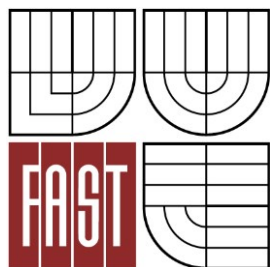




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

SROVNÁNÍ ÚČINKŮ DEŠŤE NA STARÉM A NOVÉM SIMULÁTORU DEŠŤŮ

COMPARISON OF THE EFFECTS OF RAIN ON THE OLD AND NEW RAINFALL SIMULATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. DIANA BANZETOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. RUDOLF MILERSKI, CSc.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště Ústav vodního hospodářství krajiny

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant Bc. Diana Banzetová

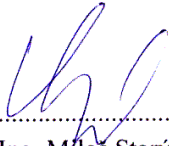
Název Srovnání účinků deště na starém a novém simulátoru dešťů

Vedoucí diplomové práce Ing. Rudolf Milerski, CSc.

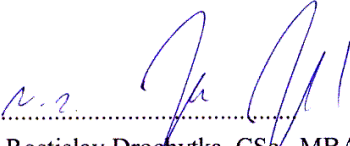
Datum zadání diplomové práce 29. 9. 2014

Datum odevzdání diplomové práce 16. 1. 2015

V Brně dne 29. 9. 2014


.....
prof. Ing. Miloš Starý, CSc.
Vedoucí ústavu




.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Výzkumné zprávy z VVÚ VSH v Kníničkách

JANEČEK M., et al.: Ochrana zemědělské půdy před erozí, Praha 2002

KUTÍLEK, M.: Vodohospodářská pedologie, Praha 1978

www

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Diplomantka vypracuje rešeršní část práce o simulátorech dešťů a provede laboratorní měření na simulátoru dešťů ve vlastnictví ÚVHK FAST. Výsledky porovná s měřeními na tomto simulátoru v Kníničkách. Práce bude obsahovat textovou část, tabulkově zaznamenané hodnoty z pokusů a zpracování do grafů.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

3.



.....
Ing. Rudolf Milerski, CSc.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá modelováním deště v laboratorních podmínkách za pomoci simulátoru dešťů, vyvinutým na VUT v Brně. Výsledky měření jsou srovnávány s naměřenými hodnotami na původní instalaci simulátoru deště umístěným ve VVÚ VSH VUT v Brně u obce Kníničky v letech 1976-1980. Diplomová práce porovnává naměřené charakteristiky působení deště na holou půdu v původním a současném umístění simulátoru, náhradu kinetické energie deště dosažené rychlostí kapek, energií získanou hmotností kapek – průtokem. Zjišťuje schopnosti současného umístění simulátoru.

Klíčová slova

simulátor deště, smyv půdy, eroze půdy, umělý déšť, energie deště, povrchový odtok, odtokový součinitel, infiltrační charakteristiky

Abstract

This dissertation is focused to modeling of the rainfall in laboratory conditions by the rainfall simulator invented in VUT Brno.

Results of the measuring are compared with measured values of the original rainfall simulator located in VVU VSH VUT in Brno by the Kninicky village in 1976-1980. Dissertation verifies rightness of substituting the natural rain with the rainfall simulator on bare soil in the original location, kinetic energy of the rain drops is substituted with the energy gained from the weight of the drops - the flow.

Generally the dissertation determines the possibilities of the rainfall simulator's current location.

Keywords

rainfall simulator, soil washdown, soil erosion, artificial rain, energy rains, surface runoff, runoff coefficient, infiltration characteristics

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Diana Banzetová *Srovnání účinků deště na starém a novém simulátoru dešťů*. Brno, 2015. 51 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Rudolf Milerski, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11.1.2015

.....
podpis autora
Bc. Diana Banzet

Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala svému vedoucímu práce, panu Ing. Rudolfu Milerskému, CSc., za odborné rady, připomínky a pomoc při zpracovávání diplomové práce.

Obsah

1	Úvod	2
2	Historie způsobů modelování dešťů	3
2.1	Vývoj simulátorů dešťů v zahraničí	4
2.2	Vývoj simulátorů dešťů v České republice	5
3	Modelování dešťů	5
3.1	Rozdělení dešťů	5
4	Dešťový simulátor	6
4.1	Rozdělení dešťových simulátorů	8
5	Zrnitostní rozbor půdy	8
5.1	Vyhodnocení měření	14
6	Popis dešťového simulátoru	14
6.1	Postup měření na simulátoru deště	18
7	Teorie modelování srážkoodtokových a erozních jevů	19
8	Laboratorní testování půdních vzorků	22
8.1	Vyhodnocení laboratorních měření	29
9	Porovnání funkce simulátoru	41
9.1	Srovnání hodnot pomocí ombrologické infiltrační křivky	45
9.2	Srovnání hodnot pomocí odtokového součinitele	45
9.3	Srovnání hodnot pomocí smyvu z půdy při přetvárné energii 1000 J/m ²	46
9.4	Srovnání hodnot s vzorky s přechodem na zatravněnou půdu	46
10	Závěr	47
11	Seznam použitých zdrojů	48
11.1	Literatura	48
11.2	Výzkumné zprávy z VVÚ VSH	48
11.3	Internetové zdroje	49

1 Úvod

Půda je rozrušována mechanickým působením pohybujících se okolních látek. V našich klimatických podmínkách je rozrušována především působením vody a větru. Vodní eroze spočívá v odnosu svrchní a to nejúrodnější části půdy, díky tomu se zhoršují vlastnosti půdy, úrodná půda se přenáší na jiná místa. Důsledkem jsou pak škody na zemědělské půdě, znečišťování vodních toků a nádrží, hlavně díky nadměrnému množství živin z hnojiv a dalších chemických látek, které mohou způsobit eutrofizaci a úhyn živočichů. Vodní eroze je v současnosti velkým problémem. V České republice je až polovina zemědělské půdy ohrožena vodní erozí. Za posledních 30 let se odnos půdy vlivem vodní eroze výrazně zrychlil.¹ Hlavním příčinou jsou nevhodné postupy v zemědělství.

