusy a sestavte návod pro opakovaná měření. Definujte rizika využití Minijetu na zemědělské půdě a možná doporučení směrem k jeho dalšímu testování.</p>		
Seznam doporučené literatury:	<p>Khanal A, Fox GA, Al-Madhhachi AT (2016) Variability of erodibility parameters from laboratory mini jet erosion tests. Journal of Hydrologic Engineering 21:1–17. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001404 Klavon K, Fox G, Guertault L, et al (2017) Evaluating a process-based model for use in streambank stabilization: insights on the Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM). Earth Surface Processes and Landforms 42:191–213. https://doi.org/10.1002/esp.4073 Klavon K, Fox G, Guertault L, et al (2017) Evaluating a process-based model for use in streambank stabilization: insights on the Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM). Earth Surface Processes and Landforms 42:191–213. https://doi.org/10.1002/esp.4073</p>		
Jméno vedoucího diplomové práce:	<u>Josef Krása, doc. Ing Ph.D.</u>		
Datum zadání diplomové práce:	<u>2.10.2020</u>	Termín odevzdání diplomové práce:	<u>3.1.2021</u>
<i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>			
Podpis vedoucího práce		Podpis vedoucího katedry	

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

2.10.2020
Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

PROHLÁŠENÍ

Jméno studenta: Bc. Michal Vrána

Název diplomové práce: Testování nové konstrukce Minijetu pro odhad kritického tečného napětí v erozním výzkumu

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma „Testování nové konstrukce Minijetu pro odhad kritického tečného napětí v erozním výzkumu“ jsem vypracoval samostatně. Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne 3.1.2021

.....

podpis

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce **doc. Ing. Josefu Krásovi, Ph.D.** za pomoc a cenné rady při zpracování této práce. Dále bych chtěl také poděkovat **Ing. Davidovi Zumrovi, Ph.D.** za poskytnutí informací ohledně konstrukce zařízení a následnou pomoc při kalibraci a výpočtech. Poděkování patří i mé rodině, která mě během práce nepřestala podporovat.

Tato práce byla podpořena projektem LTC18030 „Vliv změny využití území na erozní ohroženost, transport splavenin, kvalitu vody a odtokový režim“ a projektem SGS20/156/OHK1/3T/11 „Monitoring, experimentální výzkum a matematické modelování srážko-odtokových a erozních procesů“.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá testováním modifikované konstrukce zařízení Mini-JET, které se používá pro odhad kritického tečného napětí půdy. Hlavním cílem této práce je zjistit, zda se pomocí modifikované konstrukce zařízení Mini-JET dají stanovovat kritická tečná napětí na nesoudržných půdách, vyskytujících se na zemědělských pozemcích. V laboratorních podmínkách byla provedena kalibrace zařízení s cílem zjistit kalibrační koeficient. Na experimentálních plochách u obce Řisuty bylo provedeno celkem 75 simulací na dvou typech půdního povrchu. Na základě terénního měření byl sestaven standardizovaný postup pro opakovaná měření. Pro výpočet erozních parametrů kritické tečné napětí a koeficient erodibility byl použit tabulkový nástroj „Jet Erosion Test Spreadsheet Tool“. Následné vyhodnocení probíhalo pomocí tabulek a grafů v programu MS Excel. Z vypočtených výsledků erozních parametrů vyplynulo, že zařízení použité v této práci lze použít pro měření kritického tečného napětí i na nesoudržných půdách vyskytujících se na zemědělských pozemcích.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mini-JET, kritické tečné napětí, koeficient erodibility, nesoudržná půda

ABSTRACT

This diploma thesis deals with testing the modified design of Mini-JET device, which is used to estimate the critical shear stress of the soil. The main goal of this work is to determine whether the modified design of the Mini-JET device can be used to determine the critical shear stresses on incohesive soils, occurring on agricultural land. The device was calibrated under laboratory conditions in order to determine the calibration coefficient. A total of 75 simulations were performed on two types of soil surface in the experimental areas near the Řisuty village. Based on field measurements, a standardized procedure for repeated measurements was compiled. The table tool "Jet Erosion Test Spreadsheet Tool" was used to calculate the erosion parameters critical shear stress and erodibility coefficient. Subsequent evaluation was performed using tables and graphs in MS Excel. The calculated results of erosion parameters showed that the equipment used in this work can be used to measure the critical shear stress even on incohesive soils occurring on agricultural land.

KEYWORDS

Mini-JET, critical shear stress, erodibility coefficient, incohesive soil

OBSAH

1	ÚVOD	10
1.1	Cíle práce.....	10
2	PŮDA.....	11
2.1	Význam a funkce půdy.....	11
3	EROZE PŮDY.....	13
3.1	Základní formy a procesy.....	13
3.2	Měření eroze.....	14
3.2.1	Metody měření	15
4	JET EROSION TEST (JET).....	19
4.1	JET zařízení.....	19
4.1.1	Původní JET zařízení.....	19
4.1.2	Mini-JET zařízení.....	21
4.2	Metody výpočtu erozních parametrů.....	22
4.3	Dosavadní výsledky	25
4.3.1	Původní JET - zahraničí	25
4.3.2	Mini-JET - zahraničí.....	25
4.3.3	Mini-JET zařízení - Česká republika.....	29
5	POPIS MODIFIKOVANÉ KONSTRUKCE MINI-JET.....	31
5.1	Hlavní součásti zařízení	31
5.2	Schéma zařízení.....	37
6	KALIBRACE PŘÍSTROJE.....	39
6.1	Cíl kalibrace	39
6.2	Kalibrace č. 1	39
6.2.1	Postup	39
6.2.2	Naměřená data a výsledky.....	40
6.2.3	Zhodnocení kalibrace.....	41
6.3	Kalibrace č. 2	41

6.3.1	Postup	41
6.3.2	Naměřená data	43
6.3.3	Výpočet ztrát.....	44
6.3.4	Výsledky.....	46
6.3.5	Zhodnocení kalibrace.....	47
6.4	Kalibrace č. 3	47
6.4.1	Postup	47
6.4.2	Naměřená data a výsledky.....	48
6.4.3	Zhodnocení kalibrace.....	49
6.5	Určení kalibračního koeficientu	49
6.5.1	Postup	49
6.5.2	Naměřená data a výsledky.....	49
6.5.3	Zhodnocení.....	51
7	TERÉNNÍ MĚŘENÍ.....	52
7.1	Cíl terénního měření.....	52
7.2	Popis lokality	52
7.3	Půdní povrchy	53
7.3.1	Válcovaný úhor.....	53
7.3.2	Seťové lůžko vytvořené zemědělskou technikou.....	54
7.4	Postup terénního měření.....	56
7.4.1	Postup a problémy identifikované během měření	56
7.4.2	Navržený standardní postup měření.....	61
8	ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ DAT	63
8.1	Analýza půdních charakteristik.....	63
8.1.1	Stanovení objemové hmotnosti a vlhkosti půdy.....	63
8.1.2	Stanovení zrnitostního složení a půdního druhu.....	64
8.1.3	Stanovení stability půdních agregátů	66
8.2	Výpočet a vyhodnocení erozních parametrů	67

8.2.1	Postup výpočtu	67
8.2.2	Výsledky a zhodnocení.....	69
9	KRITICKÉ ZHODNOCENÍ ZAŘÍZENÍ A MOŽNÉ CHYBY VZNIKLÉ PŘI MĚŘENÍ a VÝPOČTECH	76
9.1	Zhodnocení konstrukce zařízení.....	76
9.1.1	Problémy vzniklé při užívání.....	76
9.1.2	Nedostatky konstrukce.....	77
9.2	Možné chyby při měření.....	77
9.3	Možné chyby při výpočtu erozních parametrů	79
10	DISKUZE	80
11	ZÁVĚR	82
12	FORMULÁŘE.....	84
12.1	Mini-JET – checklist	84
12.2	Mini-JET – záznamový formulář.....	85
13	SEZNAMY.....	86
13.1	Seznam použitých zkratk	86
13.2	Seznam obrázků	87
13.3	Seznam tabulek.....	89
13.4	Seznam grafů.....	90
14	POUŽITÉ ZDROJE.....	91

1 ÚVOD

Eroze půdy je proces, který značně ovlivňuje krajinu. Normální eroze probíhá přirozeně a přetváří reliéf krajiny. Problematická je eroze zrychlená, při které se odplavují půdní částice tak rychle, že nemohou být nahrazovány půdotvorným procesem. Zrychlená eroze je způsobena převážně člověkem. Její příčinou je zejména intenzifikace zemědělství a pěstování plodin na nevhodných pozemcích. Tím dochází ke zmenšení mocnosti půdního profilu, a tedy ke snížení úrodnosti půdy a následným ztrátám v zemědělství. Vlivem transportu půdních částic dochází k usazování sedimentu v patách svahu, ve vodních tocích a nádržích.

Měření eroze probíhá pomocí různých metod. V této práci byla využita metoda měření eroze pomocí kritického tečného napětí. K této metodě byl představen tzv. „Jet Erosion Test“, pomocí kterého se toto napětí stanovuje. V této práci bylo použito měřicí zařízení Mini-JET. Toto zařízení bylo doposud používáno pro stanovování kritického tečného napětí především na soudržných půdách (břehy vodních toků).

Hlavním cílem této práce je zjistit, zda se pomocí modifikované konstrukce zařízení Mini-JET dají stanovovat kritická tečná napětí i na nesoudržných půdách vyskytujících se na zemědělských pozemcích. Pro tato zjištění bylo potřeba stanovit několik dalších cílů, které jsou popsány níže.

1.1 Cíle práce

- Představení modifikované konstrukce zařízení pro měření tečného napětí Mini-JET
- Kalibrace Mini-JETu pro rutinní využití v terénu (nastavení tlaku a průtoku)
- Otestování zařízení na nesoudržném povrchu
- Navržení metodiky pro standardizovaná měření
- Analýza experimentů
- Definovat rizika a nejistoty využití Mini-JETu na nesoudržné zemědělské půdě a možná doporučení směrem k jeho dalšímu testování

2 PŮDA

2.1 Význam a funkce půdy

Půdu můžeme považovat za jeden z hlavních přírodních zdrojů, který nám poskytuje obživu. Půda je důležitou zásobárnou vody a také filtračním a čistícím prostředím, přes které voda prochází. Ve stabilitě ekosystému a přeměně látek a toků energií hraje zásadní a nezastupitelnou roli. Na půdu je nutné nahlížet jako na neobnovitelný přírodní zdroj, neboť tvorba malé vrstvy půdy může trvat až stovky let, ale zničení půdy je otázkou okamžiku. (*Půda*, 2020)

Produkční funkce půdy byla dlouhá léta vnímána jako její jediná funkce. V dnešní době začíná docházet k menšímu útlumu produkční funkce půdy a erozně ohrožená půda se začíná zatravňovat či zalesňovat. (*Půda*, 2020)

Kromě produkční funkce má půda několik dalších důležitých mimoprodukčních funkcí.

- **Infiltrační funkce** půd umožňuje vsak vody do půdního prostředí. Voda se přitom obohacuje o další látky obsažené v půdě. Infiltrační funkce půd zásadně ovlivňuje složení a kvalitu podzemních vod, ale i vodních toků a vodních nádrží.
- **Retenční funkce** půdy představuje schopnost půdy udržet vodu v půdním prostředí, ale mohou to být samozřejmě i jiné látky ať prospěšné či znečišťující.
- **Pufrační funkce** je důležitá pro zajištění neměnného půdního prostředí. Půda, která má vysokou pufrační schopnost, se mnohem lépe vyrovnává vnějším vlivům jako například okyselování. Pufrační schopnost půdy je omezená a při déletrvajících nadměrných vstupech látek dojde k její postupné degradaci.
- **Transportní funkce** je spjata s pohybem vody v půdním prostředí. Složení podzemní a povrchové vody se značně liší. Prvky jsou v ní přítomny ve formě koloidních částic, iontů nebo sloučenin. Transport látek může probíhat všemi směry, záleží především na fyzikálních a chemických vlastnostech půdy. Na funkci má také vliv reliéf terénu a výška hladiny podzemní vody.

- **Transformační funkce** představuje schopnost půdy odbourávat různé látky a přetvářet je na jiné. Do půdy se dostává velké množství minerálů, které jsou vystavovány fyzikálně-chemickým a biologickým procesům, které je transformují na sloučeniny a prvky. Jako příklad takového procesu je humifikace, kde probíhá přeměna organických látek na humus.
- **Stabilizační funkce** dává půdě schopnost odolávat vnějším vlivům jako je například větrná nebo vodní eroze. (*Půda*, 2020)

3 EROZE PŮDY

Eroze je přírodní proces, při kterém dochází k rozrušování půdního povrchu působením vody, transportu půdních částic a jejich následnému usazování na jiném místě. Podle intenzity můžeme erozi rozdělit na normální a zrychlenou. Normální eroze probíhá přirozeně a přetváří reliéf krajiny. Zrychlená eroze naopak odplavuje půdní částice v tak vysoké míře, že nemohou být nahrazeny půdotvorným procesem. Příčinou zrychlené eroze je především intenzifikace zemědělství a pěstování nevhodných plodin na nevhodných pozemcích. Následně dochází k zmenšení mocnosti půdního profilu, zejména ornice, a tudíž ke zmenšení úrodnosti půdy. Vodou unášené půdní částice poté zanášejí vodní toky a akumulací prostory vodních nádrží. (*Vodní eroze půdy*, 2020)

3.1 Základní formy a procesy

Vodní erozi můžeme pozorovat ve třech základních formách: eroze plošná, výmolová a proudová.

Plošná eroze je charakterizována rozrušováním půdy a následným smyvem na celém území. Plošnou erozi rozdělujeme na erozi selektivní a vrstvenou.

Při menší kinetické energii povrchově stékající vody nastává první stupeň plošné eroze, a to **eroze selektivní**. Při selektivní erozi dochází vlivem povrchového odtoku k odplavování jemných částic a na ně vázaných chemických látek. Odplavováním jemných částic dochází ke změně půdní textury a obsahu živin v půdě. V místech odplavování půdních částic (horní části svahů) se půdy stávají hrubozrnnější a mají snížený obsah živin. Naopak v místech depozice (dolní části svahů) je půda obohacena jemnými částicemi a je bohatá na živiny. Selektivní eroze probíhá pozvolna, často nepozorovaně, a nezanechává viditelné stopy.

Při větší kinetické energii povrchově stékající vody a nepříznivém utváření půdního profilu (střídání málo odolných a odolných vrstev) dochází k odnosu půdní hmoty v celých vrstvách. Tuto erozi nazýváme **eroze vrstevná**. Projevuje se v celé ploše svahu nebo v širokých pruzích. Při vrstevné erozi často dochází k odplavení celé orníční vrstvy. (Krása, 2010; *Vodní eroze*, 2020)

Výmolová eroze nastává postupným soustředováním povrchového odtoku, který vyrývá v půdním povrchu mělké zářezy, které se postupně prohlubují. Prvním stádiem výmolové eroze je eroze rýžková a brázdová.

Při **erozi rýžkové** vznikají v půdním povrchu drobné, úzké zářezy, které na postiženém svahu vytvářejí hustou síť. **Brázdová eroze** se vyznačuje mělkými, širšími zářezy, které nevytváří tak hustou síť jako eroze rýžková. Jelikož rýžková a brázdová eroze postihuje obvykle velkou část povrchu svahu, můžeme tuto erozi označit jako nejvyšší stádium plošné eroze.

Z rýžek a brázd dále vznikají soustředěným odtokem hlubší rýhy, které se směrem po svahu stále prohlubují. Tuto erozi nazýváme **erozí rýhovou**. Dalším soustředováním povrchového odtoku a postupným prohlubováním rýhová eroze přechází v erozi výmolovou a ta v nebezpečnou, území devastující **erozi stržovou**. Výsledkem výmolné a stržové eroze jsou výmoly a strže hluboké i několik metrů. (Krása, 2010; *Vodní eroze půdy*, 2020)

Proudovou erozi můžeme pozorovat ve vodních tocích působením vodního proudu, který může rozrušovat dno (dnová eroze) nebo břehy vodního toku (břehová eroze). Břehová eroze je forma eroze probíhající směrem kolmo na osu toku. Nejvíce se proudová eroze projevuje v bystřinách, které obvykle nesou velké množství splavenin. (Krása, 2010; *Vodní eroze*, 2020)

3.2 Měření eroze

Měření vodní eroze půdy patří mezi základní úkoly v erozním výzkumu. Pro měření eroze máme hlavní dva typy měření, a to měření terénní a měření laboratorní. Terénní měření bývá obtížnější, jelikož zde nemáme jasně definované podmínky. Terénním měřením ovšem lze dosáhnout výsledků, které jsou blíže realitě. Laboratorní měření bývá zpravidla jednodušší, jelikož zde máme přesně definované podmínky a měření můžeme při těchto podmínkách opakovat. Ovšem laboratorní měření může být výsledkově dále od reality. V každém případě bez měření nelze odvozovat matematické modely. (*Výzkum a měření erozních procesů*, 2020)

3.2.1 Metody měření

Dešťový simulátor

Dešťových simulátorů existuje více druhů. Z hlediska umístění existují dvě podoby, a to simulátory laboratorní a mobilní. Dále můžeme simulátory dělit podle velikosti zadešťované plochy na malé (plocha do 1,5 m²) a velké (plocha více než 16 m²). Dešťové simulátory představují důležitou alternativu ke sledování povrchového odtoku. Jsou to komplexní systémy umožňující podrobné monitorování široké škály procesů spojených se srážkami a odtokem. Jako příklad lze zmínit mobilní dešťový simulátor provozovaný ČVUT v Praze (*Obrázek 1*). Toto zařízení pomocí elektromagnetických ventilů a trysek řídí intenzitu srážek. Trysky jsou rozmístěny tak, aby byla na celé ploše dosažena stejná intenzita. Pomocí tohoto simulátoru se nejčastěji měří povrchový odtok, rychlost proudění, koncentrace nerozpuštěných látek a podobně. Kombinace povrchů bez vegetace a s vegetací umožňuje monitorovat dopad přítomnosti vegetace na povrchový odtok. V neposlední řadě je simulátor vhodným zařízením pro sledování procesu uvolňování a transportu živin, zejména fosforu. Takto získaná data jsou použita jako vstupy pro kalibrace a validace nových a stávajících matematických modelů. (Kavka, 2018)



Obrázek 1: Mobilní dešťový simulátor provozovaný ČVUT v Praze (Stašek, 2018)

Volumetrická kvantifikace

Používá se především pro kvantifikaci rýhové eroze. Pro její zaznamenání je využíván tzv. erodoměr. Toto zařízení umožňuje zaměření příčného profilu průběhu terénu. Při kvantifikaci rýhové eroze se záznam průběhu terénu provádí ve čtvercovém rámu, v němž je vyneseno několik profilů v celé šířce čtvercového pole v pravidelných vzdálenostech. Erodoměr je umísťován na svah zasažený erozí. Povrch půdy vyznačují jehlice jejichž horní části, po spuštění na terén, kopírují průběh povrchu půdy (*Obrázek 2*). Ten je zdokumentován pomocí fotoaparátu a převeden do digitální podoby ve formě grafu, který dále slouží ke stanovení objemu erozních rýh (Uhrová, 2018). Tato metoda se dnes využívá jen velmi zřídka. Dnes dokážeme pomocí fotogrammetrie dosáhnout mnohem přesnějších výsledků.

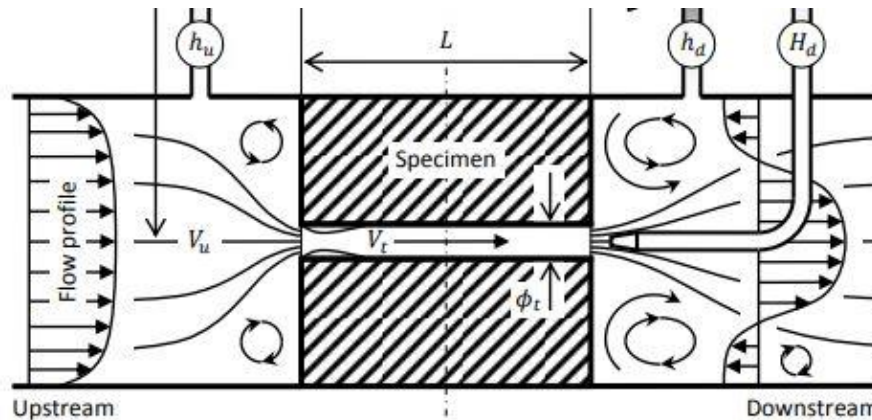


Obrázek 2: Záznam průběhu terénu pomocí erodoměru (Uhrová, 2018)

Hole erosion test (HET)

HET (*Obrázek 3*) byl vyvinut na University of New South Wales jako indexový test pro modelování eroze v tělesech zemních hrází. U této metody se připraví půdní vzorek, do kterého se vyvrtá otvor o známém průměru (nejčastěji 6 mm). Následně je půdní vzorek vystaven konstantnímu průtoku vody o známém tlaku. V průběhu testu se ve stanovených intervalech měří průběh zvětšování otvoru. Kritické smykové napětí se stanoví pomocí měřeného průtoku a konečného průměru otvoru. Erozní index

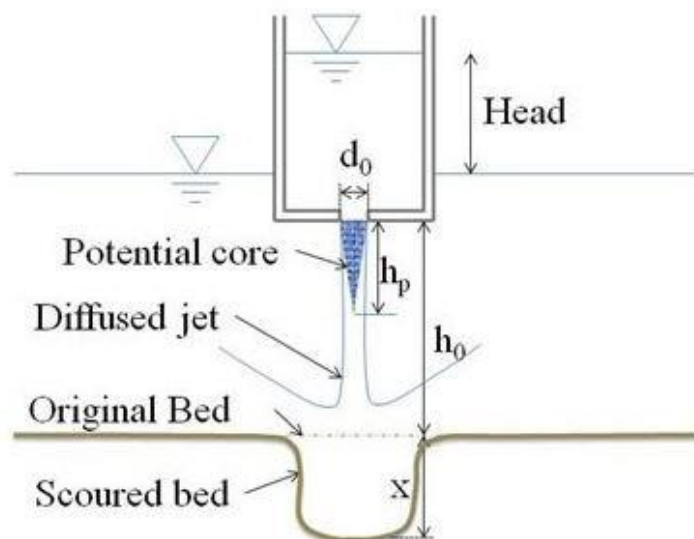
u tohoto testu nabývá hodnot 1 – 6, kde hodnota 1 ukazuje na extrémně rychlou erozi a hodnota 6 ukazuje na extrémně pomalou erozi. (Wan, 2004; Luthi, 2011)



Obrázek 3: Schéma HET (Luthi, 2011)

Jet erosion test (JET)

JET je technika používaná pro posuzování erodovatelnosti půdních materiálů pro následnou analýzu a modelování eroze vodních toků a náspů. Tryskou vyvolaný proud vody konstantním tlakem naráží na povrch půdy. Proud vody vyvíjí určitou smykovou sílu na povrch půdy, čímž se vytvoří erozní kráter (Obrázek 4). Měří se hloubka kráteru v závislosti na čase. Dále byly analyticky odvozeny postupy pro získání parametrů erodibility (tj. koeficient erodovatelnosti, k_d a kritické smykové napětí, τ_c) na základě modelování dynamiky ponořeného paprsku, což podrobně popsal ve své publikaci Hanson (1997). (Khanal, 2016)



Obrázek 4: Schéma JET (Brunier-Coulin, 2016)

Fotogrammetrie a DPZ

Fotogrammetrii lze rozdělit z hlediska polohy na fotogrammetrii družicovou, leteckou a pozemní. V současnosti se hojně využívá metoda Structure from Motion (SfM), která je založena na principu průsekové fotogrammetrie. Zkoumaný povrch je nafocen z více stran a úhlů tak, aby se na více snímcích nacházely totožné body. Poté se pomocí softwaru vytvoří 3D model povrchu. Ze 3D povrchů před a po erozní události se může vypočítat objem odplavené půdy. Pozemní měření pomocí SfM je v oblasti eroze využíváno například pro hodnocení drsnosti půdního povrchu. Pro erozní monitoring rozsáhlejších útvarů, jako jsou erozní rýhy, strže nebo velkoplošné erozní poškození, je vhodná metoda tzv. UAV fotogrammetrie. Jedná se o bezpilotní letoun, který může být řízen na dálku nebo pomocí předem naprogramovaných letových plánů nebo pomocí dynamických autonomních systémů. Používat lze různé typy například vzducholodě, vrtulníky, multirotorové systémy, letadla s fixním křídlem a další zařízení. V oboru erozní problematiky výrazně převažují multirotorové systémy (*Obrázek 5*). Pomocí bezpilotního letadla se nasnímkuje povrch terénu. Pomocí softwaru se z pořízených snímků vytvoří digitální model terénu (DMT), ze kterého se následně provádí erozní analýzy. (Báčová, 2018; Uhrová, 2018)



Obrázek 5: Hexakoptéra Trimble ZX5 (zdroj: droncentrum.cz)

4 JET EROSION TEST (JET)

Jelikož se tato práce zabývá konstrukcí a využitím Mini-JETu, bude zde podrobně popsán Jet erosion test (JET) a přístroje, které se k němu používají.

JET je technika používaná při studiu eroze a vlastností půdního vzorku. Tento test byl vyvinut ve Spojených státech amerických Hansonem (1990). Voda prochází pod určitým tlakem tryskou. Proud vody generovaný konstantním tlakem naráží na povrch půdy uvnitř přístroje. Tryska je zcela ponořená ve vodě, tudíž následné výpočty erozních parametrů probíhají na základě dynamiky ponořeného paprsku, jak ve své publikaci popsal Hanson (1997). Vodní paprsek vycházející z trysky generuje na povrchu půdy určitou smykovou sílu, čímž se začne vytvářet erozní kráter. Odečet hloubky erozního kráteru se provádí podle protokolu v průběhu erozního experimentu. Počáteční doba měření by měla být co nejmenší, aby bylo možné dosáhnout co nejpřesnějšího průběhu hloubky erozního kráteru, jelikož největší smyková síla působí na začátku testu a s rostoucí hloubkou kráteru síla klesá. S postupem hloubky se doba měření prodlužuje. Když hodnoty hloubky erozního kráteru jsou totožné ve třech po sobě jdoucích měřeních o stejné délce, test je považován za ukončený. (Khanal, 2016)

Tento test byl vyvinut především pro posuzování erodovatelnosti soudržných půdních materiálů pro následnou analýzu a modelování eroze vodních toků a náspů.

4.1 JET zařízení

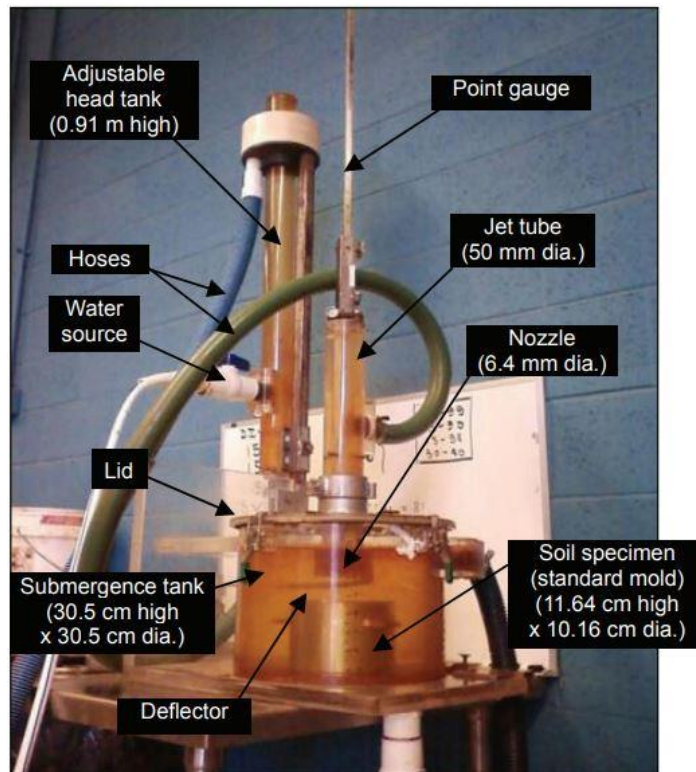
V zásadě existují dvě základní konstrukce JET zařízení. Tím starším je původní JET zařízení, které je větší než jeho novější varianta Mini-JET. Zařízení se používají jak v laboratoři za jasně definovaných podmínek, tak pro terénní měření. Obě dvě varianty zařízení jsou blíže popsány níže.

4.1.1 Původní JET zařízení

Pro popis původního JET zařízení bylo vybráno zařízení, které použil ve své studii Al-Madhhachi (2013) a lze jej označit za reprezentativní přístroj (*Obrázek 6*). Tento přístroj se skládá z několika částí.

- Zaplavovací nádrž o průměru 305 mm a výšce 305 mm
- Trysková trubice o průměru 50 mm

- Tryska o průměru 6,4 mm
- Zásobník na vodu vysoký 910 mm o průměru 50 mm
- Měřidlo hloubky erozního kráteru
- Deflektor
- Odvzdušňovací ventil
- Hadice pro přívod a odvod vody



Obrázek 6: Původní JET zařízení (Al-Madhhachi, 2013)

Zásobníkem na vodu se v systému udržuje konstantní tlak na trysce. Odečty hloubky erozního kráteru byly prováděny pomocí hloubkového bodového měřidla, jehož průměr byl ekvivalentní průměru trysky. Toto měřidlo měří vzdálenost dna erozního kráteru od trysky. Tryska společně s měřidlem je připevněna k otočné desce, která umožňuje dvě polohy přístroje. Při pracovní poloze je tryska nad erozním kráterem a při poloze čtecí je nad erozním kráterem hloubkové měřidlo. Zařízení bylo pro napouštění systému vybaveno deflektorem, který zabraňoval vodnímu paprsku rozrušovat půdní povrch během napouštění systému a během každého čtení hloubky erozního kráteru. Při počátečním plnění systému byl použit odvzdušňovací ventil k odstranění nežádoucího vzduchu v systému. Do zařízení se vkládá půdní

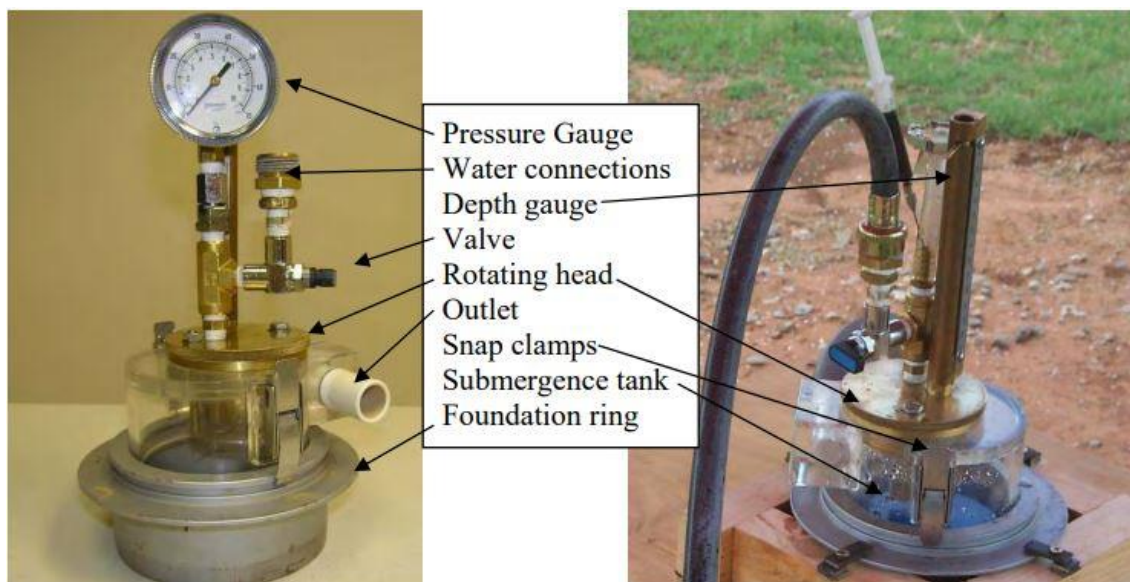
vzorek o průměru 10,16 cm a výšce 11,64 cm. Zaplavovací nádrž je otevíratelná ve své horní části (Al-Madhhachi, 2013).

Původní JET zařízení se převážně používají jako laboratorní kvůli jejich větším rozměrům a hmotnosti.

4.1.2 Mini-JET zařízení

Mini-JET zařízení je menší verze původního přístroje JET. Použití zařízení Mini-JET bylo poprvé popsáno Simonem (2010). Tato menší varianta se díky svým malým rozměrům a snadnějšímu používání lépe hodí pro terénní měření (*Obrázek 7*). Jednou z velkých výhod také je, že toto zařízení spotřebuje méně vody než jeho původní verze. Přístroj se skládá z podobných částí jako jeho větší verze.

- Základový prstenec
- Zaplavovací nádrž vysoká 70 mm o průměru 101,6 mm
- Tryska o průměru 3,18 mm
- Manometr
- Otočný ventil
- Přívod a odvod vody



Obrázek 7: Mini-JET zařízení (Simon, 2010)

U zařízení Mini-JET zajišťuje potřebný tlak vody elektrické čerpadlo. Proto u tohoto zařízení musí být dostupný zdroj elektrické energie. Následná regulace tlaku na trysce se reguluje postupným otevíráním ventilu, který je umístěn na přívodní

armatuře. Tlak vody je zde kontrolován pomocí manometru, umístěném v horní části přístroje. Jako u původní konstrukce, je zařízení vybaveno otočnou deskou, na které je připevněná tryska společně s měřidlem hloubky erozního kráteru. Pomocí otáčení je zařízení v poloze pracovní či čtecí. Základový prstec je oddělitelný od zaplavovací nádrže pomocí dvou kovových svorek.

Zařízení Mini-JET se mohou používat jako terénní i laboratorní, ale díky své malé hmotnosti jsou spíše využívána pro měření terénní.

4.2 Metody výpočtu erozních parametrů

Při hodnocení eroze půd je běžné předpokládat, že rychlost eroze ε_r [m/s], je úměrná efektivnímu smykovému napětí, které převyšuje kritické smykové napětí (Hanson, 2004). Rovnice rychlosti eroze potom vypadá následovně:

$$\varepsilon_r = k_d(\tau_e - \tau_c) \quad (1)$$

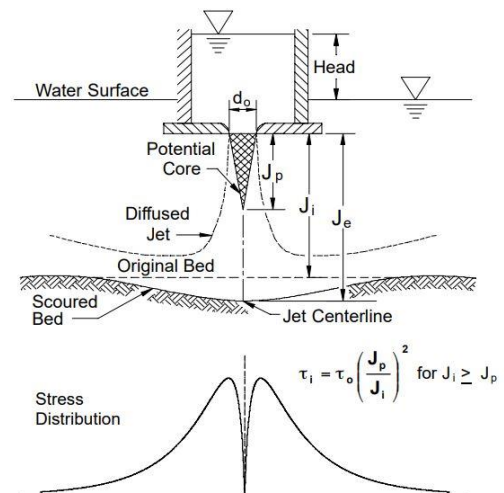
kde,

k_d – koeficient erodibility [$\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$]

τ_e – efektivní smykové napětí [Pa]

τ_c – kritické smykové napětí [Pa]

Rozložení tečného napětí pod nárazovým vodním paprskem není rovnoměrné, teoreticky je ve středu nárazové zóny nulové a zvyšuje se s vzrůstající radiální vzdáleností od středu až na okraj tryskového proudu. Poté se toto napětí se vzrůstající vzdáleností snižuje (Obrázek 8). JET analýza je založena na předpokladu, že maximální hodnota tečného napětí způsobí maximální prohloubení erozního kráteru pomocí vodního paprsku. Počáteční napětí v nárazové zóně lze vypočítat z následujících rovnic (Hanson, 2004):



Obrázek 8: Schéma JET a rozložení tečného napětí (Hanson, 2004)

$$\tau_i = \tau_0 \left(\frac{J_p}{J_i} \right)^2 \quad (2)$$

$$J_p = C_d \cdot d_0 \quad (3)$$

$$\tau_0 = C_f \cdot \rho \cdot U_0^2 \quad (4)$$

$$U_0 = \sqrt{2gh} \quad (5)$$

kde,

τ_i – tečné napětí odpovídající vzdálenosti J_i	[Pa]
τ_0 – maximální tečné napětí vyvolané tryskou	[Pa]
J_p – potenciální délka jádra paprsku	[mm]
J_i – vzdálenost dna kráteru od trysky	[mm]
C_d – difuzní konstanta	[-]
d_0 – průměr trysky	[mm]
C_f – koeficient tření	[-]
ρ – hustota vody	[kg/m ³]
U_0 – rychlost vodního paprsku u trysky	[m/s]
g – gravitační zrychlení	[m/s ²]
h – tlaková výška	[m v. sl.]

Potenciální délka jádra paprsku J_p , představuje vzdálenost od otvoru trysky až po vzdálenost, kde je rychlost paprsku stále ekvivalentní rychlosti u trysky (Hanson, 2004).

Poté po dosažení do rovnice (1) dostaneme vztah:

$$\frac{dJ}{dt} = k_d \left(\frac{\tau_0 J_p^2}{J^2} - \tau_c \right) \text{ pro } J \geq J_p \quad (6)$$

kde J [mm] je vzdálenost dna kráteru od trysky. Proto se předpokládá, že kritické tečné napětí τ_c nastává v okamžiku, kdy se erozní kráter přestane prohlubovat a hloubka kráteru je J_e . Poté dosažením do rovnice (2) můžeme vypočítat hodnotu kritického tečného napětí (Hanson, 2004; Daly, 2013).

$$\tau_c = \tau_0 \left(\frac{J_p}{J_e} \right)^2 \quad (7)$$

kde J_e [mm] představuje ustálenou hloubku erozního kráteru. Po dosažení této hloubky již nepokračuje prohlubování erozního kráteru, tudíž eroze povrchu se zastavuje.

Následně je možné stanovit koeficient erodibility k_d , který se stanoví na základě měřené hloubky, času, předem stanoveného kritického tečného napětí a bezrozměrné funkce času (*Graf 1*).

$$T^* = -J^* + 0,5 \ln\left(\frac{1+J^*}{1-J^*}\right) \quad (8)$$

kde,

T^* - bezrozměrná funkce času, t_m/T_r

t_m - měřený čas při simulaci

T_r - referenční čas, $J_e/(k_d \tau_c)$

J^* - bezrozměrná funkce hloubky, J/J_e

Všechny tyto rovnice (2-8) použil Hanson (2004) v tabulkovém nástroji MS Excel, pomocí kterého bylo možné stanovit hodnoty kritického tečného napětí a koeficientu erodibility. Někteří autoři (Blaisdell, 1981) poznamenali, že může být obtížné určit rovnovážnou hloubku, kvůli potřebě dlouhého času k dosažení této hloubky. Proto navrhli techniku pro výpočet rovnovážné hloubky tak, že se data hloubek a času stanou hyperbolickou funkcí (*Graf 2*), kterou Blaisdell (1981) zformuloval takto:

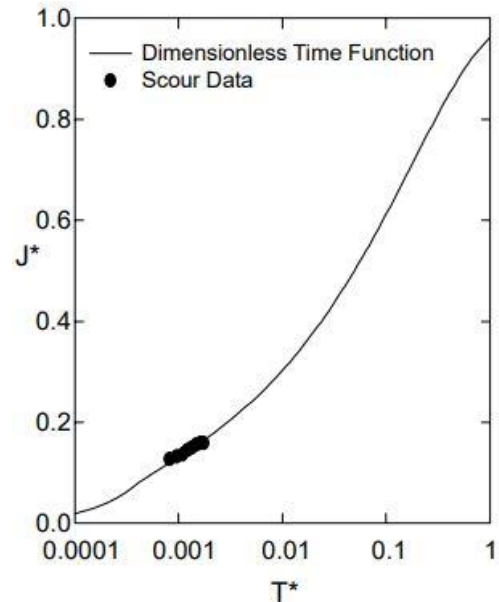
$$A = (f - f_0)^2 - x^2 \quad (9)$$

$$f = \log\left(\frac{J}{d_0}\right) - \log\left(\frac{U_0 t}{d_0}\right) \quad (10)$$

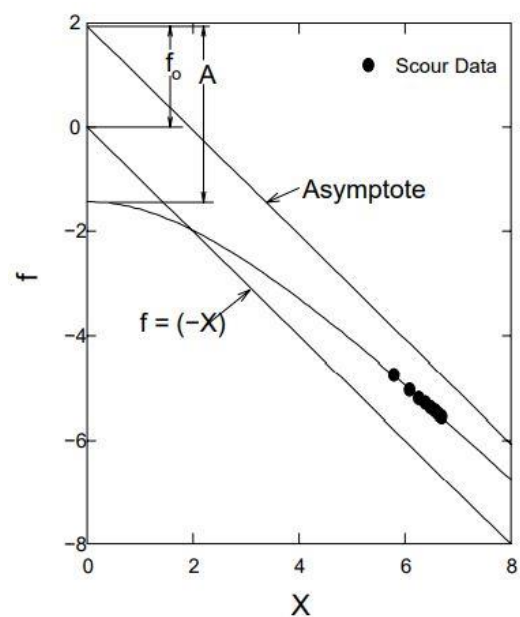
$$f_0 = \log\left(\frac{J_e}{d_0}\right) \quad (11)$$

$$x = \log\left(\frac{U_0 t}{d_0}\right) \quad (12)$$

Koeficienty A a f lze určit pomocí aplikace MS Excel Solver, a následně může být stanovena rovnovážná hloubka $J_e = d_0 10^{f_0}$. Tato Blaisdellova metoda (BM) je jedním z přístupů řešení erozních parametrů.



Graf 1: Hledání řešení pomocí funkcí T^* a J^* (Hanson, 2004)



Graf 2: Hledání řešení pomocí funkcí x a f (Hanson, 2004)

Pro výpočet erozních parametrů existují, kromě Blaistellovy metody, ještě dvě známé metody: metoda „Scour depth“ (SDM) a Iterační metoda (IM). Metody SDM a IM jsou variacemi Blaistellovy metody. U Iterační metody jsou zpočátku erozní parametry τ_c a k_d , odhadnuty pomocí Blaistellovy metody na základě hodnot T^* a J^* . Parametry erodibility jsou poté současně iteračně řešeny. Cíl pro tuto iterační metodu je minimalizace chyby mezi měřeným a predikovaným časem. Je zde zahrnuta ovšem horní hranice τ_c , aby se zabránilo překročení rovnovážné hloubky. V IM je τ_c funkcí smykového napětí na trysce a maximální naměřené hloubce během simulace. Metodu „Scour dept“ vyvinul Daly (2013), ve které jsou erozní parametry také řešeny iteračně. Cíl pro tuto metodu je minimalizace chyby mezi naměřenými hloubkami a predikovanými údaji o hloubce. Výsledky této metody ukazují lepší přiblížení naměřeným hodnotám hloubek, ale hodnoty parametru erodibility byly shledány mnohem vyššími, v některých případech až nereálnými (Mahalder, 2018).

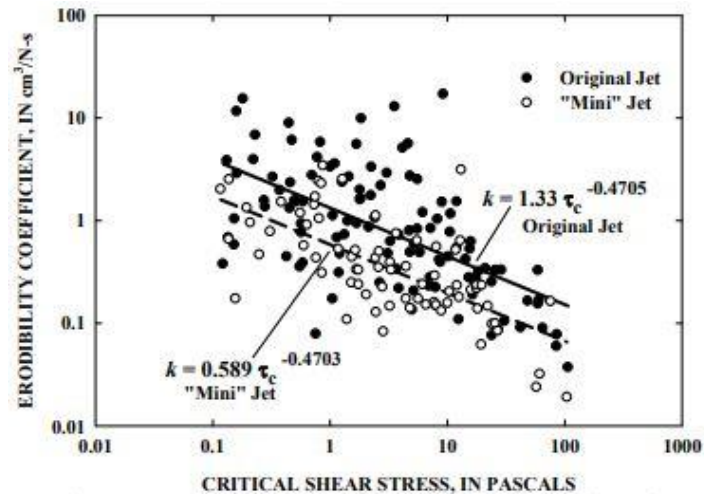
4.3 Dosavadní výsledky

4.3.1 Původní JET - zahraničí

Při měření v terénu pomocí původního JET zařízení Hanson (2004) zjistil, že mezi erozními parametry, jako je kritické tečné napětí a koeficient erodovatelnosti, panuje velká variabilita. Tato variabilita byla přičítána heterogenitě různých faktorů půdy jako je: struktura půdy, obsah vlhkosti, vegetace, makropóry. Variabilita může být způsobena také složitými interakcemi těchto faktorů, takže účinek každého z těchto faktorů je obtížně zjistitelný. Určitý stupeň variability však lze přisuzovat i samotnému provozu zařízení.

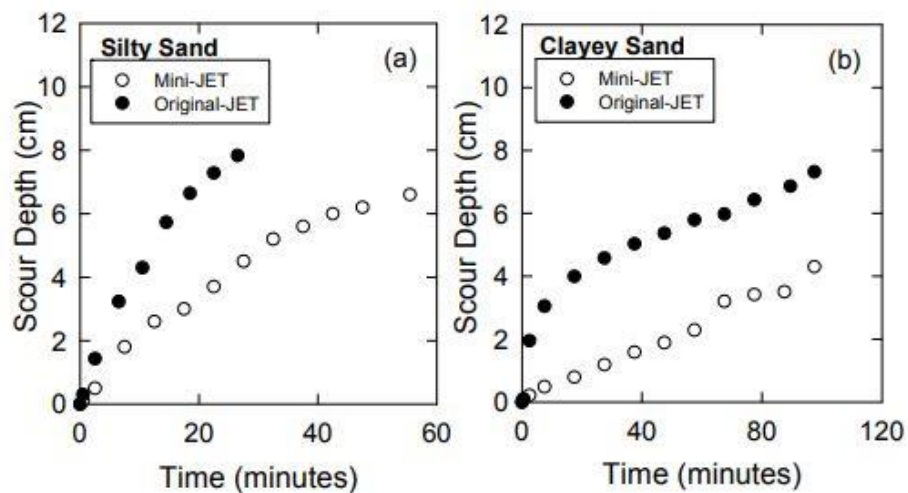
4.3.2 Mini-JET - zahraničí

Použití zařízení Mini-JET bylo poprvé popsáno Simonem (2010). Byla provedena studie, která představila porovnání erozních parametrů půdy, měřených pomocí původního JET zařízení se zařízením Mini-JET. Měření bylo provedeno v terénu a jako v předchozím případě, i zde výsledky vykazovaly značnou variabilitu výsledků. Následně byly odvozeny vztahy pro výpočet koeficientu erodibility k_d pomocí kritického tečného napětí τ_c (Graf 3).

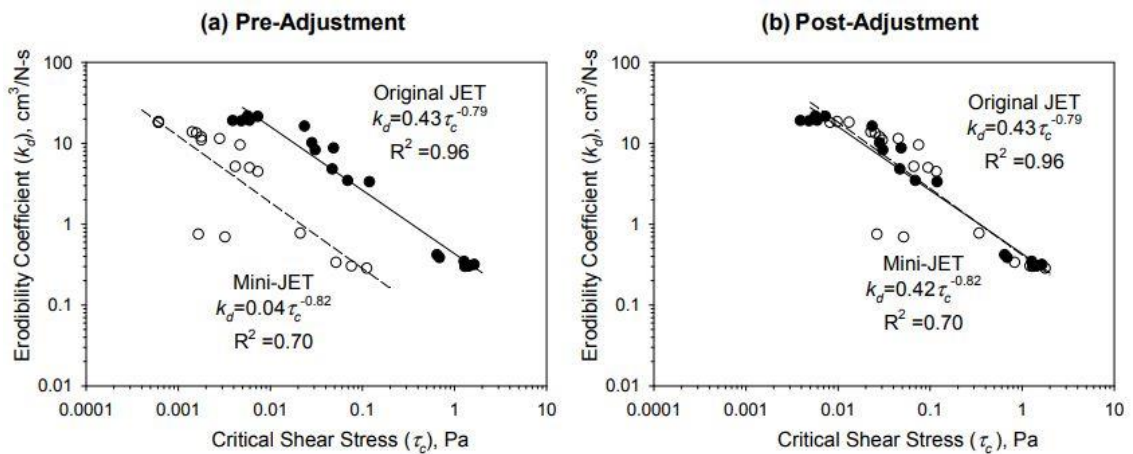


Graf 3: Odvození vztahu pro výpočet koeficientu erodibility k_d (Simon, 2010)

Srovnávací studii v laboratorních podmínkách s původním zařízením JET a se zařízením mini-JET později provedl Al-Madhhachi (2013). Měření bylo prováděno na dvou typech půdy. Studie dospěla k závěru, že se zohledněním rozdílu ve velikosti trysek dvou zařízením JET, původní JET a Mini-JET poskytují ekvivalentní hodnoty koeficientu erodibility. Hodnoty kritického tečného napětí byly u zařízením Mini-JET trvale nižší než u původního JET zařízením. Přesto tato studie naznačila, že zařízením Mini-JET může poskytovat v zásadě rovnocenné výsledky jako původní JET zařízením (Graf 5).

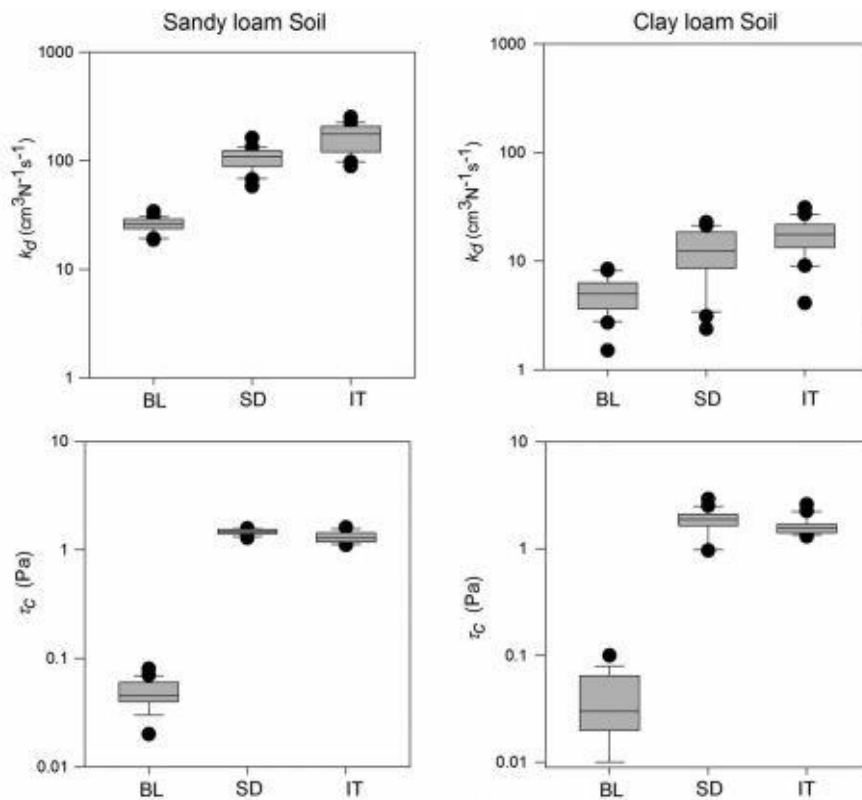


Graf 4: Průběh naměřených hodnot hloubek erozního kráteru v čase s oběma zařízením (Al-Madhhachi, 2013)



Graf 5: Závislost erozních parametrů naměřených pomocí obou zařízení a následné zohlednění velikosti trysky (Al-Madhhachi, 2013)

V další studii provedl Khanal (2016) sérii měření erozních parametrů na dvou různých půdách. Výpočet erozních parametrů počítal třemi metodami (BL – Blaistellova metoda, SD – Scour depth metoda, IT – Iterační metoda), které potom vzájemně porovnával (Graf 6).