Jednou z možností výzkumu půdní eroze je pozorování erozních procesů na dešťovém simulátoru, který vytváří umělý déšť s volitelnou intenzitou a dobou trvání. Dešťové simulátory působí na půdní vzorky obdobně jako déšť přírodní.

V letech 1976 – 1980 byl u městské části Kníničky ve VVÚ VSH VUT v Brně zkonstruován simulátor deště, na kterém byly např. zkoumány protierozní ochranné účinky na různých druzích travního porostu, vliv intenzity deště na odtok a infiltraci do půdy.²

Cílem diplomové práce je laboratorní porovnání nové instalace simulátoru dešťů s hodnotami naměřenými na původní nestandardní (malá výška pádu kapek) instalaci v Kníničkách a jejich vyhodnocení.

¹http://vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=eroze_pudy&site=puda

² KASPRZAK, K. *Teoretické a praktické vyhodnocení zatravněných ploch namáhaných erozními účinky srážkové vody*. Brno: VUT Brno. 1980, s. 58 - 60

2 Historie způsobů modelování dešťů

Optimální využití vody je od pradávna jednou z hlavních lidských činností, nejinak je tomu u využití atmosférických srážek. Období sucha a dešťů se snažil člověk optimalizovat výstavbou přehrad. Nejlepší přirozenou zásobárnou vody je půda. Její akumulární a retenční vlastnosti jsou však značně ovlivněny lidskou činností a to převážně zemědělstvím.

Intenzifikace zemědělství založeného na velkovýrobě na velkých půdních celcích a i využití vědeckotechnické revoluce silně ovlivňují regulační schopnost půdy. S tím přišla i potřeba simulací deště a to v mnoha odvětvích. Jedním z nejvýznamnějších odvětví je výzkumnictví, kde se simulace deště používá například v letectví, při stavbě motorových vozidel a zkoumání jejich jízdních vlastností za mokra, dále v energetice, stavebnictví, ale i třeba ve filmařském průmyslu. Oborem, který nejvíce pomohl k rozvoji modelování deště se všemi jeho fyzikálními vlastnostmi, byla protierozní ochrana půdy.³

Při zemědělské činnosti bylo již dříve známo, že dešť může významně měnit fyzikální vlastnosti půdy. Tato vlastnost deště byla experimentálně poprvé dokázána v roce 1874 Ewaldem Wollnym, který je v současnosti považován za průkopníka v oboru protierozní ochrany půdy.⁴ Problémem vlivu deště na půdu se zabývali i jiní autoři, například Édouard Risler uvádí poznatek: *“Vzhledem k tomu, že dešť padá na obděláná pole určitou silou, dopad dešťové vody mnohdy stačí k rozrušení hrud, které v době sucha ztvrdly. Přesáhne-li dopadající dešťová voda množství, které půda již nestačí pojmout, přebytek vody se rozlije mezi hrudky a teče brázdami po poli. Voda teče prudce, je zakalená a unáší s sebou část půdy, kterou vyplavila z obděláného pole.”*⁵

První výzkumy měly zásadní nedostatek, byly vždy závislé na výskytu deště, na rozmanitosti jeho intenzity, na době trvání ale i pokaždé na jiných počátečních podmínkách. Tyto nedostatky vedly brzo k hledání jiného optimálního způsobu jak nahradit přirozený dešť deštěm umělým, který by se dal využít i v laboratorních podmínkách. Modelování umělého deště vedlo k detailní studii přirozeného deště, jeho kinetických vlastností, studii pohybu, velikosti, tvaru a stability padajících kapek a následnému vytvoření ideálních generátorů, které bylo ovšem třeba nadále vyvíjet. Tyto generátory vedly ke konstrukci prvních

³ KASPRZAK, K. *Simulátor deště a jeho použití ve výzkumu srážkoodtokových vztahů erozních jevů na zemědělských půdách, dílčí zpráva výzkumného úkolu II-7-4/2*. Brno: VUT Brno. 1977, s. 6

⁴ KASPRZAK, K. *Simulátor deště a jeho použití ve výzkumu srážkoodtokových vztahů erozních jevů na zemědělských půdách, dílčí zpráva výzkumného úkolu II-7-4/2*. Brno: VUT Brno. 1977, s. 6

⁵ RISLER, E. *Geologie Agricole*. Paříž: HACHETTE BNF. 1895, s. 55

dešťových simulátorů. Vývoj a zdokonalování simulátorů se děje dodnes a to na základě nových poznatků hlavně z oboru meteorologie a klimatologie.

2.1 Vývoj simulátorů dešťů v zahraničí

Americký hydrolog R. E. Horton začal jako první v letech 1914 používat při výzkumu infiltrace simulátor deště, který byl založen na principu postřiku. V následujících letech se simulátor deště dostává čím dál více do popředí ve spojení s výzkumem eroze půdy. Společným rysem simulátorů v té době bylo využívání dýz závlahových postřikovačů k simulaci deště, díky čemuž se velikost kapek pohybovala v širokém spektru a byla považována za vedlejší faktor. Pozornost byla tehdy zaměřena hlavně na intenzitu deště. V roce 1940 bylo výzkumem zjištěno, že vzroste-li průměrná velikost kapek z 1 mm na 2,25 mm, sníží se tím vsakovací schopnost půdy až o 70% a tím vzroste obsah erozně vyplavených sedimentů ve stékající povrchové vodě o více než 1200%.⁶ Tento poznatek měl značný vliv na další vývoj simulátorů deště a byl vyvinut nový typ simulátoru deště tzv. "F-typ simulátor", který byl sestaven ze dvou řad hubic, kde velikost kapek odpovídala přirozenému přívalovému dešti. Stále zde však byl problém s výškou, která nebyla postačující k dosažení ustálené rychlosti. Poznatky však vedly k hlubšímu propracování teorie podobnosti dešťů i k jejich modelování. Novou etapou při vývoji simulátorů byla koncem padesátých let experimentální hydrologie, která začala používat fyzikálních modelů povodí při zkoumání srážkoodtokových vztahů. Začal se používat simulátor s tlakovými krabicemi, které měly ve dně polyetylenové, skleněné nebo ocelové kapiláry. Nejlepší laboratoří ať už na základě aplikací či technického vybavení se stala laboratoř pro výzkum srážkoodtokových procesů ve Spojených státech pod vedením prof. Ven Te Chow, kde dešťové zařízení tvořilo strop a mohlo vytvořit umělý déšť až na ploše 1600 čtverečných stop. Systém se skládal ze 400 generátorů, kde mohla být u každého zvlášť ovládána intenzita.⁷ Ve světě bylo poté sestaveno mnoho podobných zařízení, například v Londýně, v Izraelském institutu technologie a podobně.

⁶ KASPRZAK, K. *Simulátor deště a jeho použití ve výzkumu srážkoodtokových vztahů erozních jevů na zemědělských půdách, dílčí zpráva výzkumného úkolu II-7-4/2*. Brno: VUT Brno. 1977, s. 7-8

⁷ KASPRZAK, K. *Simulátor deště a jeho použití ve výzkumu srážkoodtokových vztahů erozních jevů na zemědělských půdách, dílčí zpráva výzkumného úkolu II-7-4/2*. Brno: VUT Brno. 1977, s. 10-12

2.2 Vývoj simulátorů dešťů v České republice

U nás začalo modelování dešťů ve druhé polovině šedesátých let, kdy byly na sobě nezávisle vyvíjeny simulátory na třech různých místech. Prvním místem byl Vědeckovýzkumný ústav vodního stavitelství a hospodářství Vysokého učení technického v Brně pod vedením docenta Klaudiuse Kasprzaka, druhým místem byla katedra Základů vodního hospodářství Vysoké školy zemědělské v Praze a třetím místem katedra Základní agrotechniky Vysoké školy zemědělské v Českých Budějovicích.⁸

V roce 1965 byl uveden do provozu první simulátor deště u nás, který byl určen primárně pro výzkum velikosti erozních smyvů a pracoval na principu rozstříku vody. Po skončení výzkumu nebyl již používán. V následujících letech byla snaha o vytvoření kapilárového simulátoru. Simulátor byl vytvořen v roce 1968 a sloužil k výzkumu erozní stability, k výukovým a demonstrativním účelům. Dlouho byl využíván pro výzkum povrchového odtoku a smyvu, dále pro výzkum protierozně ochranného účinku travních směsí na umělých svazích a podobně. V roce 1976 byla zahájena výstavba třetího typu simulátoru, u kterého již bylo možné volit energetické parametry umělého deště. Poslední typ je určen pro testování erozní odolnosti půdy, smyvu živin, geneze povrchových odtoků, srážek na zemědělské půdě, k výzkumu mechanického účinku deště na půdu a podobně.⁹

3 Modelování dešťů

Při nahrazování skutečného deště deštěm umělým je důležitá podrobná znalost přirozeného deště. Dokonalé napodobení skutečného deště platí zejména při studiu účinků deště na půdu. Vysoký stupeň přesnosti se vyžaduje jak z hlediska kvantitativního tak kvalitativního.

3.1 Rozdělení dešťů

Děšť patří mezi kapalně atmosférické srážky, které dopadají na zem důsledkem kondenzace vodních par v ovzduší a gravitace země.

⁸ KASPRZAK, K. *Simulátor deště a jeho použití ve výzkumu srážkoodtokových vztahů erozních jevů na zemědělských půdách, dílčí zpráva výzkumného úkolu II-7-4/2*. Brno: VUT Brno. 1977, s. 12

⁹ KASPRZAK, K. *Simulátor deště a jeho použití ve výzkumu srážkoodtokových vztahů erozních jevů na zemědělských půdách, dílčí zpráva výzkumného úkolu II-7-4/2*. Brno: VUT Brno. 1977, s. 12-14

Podle původu je dešť:¹⁰

- Konvenční dešť - tedy dešť z tepla, který vzniká při výstupech vzdušných proudů a projevuje se jako místní prudký dešť.
- Orografický dešť – dešť, který byl vyvolaný reliéfem oblasti, zejména u horských oblastí, bývá často vytrvalý, ale méně vydatný.
- Cyklonální dešť – vznikající postupující tlakovou depresí neboli cyklonou. Malé hluboké cyklony vyvolávají silnou průtrž mračen, zatímco ploché cyklony způsobují rozsáhlé a vytrvalé deště.