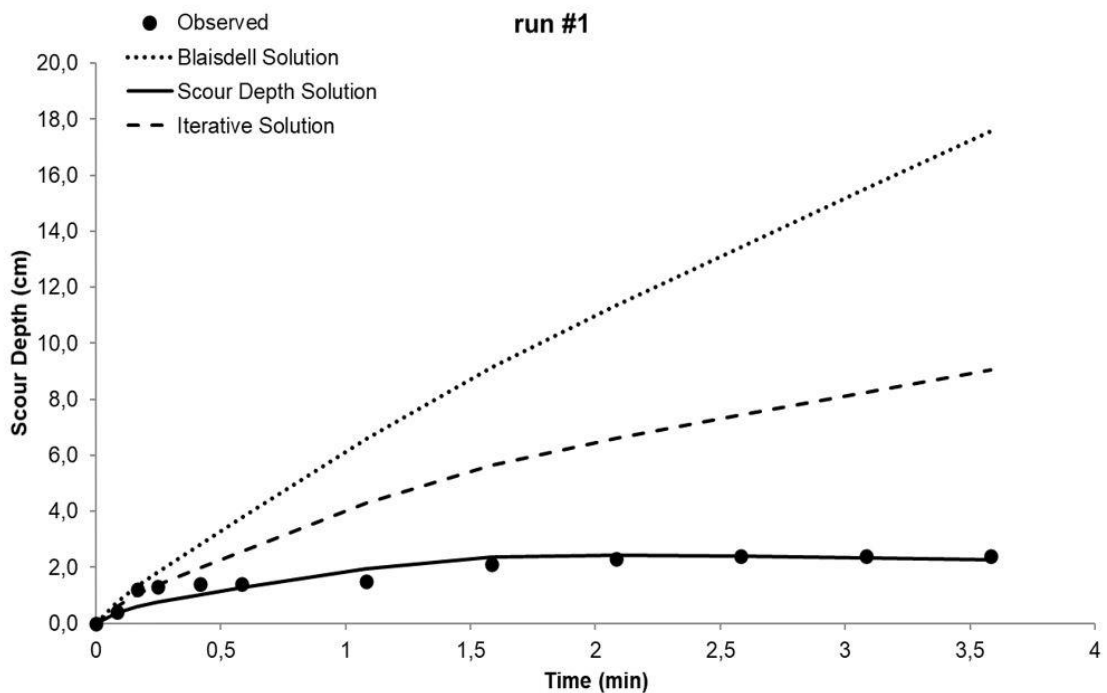
Graf 6: Erozní parametry vypočtené různými metodami na dvou typech půdy (Khanal, 2016)

Měření erozních parametrů také nedávno provedl Mahalder (2018), který vypočetl erozní parametry pomocí šesti různých metod. Výsledky erozních parametrů z těchto metod dále porovnával (*Tabulka 1*).

Tabulka 1: Hodnoty erozních parametrů vypočtených různými metodami (Mahalder, 2018)

Methods	Critical Shear Stress, τ_c (Pa)				Erodibility Coefficient, k_d (cm ³ /N-s)			
	Min	Max	Mean	Std. Dev	Min	Max	Mean	Std. Dev
Single Pressure Setting (SPS-BM)	0.00	12.43	2.48	2.25	0.53	24.28	3.84	3.84
Multiple Pressure Settings (MPS-BM)	0.09	26.80	5.13	3.82	0.56	24.28	3.26	3.54
Scour Depth Principle (SPS-SDP)	0.00	19.09	6.88	3.78	0.93	81.13	12.28	13.02
MPS using SDP method (MPS-SDP)	0.00	21.97	8.51	4.32	0.89	81.13	9.44	10.48
Iterative Principle (SPS-IP)	1.99	12.76	7.07	2.09	3.73	102.12	23.92	16.77
MPS using IP method (MPS-IP)	1.99	15.20	8.12	2.61	3.73	102.12	24.27	15.98

Také modifikoval Dalyho (2013) výpočet v prostředí MS Excel pro určení erozních parametrů. Přidal do něj algoritmus Iterační metody, tudíž stávající makro obsahuje všechny tři nejpoužívanější metody výpočtu erozních parametrů. Dále přidal grafické vyjádření výsledků, podle kterého se uživatel může rozhodnout, jaká metoda se pro jeho naměřená data nejvíce hodí (*Graf 7*).



Graf 7: Graf pro výběr správné metody výpočtu erozních parametrů (Mahalder, 2014)

4.3.3 Mini-JET zařízení - Česká republika

Pokud jde o výsledky erozních parametrů naměřených v České republice, lze zmínit relativně malý počet měření, která provedla Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství ČVUT. Měření proběhla v roce 2019, konkrétně ve dnech 24.9., 3.10. a 17.10. na různých půdních površích. Na rozdíl od této práce bylo použito jiné Mini-JET zařízení, konkrétně zařízení, které použil ve svém měření Mahalder (2018), zapůjčené od University of Tennessee, Knoxville, USA (*Obrázek 9*). Měření bylo provedeno v lokalitě Řisuty, tj. ve stejné lokalitě jako bylo provedeno měření v této práci. Více informací o této lokalitě je uvedeno v kapitole 7.2.



Obrázek 9: Základový prstenec Mini-JET zařízení, které bylo použito pro měření

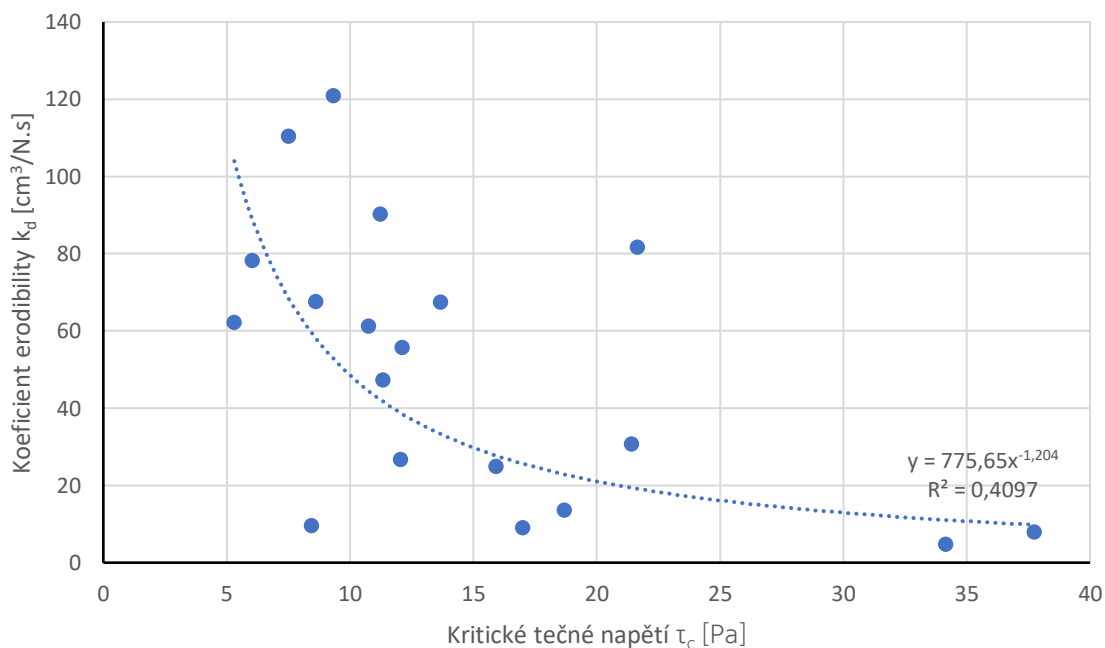
Autor této práce byl pověřen, aby provedl následné výpočty erozních parametrů z hodnot naměřených v roce 2019, s použitím MS Excelu, poskytnutým Mahalderem (2014). Byla mu tedy poskytnuta všechna naměřená data. Postup výpočtu erozních parametrů je blíže popsán v kapitole 8.2.

V roce 2019 bylo provedeno celkem 29 měření, z toho 2 měření byla nezdařená. Po následných výpočtech bylo vyřazeno dalších 8 měření, u kterých nebylo možné výše popsanou metodikou vypočítat hodnoty erozních parametrů. Vyhodnoceno bylo celkem 19 měření, jejichž výsledky jsou uvedeny v tabulce (*Tabulka 2*).

Tabulka 2: Výsledné hodnoty erozních parametrů ze simulací 2019

Povrch	Č. simulace	Tlak	Kritické tečné napětí (τ_c)	Koeficient erodibility (k_d)
[-]	[-]	[kPa]	[Pa]	[cm ³ /N.s]
neobdělávaný	1	40 - 50	8,44	9,45
obdělávaný	2	50	8,61	67,55
obdělávaný	5	50 - 75	11,34	47,19
zoraný	6	65 - 80	17,01	8,98
zoraný	9	70	21,43	30,6
neporušený	1	70	18,69	13,5
neporušený	2	63 - 70	34,15	4,65
neporušený	3	65 - 68	15,92	24,79
neporušený	4	65 - 66	37,74	7,83
obdělávaný	7	58	21,65	81,53
obdělávaný	8	55	9,33	120,83
tvrdý	9	54 - 56	12,06	26,58
neobdělávaný	2	52 - 54	10,76	61,09
neobdělávaný	3	53 - 54	11,23	90,2
neobdělávaný	4	52	12,13	55,6
neobdělávaný	5	53 - 54	13,69	67,37
obdělávaný	7	55 - 58	5,31	62,1
obdělávaný	9	57 - 58	6,05	78,19
obdělávaný	11	55 - 56	7,52	110,35

Následně byly tyto výsledné hodnoty erozních parametrů zobrazeny v grafu (Graf 8).



Graf 8: Závislost erozních parametrů

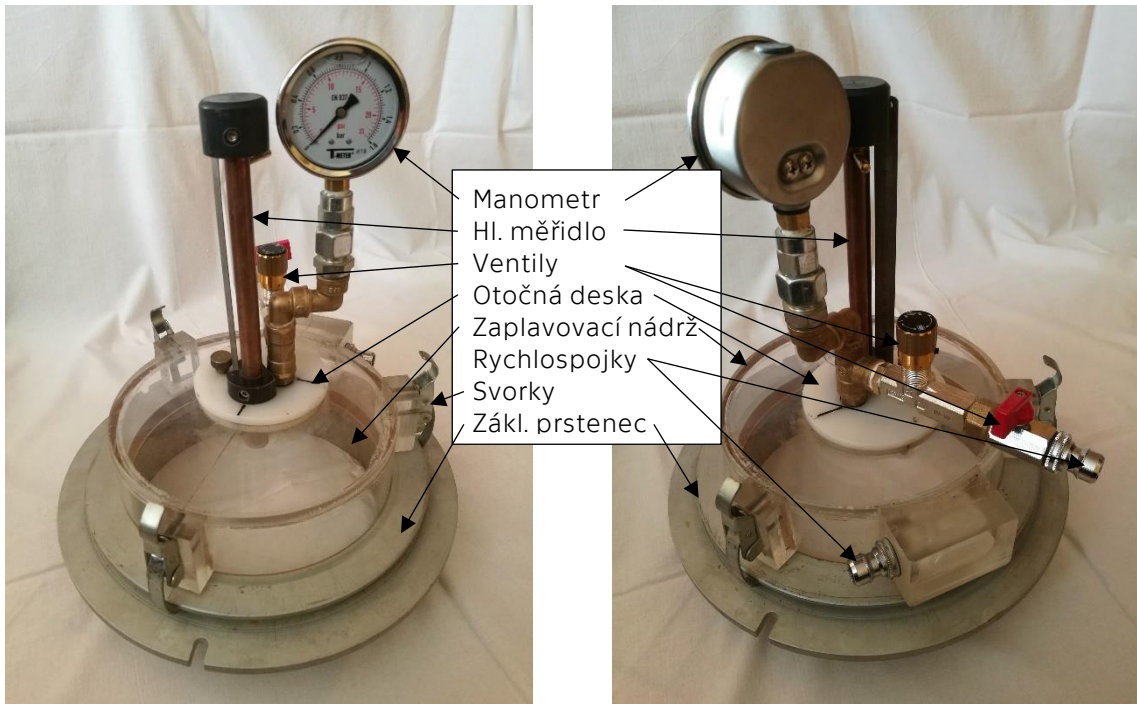
5 POPIS MODIFIKOVANÉ KONSTRUKCE MINI-JET

Tato kapitola popisuje konstrukci modifikovaného zařízení Mini-JET, pomocí kterého bylo provedeno veškeré měření v této práci.

Zařízení je menší verze původního zařízení JET, jehož přímou předlohou bylo zařízení Mini-JET, které použil Mahalder (2018) ve své studii. Modifikace zařízení spočívá v úpravě průměru základového prstence, který byl zvětšen tak, aby při erozi nesoudržného povrchu na orné půdě nedocházelo k rozšíření erozního kráteru až k prstenci. Příklad byl vyroben na zakázku firmou CS Plasting s.r.o. Skládá se z několika součástí (*Obrázek 10, Obrázek 11*), které zde budou blíže popsány.

5.1 Hlavní součásti zařízení

- Základový prstenec
- Zaplavovací nádrž
- Těsnění základového prstence
- Kovové svorky
- Ventily
- Rychlospojky
- Otočná deska s aretačním šroubem
- Tryska
- Hloubkové měřidlo
- Manometr

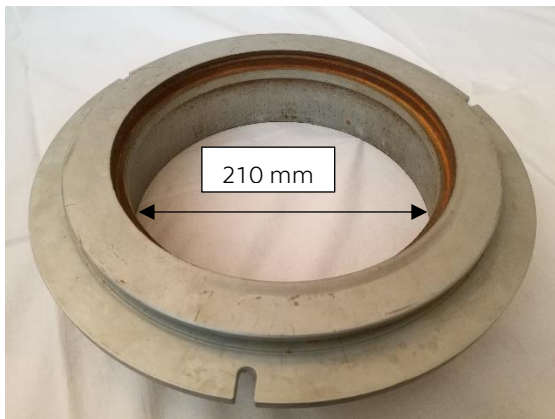


Obrázek 10: Nová konstrukce zařízení Mini-JET – pohled 1

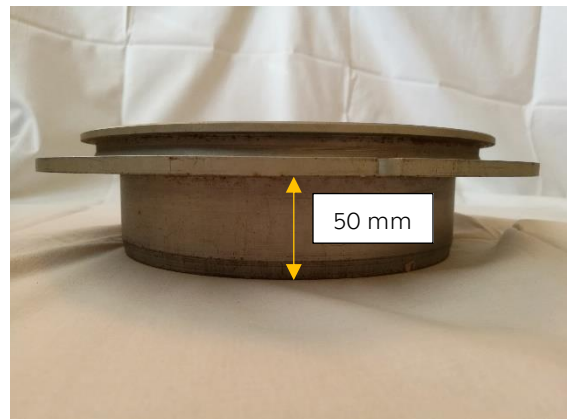
Obrázek 11: Nová konstrukce zařízení Mini-JET – pohled 2

Základový prsteneč

Základový prstec (Obrázek 12) slouží jako základna přístroje, která se zarážejí do půdy na místě měření. Prsteneč lze zatlačit maximálně do hloubky 50 mm a je doporučováno jej právě do této hloubky zatlačovat. Jeho vnitřní průměr činí 210 mm. Vnější průměr činí 300 mm. Celá tato část je kovová, a dá se tedy zarážet do půdy i pomocí těžšího náradí jako je například gumová palice.



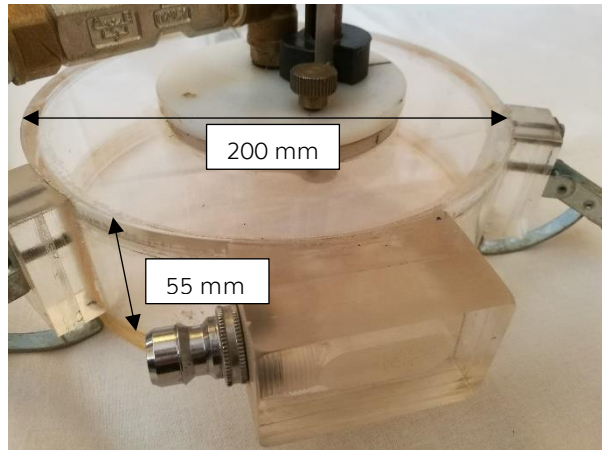
Obrázek 12: Základový prsteneč - pohled shora



Obrázek 13: Základový prsteneč - pohled z boku

Zaplavovací nádrž

Zaplavovací nádrž (*Obrázek 14*) se nachází nad základovým prstencem a slouží k tomu, aby v systému bylo takové množství vody, aby se tryska nacházela při měření pod vodní hladinou. Nádrž má průměr 200 mm a výšku 55 mm. Nádrž je vyrobena z čirého polykarbonátu, který se vyznačuje pevností a houževnatostí. Čirá varianta polykarbonátu umožňuje sledovat při měření stav vodní hladiny v systému a případně se dá ohlídat, jestli se tryska po celý čas měření nachází pod vodní hladinou. Zaplavovací nádrž se připevňuje k základovému prstenci pomocí tří kovových svorek, které



Obrázek 14: Zaplavovací nádrž zařízení Mini-JET

jsou upevněny na výstupcích zaplavovací nádrže. Na základovém prstenci se nachází obruba, za kterou se tyto svorky přichytnou. Vodotěsnost spoje mezi těmito dvěma částmi zajišťuje gumové těsnění, které se umísťuje na horní stranu prstence.

Ventily

Voda je do zařízení přiváděna přes kulový ventil, kterým se reguluje tlak v zařízení (*Obrázek 15*). Pomocí přivírání ventilu lze nastavit potřebný pracovní tlak.

Za kulový ventil byl, na základě zkušeností při zpracování této diplomové práce, přidán ventil s jemným ovládním průtoku, kterým se výrazně lépe reguluje tlak vody v systému (*Obrázek 16*). Jemný ventil tak slouží pro nastavení tlaku, kulový ventil slouží pro otevírání a zavírání přívodu vody. Bohužel jemný ventil byl instalován až po skončení terénního měření. Tudíž byl použit pouze pro poslední kalibraci přístroje. Do budoucna ale přinese snadnější uživatelské ovládní tlaku v systému.

Oba ventily mají 3/8" závit.



Obrázek 15: Kulový ventil



Obrázek 16: Jemný ventil pro regulaci tlaku v systému

Rychlospojky

Rychlospojky byly na přístroji osazeny na vstupu před kulový ventil a na místo odtoku přebytečné vody ze systému (Obrázek 17). Rychlospojky jsou kovové se 3/8" závitem. Rychlospojky byly zvoleny z důvodu snadné manipulace s hadicemi pro přívod a odvod vody. Pro přívod a odvod vody byly použity klasické zahradní hadice 1/2".

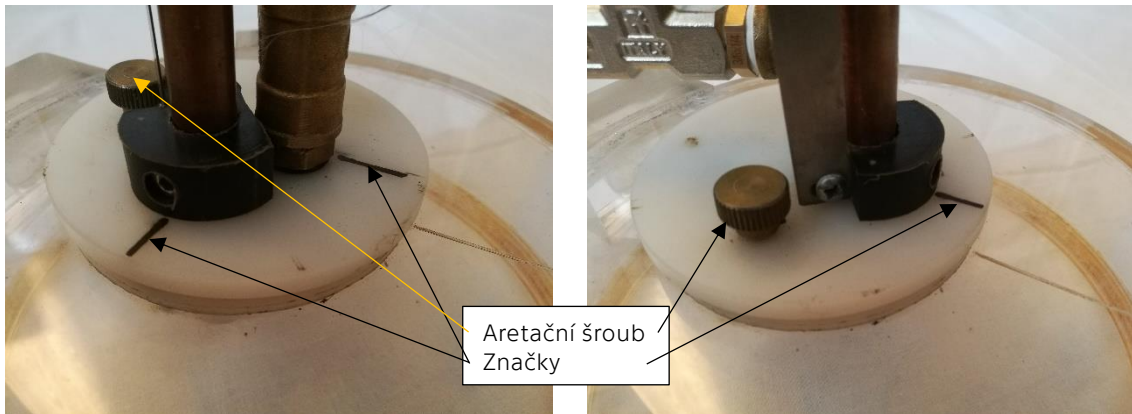


Obrázek 17: Rychlospojka před kulovým ventilem

Otočná deska s aretačním šroubem

Otočná deska je jednou z nejdůležitějších součástí přístroje Mini-JET. Je vyrobena z bílého polykarbonátu o průměru 100 mm. K této desce je připevněna tryska společně s hloubkovým měřidlem pro měření hloubky erozního kráteru. Pootáčením této desky můžeme přístroj uvést do dvou poloh, a to polohy pracovní a čtecí. V pracovní poloze se tryska nachází nad vytvářejícím se erozním kráterem. V poloze čtecí se nad erozním kráterem nachází hloubkové měřidlo, pomocí kterého můžeme změřit hloubku erozního kráteru. Aby uživatel poznal, v jaké pozici se přístroj nachází, jsou na této desce vyznačeny dvě černé značky (Obrázek 18, Obrázek 19). Pokud např. značka u trysky lícuje se zářezem na vrchní straně nádrže,

přístroj se nachází v pracovní poloze a naopak. Z toho je patrné, že se deska dá pootáčet o cca 90 °. Pro zajištění v určité poloze je deska vybavena aretačním šroubem, pomocí kterého se deska dá aretovat do potřebné polohy. Styk mezi otočnou deskou a zaplavovací nádrží je utěsněn gumovým O-kroužkem.



Obrázek 18: Otočná deska - pracovní poloha

Obrázek 19: Otočná deska - čtecí poloha

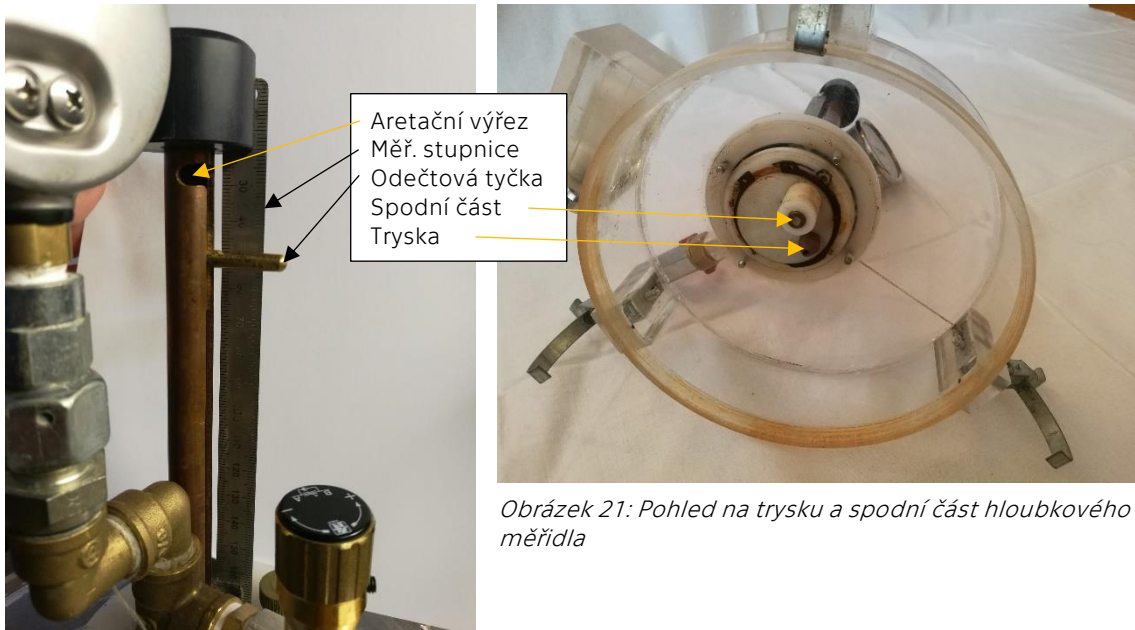
Tryska

Pomocí trysky se tvoří vodní paprsek, který vyvozuje na povrchu půdy určité smykové napětí. Tryska se nachází na spodní straně otočné desky, ke které je přichycena (Obrázek 21).

U zařízení, které ve své studii popsal Simon (2010), byla použita tryska o průměru 3,18 mm. Později Al-Madhhachi (2013) ve své studii zjistil, že průměr trysky ovlivňuje výsledky erozních parametrů. Z tohoto důvodu bylo vhodné použít právě trysku se stejným průměrem jako ve zmiňovaných studiích. Nakonec byla tryska vyrobena na zakázku. Otvor byl vyvrtán přesným vrtákem o průměru **3,2 mm**, který se nejvíce přibližuje hodnotě 3,18 mm. Tryska je kruhová a vytváří rovný přímkový kruhový a plný vodní paprsek.

Hloubkové měřidlo

Hloubkové měřidlo slouží k měření hloubky erozního kráteru, respektive měří vzdálenost trysky ode dna erozního kráteru v čase (Obrázek 20). Je to mosazná trubice, ve které se nachází měřící tyčka, která se spouští do erozního kráteru. V horní části měřidla se nachází aretační výřez, kde se měřící (odečtová) tyčka zajistí po skončení odečtu hloubky. Podél trubice se nachází měřící stupnice v rozsahu 20 – 160 mm.