Dešť bývá často kombinací všech uvedených typů.

Podle hydrologického hlediska:¹¹

- průběh deště
- trvání deště
- intenzita deště
- plošné rozdělení
- výskyt deště

Podle fyzikálního hlediska:

- kvantitativní vlastnosti - množství a doba trvání, intenzita
- kvalitativní vlastnosti – vodnost deště, struktura deště, dynamika deště

Odvozenými vlastnostmi jsou energie, hybnost a výkon deště.¹²

4 Dešťový simulátor

Dešťový simulátor se užívá zejména k experimentálnímu zjišťování erozních vlastností půd a vztahů mezi intenzitou srážky a odtokem.

Účelem zkoumání eroze na dešťovém simulátoru je zjištění vlivů různých faktorů na vznik a průběh povrchového odtoku, infiltraci a smyv půdních částic, z čehož získáme vstupní data pro simulační srážkoodtokové modely, k výzkumu půdní eroze, infiltrační schopnosti půd, množství povrchového odtoku v závislosti na počátečních podmínkách nebo vyplavování škodlivin jak povrchovým, tak podpovrchovým odtokem.

¹⁰ KASPRZAK, K. *Simulátor deště a jeho použití ve výzkumu srážkoodtokových vztahů erozních jevů na zemědělských půdách, dílčí zpráva výzkumného úkolu II-7-4/2*. Brno: VUT Brno. 1977, s. 16

¹¹ KASPRZAK, K. *Simulátor deště a jeho použití ve výzkumu srážkoodtokových vztahů erozních jevů na zemědělských půdách, dílčí zpráva výzkumného úkolu II-7-4/2*. Brno: VUT Brno. 1977, s. 16-17

¹² KASPRZAK, K. *Simulátor deště a jeho použití ve výzkumu srážkoodtokových vztahů erozních jevů na zemědělských půdách, dílčí zpráva výzkumného úkolu II-7-4/2*. Brno: VUT Brno. 1977, s. 17-18

Na vzniku a průběhu eroze půdy se podílí několik faktorů meteorologických, pedologických, morfologických, biologických i antropogenních.

Při výzkumu v terénu jsou mnohé hodnoty obtížně měřitelné a je nemožné ovlivnit přirozené srážkové děje. U dešťového simulátoru se mohou do určité míry nastavit potřebné podmínky pro zjištění všech parametrů určujících význam eroze půdy na daném území.

Výhody simulátorů dešťů:

- Možnost pořídit mnoho měření, aniž by se muselo čekat na přírodní dešť
- Schopen pracovat s konstantním deštěm, čímž se eliminuje nestabilní a nepředvídatelná rozmanitost přirozeného deště.
- Obvykle je rychlejší a jednodušší nastavit simulátor na stávající opatření než zjišťování opatření na odtokových plochách se skutečným deštěm.

Nevýhody simulátorů deště:

- Je levnější a jednodušší použití malého simulátoru, který prší na zkušebním pozemku jen několik metrů čtverečních, ale simulátory které musí pokrýt pole 100 m² a více, jsou velké drahé a těžkopádné.

Využití dešťových simulátorů

Příklady experimentů, pro které jsou simulátory deště vhodné:

- Relativní ochrana poskytovaná různými hustotami rostlin;
- Relativní ochrana poskytovaná v různých časech během vegetačního období;
- Studie relativní erodovatelnosti;
- Studie infiltračních charakteristik půdy;
- Eroze a odtok ze svahu řádkových plodin.

Princip dešťových simulátorů

Z fyzikálního hlediska lze proces vodní eroze brát jako mechanický děj vyvolaný pohybující se vodou. V přírodních podmínkách je tento děj brán jako hybnost a energie vody dopadající na povrch půdy ve formě kapek deště. A dále jako hybnost a energie vody stékající po povrchu půdy.

Energii lze považovat za základní fyzikální faktor, který ukazuje kvantitativní znaky erozního děje, protože proces disperze a transportu půdní hmoty je roven výsledku práce, kterou pohybující voda vykoná. Rozlišujeme dva faktory kinetické energie. Kinetická energie deště, která je vykonána padající vodou, je aplikována u disperzního procesu a rozstříku půdní hmoty a kinetickou energii povrchového odtoku, tedy tekoucí vody, která způsobuje transport půdní hmoty a tak přerozděluje její granulometrickou selekci.

Při určování hybnosti a energie deště je základním parametrem intenzita deště. Intenzita deště v průběhu deště různě kolísá. U dešťového simulátoru je proto důležité nahradit skutečný déšť různými dešti o různé intenzitě a době trvání, aby měly stejný účinek, jako má déšť přirozený.

4.1 Rozdělení dešťových simulátorů

V současné době se v podstatě rozeznávají dva typy dešťových simulátorů.