Obrázek 20: Pohled na hloubkové měřidlo

Obrázek 21: Pohled na trysku a spodní část hloubkového měřidla

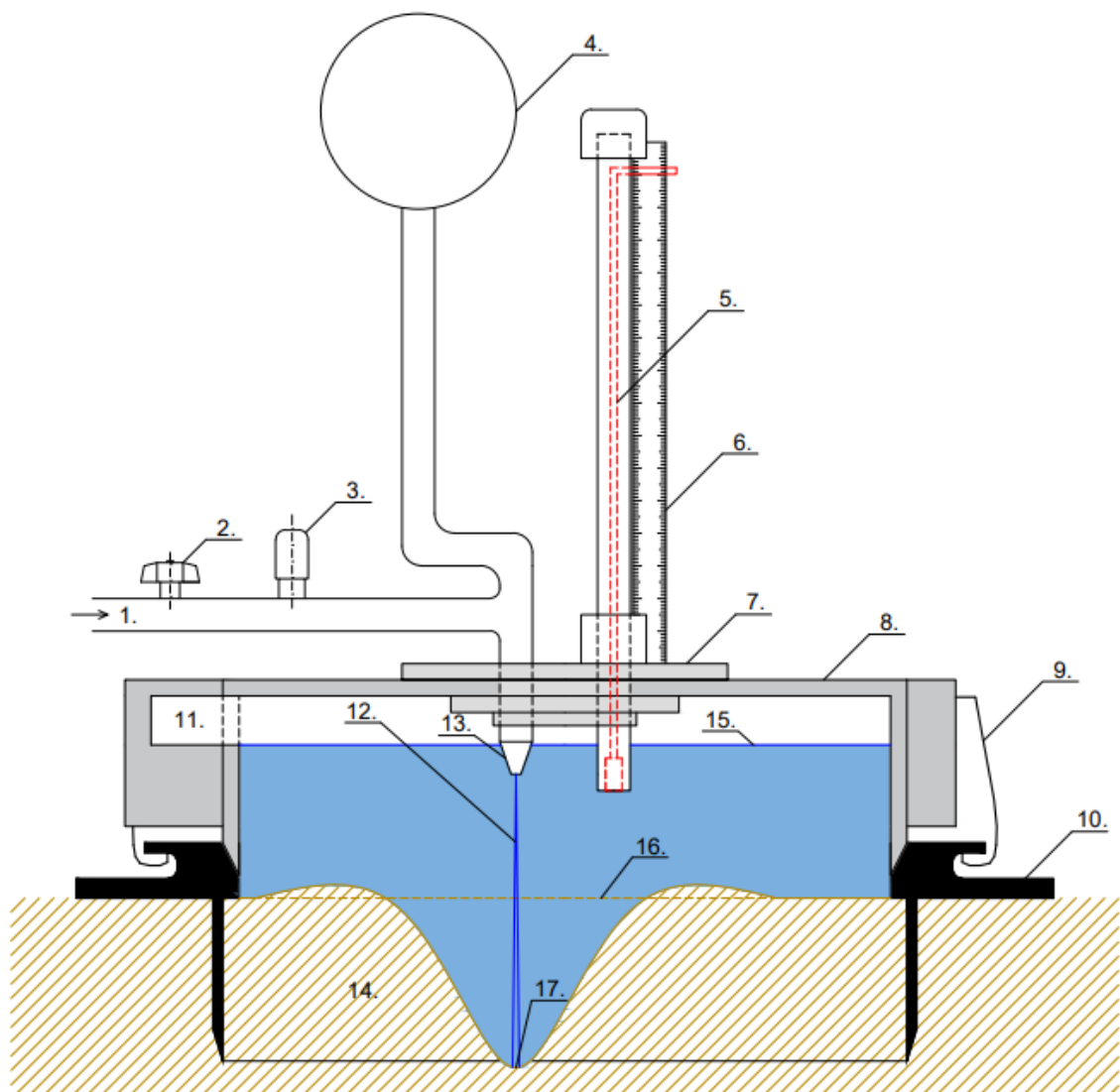
Manometr

Manometr se nachází v horní části přístroje (Obrázek 22). Pomocí manometru můžeme přesně nastavovat a hlídat tlak vody v systému při měření. Závit manometru je shodný s ostatními armaturami a to 3/8".



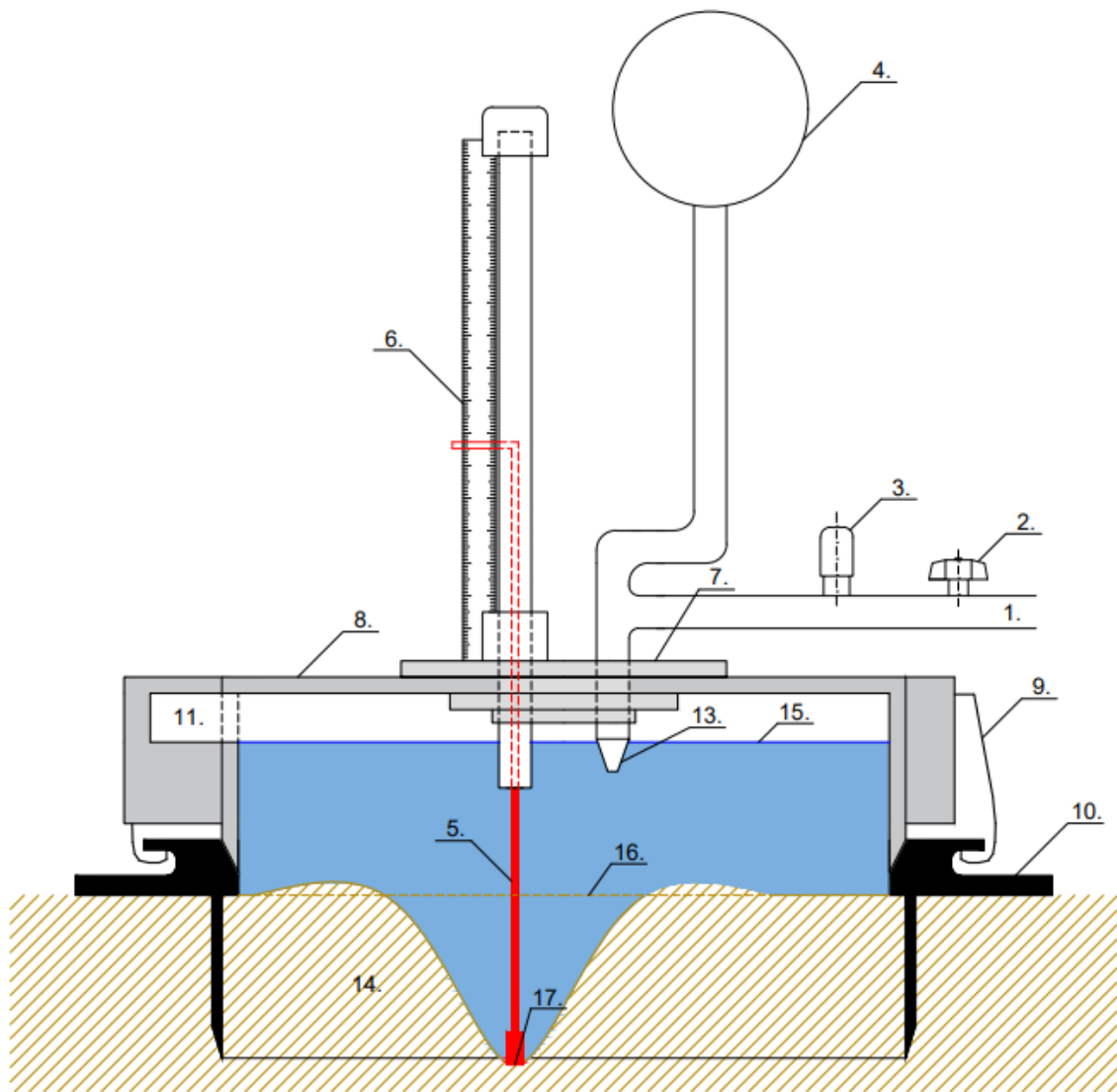
Obrázek 22: Manometr s rozsahem do 23 psi

5.2 Schéma zařízení



Obrázek 23: Schéma zařízení Mini-JET v pracovní poloze

- | | |
|-----------------------|---------------------------|
| 1 - Přívod vody | 10 - Základový prsteneč |
| 2 - Kulový ventil | 11 - Odtoková komora |
| 3 - Jemný ventil | 12 - Vodní paprsek |
| 4 - Manometr | 13 - Tryska |
| 5 - Hloubkové měřidlo | 14 - Půdní prostředí |
| 6 - Měřící stupnice | 15 - Vodní hladina |
| 7 - Otočná deska | 16 - Původní půdní povrch |
| 8 - Zaplavovací nádrž | 17 - Dno erozního kráteru |
| 9 - Svorka | |



Obrázek 24: Schéma zařízení Mini-JET ve čtecí poloze

- | | |
|-----------------------|---------------------------|
| 1 - Přívod vody | 9 - Svorka |
| 2 - Kulový ventil | 10 - Základový prsteneč |
| 3 - Jemný ventil | 11 - Odtoková komora |
| 4 - Manometr | 13 - Tryska |
| 5 - Hloubkové měřidlo | 14 - Půdní prostředí |
| 6 - Měřicí stupnice | 15 - Vodní hladina |
| 7 - Otočná deska | 16 - Původní půdní povrch |
| 8 - Zaplavovací nádrž | 17 - Dno erozního kráteru |

6 KALIBRACE PŘÍSTROJE

Tato kapitola popisuje kalibraci přístroje Mini-JET v hydropedologické laboratoři Katedry hydromeliorací a krajinného inženýrství a některé problémy, které se během kalibrace vyskytly.

6.1 Cíl kalibrace

Jelikož výpočty erozních parametrů budou počítány pomocí připraveného makra v prostředí MS Excel (Mahalder, 2014) je potřeba znát kalibrační koeficient pro daný přístroj. Ten odpovídá ztrátám v hydraulických komponentách zařízení. Pro výpočet tohoto koeficientu bylo potřeba znát průtok při konkrétních pracovních tlacích. Bylo tedy potřeba co nejpřesněji změřit průtok vody zařízením při jednotlivých tlacích.

6.2 Kalibrace č. 1

První kalibrace zařízení proběhla 2.7.2020.

6.2.1 Postup

Přístroj byl sestaven stejně jako při terénním měření. Jako zdroj vody byl použit vodovodní řad, který zajišťoval i potřebný tlak. Tlak byl regulován pomocí kulového ventilu na přístroji. Průtok se měřil pomocí váhové metody, tj. měřila se hmotnost vody proteklá za časový úsek. Pro měření byly použity dvě kádinky, které byly předem zváženy (m_k). Pro každý měřený tlak bylo provedeno pět měření. Nakonec byla pro každý tlak vypočtena průměrná hodnota průtoku.

6.2.2 Naměřená data a výsledky

Tabulka 3: Záznamová tabulka výsledků - ukázka

Tlak	č. k.	Hmotnost kádinky + voda (m_{kv})	Hmotnost vody (m_v)	Čas (t)	Průtok (Q)
[psi]	[-]	[g]	[g]	[s]	[l/s]
1	27	946,80	713,93	27,26	0,0262
1	8	995,62	760,14	28,24	0,0269
1	27	968,76	735,89	27,08	0,0272
1	8	1005,01	769,53	28,57	0,0269
1	27	967,36	734,49	27,16	0,0270
2	8	986,45	750,97	21,73	0,0346
2	27	949,21	716,34	20,78	0,0345
2	8	921,20	685,72	20,17	0,0340
2	27	971,69	738,82	21,82	0,0339
2	8	985,12	749,64	22,11	0,0339

Výpočet průtoku byl proveden následovně:

$$Q = \frac{m_{kv} - m_k}{t \cdot 1000} \quad (13)$$

kde,

Q – průtok vody zařízením [l/s]

m_{kv} – hmotnost kádinky s vodou [g]

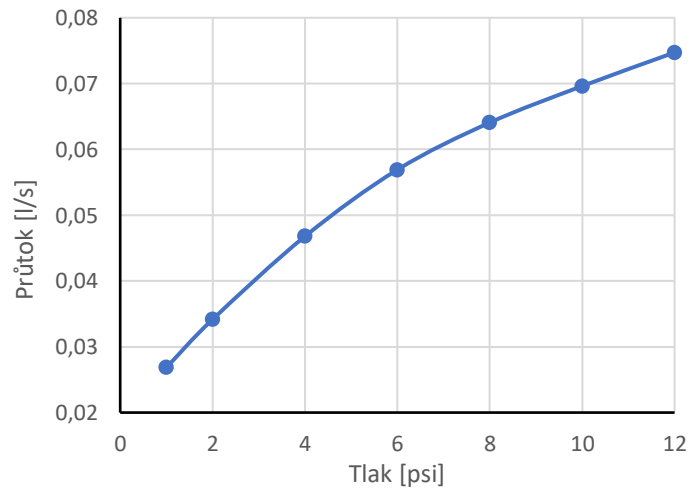
m_k – hmotnost kádinky [g]

t – čas plnění kádinky [s]

Po následném výpočtu všech hodnot a zprůměrování jsou výsledné hodnoty uvedeny v tabulce (Tabulka 4) a zobrazeny v grafu (Graf 9).

Tabulka 4: Výsledné hodnoty průtoků

Tlak	Průtok
[psi]	[l/s]
1	0,0269
2	0,0342
4	0,0468
6	0,0569
8	0,0641
10	0,0696
12	0,0747



Graf 9: Závislost průtoku a tlaku

6.2.3 Zhodnocení kalibrace

Na první pohled se výsledky zdají být uspokojivé. Bylo ale rozhodnuto že se provede kalibrace nová, kvůli manometru, který byl při kalibraci osazen (*Obrázek 25*). Při následném terénním měření se zjistilo, že manometr neměří spolehlivě v oblasti nízkých tlaků. Je to způsobeno nejspíše velkým rozsahem manometru. Manometr má rozsah do 36 psi. Při měření tlaku 1 psi, odpovídá tlak jednomu dílku na stupnici. Proto se zde mohla vyskytnout chyba.



Obrázek 25: Manometr použitý při 1. kalibraci

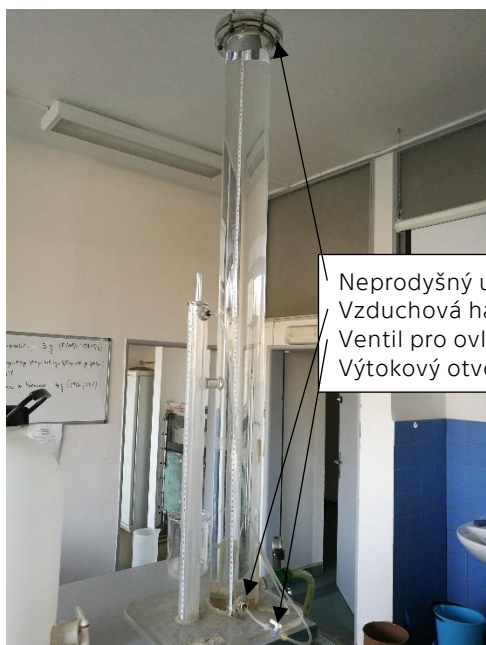
6.3 Kalibrace č. 2

Druhá kalibrace zařízení proběhla 9.10.2020.

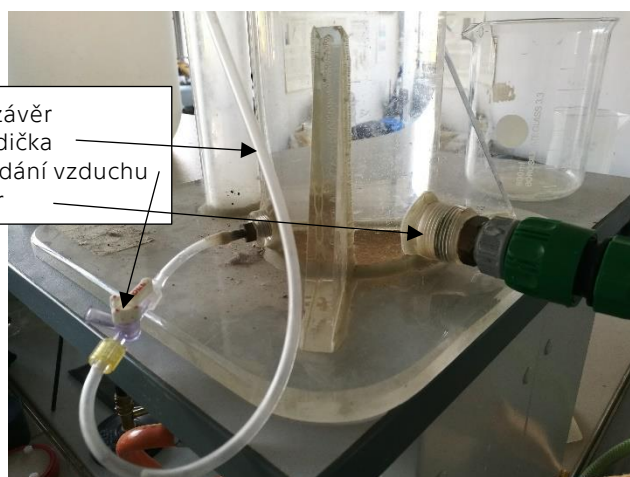
6.3.1 Postup

U druhé kalibrace byl zvolen podstatně jiný postup než u kalibrace první. Byl osazen nový manometr, který má menší rozsah tlaku (do 23 psi) (*Obrázek 22*). Tento manometr byl již popsán v kapitole 5. Bylo rozhodnuto, že se bude měřit až od vyšších tlaků (cca 2 psi a více). Nízký tlak (cca 2 psi a méně) byl nastavován pomocí Mariottovy láhve (*Obrázek 26*). Průtok se měřil stejně jako u předchozí kalibrace.

Mariottova láhev je uzavřená nádoba, ze které vytéká kapalina stálým přetlakem. Láhev je neprodyšně uzavřena. U této kalibrace byla použita velká Mariottova láhev, která má umístěnou vzduchovou hadičku v těžišti výtokového otvoru, tudíž u výtokového otvoru se vyskytuje atmosférický tlak.



Obrázek 26: Mariottova láhev použitá při kalibraci



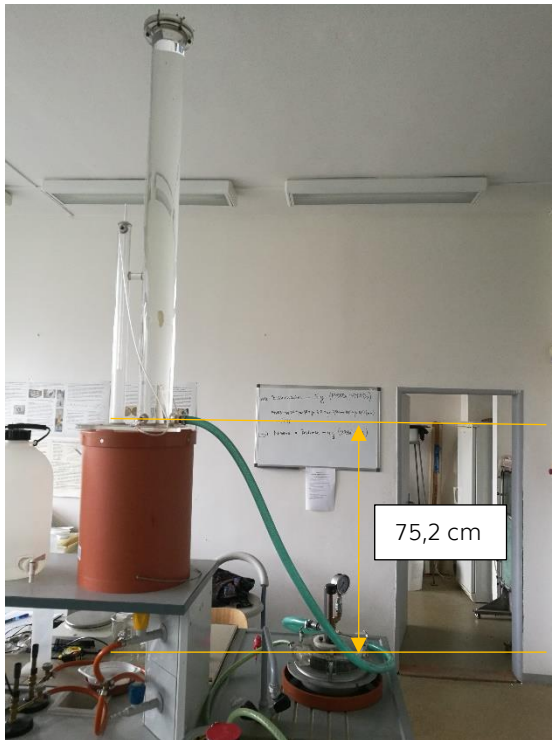
Obrázek 27: Detail umístění otvorů

Neprodyšný uzávěr
 Vzduchová hadička
 Ventil pro ovládání vzduchu
 Výtokový otvor

Při plnění Mariottovy láhve byl povolen uzávěr v horní části láhve, následně byla na výtokový otvor našroubována rychlospojka a pomocí 1/2" hadice byla láhev naplněna vodou. Poté byl uzávěr neprodyšně uzavřen. Rychlospojka byla odstraněna a na výtok byla napojena 3/4" hadice kvůli dosažení co nejmenších ztrát třením v hadici. Pomocí ventilu na vzduchové hadičce se poté ovládal průtok vody.

U zařízení Mini-JET byl kulový ventil zcela otevřen a průtok byl řízen pouze ventilem na vzduchové hadičce. Při měření pomocí Mariottovy láhve byl potřebný tlak vyvolán výškovým rozdílem mezi výtokovým otvorem Mariottovy láhve a výtokovým otvorem z Mini-JETu. Byly provedeny celkem čtyři výškové rozdíly a to 33; 75,2; 121,7 a 150,5 cm.

Aby se zamezilo případným únikům vody ze spodní části Mini-JETu, byla k základovému prstenci přilepena silikonem gumová podložka. Měření dále probíhalo stejnou metodou jako u předchozí kalibrace, tj. váhovou metodou. U měření pomocí Mariottovy láhve bylo změřeno minimálně 10 hodnot při jednom výškovém rozdílu. Při měření pomocí manometru bylo měřeno 5 hodnot při stejném tlaku.



Obrázek 28: Ukázka výškového rozdílu 75,2 cm



Obrázek 29: Ukázka výškového rozdílu 121,7 cm

6.3.2 Naměřená data

Tabulka 5: Záznamová tabulka výsledků - ukázka (Mariottova láhev)

Tlak [cm v. sl.]	č. k. [-]	Hmotnost kádinky + voda [g]	Hmotnost vody [g]	Čas [s]	Průtok [l/s]
121,7	1	577,03	410,86	98,05	0,0042
121,7	4	536,94	385,47	92,98	0,0041
121,7	1	567,39	401,22	96,14	0,0042
121,7	1	577,56	411,39	78,90	0,0052
121,7	1	557,60	391,43	74,83	0,0052
121,7	1	567,96	401,79	76,82	0,0052
121,7	1	556,08	389,91	82,32	0,0047
121,7	1	546,21	380,04	80,75	0,0047
121,7	1	562,10	395,93	83,98	0,0047

Tabulka 5 ukazuje výsledky měření při tlakové výšce 121,7 cm. Jelikož při této tlakové výšce bylo provedeno celkem 23 měření, Mariottova láhev se musela celkem třikrát naplnit vodou. Toto plnění je v tabulce znázorněno barvami. Lze si tedy všimnout, že průtok se při každém naplnění změnil. Tato změna může být způsobena vzduchovou hadičkou, pomocí které je přiváděn do láhve vzduch.

Tabulka 6: Záznamová tabulka výsledků - ukázka (manometr)

Tlak [psi]	č. k. [-]	Hmotnost kádinky + voda [g]	Hmotnost vody [g]	Čas [s]	Průtok [l/s]
2	1	554,15	387,98	9,59	0,0405
2	1	554,56	388,39	9,74	0,0399
2	1	569,34	403,17	10,10	0,0399
2	1	560,28	394,11	9,85	0,0400
2	1	540,46	374,29	9,37	0,0399

6.3.3 Výpočet ztrát

Dále bylo potřeba vypočítat, jaké ztráty vyvozuje spojení mezi Mariottovou láhví a Mini-JETem. Z hlediska minimalizace ztrát byla použita co nejkratší hadice s co největším průměrem. Výpočet byl proveden následovně:

Jako první bylo potřeba vypočítat rychlost proudění v hadici:

$$v = \frac{Q}{S} \quad (14)$$

kde,

v – rychlost proudění v hadici [m/s]

Q – průtok [m³/s]

S – průřezová plocha hadice [m²]

Následně bylo vypočteno Reynoldsovo číslo a součinitel ztráty třením.

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (15)$$

kde,

Re - Reynoldsovo číslo [-]

v – rychlost proudění [m/s]

D – průměr hadice [m]

ν – kinematická viskozita vody [N.s/m²]

$$\lambda = \frac{64}{Re} \text{ pro laminární proudění} \quad (16)$$

kde,

λ – součitel ztrát třením [-]

Re - Reynoldsovo číslo [-]

Následoval výpočet již zmíněných ztrát, konkrétně ztrát třením a ztrát místních.

$$Z_t = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (17)$$

kde,

Z_t – ztráta třením [m]
 λ – součinitel ztrát třením [-]
 L – délka hadice [m]
 D – průměr hadice [m]
 v – rychlost proudění [m/s]

$$Z_m = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (18)$$

kde,

Z_m – ztráta místní [m]
 ζ – součinitel místní ztráty [-]
 v – rychlost proudění [m/s]

Výsledná ztráta představuje součet ztráty třením a ztráty místní.

$$Z = Z_t + Z_m \quad (19)$$

kde,

Z – celková ztráta [m]
 Z_t – ztráta třením [m]
 Z_m – ztráta místní [m]

Vypočtené hodnoty ztrát pro jednotlivé průtoky jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 8).

Tabulka 7: Konstantní veličiny

Průměr hadice (D)	0,0191	m
Průřezová plocha (S)	0,0003	m ²
Délka hadice (L)	2,5000	m
Součinitel místních ztrát (ζ)	0,3086	-

Tabulka 8: Výpočet ztrát

Průtok (Q)	Rychlost (v)	Reynoldsovo číslo (Re)	Součinitel ztrát třením (λ)	Ztráta třením (Z_t)	Ztráta místní (Z_m)	Celkové ztráty (Z)
[m ³ /s]	[m/s]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]
3,13E-06	0,011	160	0,401	0,000323	0,000002	0,000325
5,12E-06	0,018	261	0,245	0,000529	0,000005	0,000534
4,73E-06	0,017	241	0,265	0,000488	0,000004	0,000492
5,23E-06	0,018	267	0,240	0,000540	0,000005	0,000546

Z tabulky (Tabulka 8) je patrné, že i při největším průtoku, který byl při měření dosažen, je hodnota celkové ztráty pouhých **0,546 mm**. Jelikož tlakové výšky jsou v řádech desítek centimetrů, jsou tyto ztráty tak malé, že je lze zanedbat.

6.3.4 Výsledky

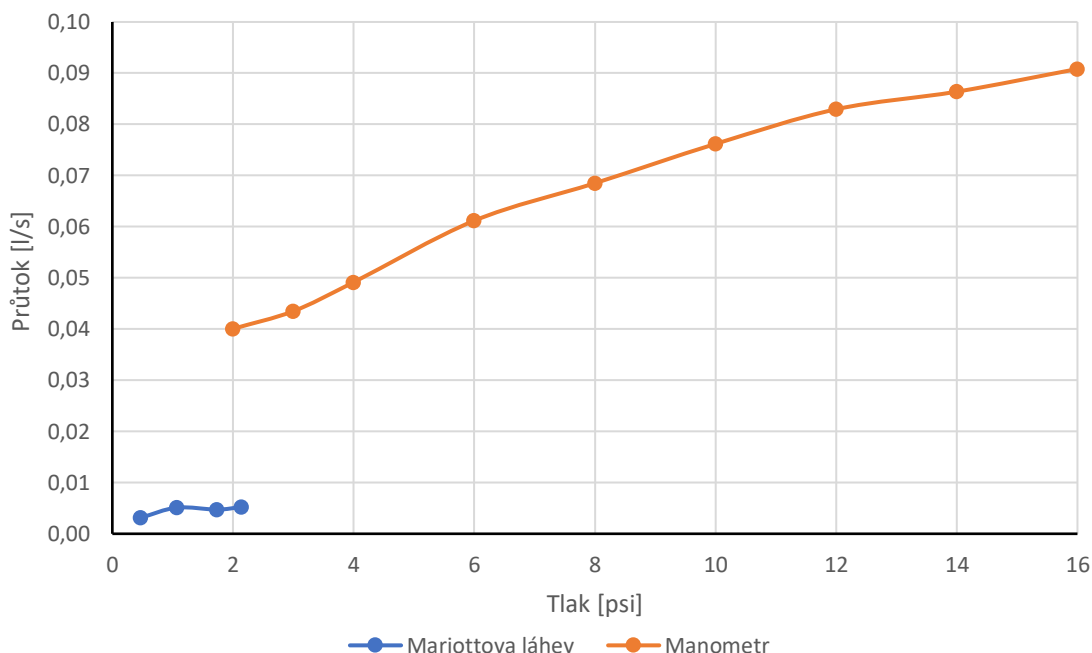
Po následném výpočtu všech hodnot a zprůměrování jsou výsledné hodnoty uvedeny v tabulkách (Tabulka 9, Tabulka 10). Následně jsou zobrazeny v grafu (Graf 10).