- a) Tryskový dešťový simulátor
 - voda je přiváděna do potrubí a to pevného nebo pohyblivého, které je nad zadešťovanou plochou. Z potrubí otvory nebo tryskami vystřikuje voda pod tlakem a dopadá na pokusnou plochu.

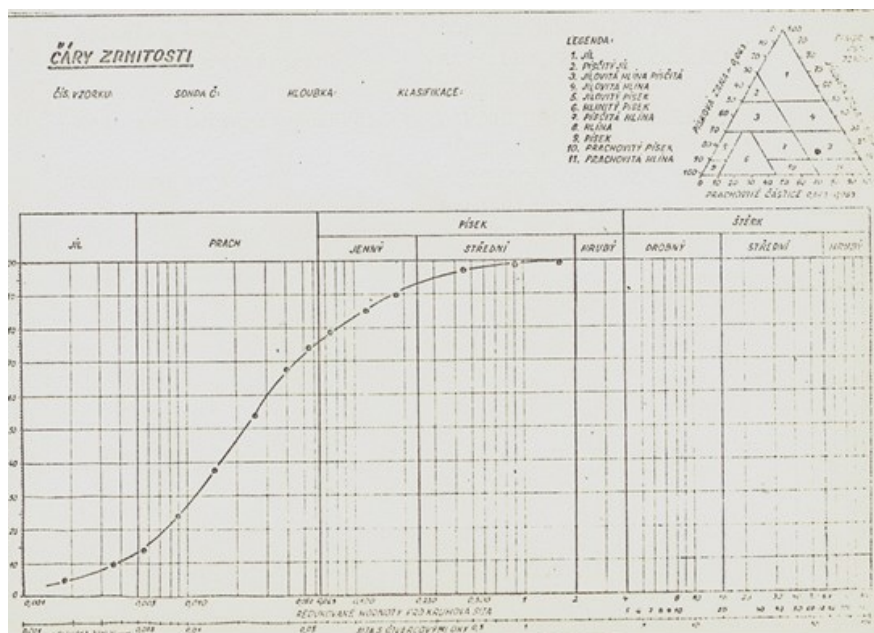
- b) Kapilárový dešťový simulátor
 - Voda je přiváděna do nádrže zpravidla tlakové, umístěné nad pokusnou plochou. Ve dně nádrže jsou malé otvory, jimiž voda vytéká a volným pádem dopadá na zkoumanou plochu. Aby se dosáhlo vytváření kapek, jsou otvory opatřeny kapilárami nebo z každého otvoru splývá vlákno, po kterém voda stéká a na konci odkapává.

5 Zrnitostní rozbor půdy

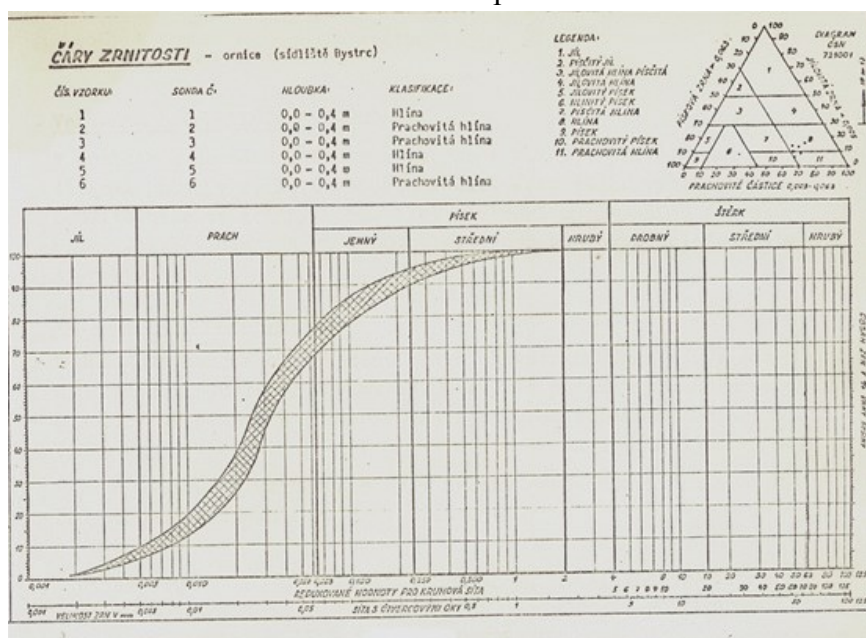
Diplomová práce se zabývá hlavně prvotním srovnáním původní instalace simulátoru dešťů v Kníničkách a jeho současnou instalací v laboratořích ústavu VHO FAST na Žižkové 17. Srovnání se provádí zjišťováním účinků simulátorů na půdní vzorek. Pro srovnání účinků máme k dispozici průměrné parametry rovnic vsaku, odtoku a smyvu, které byly zjištěny na instalaci simulátoru ve VVÚ VSH VUT.

Původní půdní vzorky byly odebrány ze dvou míst. První vzorek byl odebrán z hlinité zeminy z pokusných pozemků VŠZ v Jinačovicích (obr. 1), druhý vzorek byl odebrán z hlinité až

prachovitě - hlinité zeminy z orníčních skrývek sídliště Bystrc z orníční vrstvy půdy (obr. 2). Vzorek pro současné měření byl odebrán v bývalém areálu VVÚ VSH u obce Kníničky. Pro současné měření byly z tohoto vzorku odebrány dva půdní vzorky (V1, V2) půdy, které jsme srovnali pomocí zrnitostního rozboru s původními vzorky. Jedná se o půdní typ nivní půda a pro odběr byla použita orníční vrstva. Porovnání nových vzorků s prvním původním vzorkem je na obr. 3 a obr. 4. Srovnání s druhým původním vzorkem je na obr. 5 a obr. 6.