Tabulka 9: Výsledky měření průtoků pomocí Mariottovy láhve

Tlak	Tlak	Průtok
[cm v. sl.]	[psi]	[l/s]
33,0	0,47	0,0031
75,2	1,07	0,0051
121,7	1,73	0,0047
150,5	2,14	0,0052

Tabulka 10: Výsledky měření průtoků pomocí manometru

Tlak	Průtok
[psi]	[l/s]
2	0,0400
3	0,0435
4	0,0491
6	0,0612
8	0,0685
10	0,0762
12	0,0829
14	0,0864
16	0,0908



Graf 10: Zobrazené výsledky z kalibrace č. 2

Z grafu (Graf 10) je patrné, že hodnoty průtoku při tlaku 2 psi se liší skoro o řád. Na vině bude nejspíš nedostatečný průtok vzduchu hadičkou do Mariottovy láhve. To vedlo ke snížení průtoku bez ohledu na vyvolaný tlak v systému.

6.3.5 Zhodnocení kalibrace

Jak již bylo řečeno, měření průtoku pomocí Mariottovy láhve bylo neúspěšné díky nedostatečnému průtoku vzduchu do láhve. Hodnoty průtoku, naměřené pomocí manometru byly uspokojivé. Jelikož hodnoty malých tlaků byly naměřeny chybně, bylo rozhodnuto, že se provede nová kalibrace.

6.4 Kalibrace č. 3

Třetí kalibrace proběhla 26.11.2020.

6.4.1 Postup

Při této kalibraci byl zvolen stejný způsob měření jako u první kalibrace. To znamená měření tlaku pomocí manometru, který byl použit ve druhé kalibraci. Tlak byl regulován pomocí nově namontovaného jemného ventilu (kapitola 5.1). Průtok byl měřen pomocí váhové metody, tj. měřila se hmotnost vody proteklá za časový úsek. Byly měřeny tlaky v rozsahu 1 – 12 psi. Pro tlaky 1 – 5 psi bylo změřeno 10 hodnot,

pro zbytek tlaků bylo změřeno pouze 5 hodnot. Byla také spočtena směrodatná odchylka pro ověření variability měření.

6.4.2 Naměřená data a výsledky

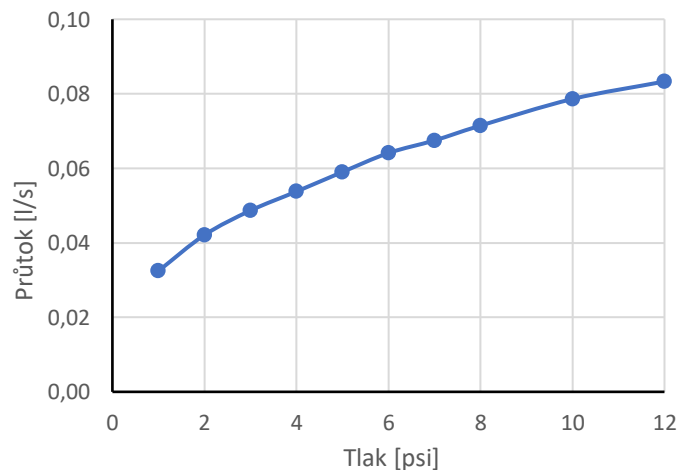
Tabulka 11: Záznamová tabulka výsledků měření - ukázka

Tlak	Hmotnost kádinky + voda	Hmotnost vody	Čas	Průtok
[psi]	[g]	[g]	[s]	[l/s]
6	888,06	654,67	10,22	0,0641
6	928,04	694,65	10,82	0,0642
6	972,12	738,73	11,53	0,0641
6	960,22	726,83	11,31	0,0643
6	942,06	708,67	11,09	0,0639
7	932,25	698,86	10,38	0,0673
7	923,11	689,72	10,25	0,0673
7	879,33	645,94	9,57	0,0675
7	821,49	588,10	8,66	0,0679
7	905,95	672,56	9,98	0,0674

Následné výpočty byly provedeny stejně jako při první kalibraci. Výsledné hodnoty průtoku jsou průměrem vypočtených hodnot. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce (Tabulka 12) a grafu (Graf 11).

Tabulka 12: Výsledky měření

Tlak	Průtok	Sm. Odchylka
[psi]	[l/s]	[-]
1	0,0324	0,00065
2	0,0421	0,00031
3	0,0487	0,00037
4	0,0538	0,00031
5	0,0590	0,00051
6	0,0641	0,00013
7	0,0675	0,00022
8	0,0715	0,00014
10	0,0786	0,00011
12	0,0833	0,00037



Graf 11: Závislost průtoku a tlaku

6.4.3 Zhodnocení kalibrace

Během této kalibrace nenastaly žádné komplikace jako u předchozích kalibrací. Hodnoty průtoku byly mírně vyšší nebo stejné oproti předchozí kalibraci č. 2. Variabilita naměřených dat je také velmi dobrá, lze tedy říci, že měření proběhlo s dostatečnou přesností. Proto bude použito pro následný výpočet kalibračního koeficientu.

6.5 Určení kalibračního koeficientu

Kalibrační koeficient C_d je potřeba určit, jelikož je to jeden z parametrů, který se zadává do tabulkového nástroje „Jet erosion test spreadsheet tool“ (Mahalder, 2014). Pomocí tohoto nástroje se dále budou počítat erozní parametry.

6.5.1 Postup

Pro určení kalibračního koeficientu byla potřeba data závislosti tlaku a průtoku. Tato data byla využita z kalibrace č. 3. Dále byla potřeba přepočítat použité tlaky na tlakové výšky. Následně se postupovalo podle návodu, který je vyobrazen v záložce „JET CALIBRATION“ v tabulkovém nástroji (Mahalder, 2014).

Jelikož je rychlost proudění na trysce definována jako $U = C_d \sqrt{2gh}$, kde C_d je kalibrační koeficient, bylo potřeba vypočítat tzv. teoretický průtok Q_{teo} .

$$Q_{teo} = A \cdot \sqrt{2gh} \quad (20)$$

kde,

Q_{teo} – teoretický průtok [m^3/s]
 A – průřezová plocha trysky [m^2]
 g – gravitační zrychlení [m/s^2]
 h – tlaková výška [m v. sl.]

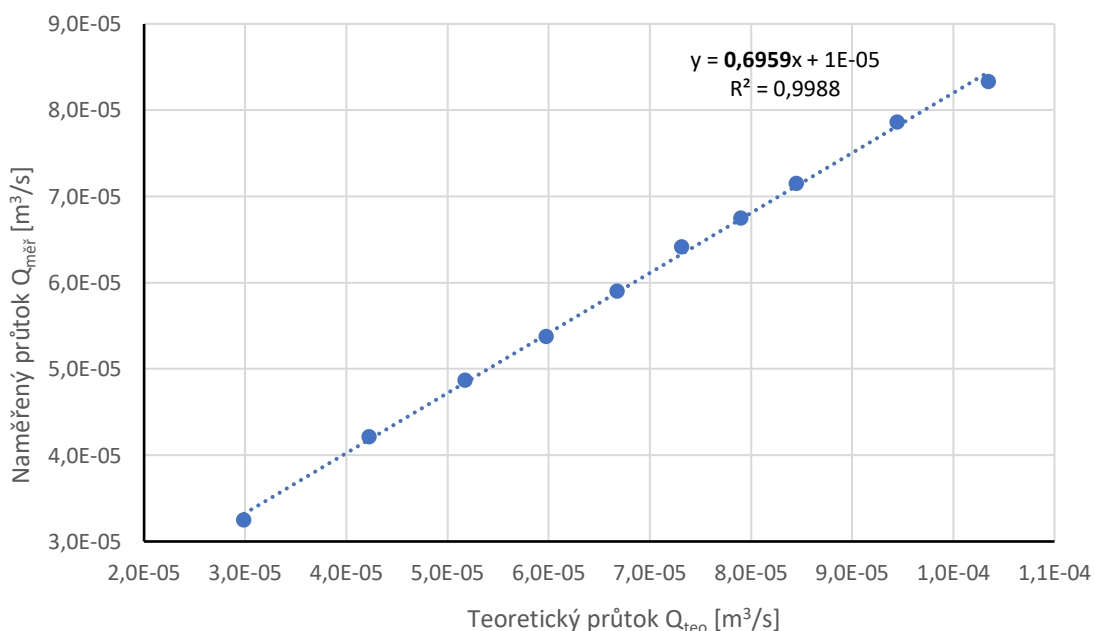
6.5.2 Naměřená data a výsledky

V tabulce (*Tabulka 13*) jsou zobrazeny vypočtené hodnoty, které budou dále využity pro určení kalibračního koeficientu.

Tabulka 13: Naměřené a vypočtené hodnoty pro výpočet kalibračního koeficientu

Tlak	Naměřený průtok ($Q_{m\check{e}r}$)	Tlaková výška (h)	Teoretický průtok (Q_{teo})
[psi]	[m ³ /s]	[m v. sl.]	[m ³ /s]
1	3,245E-05	0,703	2,987E-05
2	4,209E-05	1,406	4,225E-05
3	4,866E-05	2,110	5,174E-05
4	5,377E-05	2,813	5,975E-05
5	5,901E-05	3,516	6,680E-05
6	6,410E-05	4,219	7,318E-05
7	6,748E-05	4,923	7,904E-05
8	7,146E-05	5,626	8,450E-05
10	7,861E-05	7,032	9,447E-05
12	8,330E-05	8,439	1,035E-04

Následně byl sestrojen graf, kde na ose x jsou hodnoty vypočteného teoretického průtoku a na ose y jsou hodnoty průtoku, které byly naměřeny v kalibraci č. 3. Jednotlivými body byla proložena přímka, jejíž směrnice odpovídá kalibračnímu koeficientu (*Graf 12*).



Graf 12: Určení kalibračního koeficientu

Po proložení bodů přímkou je patrné, že kalibrační koeficient $C_d = 0,6959$. Tato hodnota bude dále použita pro výpočet erozních parametrů.

6.5.3 Zhodnocení

Určení hodnoty kalibračního koeficientu je velmi závislé na přesnosti měření průtoku. Proto byl objednan manometr s ještě menším rozsahem (do 5,6 psi) a po dodání tohoto manometru bude provedena kalibrace znovu, aby se ověřila správnost hodnoty kalibračního koeficientu. Pro tuto práci byla hodnota kalibračního koeficientu vypočteného výše považována jako správná.

7 TERÉNNÍ MĚŘENÍ

7.1 Cíl terénního měření

Cílem terénního měření bylo otestovat zařízení provedením simulací a získat skutečné hodnoty hloubek erozních kráterů při jednotlivých tlacích vody, tedy zda lze zařízení využít na daném povrchu zemědělského pozemku k výpočtům erozních parametrů.

7.2 Popis lokality

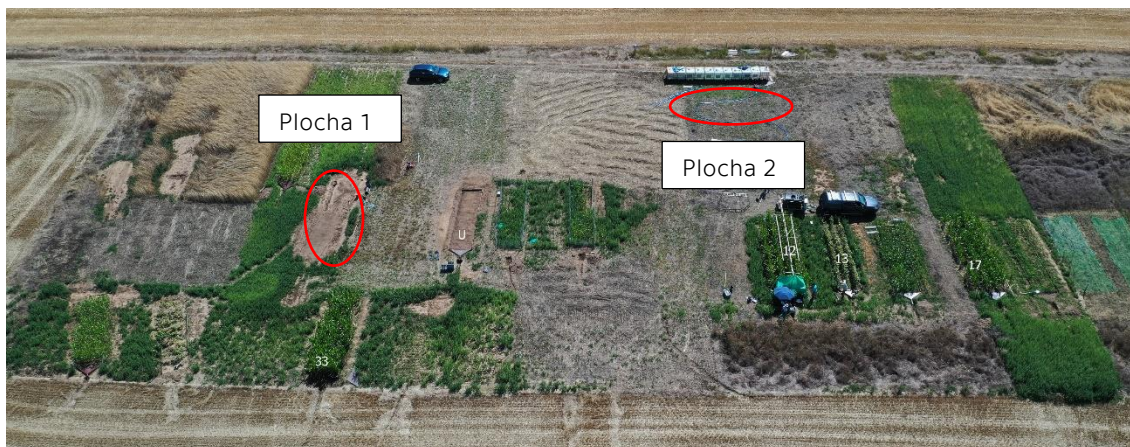
Všechny simulace byly měřeny na experimentálních plochách Katedry hydromeliorací a krajinného inženýrství u obce Řisuty. Obec Řisuty se nachází v okrese Kladno a leží asi 5 km západně od Slaného. Reliéf krajiny má charakter ploché pahorkatiny. Experimentální plochy se nachází v nadmořské výšce 320 m n. m. Klima je zde suché a teplé, s mírnou zimou a s velmi krátkým trváním sněhové pokrývky. Průměrná roční teplota se zde pohybuje mezi 8 a 9 °C. Průměrný roční srážkový úhrn se zde pohybuje okolo 500 mm z důvodu srážkového stínu. (Stašek, 2018)



Obrázek 30: Vyznačení experimentálních ploch u obce Řisuty (zdroj: mapy.cz)

7.3 Půdní povrchy

Terénní měření bylo provedeno na dvou typech půdního povrchu. Umístění obou experimentálních ploch je znázorněno v následném šikmém pohledu (Obrázek 31). Jelikož metodika výpočtu erozních parametrů počítá s homogenním půdním prostředím, byly vybrány dva typy půdního povrchu.



Obrázek 31: Umístění ploch, které byly využity při měření (zdroj: Josef Krása – emailová komunikace)

7.3.1 Válcovaný úhor

Na experimentální ploše 1 se nacházel tzv. čerstvě vytvořený válcovaný úhor (Obrázek 32). Jde o totožný půdní povrch, který je srovnávacím stavem pro měření smyvu během kampaní s dešťovým simulátorem pro určování C-faktoru (Stašek, 2018). Postup přípravy tohoto půdního povrchu je následující: nejprve se plocha v celé délce dvakrát zkypří pomocí kultivátoru. Poté jsou odstraněny větší kameny, kořeny a jiné nežádoucí předměty. Povrch se následně urovná pomocí kovových hrábí. Jako poslední se srovnaný povrch dvakrát uválcuje pomocí ručního válce o hmotnosti přibližně 50 kg.



Obrázek 32: Válcovaný úhor

V tabulce (*Tabulka 14*) jsou zobrazeny základní půdní charakteristiky, jejichž výpočet bude přiblížen v kapitole 8.1.

Tabulka 14: Vypočtené půdní charakteristiky pro válcovaný úhor

Půda	Objemová hmotnost	Objemová vlhkost
	[g/cm ³]	[%]
Válcovaný úhor	1,348	19,53

7.3.2 Seťové lůžko vytvořené zemědělskou technikou

Na experimentální ploše 2 se nacházel povrch po běžné přípravě pozemku na seťové lůžko (*Obrázek 33*). Informace o postupu přípravy tohoto povrchu byly poskytnuty Martinem Mistrem (VÚMOP) pomocí emailové komunikace.

25.9.2020 – podmítka (radličkový podmítač, hloubka 18 – 22 cm)

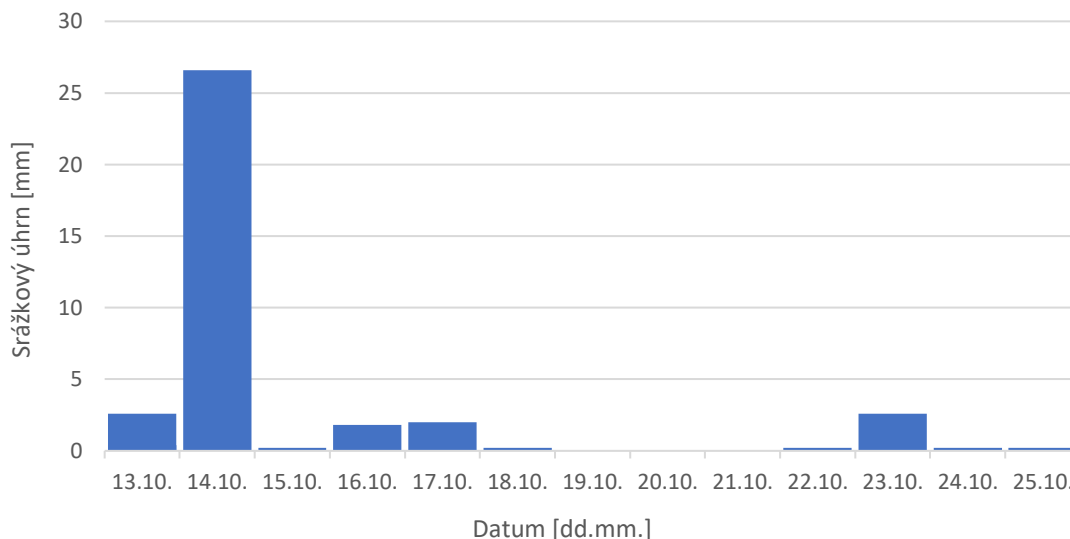
29.9.2020 – orba po spádnici do hloubky cca 26 cm

13.10.2020 – setí žita po spádnici



Obrázek 33: Stav půdního povrchu po zasetí žita

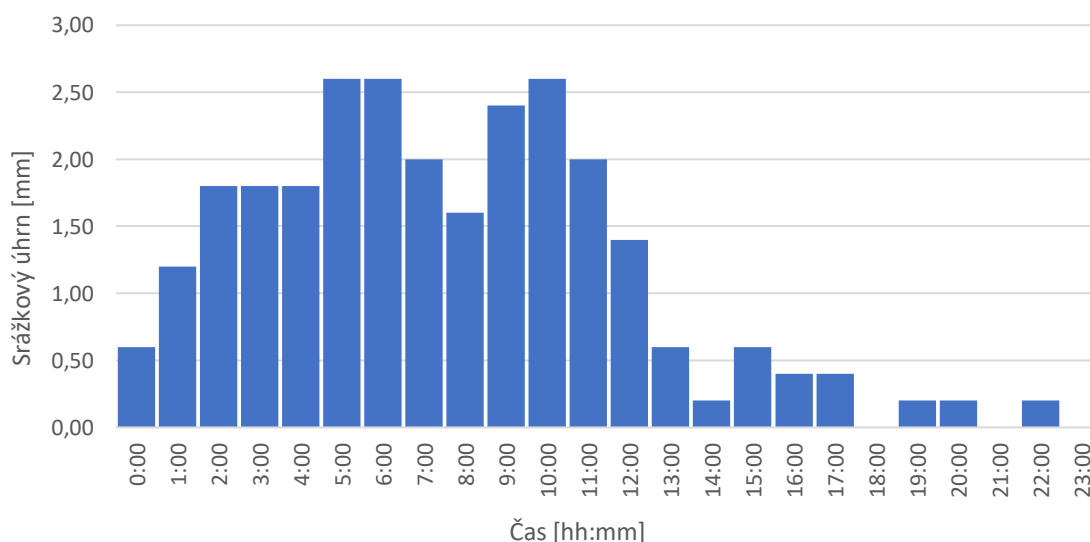
Jelikož se terénní měření na tomto povrchu uskutečnilo ve dnech 21 – 25.10.2020, tj. až 8 dnů od setí, bylo potřeba zjistit, zda se v lokalitě nevyskytla významná srážka, která by mohla způsobit krustaci půdního povrchu.



Graf 13: Denní srážkové úhrny od setí do terénního měření (zdroj: data ze srážkoměru, David Zumr)

Z grafu (Graf 13) je patrné, že dne 14.10. se nad povrchem vyskytla srážka s denním úhrnem 26,6 mm.

Dále bylo důležité zjistit průběh této srážky. Její průběh je zobrazen v grafu (Graf 14).



Graf 14: Hodinové srážkové úhrny 14.10.2020 (zdroj: data ze srážkoměru, David Zumr)

Z grafu je patrné, že maximální intenzita srážky činila 2,6 mm/hod, což by nemělo zásadně ovlivnit půdní povrch.

Dále jsou v tabulkách (Tabulka 15, Tabulka 16) zobrazeny půdní charakteristiky, jejichž výpočet bude přiblížen v kapitole 8.1.

Tabulka 15: Zrnitostní složení

Půda	Zrnitostní složení půdy			Půdní druh
	jíl	prach	písek	
	[%]	[%]	[%]	
Seťové lože (21.10.)	8,33	54,51	37,17	Prachovitá hlína
Seťové lože (24.10.)	8,85	57,25	33,91	Prachovitá hlína
Seťové lože (25.10.)	9,94	57,00	33,06	Prachovitá hlína

Tabulka 16: Základní půdní charakteristiky

Půda	Objemová hmotnost	Objemová vlhkost	Stabilita agregátů
	[g/cm ³]	[%]	[%]
Seťové lože (21.10.)	1,824	29,33	55,86
Seťové lože (24.10.)	1,849	30,18	60,78
Seťové lože (25.10.)	1,807	32,34	57,83

7.4 Postup terénního měření

7.4.1 Postup a problémy identifikované během měření

Příprava pomůcek pro měření

Po příjezdu na experimentální plochu bylo připraven a zkompletován celý systém.

Jako zdroj vody byly použity IBC kontejnery o objemu 1000 l, ze kterých byla voda dále přepouštěna do menšího 100 l sudu. V sudu bylo umístěno kalové čerpadlo, ze kterého byla pomocí 1/2" hadice dopravována voda do přístroje Mini-JET. K napájení čerpadla byla použita elektrocentrála Honda EU 22iT o výkonu 2,2 kW.

Dále byl připraven přístroj na měření vlhkosti HydroSense II. Také byla připravena sada Kopeckého válečků, pomocí kterých se budou odebírat půdní vzorky, u kterých se budou v laboratoři zjišťovat půdní charakteristiky objemová hmotnost, vlhkost a zrnitostní složení.

Před samotným měřením byl také důkladně odvzdušněn celý systém. Odvzdušnění bylo provedeno otevřením kulového ventilu na přístroji. Voda přebytečný vzduch vytlačila. Důležité bylo zkontrolovat, zda se vzduch nenachází u manometru, což by vedlo k nefunkčnosti manometru. Vzduch by se případně odstranil povolením manometru a následným utáhnutím. Do budoucna bude přístroj osazen odvzdušňovacím ventilem, který tento úkon velmi usnadní.

Výběr vhodného místa a osazení základového prstence

U místa pro samotné měření bylo potřeba dát si pozor na přítomnost předmětů, které by mohly narušit tvorbu erozního kráteru. Předně to jsou kameny na půdním povrchu, ale také rostlinné zbytky jako jsou kořeny atd. Tyto předměty znemožňují tvorbu erozního kráteru a měření by bylo neúspěšné.

Po výběru vhodného místa pro měření následovalo osazení základového prstence do půdního povrchu (*Obrázek 34*). U provedených simulací byl povrch dostatečně měkký a prstenec stačilo zatlačit do půdy ručně. V případě tvrdších půd lze ale použít i gumovou palici. U základového prstence bylo potřeba si dát pozor, aby byl do půdy umístěn vodorovně. Při velkém sklonu by po napuštění přístroje tryska nemusela být ponořena, tudíž by neplatily vztahy pro následné výpočty erozních parametrů.



Obrázek 34: Osazení základového prstence

Odběr půdních vzorků, měření vlhkosti, fotodokumentace

Po osazení základového prstence následoval odběr půdních vzorků pomocí Kopeckého válečků, ze kterých se v laboratoři zjišťovaly půdní charakteristiky. Pokud byl k dispozici dostatek válečků, půdní vzorky se odebíraly u každého měření. Většinou ale nebylo možné odebrat velké množství válečků, a tak bylo odebráno celkem 5 válečků za celou sérii měření v jednu dnu.

Následovalo měření vlhkosti pomocí přístroje HydroSense II. Bylo změřeno vždy pět hodnot vlhkostí kolem základového prstence (*Obrázek 35*).

Nakonec byl pořízen snímek půdního povrchu, který bude dále využit pro následné vyhodnocení (*Obrázek 36*).



Obrázek 35: Měření vlhkosti půdy pomocí sondy HydroSense II



Obrázek 36: Pořízený snímek půdního povrchu před experimentem

Napouštění systému

Před samotným napouštěním systému vodou bylo na základový prstenec osazeno těsnění a následně osazena samotná zaplavovací nádrž s přístrojem.

K základovému prstenci byla nádrž přichycena pomocí tří kovových svorek.

Následně začalo napouštění systému vodou. Původní postup předpokládal, že se systém bude napouštět tryskou ve čtecí poloze, ale už po prvních měřeních bylo zjištěno, že plnění tryskou ve čtecí poloze může vytvářet erozní kráter tak velký, že následně ovlivňuje erozní kráter, který je vytvářen záměrně (v pracovní poloze). Toto se dělo především u válcovaného úhoru. Bylo tedy rozhodnuto, že se bude systém plnit odtokovým otvorem, který se nachází na okraji prstence. Vytvořený erozní kráter tudíž nebude ovlivňovat výsledky měření.

Napouštění systému probíhalo pozvolna, velmi malým průtokem, až do doby, kdy se hladina vody ustálila v úrovni výtoku (Obrázek 37). Následně byl systém připraven pro samotné měření.