Obr. 1. Křivka zrnitosti – původní vzorek¹³



Obr. 2. Křivka zrnitosti - původní vzorek (ornice)¹⁴

¹³ KASPRZAK, K. *Teoretické a praktické vyhodnocení zatravněných ploch namáhaných erozními účinky srážkové vody*. Brno: VUT Brno. 1980, s. 60

¹⁴ KASPRZAK, K. *Teoretické a praktické vyhodnocení zatravněných ploch namáhaných erozními účinky srážkové vody*. Brno: VUT Brno. 1980, s. 60

ZÁPIS MĚŘENÍ A VÝPOČET KŘIVKY ZRNITOSTI HUSTOMĚRNOU METODOU

Lokalita: Kníničky Vzorek: V 1 Rozbor provedl: Banzetová

Datum : Hustoměr: 384 Antikoagulans: vod. sklo

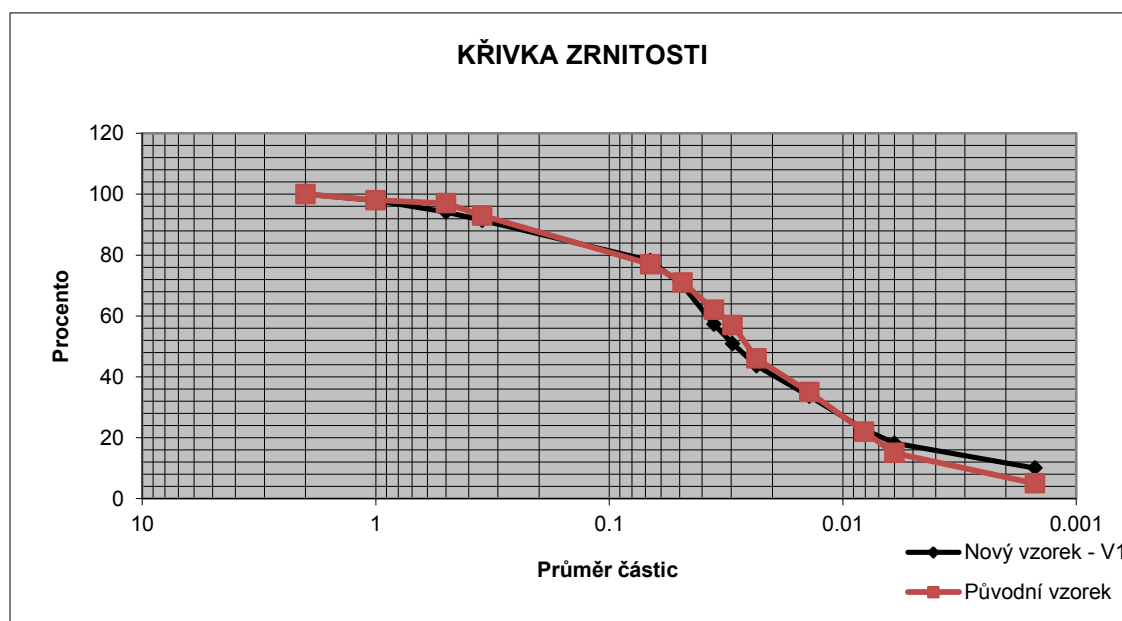
Stanovení W_o Měrná hmotnost : 2.65 g/cm³

Navážka pro rozbor na vzduchu vyschlé zeminy : 36.665 g

Navážka pro rozbor vlhkosti : 9.428 g Sušina : 9.092 g

Navážka pro rozbor vysušené zeminy W_o : 35.35831 g

Čas [s]	Ro	Ts	Tp	m	R	R + m	d [mm]	W %	
Rozbor na sítích :								2	100
								1	97.97
								0.5	94.12
								0.35	91.42
30	16.6	21	21	0.2115	17	17.2115	0.0666	78.18	
60	14.8	21	21	0.2115	15.2	15.4115	0.0484	70.00	
120	12	21	21	0.2115	12.4	12.6115	0.0356	57.28	
180	10.6	21	21	0.2115	11	11.2115	0.0296	50.93	
300	9	21	21	0.2115	9.4	9.6115	0.0234	43.66	
900	6.8	21	21	0.2115	7.2	7.4115	0.0139	33.66	
2820	4.4	21	21	0.2115	4.8	5.0115	0.0081	22.76	
5160	3.4	21	21	0.2115	3.8	4.0115	0.006	18.22	
86050	1.6	21	21	0.2115	2	2.2115	0.0015	10.05	



Obr. 3. Křivka zrnitosti – nový vzorek – V1¹⁵

¹⁵ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

ZÁPIS MĚŘENÍ A VÝPOČET KŘIVKY ZRNITOSTI HUSTOMĚRNOU METODOU

Lokalita: Kníničky Vzorek: V 2 Rozbor provedl: Banzetová

Datum : Hustoměr: 628 Antikoagulans: vod. sklo

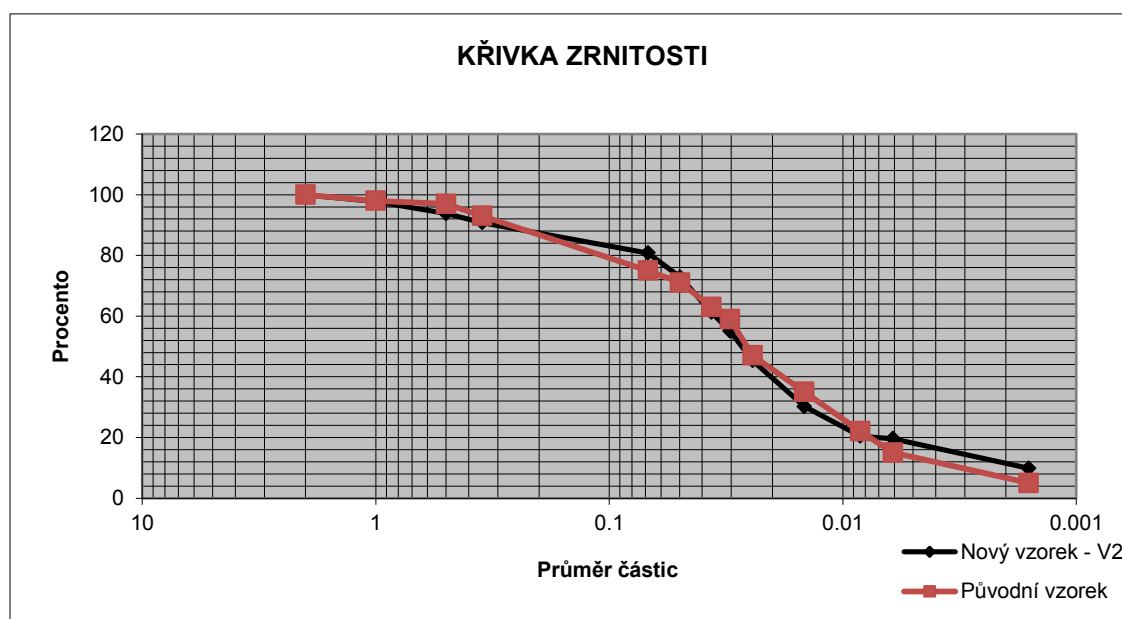
Stanovení W_o Měrná hmotnost : 2.65 g/cm³

Navážka pro rozbor na vzduchu vyschlé zeminy : 37.533 g

Navážka pro rozbor vlhkosti : 9.428 g Sušina : 9.092 g

Navážka pro rozbor vysušené zeminy W_o : 36.19538 g

Čas [s]	Ro	Ts	Tp	m	R	R + m	d [mm]	W %	
Rozbor na sítích :								2	100
								1	97.695
								0.5	93.8231
								0.35	90.78
30	18.2	21	21	0.2115	18	18.2115	0.0682	80.81	
60	16.4	21	21	0.2115	16.2	16.4115	0.0497	72.82	
120	13.8	21	21	0.2115	13.6	13.8115	0.0365	61.28	
180	12.4	21	21	0.2115	12.2	12.4115	0.0304	55.07	
300	10.2	21	21	0.2115	10	10.2115	0.0243	45.31	
900	6.8	21	21	0.2115	6.6	6.8115	0.0146	30.22	
2880	4.6	21	21	0.2115	4.4	4.6115	0.0084	20.46	
5400	4.4	21	21	0.2115	4.2	4.4115	0.0061	19.57	
85740	2.2	21	21	0.2115	2	2.2115	0.0016	9.81	



Obr. 4. Křivka zrnitosti – nový vzorek – V2¹⁶

¹⁶ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

ZÁPIS MĚŘENÍ A VÝPOČET KŘIVKY ZRNITOSTI HUSTOMĚRNOU METODOU

Lokalita: Kníničky Vzorek: V 1 Rozbor provedl: Banzetová

Datum : Hustoměr: 384 Antikoagulans: vod. sklo

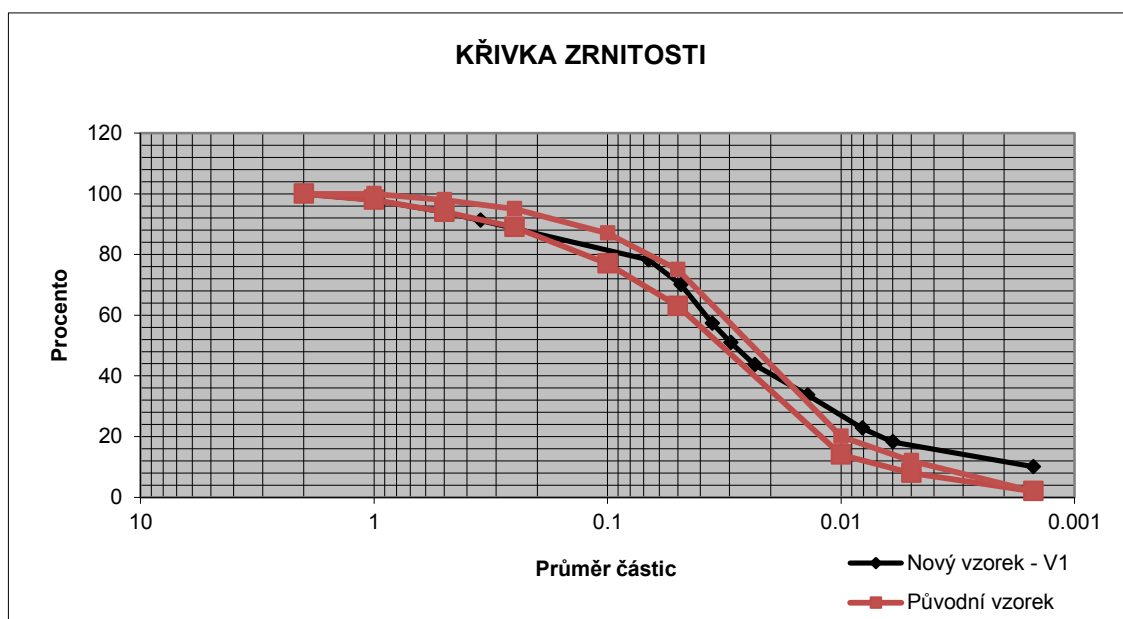
Stanovení W_o Měrná hmotnost : 2.65 g/cm³