Při napouštění se několikrát stalo, že systém nebylo možné naplnit, protože voda rychle infiltrovala. Toto způsobily pravděpodobně preferenční cesty v půdním profilu jako



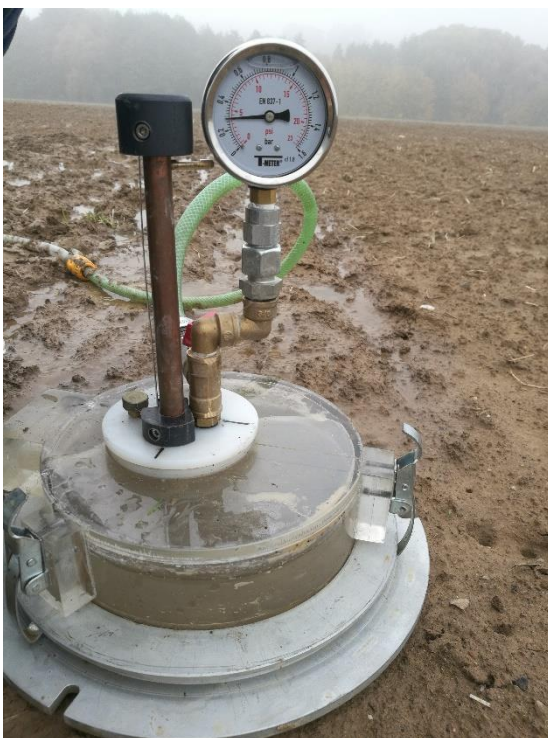
Obrázek 37: Napouštění systému

jsou např. díry od myší. V takovém případě bylo potřeba přístroj umístit na jiné místo.

Měření

Cílem měření bylo co nejpřesněji zaznamenat průběh tvorby erozního kráteru v čase. Bylo proto zcela zásadní použít správný tlak vody. Pokud by byl příliš vysoký, kráter se vytvoří okamžitě a průběh by se nestihl měřit. Naopak pokud by byl příliš nízký, erozní kráter by se nevytvářel. Výběr správného tlaku vody závisí především na zkušenostech uživatele. Pro válcovaný úhor byl použit převážně tlak 1 psi a pro seťové lůžko vytvořené zemědělskou technikou byl použit tlak 3 a 4 psi (*Obrázek 38*).

Po výběru správného pracovního tlaku vody následovalo otočení systému do čtecí polohy a následné změření počáteční vzdálenosti půdního povrchu od trysky. Po změření se přístroj otočil do pracovní polohy a následovalo pouštění vodního paprsku na půdní povrch. Vodní paprsek se na půdní povrch pouštěl v intervalech, které se s prohlubováním erozního kráteru prodlužovaly. Mezi měřeními se přístroj opět otáčel do čtecí polohy a měřil se průběh tvorby kráteru (*Obrázek 39*). Jako počáteční doba měření byla zvolena hodnota 5 s. Prodlužování doby měření je závislé na zkušenostech uživatele. Měření bylo ukončeno, když se při posledních třech měřeních o délce min. 30 s. hloubka erozního kráteru nezměňovala.



Obrázek 38: Průběh měření s tlakem 4 psi



Obrázek 39: Odečet hloubky pomocí měřidla

Tabulka 17: Formulář pro zapisování naměřených hodnot - ukázka

Simulace č.	7
Tlak [psi]	3
Počáteční hloubka [mm]	82
Čas	Hloubka
[s]	[mm]
5	83
5	83
10	85
10	86
10	88
10	91
10	93
10	94
10	95
30	96
30	96
30	96



Obrázek 40: Zapisování naměřených hodnot do formuláře

Při měření hloubky erozního kráteru bylo potřeba měřidlo spouštět opatrně. Při samovolném puštění měřidla by měřidlo mohlo prohloubit kráter a mohlo by dojít ke zkreslení výsledků.

Po skončení jednoho měření byl přístroj rozebrán a základový prsteneček byl přemístěn na nové stanoviště. Jako poslední byl vyfocen půdní povrch po simulaci (Obrázek 41). To může posloužit pro porovnání tvarů erozních kráterů.



Obrázek 41: Snímek erozního kráteru po simulaci

Zhodnocení terénního měření

Celkem bylo provedeno 75 simulací, z toho 6 simulací bylo neúspěšných. Důvod neúspěšných simulací byl především výskyt nežádoucího předmětu v půdním profilu pod tryskou např. kamenu. Dalším faktorem neúspěchu bylo zhroucení erozního kráteru v průběhu měření. Lze tedy konstatovat, že bylo provedeno dostatečné množství simulací k následnému vyhodnocení.

7.4.2 Navržený standardní postup měření

Na základě terénního měření, které bylo popsáno v kapitole 7.4.1, byl sestaven standardizovaný postup, podle kterého se bude postupovat při budoucích simulacích. Standardizovaný postup obsahuje i postup doplňkových měření odběr půdních vzorků a měření vlhkosti půdy. Pokud uživatel tato data nepotřebuje, může tyto kroky přeskočit. Nutno zmínit, že tento standardizovaný postup je určen výhradně pro terénní měření.

1. Pomocí navrženého checklistu (*Kapitola 12.1*) zkontrolovat všechny body před plánovanou simulací.
2. Po příjezdu na měřicí stanoviště je potřeba sestavit celý systém (zprovoznit elektrocentrálu, zajistit přívod vody pomocí čerpadla, propojit čerpadlo se zařízením Mini-JET).
3. Důkladně odvzdušnit zařízení, ujistit se, že manometr správně měří tlak vody v systému. Odvzdušnění provést povolením šroubení manometru (do budoucna pomocí odvzdušňovacího ventilu).
4. Na měřeném půdním povrchu odebrat půdní vzorky pomocí Kopeckého válečků. Pro každý půdní povrch odebrat minimálně 5 vzorků.
5. Vybrat vhodné místo pro simulaci. Půda na vhodném místě by měla být homogenní, bez viditelné krusty na povrchu. Dále by se na vhodném místě neměly nacházet nežádoucí předměty, které by měření mohly narušit, jako jsou zbytky rostlin, kameny, kořeny apod.
6. Po výběru vhodného místa osadit základový prstenec. V případě měkké půdy může být do půdy zatlačen ručně, v případě tvrdší půdy je možno použít gumovou palici. Pokud možno, prstenec zarazit do maximální možné hloubky (50 mm). Prstenec umístit do půdy co nejvíce vodorovně, abychom po napuštění zajistili důkladné ponoření trysky.

7. Po osazení prstence změřit půdní vlhkost kolem prstence pomocí půdního vlhkoměru. Změřit minimálně 5 hodnot vlhkostí půdy.
8. Mimo připravený povrch si pomocí jemného ventilu na zařízení nastavit potřebný tlak, při kterém se bude měřit.
9. Na základový prstenec umístit těsnění a dále pomocí svorek přichytit horní část zařízení k základovému prstenci.
10. Pomocí výtokového otvoru opatrně napustit zařízení vodou. Vodní hladina v zařízení musí dosahovat úrovně výtokového otvoru, tj. tryska musí být zcela ponořena.
11. Přívod vody vrátit na vstupní otvor, otočit zařízení do čtecí polohy a pomocí hloubkového měřidla změřit výchozí vzdálenost půdního povrchu od trysky. Tuto hodnotu zapsat do záznamového formuláře, položka *Výchozí vzdálenost (Kapitola 12.2)*.
12. Otočit zařízení do pracovní polohy a zvolit si počáteční dobu měření. Ta bude záviset především na vlastnostech půdy. Doporučená počáteční doba je 5 sekund. Pomocí kulového ventilu pustit vodu do trysky pod daným tlakem. Po uplynutí zvolené doby přívod vody do trysky uzavřít. Následně přístroj otočit do čtecí polohy a změřit hloubku erozního kráteru. Doby měření a hloubku erozního kráteru zapsat do záznamového formuláře, položky *Doba měření a Hloubka (Kapitola 12.2)*.
13. Otočit zařízení zpět do pracovní polohy a provést opakovaná měření dle postupu v předchozím bodě. Doby měření prodlužovat podle rychlosti hloubení kráteru. Měření ukončit, když po dobu tří po sobě následujících měřeních o délce minimálně 30 sekund se již hloubka kráteru nemění.

8 ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ DAT

Tato kapitola se zabývá zpracováním naměřených dat. Přesněji se bude zabývat metodami výpočtu půdních charakteristik a erozních parametrů. Následně budou tato data vyhodnocena.

8.1 Analýza půdních charakteristik

Analýza půdních charakteristik byla provedena pomocí půdních vzorků z Kopeckého válečků. K analýze bylo celkem odebráno 27 půdních vzorků.

8.1.1 Stanovení objemové hmotnosti a vlhkosti půdy

Objemová hmotnost a vlhkost byla stanovena gravimetricky. Neporušený půdní vzorek byl s válečkem zvážen. Poté byl sušen 24 hodin při teplotě 105 °C. Po 24 hodinách byl vzorek opět zvážen (Obrázek 42). Po odečtení hmotnosti válečku jsme dostali hmotnosti vlhkého a vysušeného vzorku. Z těchto hodnot již lze spočítat objemovou hmotnost a objemovou vlhkost půdy.



Obrázek 42: Vysušené půdní vzorky

$$\rho = \frac{m_{pw}}{V} \quad (21)$$

kde,

ρ – objemová hmotnost půdy [g/cm³]

m_{pw} – hmotnost vlhké půdy [g]

V – objem válečku [cm³]

$$\theta = \frac{m_w}{V} \quad (22)$$

kde,

θ – objemová vlhkost půdy [%]

m_w – hmotnost vody obsažené ve vzorku [g]

V – objem válečku [cm³]

V tabulkách (*Tabulka 18, Tabulka 19*) jsou uvedeny výsledky těchto charakteristik.

Tabulka 18: Vypočtené hodnoty objemové hmotnosti půdy

Povrch	Objemová hmotnost [g/cm ³]			
	Min.	Max.	Průměr	Směr. odch.
Válcovaný úhor	1,276	1,394	1,348	0,038
Seťové lože (21.10.)	1,723	1,883	1,824	0,051
Seťové lože (24.10.)	1,812	1,871	1,849	0,021
Seťové lože (25.10.)	1,768	1,822	1,807	0,020

Tabulka 19: Vypočtené hodnoty objemové vlhkosti půdy

Povrch	Objemová vlhkost [%]			
	Min.	Max.	Průměr	Směr. odch.
Válcovaný úhor	15,549	21,920	19,532	2,071
Seťové lože (21.10.)	28,061	30,887	29,327	0,812
Seťové lože (24.10.)	29,359	31,067	30,180	0,667
Seťové lože (25.10.)	30,588	33,314	32,337	1,002

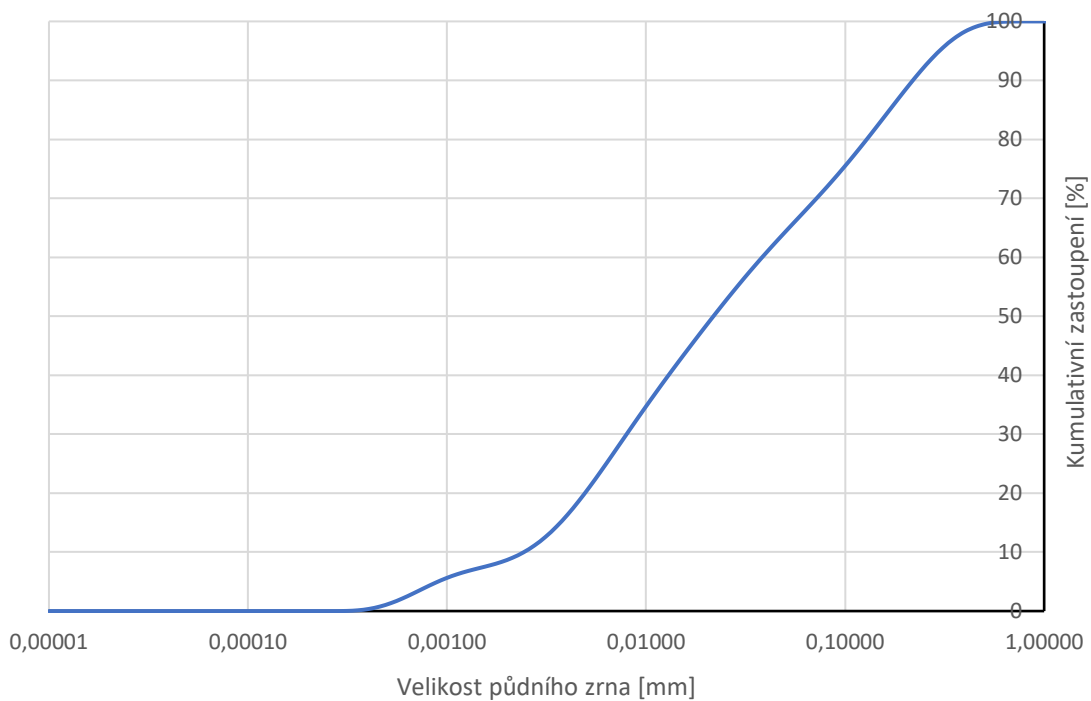
8.1.2 Stanovení zrnitostního složení a půdního druhu

Ke stanovení zrnitostního složení bylo využito zařízení MASTERSIZER 3000 od firmy Malvern (*Obrázek 43*). Toto zařízení pomocí laserového paprsku měří velikosti půdních zrn a následně stanoví procentuální zastoupení jednotlivých půdních frakcí.

Pro každý půdní povrch bylo provedeno celkem 10 měření. Po skončení měření byla vyexportována data zrnitostní křivky, která byla následně zprůměrována (*Graf 15*). Z vyexportovaných dat byl následně určen procentuální podíl jílu, prachu a písku. Výsledky zrnitostního složení byly již vyobrazeny v tabulce (*Tabulka 15*).

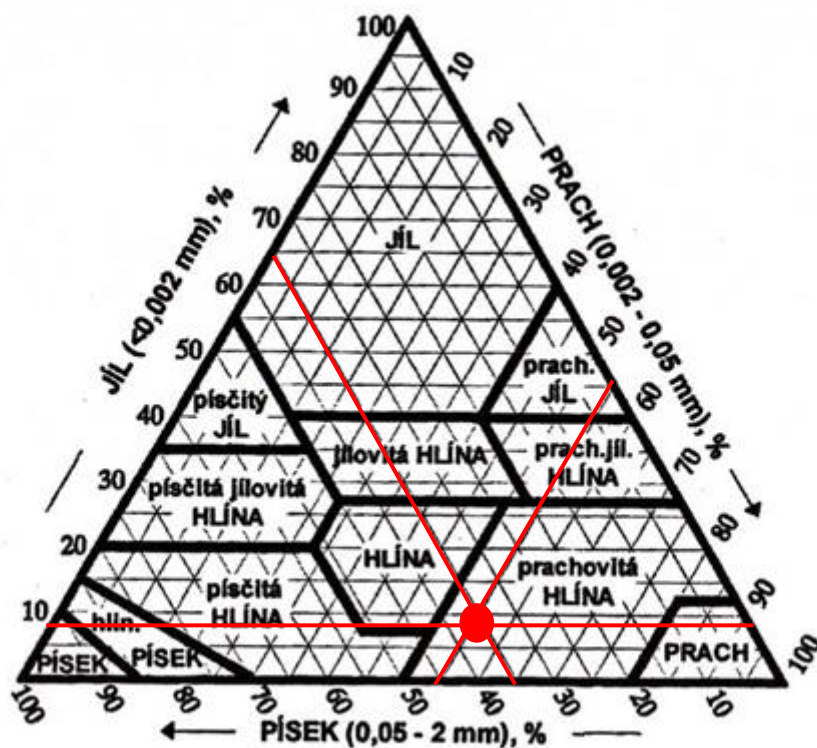


Obrázek 43: Přístroj MASTERSIZER 3000



Graf 15: Zrnitostní křivka půdy sešového lůžka (21.10.)

Následně byl pomocí trojúhelníkového diagramu stanoven půdní druh (Obrázek 44).



Obrázek 44: Stanovení půdního druhu pomocí trojúhelníkového diagramu

Jak je patrné, zkoumané půdy byly zařazeny jako **prachovité hlíny**.

8.1.3 Stanovení stability půdních agregátů

Stanovení stability půdních agregátů bylo provedeno s pomocí zařízení na mokré prosívání (Obrázek 45). Postup měření se řídil podle přiloženého manuálu (*Wet sieving apparatus manual*, 2018). Jednalo se v podstatě o modifikovanou metodu Nimma a Perkinse (2002). Byly pouze použity odlišné velikosti prosévacích sít.



Obrázek 45: Příklad na mokré prosívání

Postup stanovení byl následovný:

za pomoci sít o velikosti ok 1 a 2 mm byla připravena frakce půdních agregátů 1/2. Následně byly 4 g této frakce (Obrázek 46) umístěny na sítka pro mokré prosívání. Tato sítka byla dále umístěna na horní část přístroje. Příklad obsahuje celkem 8 pozic pro tato sítka, tudíž se provedlo 8 měření najednou (pro každou půdu se provedlo právě 8 měření).



Obrázek 46: Příprava vzorku na mokré prosívání



Obrázek 47: Vzorky připravené na filtraci

Pod připravená sítka byly umístěny kovové nádoby s destilovanou vodou, pomocí kterých bude probíhat mokré prosívání. Před samotným prosíváním byly vzorky zvlhčeny také destilovanou vodou a ponechány 5 – 10 minut v klidu. Následně probíhalo pomocí přístroje mokré prosívání po dobu 3 minut. Sítka se pohybovala v amplitudě 1,3 cm rychlostí 34 zdvihů za minutu. Po dokončení procedury byly nádoby s vodou a rozrušenými agregáty vyměněny za nádoby s rozpuštěným

dispergačním činidlem. Mokrý prosívání v činidle probíhalo, dokud nebyly všechny agregáty zcela rozpuštěny.

Poté byl obsah nádobek (Obrázek 47) přefiltrován přes filtrační papír, který byl následně vysušen (105 °C na 24 hodin) a zvážen. Podle hmotností nestabilních agregátů, rozpuštěných ve vodě, a stabilních agregátů, rozpuštěných v dispergačním činidle, byla určena výsledná stabilita půdních agregátů následovně.

$$WSA = \frac{WDS}{WDS+WDW} \quad (23)$$

kde,

WSA – index stability půdních agregátů [%]

WDW – hmotnost stabilních agregátů dispergovaných ve vodě [g]

WDS – hmotnost nestabilních agregátů dispergovaných činidlem [g]

Výsledky z provedených měření jsou zobrazeny v tabulce (Tabulka 20).

Tabulka 20: Vypočtené hodnoty stability půdních agregátů

Povrch	Stabilita půdních agregátů [%]			
	Min.	Max.	Průměr	Směr. odch.
Seťové lože (21.10.)	43,77	64,73	55,86	5,97
Seťové lože (24.10.)	45,55	70,07	60,78	7,30
Seťové lože (25.10.)	50,56	65,70	57,83	4,81

8.2 Výpočet a vyhodnocení erozních parametrů

Pro výpočet kritického tečného napětí τ_c a koeficientu erodibility k_d byl použit již zmíněný Excel s makry vytvořený Mahalderem (2014). K výpočtům bylo použito celkem 69 datových sad z provedených simulací.

8.2.1 Postup výpočtu

Před samotným výpočtem bylo potřeba do záložky „JET CALIBRATION“ zadat parametry zařízení: průměr trysky (*Nozzle Diameter*) a hodnotu kalibračního koeficientu (*Cd*) (Obrázek 48).

JET ID	Point Gage Reading at Nozzle (mm)	Nozzle Diameter (in)	Cd
1	0	0,125984252	0,6959

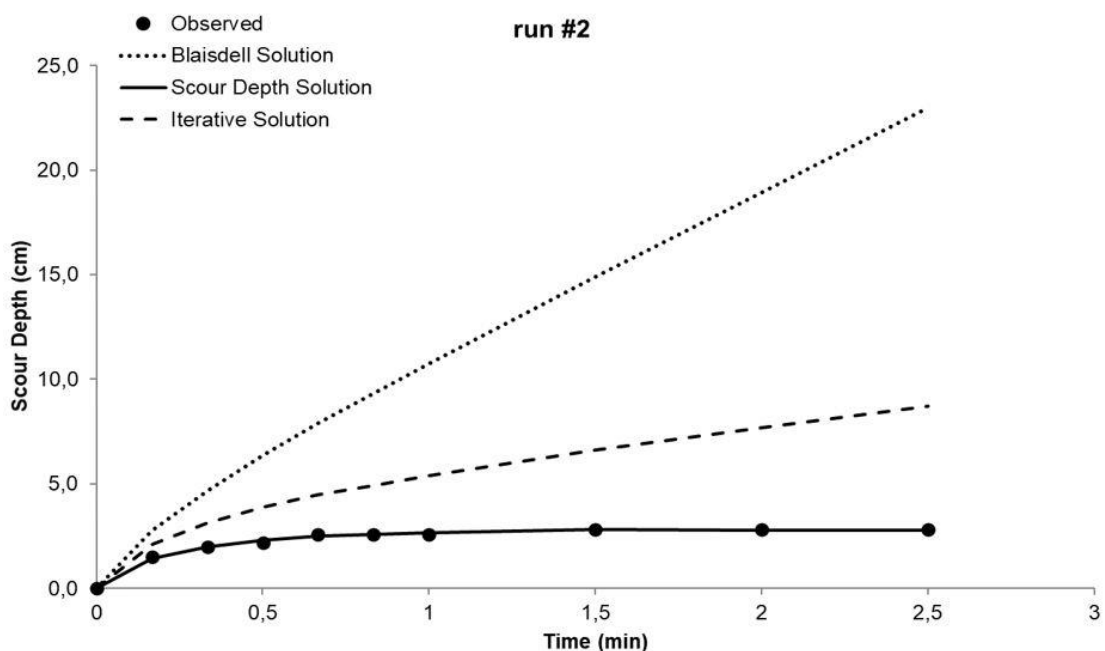
Obrázek 48: Parametry přístroje použitého při simulacích

Následně bylo potřeba v záložce „Data Input“ vyplnit údaje o průběhu hloubky erozního kráteru (*Pt Gage Reading*) (naměřené hloubky bylo potřeba před zapsáním do tabulky zmenšit o **18 mm**, protože hloubkové měřidlo je vůči trysce posunuté právě o 18 mm) v čase (*Diff Time*) a hodnotu nastaveného tlaku přepočteného na tlakovou výšku v palcích (*Head*) (Obrázek 49).

Scour Depth Readings						Head Setting	
Time (min)	Diff Time (min)	Pt Gage Reading (mm)	Depth (ft)	Pt Gage Reading (ft)	Maximum Depth of Scour (ft)	Time (min)	Head (in)
0	0	60	0,197	0,803	0,000	0	55,36
0,1667	0,1667	75	0,246	0,754	0,049	0,1667	55,36
0,3334	0,1667	80	0,262	0,738	0,066	0,3334	55,36
0,5001	0,1667	82	0,269	0,731	0,072	0,5001	55,36
0,6668	0,1667	86	0,282	0,718	0,085	0,6668	55,36
0,8335	0,1667	86	0,282	0,718	0,085	0,8335	55,36
1,0002	0,1667	86	0,282	0,718	0,085	1,0002	55,36
1,5002	0,5	88	0,289	0,711	0,092	1,5002	55,36
2,0002	0,5	88	0,289	0,711	0,092	2,0002	55,36
2,5002	0,5	88	0,289	0,711	0,092	2,5002	55,36

Obrázek 49: Tabulka pro vyplnění hodnot hloubek, času a tlaku (vyznačeno oranžově)

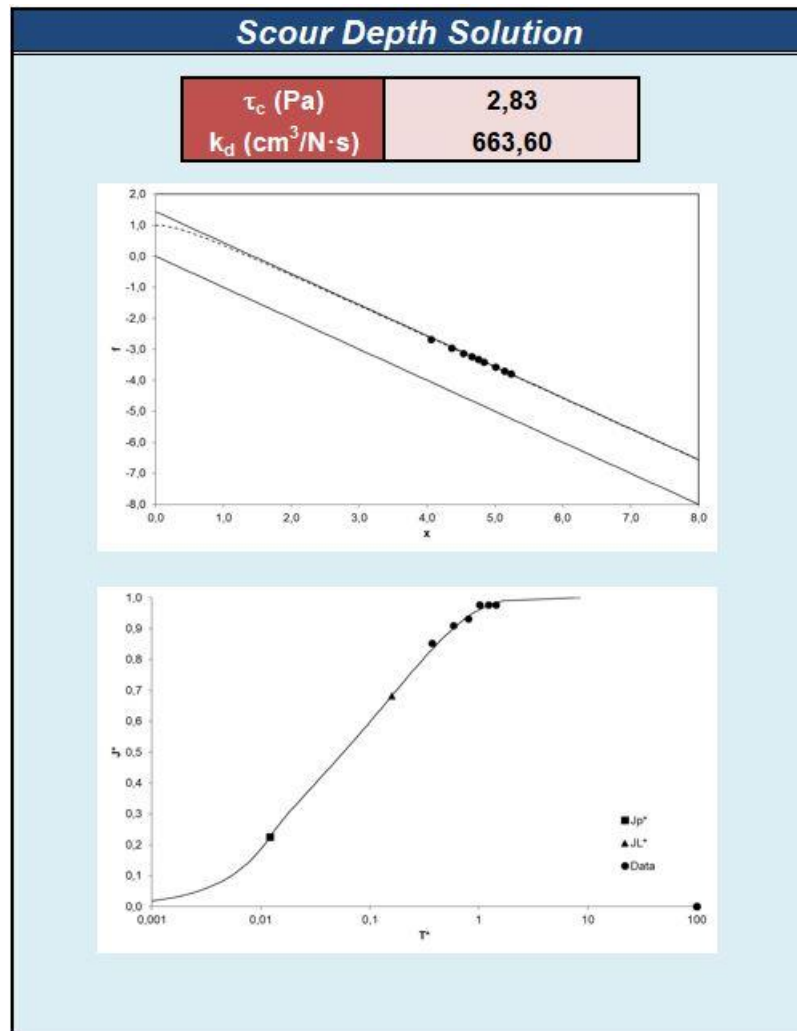
Poté byl spuštěn výpočet v záložce „Solve“ tlačítkem SOLVE WORKBOOK. Tím byly vypočteny hodnoty erozních parametrů pomocí tří metod (BM, SDM, IM). Po provedeném výpočtu záložka „Solve“ obsahuje srovnávací graf, podle kterého si uživatel může určit jaké výsledky použije (Graf 16).



Graf 16: Srovnávací graf výpočetních metod

Z grafu (Graf 16) je patrné, že pro data, naměřená v rámci této práce, bude nejvíce odpovídat metoda „Scour Depth“ (SDM). Proto je také použita pro všechny výpočty, které byly provedeny v této práci.

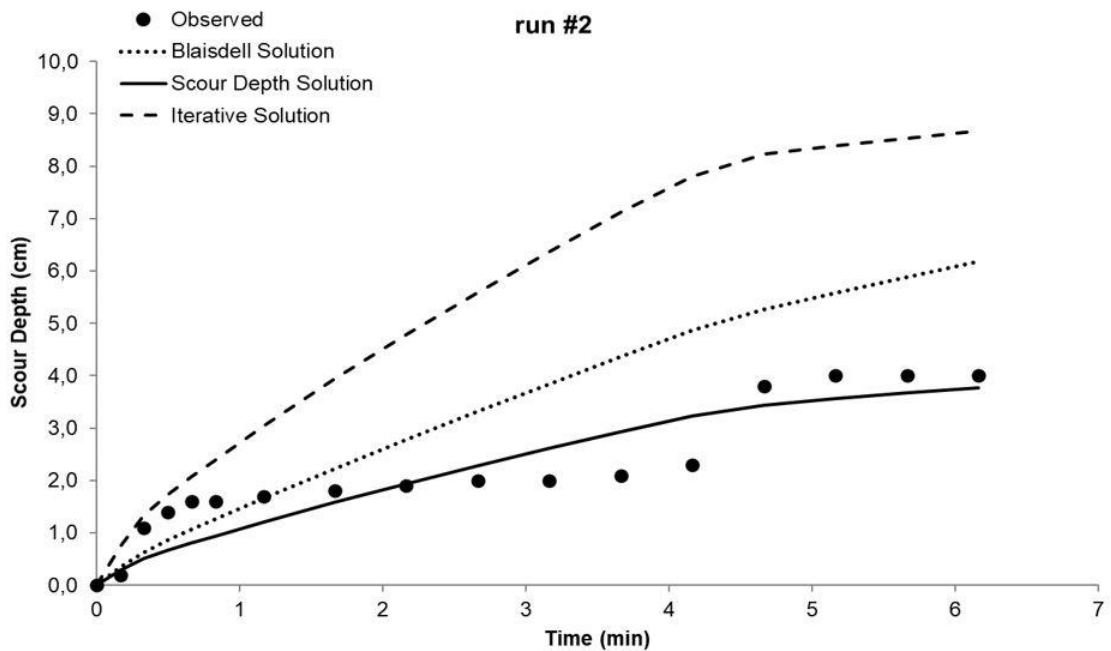
Záložka „Solve“ také obsahuje výsledné hodnoty erozních parametrů, a grafy hledání řešení pomocí funkcí, které byly blíže popsány v kapitole 4.2 (Obrázek 50).



Obrázek 50: Výsledné hodnoty erozních parametrů vypočtených metodou SDM

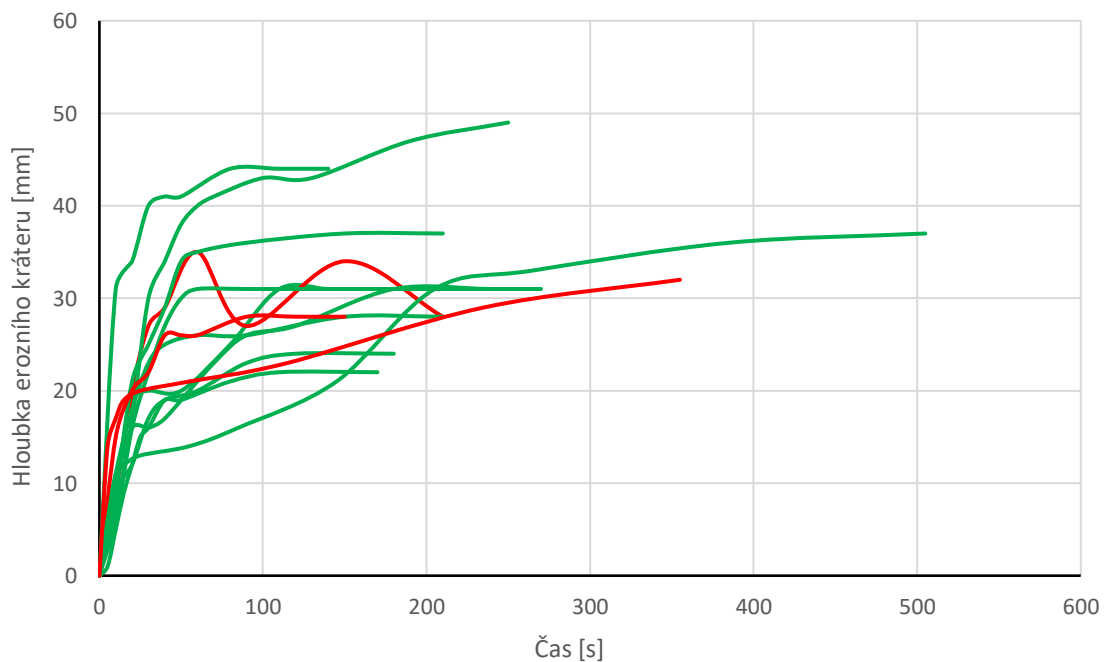
8.2.2 Výsledky a zhodnocení

Ze 69 simulací, pomocí kterých byly vypočteny erozní parametry, bylo 17 simulací vyřazeno. 7 simulací se nepovedlo vypočítat – algoritmus nenašel řešení, 10 simulací nebylo použito z důvodu průběhu hloubky kráteru v čase, který neodpovídal použité výpočetní metodě (Graf 17).

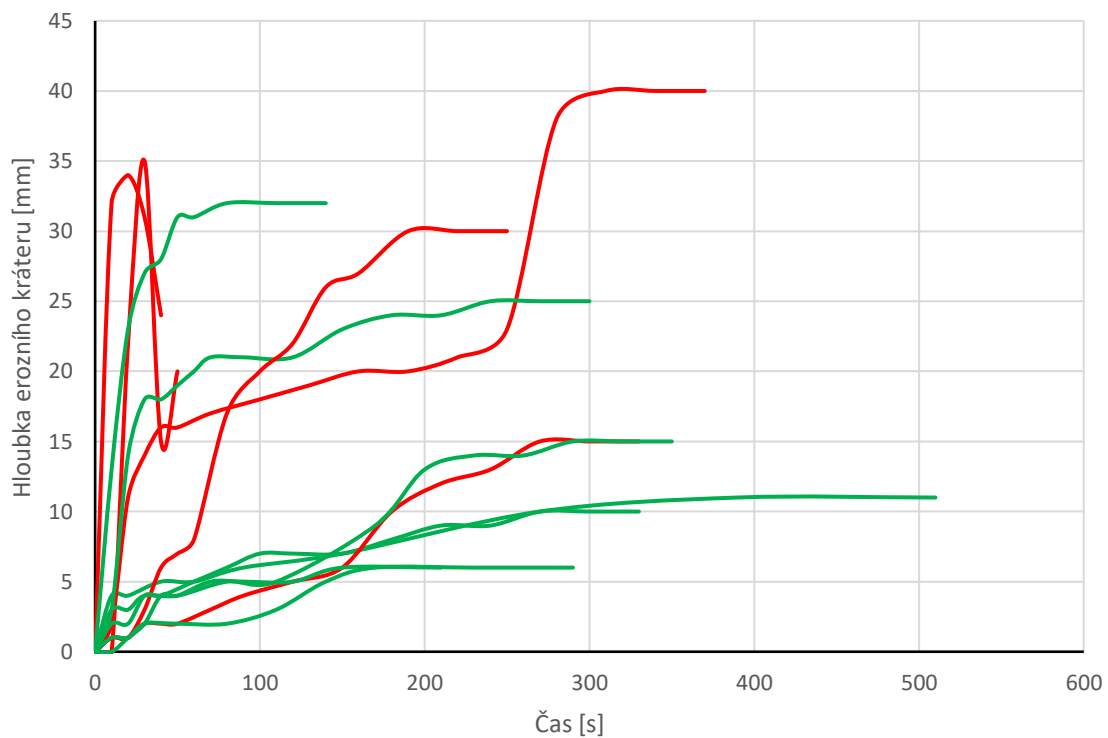


Graf 17: Simulace vyřazená z výsledků díky průběhu hloubky krátera

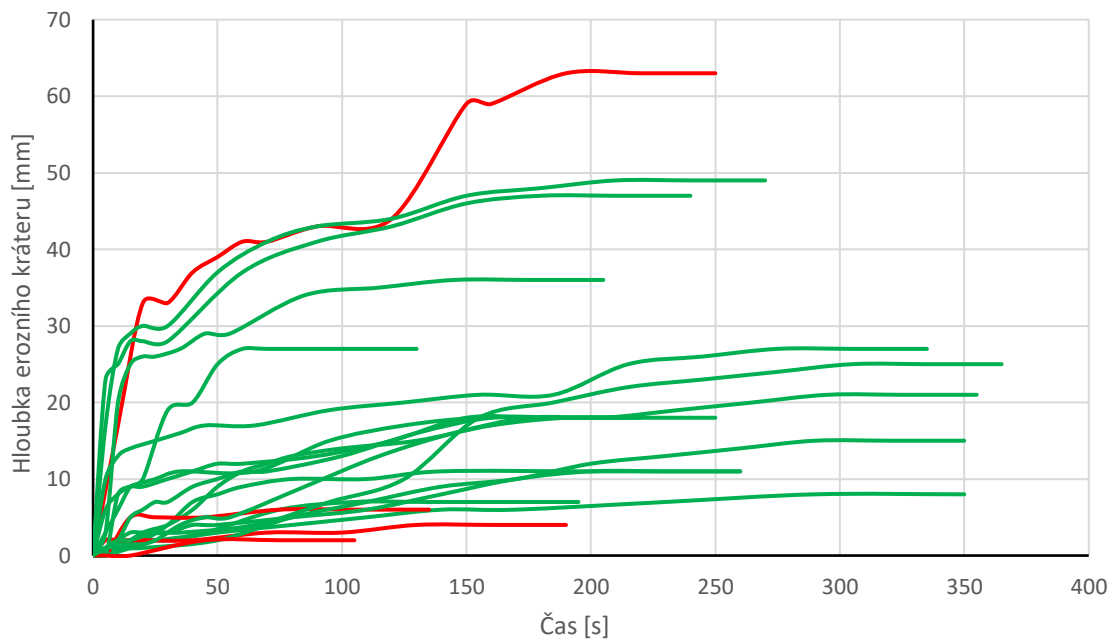
V níže uvedených grafech (Graf 18, Graf 20, Graf 19, Graf 21) jsou zobrazeny průběhy hloubek ze simulací, přičemž červeně jsou vyznačeny simulace, které nebyly použity pro výpočet erozních parametrů. Zeleně vyznačené simulace naopak byly použity pro výpočet erozních parametrů.



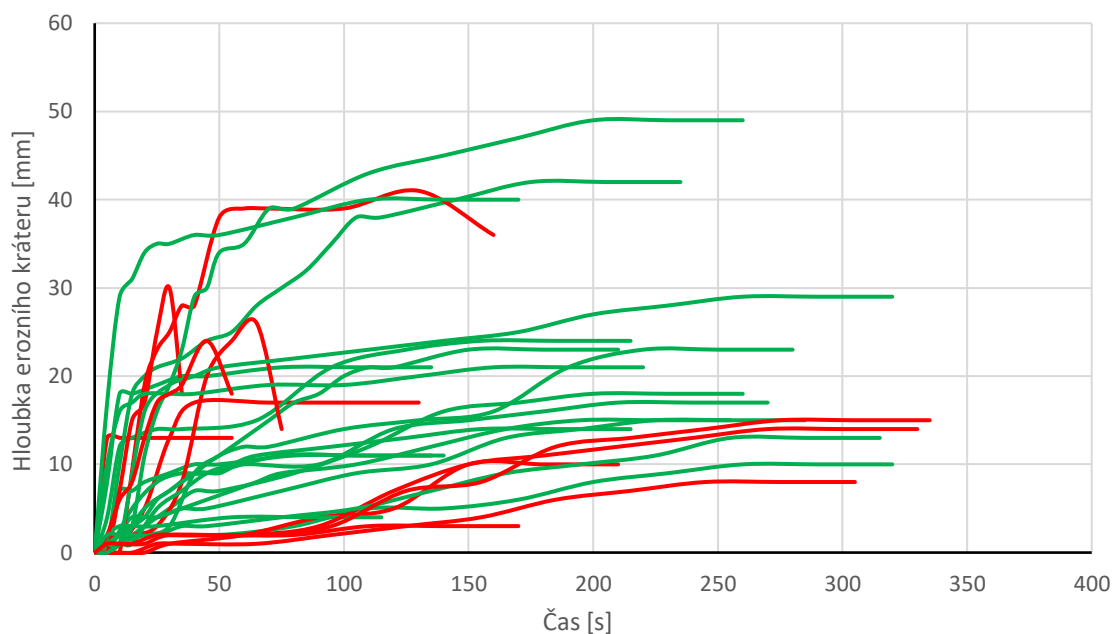
Graf 18: Průběh hloubek při simulacích na válcovaném úhuru (8.7.2020, 10.9.2020) a vyznačení nepoužitých simulací k výpočtu erozních parametrů (nepoužité vyznačeny červeně)



Graf 20: Průběh hloubek při simulacích na povrchu seťového lože 21.10.2020 a vyznačení nepoužitých simulací k výpočtu erozních parametrů (nepoužité vyznačeny červeně)



Graf 19: Průběh hloubek při simulacích na povrchu seťového lože 24.10.2020 a vyznačení nepoužitých simulací k výpočtu erozních parametrů (nepoužité vyznačeny červeně)

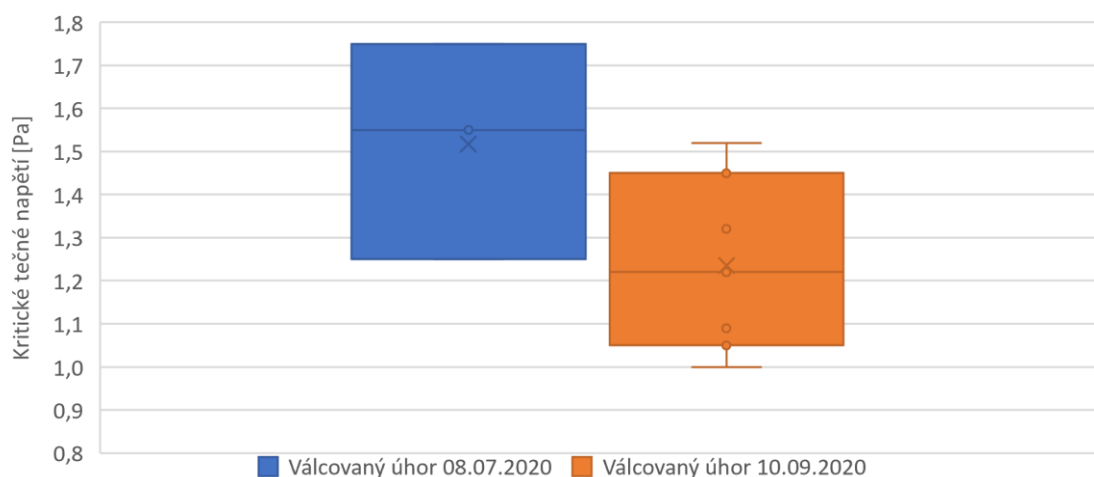


Graf 21: Průběh hloubek při simulacích na povrchu seťového lože 25.10.2020 a vyznačení nepoužitých simulací k výpočtu erozních parametrů (nepoužité vyznačeny červeně)

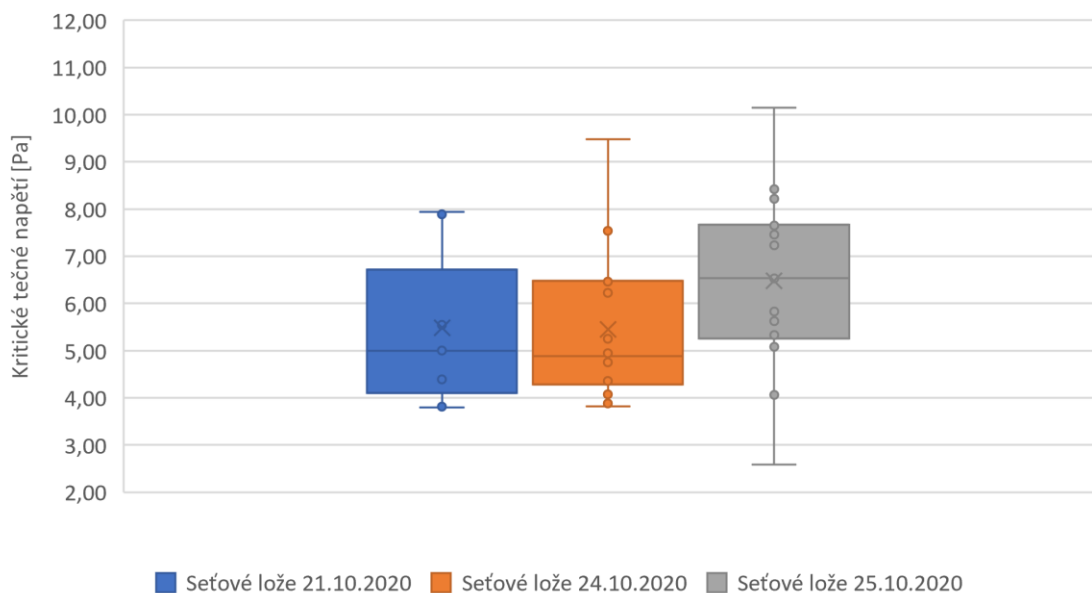
Z použitých 52 simulací byly vypočteny erozní parametry jejichž výsledky jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 21).

Tabulka 21: Výsledné hodnoty kritického tečného napětí

Povrch	Kritické tečné napětí [Pa]			
	Min.	Max.	Průměr	Směr. odch.
válcovaný úhor (8.7.2020)	1,25	1,75	1,52	0,21
válcovaný úhor (10.9.2020)	1,00	1,52	1,24	0,19
seťové lože (21.10.2020)	3,79	7,94	5,48	1,64
seťové lože (24.10.2020)	3,82	9,48	5,45	1,52
seťové lože (25.10.2020)	2,58	10,15	6,48	1,73



Graf 22: Variabilita hodnot kritického tečného napětí na válcovaném úhoru



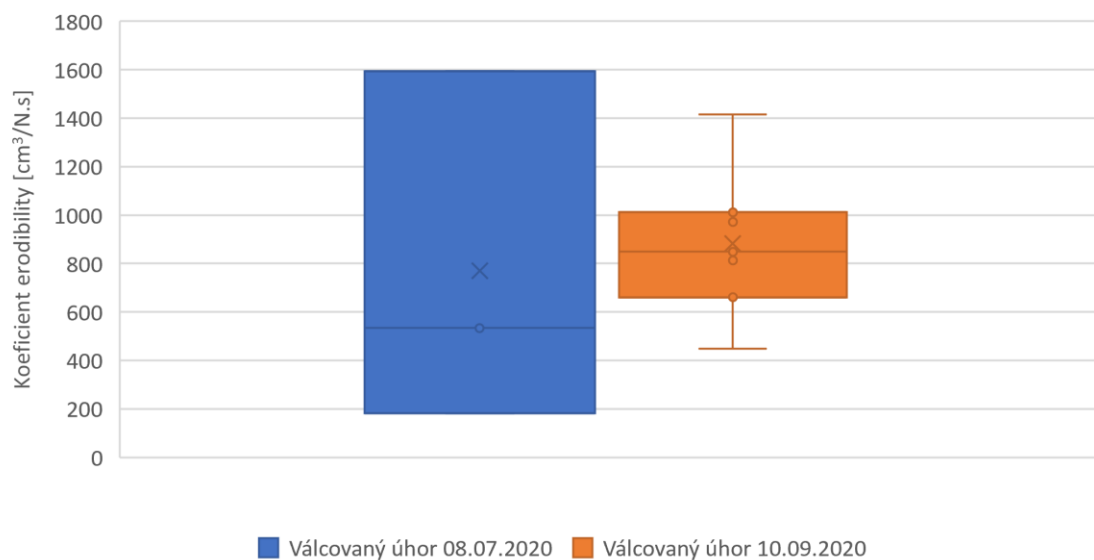
Graf 23: Variabilita hodnot kritického tečného napětí na povrchu seťového lože

Jak je patrné z výsledků (*Tabulka 21, Graf 22*), vypočtené hodnoty průměrného kritického tečného napětí pro povrchy válcovaného úhoru se pohybují od 1,24 do 1,52 Pa. Variabilita těchto hodnot je velmi nízká (směrodatná odchylka 0,19 – 0,21). Tato variabilita může být způsobena drobnými rozdíly mezi půdními povrchy. Může to být mírně rozdílná objemová hmotnost, vlhkost či stabilita půdních agregátů. Jelikož u povrchu válcovaného úhoru byly odebrány půdní vzorky pouze u jedné série simulací, nelze jednoznačně určit důvod této variability. V neposlední řadě může být mírná variabilita způsobená chybami, které vznikly během simulace (kapitola 9.2).

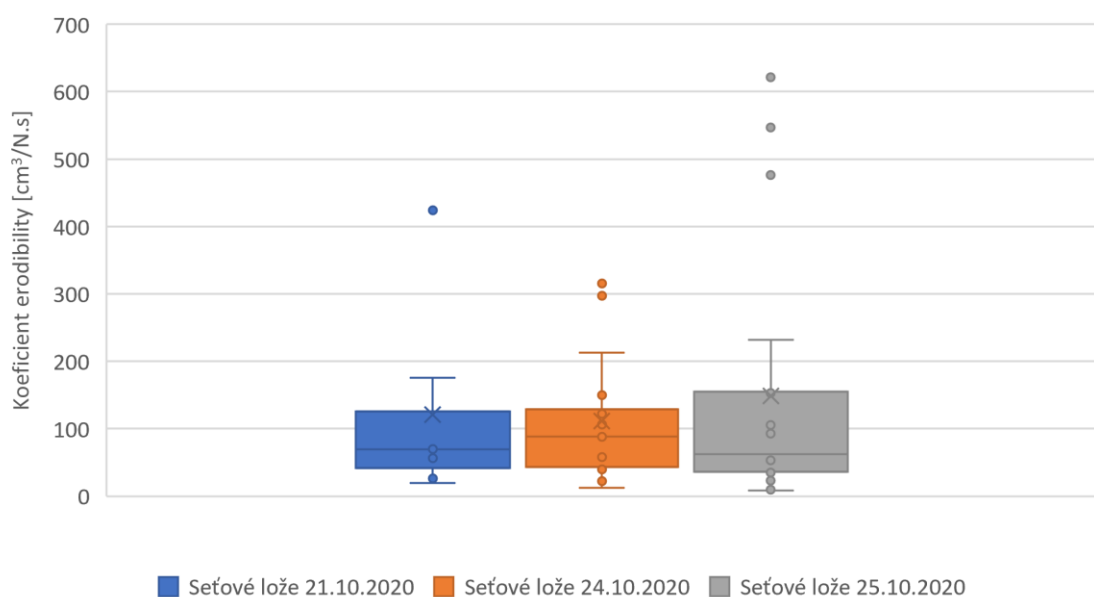
Vypočtené hodnoty průměrného kritického tečného napětí pro povrchy seťového lože (*Tabulka 21, Graf 23*) dosahují vyšších hodnot (5,48 – 6,48 Pa) než u válcovaného úhoru. To je způsobeno především objemovou hmotností, které je vyšší u seťového lože než u válcovaného úhoru (*Tabulka 18*). Naopak u tohoto povrchu došlo k větší variabilitě výsledných hodnot (směrodatná odchylka 1,52 – 1,73). Tato variabilita může být způsobena stejnými vlivy jako v předešlém případě, ale také může být způsobena heterogenitou půdního prostředí. Jistou variabilitu výsledků by mohla také způsobovat půdní vlhkost, ale díky simulacím provedených za téměř totožných podmínek, nelze tuto závislost ověřit.

Tabulka 22: Výsledné hodnoty koeficientu erodibility

Povrch	Koeficient erodibility [$\text{cm}^3/\text{N.s}$]			
	Min.	Max.	Průměr	Směr. odch.
válcovaný úhor (8.7.2020)	182,52	1594,02	769,99	600,03
válcovaný úhor (10.9.2020)	448,53	1415,05	881,40	280,75
seťové lože (21.10.2020)	19,19	424,21	121,18	132,55
seťové lože (24.10.2020)	12,38	315,15	111,33	88,81
seťové lože (25.10.2020)	8,16	620,97	148,75	183,10



Graf 24: Variabilita hodnot koeficientu erodibility na válcovaném úhoru



Graf 25: Variabilita hodnot koeficientu erodibility na povrchu seťového lože

Jak je patrné z výsledků (*Tabulka 22, Graf 24*), průměrné hodnoty koeficientu erodibility pro válcovaný úhor dosahují 769,99 – 881,40 cm³/N.s. Vykazují také extrémně vysokou variabilitu výsledných hodnot (*Graf 24*). Důvodem takto vysokých hodnot bude značná nesoudržnost půdy (předem nakypřená a uválcovaná). Vysoká variabilita může být také způsobena chybami při měření (kapitola 9.2).

Oproti tomu průměrné hodnoty koeficientu erodibility seťového lože (*Tabulka 22*) jsou výrazně nižší (111,33 – 148,75 cm³/N.s), ale také s velmi vysokou variabilitou (*Graf 25*). Jelikož je tato půda soudržnější, hodnoty koeficientu erodibility jsou tím menší. Důvod vysoké variability je stejný jako u válcovaného úhoru.

9 KRITICKÉ ZHODNOCENÍ ZAŘÍZENÍ A MOŽNÉ CHYBY VZNIKLÉ PŘI MĚŘENÍ A VÝPOČTECH

Tato kapitola popisuje zhodnocení zařízení Mini-JET a možných chyb, kterých se může uživatel dopustit při terénním experimentu.

9.1 Zhodnocení konstrukce zařízení

Z obecného hlediska autor práce hodnotí konstrukci modifikovaného zařízení Mini-JET velmi kladně. Lze však poukázat na problémy, které nastaly během experimentů a drobné nedostatky konstrukce.

9.1.1 Problémy vzniklé při užívání

V průběhu testování modifikovaného přístroje Mini-JET se vyskytlo pár problémů se samotnou konstrukcí přístroje. Zde je výčet závad a problémů, které se v průběhu testování vyskytly. Na jejich základě byly navrženy úpravy, z nichž některé byly i v rámci práce na DP realizovány.

Složitá demontáž po provedeném experimentu

Tato závada se projevila při prvním terénním měření. Jelikož asi dva týdny před měřením byla prováděna v laboratoři první kalibrace přístroje, dosedací plocha na základovém prstenci, kam se umísťuje těsnění a následně zaplavovací nádrž, značně zkorodovala a zabránila oddělení těchto dvou částí.

Závada byla vyřešena zvětšením vůle mezi těmito částmi vyfrézováním. Těsnost systému zůstala zachována.

Zablokovaná otočná deska

Tato závada se projevila také při prvním terénním měření. Nejspíše byla na vině také koroze mezi zaplavovací nádrží a otočnou deskou, případně zanesení styčné plochy pŕdními částicemi.

Závada byla vyřešena zvětšením vůle mezi zaplavovací nádrží a otočnou deskou. Těsnost systému zůstala zachována.

Velký rozsah manometru

Tento problém se projevil také při prvním terénním měření. Při měření manometr ukazoval stále nulový tlak. Důvod, proč manometr neukazoval aktuální tlak, byl nejspíše příliš vysoký rozsah manometru (do 36 psi), což způsobuje jeho nízkou citlivost při tlacích, které byly pro experimenty použity.

Závada byla vyřešena zakoupením nového manometru s nižším rozsahem pracovních tlaků (do 23 psi). S tímto manometrem byly měřeny veškeré experimenty v této práci. Je zde ale riziko, že současný manometr není dostatečně přesný, a proto byl objednáno manometr s ještě menším rozsahem (do 5,6 psi). Tímto manometrem se v budoucnu zkontroluje přesnost vypočteného kalibračního koeficientu.

9.1.2 Nedostatky konstrukce

V průběhu provádění experimentů autor práce narazil na drobný nedostatek, který doporučuje vyřešit.

Absence odvzdušňovacího ventilu

Během testování se vyskytly problémy s odvzdušňováním systému. Při nedokonalém odvzdušnění se zbytkový vzduch nahromadí v nejvyšším místě v systému, tj. u manometru. Manometr poté neměří a je potřeba ho vyšroubovat, aby přebytečný vzduch mohl uniknout. To by do budoucna mohl vyřešit odvzdušňovací ventil, který by se umístil do nejvyššího místa v systému tak, aby se dal systém odvzdušnit bez potřeby demontáže manometru. Uživatelsky by se tím práce s tímto přístrojem výrazně usnadnila.

9.2 Možné chyby při měření

Nedokonalé odvzdušnění systému

Tento bod souvisí s absencí odvzdušňovacího ventilu. Při nedokonalém odvzdušnění dochází k nesprávné funkci manometru, takže naměřené hodnoty nemusí odpovídat skutečnosti. To se samozřejmě negativně promítne do vypočtených erozních koeficientů.

Nehomogenní půdní prostředí

Metodika výpočtu erozních parametrů předpokládá homogenní půdní prostředí v místě simulace. Pokud půdní prostředí není homogenní, výrazně to může ovlivnit výsledné hodnoty erozních parametrů.

Nedokonalé zaplavení systému

Metodika výpočtu předpokládá, že tryska bude zcela zaplavena a vodní paprsek bude zcela ponořený. Při nedokonalém zaplavení nebudou platit vztahy, které jsou využity v jednotlivých metodách.

Ovládání hloubkového měřidla

Pokud při měření došlo k rychlému spuštění měřidla do kráteru, kinetická energie měřidla může kráter prohloubit a tím zkreslit naměřené hodnoty. Vždy je potřeba hloubkové měřidlo spouštět do erozního kráteru pomalu a opatrně.

Po změření hloubky kráteru je třeba hloubkové měřidlo zaaretovat. Pokud dojde k opomenutí toho úkonu, při následném otočení do pracovní polohy hloubkové měřidlo vyryje v kráteru rýhu, čímž je experiment znehodnocen.

Nastavení tlaku

Jelikož při terénním měření ještě přístroj nebyl osazen jemným ventilem, bylo ovládání tlaku prováděno pomocí ventilu kulového. V tomto případě nastavení tlaku vždy zabralo minimálně 2 sekundy. To mohlo také značně ovlivnit výsledné erozní parametry. V současnosti je tato chyba již eliminována osazením jemného ventilu pro regulaci tlaku.

Špatným výběrem měřícího tlaku se lze dopustit chyby, protože pro přesný výpočet, je potřeba mít co nejpřesněji zmapovaný průběh hloubky erozního kráteru v čase.

Výskyt nežádoucího předmětu v půdě

Pokud se přímo v erozním kráteru vyskytne nežádoucí předmět jako je například větší kámen či kořen, prohlubování kráteru se zastaví. Pokud by si uživatel nevšiml nežádoucích předmětů a považoval tento experiment jako úspěšný, následně vypočtené hodnoty by byly zcela chybné.

9.3 Možné chyby při výpočtu erozních parametrů

Chybně vypočtený kalibrační koeficient

Pokud by se při kalibraci chybně naměřil průtok vody, nebude hodnota kalibračního koeficientu, který vstupuje do výpočtu erozních parametrů, správná. Tento problém ale úzce souvisí především s přesností použitého manometru.

Chybné vložení hloubek do výpočetní tabulky

Jelikož do výpočtu potřebujeme znát vzdálenost trysky ode dna kráteru, je potřeba od naměřené hloubky odečíst hodnotu **18 mm**. Hloubkové měřidlo je od počátku trysky posunuto právě o tuto hodnotu. Při opomenutí odečtu této hodnoty se uživatel dopouští chyby.

Průběh hloubky erozního kráteru

Pokud je průběh hloubky kráteru jiný než průběh použité metody (*Graf 17*), výsledky erozních parametrů budou nepřesné. Takové měření je třeba vyřadit z hodnocení.

10 DISKUZE

Pro otestování modifikovaného zařízení Mini-JET byly využity dva typy půdního povrchu. Byl to povrch válcovaného úhoru o objemové hmotnosti $1,348 \text{ g/cm}^3$ a vlhkosti 19,53 % a povrch seťového lože o objemové hmotnosti $1,827 \text{ g/cm}^3$, vlhkosti 30,62 % a stabilitě půdních agregátů 58,16 %. Půda seťového lože byla také klasifikována jako prachovitá hlína (jíl - 9,04 %, prach - 56,25 %, písek - 34,71 %).

Po provedených experimentech byl proveden výpočet erozních parametrů. U válcovaného úhoru byla průměrná hodnota kritického tečného napětí 1,38 Pa se směrodatnou odchylkou 0,20 a průměrná hodnota koeficientu erodibility byla $825,70 \text{ cm}^3/\text{N.s}$ se směrodatnou odchylkou 440,39. Jelikož autor nedohledal žádnou publikaci, ve které by byly testovány značně nesoudržné půdy, nelze výsledky s ničím porovnat.

Naopak půda seťového lože byla soudržnější a průměrná hodnota kritického tečného napětí zde dosahovala hodnoty 5,80 Pa, podobně jako ve studii Mahaldera (2018), který testoval půdu o objemové hmotnosti $1,80 \text{ g/cm}^3$ a vlhkostí okolo 30 %. Při použití metody SDM Mahalder (2018), uvádí výsledné průměrné kritické tečné 6,88 Pa se směrodatnou odchylkou 3,78. To jsou velmi podobné hodnoty, tedy lze konstatovat, že na tomto povrchu zařízení je schopno měřit kritické tečné napětí.

Jako další následoval koeficient erodibility, kde jeho průměrná hodnota vycházela $127,09 \text{ cm}^3/\text{N.s}$ se směrodatnou odchylkou 134,82. Ve své studii Mahalder (2018) uvádí koeficient erodibility výrazně nižší, konkrétně $12,28 \text{ cm}^3/\text{N.s}$ se směrodatnou odchylkou 13,02. Tato nesourodost výsledků je způsobena pravděpodobně tím, že dosavadní studie (Hanson, 2004; Daly, 2013; Al-Madhhachi, 2013; Mahalder, 2018) se věnovaly testováním zařízení na soudržných půdách (zejména půdy na březích vodních toků), oproti tomu tato DP testuje zařízení na nesoudržných půdách. Výsledky ale naznačují, že s klesající soudržností půd koeficient erodibility roste.

Pomocí SDM také testoval Daly (2013), kterému u soudržných půd kritické tečné napětí vycházelo 1,2 – 16,4 Pa a koeficient erodibility 2,0 – $210,8 \text{ cm}^3/\text{N.s}$. Lze tedy pozorovat, že velká variabilita výsledků panuje i mezi ostatními autory.

Stanovení závislosti erozních parametrů a půdních charakteristik nemohlo být zpracováno, jelikož experimenty byly provedeny pouze na dvou typech půdního povrchu. Pro stanovení závislostí by bylo potřeba provést měření pro více typů

povrchů s odlišnými půdními charakteristikami. Do budoucna ale mohou být data obsažená v této práci využita pro stanovení těchto závislostí.

11 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zjistit, zda se pomocí modifikované konstrukce zařízení Mini-JET dají stanovovat kritická tečná napětí i na nesoudržných půdách jako jsou například půdy na zemědělských pozemcích.

Jako první byl modifikovaný přístroj Mini-JET představen a podrobně popsán. Byly také popsány konstrukční změny, které byly provedeny v rámci testování. Dále byly provedeny kalibrace přístroje za účelem zjištění kalibračního koeficientu. Po poslední úspěšné kalibraci byl vypočten kalibrační koeficient, který byl následně použit pro výpočet erozních parametrů.

Poté bylo podrobně popsáno testování přístroje, které probíhalo na experimentálních plochách u obce Řisuty. Testování probíhalo na dvou typech půdních povrchů (válcovaný úhor, setové lože). Celkem bylo provedeno 75 simulací, z toho bylo 6 simulací neúspěšných. Úspěšnost simulací tak činila 92 %. Na základě provedených experimentů byl navržen standardizovaný postup pro terénní měření.

Dále následovalo zpracování naměřených dat a půdních vzorků. U půdních vzorků byla zjištěna objemová hmotnost, vlhkost, zrnitostní složení a stabilita agregátů. Pomocí nástroje „Jet Erosion Test Spreadsheet Tool“ byly vypočteny erozní parametry kritické tečné napětí a koeficient erodibility. Ze 69 simulací, které byly použity pro výpočty, nebylo 17 simulací použito pro následné vyhodnocení parametrů z důvodu chyby ve výpočtu nebo nekorespondujícímu průběhu naměřených hloubek s použitou metodou výpočtu. Úspěšnost výpočtu erozních parametrů činila 75,4 %.

Autorem byly také popsány zjištěné nedostatky konstrukce, které by bylo vhodné do budoucna vyřešit. Také byly popsány možné chyby, kterých se může uživatel dopustit. Minimalizací těchto nedostatků a chyb by bylo možné dosáhnout mnohem menší variability výsledných erozních parametrů. Také by bylo možno zvýšit celkovou úspěšnost metody SDM, která v této práci činí 69,3 %.

Z vypočtených výsledků erozních parametrů, které byly také porovnány s ostatními autory, vyplynulo, že zařízení použité v této práci lze použít pro měření kritického tečného napětí i na nesoudržných půdách jako jsou například zemědělské pozemky.

Do budoucna autor doporučuje provést experimenty na půdních povřích s různými půdními charakteristikami, aby se daly určit závislosti erozních parametrů mezi těmito charakteristikami.

12 FORMULÁŘE

12.1 Mini-JET – checklist

Seznam věcí pro funkčnost systému

- Mini-JET zařízení
- Elektrocentrála
- Prodlužovací kabel
- Ponorné čerpadlo
- Hadice (k propojení čerpadla s Mini-JETem)
- Nádoba pro umístění čerpadla (sud 100 l)
- Hadice k dopouštění vody do nádoby z IBC kontejnerů (průměr 50 mm)

Seznam věcí pro doplňkové činnosti

- Sonda Hydrosence II (pro měření půdní vlhkosti)
- Sada pro odběr Kopeckého válečků + Kopeckého válečky

Úkony důležité před výjezdem

- Zajistit dostatečné množství vody pro plánované simulace (10 - 20 l/simulace)
- Zajistit dostatečné množství Kopeckého válečků
- Zajistit dostatečné množství benzínu pro chod elektrocentrály

12.2 Mini-JET – záznamový formulář

Datum	
Lokalita	
Povrch	

Odebrané válečky:

Simulace č.	
Tlak [psi]	
Výchozí vzdálenost [mm]	
Doba měření [s]	Hloubka [mm]

vlhkost
%

Simulace č.	
Tlak [psi]	
Výchozí vzdálenost [mm]	
Doba měření [s]	Hloubka [mm]

vlhkost
%

Simulace č.	
Tlak [psi]	
Výchozí vzdálenost [mm]	
Doba měření [s]	Hloubka [mm]

vlhkost
%

Simulace č.	
Tlak [psi]	
Výchozí vzdálenost [mm]	
Doba měření [s]	Hloubka [mm]

vlhkost
%

13 SEZNAMY

13.1 Seznam použitých zkratek

BM	Blaisdellova metoda
DMT	Digitální model terénu
DP	Diplomová práce
DPZ	Dálkový průzkum Země
HET	Hole erosion test
IBC	Intermediate Bulk Container
IM	Iterační metoda
JET	Jet erosion test
SDM	„Scour depth“ metoda
SfM	Structure from Motion
TOC	Total Organic Carbon (celkový organický uhlík)
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (bezpilotní letadlo)
VÚMOP	Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.

13.2 Seznam obrázků

Obrázek 1: Mobilní dešťový simulátor provozovaný ČVUT v Praze.....	15
Obrázek 2: Záznam průběhu terénu pomocí erodoměru	16
Obrázek 3: Schéma HET	17
Obrázek 4: Schéma JET	17
Obrázek 5: Hexakoptéra Trimble ZX5.....	18
Obrázek 6: Původní JET zařízení.....	20
Obrázek 7: Mini-JET zařízení	21
Obrázek 8: Schéma JET a rozložení tečného napětí.....	22
Obrázek 9: Základový prsteneц Mini-JET zařízení, které bylo použito pro měření ...	29
Obrázek 10: Nová konstrukce zařízení Mini-JET – pohled 1.....	32
Obrázek 11: Nová konstrukce zařízení Mini-JET – pohled 2.....	32
Obrázek 12: Základový prsteneц - pohled shora.....	32
Obrázek 13: Základový prsteneц - pohled z boku.....	32
Obrázek 14: Zaplavovací nádrž zařízení Mini-JET	33
Obrázek 15: Kulový ventil	34
Obrázek 16: Jemný ventil pro regulaci tlaku v systému	34
Obrázek 17: Rychlospojka před kulovým ventilem	34
Obrázek 18: Otočná deska - pracovní poloha	35
Obrázek 19: Otočná deska - čtecí poloha	35
Obrázek 20: Pohled na hloubkové měřidlo	36
Obrázek 21: Pohled na trysku a spodní část hloubkového měřidla.....	36
Obrázek 22: Manometr s rozsahem do 23 psi	36
Obrázek 23: Schéma zařízení Mini-JET v pracovní poloze	37
Obrázek 24: Schéma zařízení Mini-JET ve čtecí poloze	38
Obrázek 25: Manometr použitý při 1. kalibraci.....	41
Obrázek 26: Mariottova láhev použitá při kalibraci	42
Obrázek 27: Detail umístění otvorů	42
Obrázek 28: Ukázka výškového rozdílu 72,5 cm.....	43
Obrázek 29: Ukázka výškového rozdílu 121,7 cm	43
Obrázek 30: Vyznačení experimentálních ploch u obce Řisuty	52
Obrázek 31: Umístění ploch, které byly využity při měření.....	53
Obrázek 32: Válcovaný úhor.....	53
Obrázek 33: Stav půdního povrchu po zasetí žita	54
Obrázek 34: Osazení základového prstence.....	57

Obrázek 35: Měření vlhkosti půdy pomocí sondy HydroSense II	58
Obrázek 36: Pořízený snímek půdního povrchu před experimentem	58
Obrázek 37: Napouštění systému	58
Obrázek 38: Průběh měření s tlakem 4 psi.....	59
Obrázek 39: Odečet hloubky pomocí měřidla.....	59
Obrázek 40: Zapisování naměřených hodnot do formuláře	60
Obrázek 41: Snímek erozního kráteru po simulaci	60
Obrázek 42: Vysušené půdní vzorky.....	63
Obrázek 43: Příklad MASTERSIZER 3000	64
Obrázek 44: Stanovení půdního druhu pomocí trojúhelníkového diagramu	65
Obrázek 45: Příklad na mokré prosívání.....	66
Obrázek 46: Příprava vzorku na mokré prosívání.....	66
Obrázek 47: Vzorky připravené na filtraci	66
Obrázek 48: Parametry přístroje použitého při simulacích	67
Obrázek 49: Tabulka pro vyplnění hodnot hloubek, času a tlaku	68
Obrázek 50: Výsledné hodnoty erozních parametrů vypočtených metodou SDM..	69

13.3 Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty erozních parametrů vypočtených různými metodami.....	28
Tabulka 2: Výsledné hodnoty erozních parametrů ze simulací 2019.....	30
Tabulka 3: Záznamová tabulka výsledků - ukázka.....	40
Tabulka 4: Výsledné hodnoty průtoků	40
Tabulka 5: Záznamová tabulka výsledků - ukázka (Mariottova láhev).....	43
Tabulka 6: Záznamová tabulka výsledků - ukázka (manometr).....	44
Tabulka 7: Konstantní veličiny	45
Tabulka 8: Výpočet ztrát.....	46
Tabulka 9: Výsledky měření průtoků pomocí Mariottovy láhve.....	46
Tabulka 10: Výsledky měření průtoků pomocí manometru	46
Tabulka 11: Záznamová tabulka výsledků měření - ukázka	48
Tabulka 12: Výsledky měření.....	48
Tabulka 13: Naměřené a vypočtené hodnoty pro výpočet kalibračního koeficientu	50
Tabulka 14: Vypočtené půdní charakteristiky pro válcovaný úhor.....	54
Tabulka 15: Zrnitostní složení	56
Tabulka 16: Základní půdní charakteristiky	56
Tabulka 17: Formulář pro zapisování naměřených hodnot - ukázka	60
Tabulka 18: Vypočtené hodnoty objemové hmotnosti půdy.....	64
Tabulka 19: Vypočtené hodnoty objemové vlhkosti půdy.....	64
Tabulka 20: Vypočtené hodnoty stability půdních agregátů	67
Tabulka 21: Výsledné hodnoty kritického tečného napětí.....	72
Tabulka 22: Výsledné hodnoty koeficientu erodibility	74

13.4 Seznam grafů

Graf 1: Hledání řešení pomocí funkcí T^* a J^*	24
Graf 2: Hledání řešení pomocí funkcí x a f	24
Graf 3: Odvození vztahu pro výpočet koeficientu erodibility k_d	26
Graf 4: Průběh naměřených hodnot hloubek erozního kráteru v čase s oběma zařizeními	26
Graf 5: Závislost erozních parametrů naměřených pomocí obou zařizení a následné zohlednění velikosti trysky	27
Graf 6: Erozní parametry vypočtené různými metodami na dvou typech půdy	27
Graf 7: Graf pro výběr správné metody výpočtu erozních parametrů	28
Graf 8: Závislost erozních parametrů	30
Graf 9: Závislost průtoku a tlaku	40
Graf 10: Zobrazené výsledky z kalibrace č. 2	47
Graf 11: Závislost průtoku a tlaku	48
Graf 12: Určení kalibračního koeficientu	50
Graf 13: Denní srážkové úhrny od setí do terénního měření	55
Graf 14: Hodinové srážkové úhrny 14.10.2020	55
Graf 15: Zrnitostní křivka půdy seťového lůžka (21.10.)	65
Graf 16: Srovnávací graf výpočetních metod	68
Graf 17: Simulace vyřazená z výsledků díky průběhu hloubky kráteru	70
Graf 18: Průběh hloubek při simulacích na válcovaném úhoru (8.7.2020, 10.9.2020) a vyznačení nepoužitých simulací k výpočtu erozních parametrů	70
Graf 20: Průběh hloubek při simulacích na povrchu seťového lože 24.10.2020 a vyznačení nepoužitých simulací k výpočtu erozních parametrů	71
Graf 19: Průběh hloubek při simulacích na povrchu seťového lože 21.10.2020 a vyznačení nepoužitých simulací k výpočtu erozních parametrů	71
Graf 21: Průběh hloubek při simulacích na povrchu seťového lože 25.10.2020 a vyznačení nepoužitých simulací k výpočtu erozních parametrů	72
Graf 22: Variabilita hodnot kritického tečného napětí na válcovaném úhoru	72
Graf 23: Variabilita hodnot kritického tečného napětí na povrchu seťového lože ...	73
Graf 24: Variabilita hodnot koeficientu erodibility na válcovaném úhoru	74
Graf 25: Variabilita hodnot koeficientu erodibility na povrchu seťového lože	74

14 POUŽITÉ ZDROJE

AL-MADHHACHI, Abdul-Sahib, Garey FOX, G. HANSON a A. TYAGI, 2013. *Measuring soil erodibility using a laboratory "mini" JET*. Transactions of the ASABE, 901-910.

Dostupné z: doi:10.13031/trans.56.9742

BÁČOVÁ, Markéta, 2018. *Monitoring projevů vodní eroze na zemědělských půdách*. Praha. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze.

Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.

BLAISDELL, F.W, L.A CLAYTON a C.G HEBAUS, 1981. *Ultimate Dimension of Local Scour*. Journal of the Hydraulics Division, 327-337.

BRUNIER-COULIN, Florian, Pablo CUELLAR a Pierre PHILIPPE, 2016. Local mechanisms of cohesive soil erosion. *8th International Conference on Scour and Erosion*.

Mathematical Institute, Oxford, UK.

DALY, E., G. FOX, A. AL-MADHHACHI a R. MILLER, 2013. *A scour depth approach for deriving erodibility parameters from Jet Erosion Tests*. 1343-1351.

Dostupné z: doi:10.13031/trans.56.10350

HANSON, G. a K. COOK, 1997. *Development of excess shear stress parameters for circular jet testing*. ASAE, St. Joseph, MI.

HANSON, G. a K. COOK, 2004. *Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ*. Applied Engineering in Agriculture, 455-462.

Dostupné z: doi:10.13031/2013.16492

HANSON, G. a K. ROBINSON, 1990. *Pressure and stress distributions due to a submerged impinging jet*. New York: ASCE National 717 Conf. on Hydraulic Engineering, 525-530.

KAVKA, Petr, Luděk STROUHAL, Barbora JÁCHYMOVÁ et al., 2018. *Double size fulljet field rainfall simulator for complex interrill and rill erosion studies*. THE CIVIL ENGINEERING JOURNAL 2-2018, 183-194.

Dostupné z: doi:10.14311/CEJ.2018.02.0015

KHANAL, Anish, Garey FOX a Abdul-Sahib T. AL-MADHHACHI, 2016. *Variability of Erodibility Parameters from Laboratory Mini Jet Erosion Tests*. Journal of Hydrologic Engineering. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001404

KRÁSA, Josef, 2010. *Empirické modely vodní eroze v ČR*. Praha. Habilitační práce. České vysoké učení technické v Praze.

LUTHI, Marcel, 2011. *A modified hole erosion test (HET-P) to study erosion characteristics of soil*. Vancouver. Disertační práce. THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA.

MAHALDER, Badal, 2014. *Jet Erosion Test Spreadsheet Tool*.

MAHALDER, Badal, John SCHWARTZ, Angelica PALOMINO a Jon ZIRKLE, 2018. *Estimating Erodibility Parameters for Streambanks with Cohesive Soils Using the Mini Jet Test Device: A Comparison of Field and Computational Methods*.
Dostupné z: doi:10.3390/w10030304

Půda: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, vvi [online]. [cit. 2020-10-14].
Dostupné z: <http://www.organickahmota.cz/#/puda>

SIMON, A., R. THOMAS a L. KLIMETZ, 2010. *Comparison and experiences with field techniques to measure critical shear stress and erodibility of cohesive deposit*. 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas.

STAŠEK, Jakub, 2018. *Optimalizace měření odtoku na mobilním deštovém simulátoru*. Praha. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.

UHROVÁ, Jana, Radek BACHAN a Pavla ŠTĚPÁNKOVÁ, 2018. *Stanovení odnosu půdy z rýhové eroze metodou digitální fotogrammetrie a metodou volumetrické kvantifikace* [online]. [cit. 2020-11-09].

Dostupné z: <https://www.vtei.cz/2018/12/stanoveni-odnosu-pudy-z-ryhove-eroze-metodou-digitalni-fotogrammetrie-a-metodou-volumetricke-kvantifikace/>

Vodní eroze [online]. [cit. 2020-10-19].

Dostupné z: <http://eroze.sweb.cz/formy.htm>

Vodní eroze půdy [online]. [cit. 2020-10-14].

Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/puda/ochrana-pudy-a-krajiny/degradace-pud/vodni-eroze-pudy/>

Výzkum a měření erozních procesů [online]. [cit. 2020-12-07]. Dostupné z:
[http://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/YOPO/eroze%2003__vyzkum__1\(1\).pdf](http://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/YOPO/eroze%2003__vyzkum__1(1).pdf)

WAN, C. a R. FELL, 2004. *Laboratory Tests on the Rate of Piping Erosion of Soils in Embankment Dams*. Geotechnical Testing Journal 27, no. 3, 295-303.

Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1520/GTJ11903>

Wet sieving apparatus manual. 2018. Eijkelkamp Soil and Water.