Navážka pro rozbor na vzduchu vyschlé zeminy : 36.665 g

Navážka pro rozbor vlhkosti : 9.428 g Sušina : 9.092 g

Navážka pro rozbor vysušené zeminy W_o : 35.35831 g

Čas [s]	Ro	Ts	Tp	m	R	R + m	d [mm]	W %	
Rozbor na sítích :								2	100
								1	97.92
								0.5	93.98
								0.35	91.21
30	16.6	21	21	0.2115	17	17.2115	0.0666	78.18	
60	14.8	21	21	0.2115	15.2	15.4115	0.0484	70.00	
120	12	21	21	0.2115	12.4	12.6115	0.0356	57.28	
180	10.6	21	21	0.2115	11	11.2115	0.0296	50.93	
300	9	21	21	0.2115	9.4	9.6115	0.0234	43.66	
900	6.8	21	21	0.2115	7.2	7.4115	0.0139	33.66	
2820	4.4	21	21	0.2115	4.8	5.0115	0.0081	22.76	
5160	3.4	21	21	0.2115	3.8	4.0115	0.006	18.22	
86050	1.6	21	21	0.2115	2	2.2115	0.0015	10.05	



Obr. 5. Křivka zrnitosti – nový vzorek – V1¹⁷

¹⁷ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

ZÁPIS MĚŘENÍ A VÝPOČET KŘIVKY ZRNITOSTI HUSTOMĚRNOU METODOU

Lokalita: Kníničky Vzorek: V 2 Rozbor provedl: Banzetová

Datum : Hustoměr: 628 Antikoagulans: vod. sklo

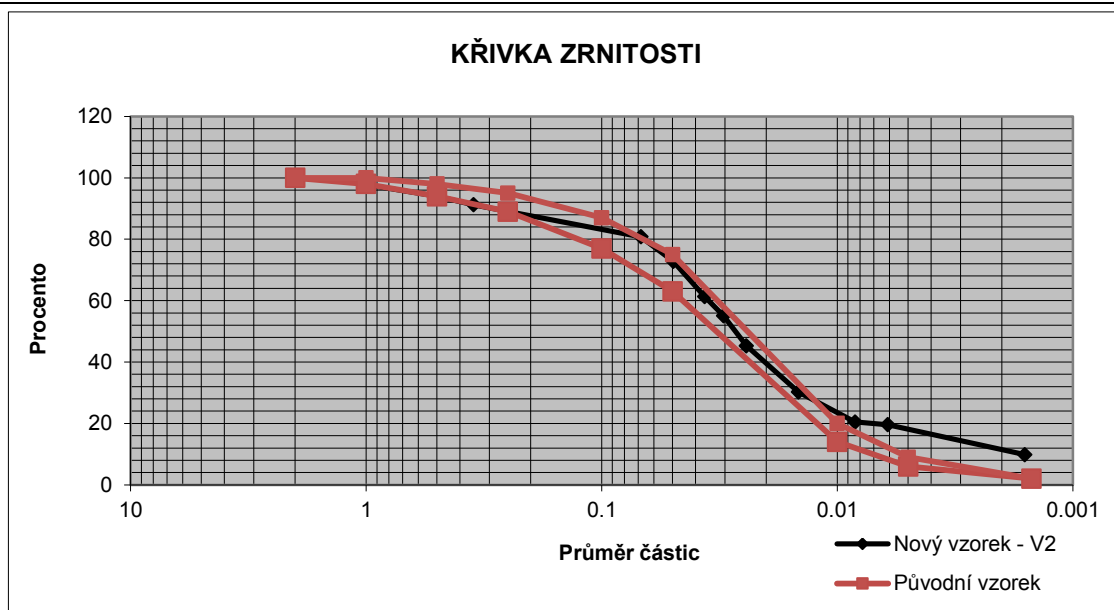
Stanovení W_o Měrná hmotnost : 2.65 g/cm³

Navážka pro rozbor na vzduchu vyschlé zeminy : 37.533 g

Navážka pro rozbor vlhkosti : 9.428 g Sušina : 9.092 g

Navážka pro rozbor vysušené zeminy W_o : 36.19538 g

Čas [s]	Ro	Ts	Tp	m	R	R + m	d [mm]	W %	
Rozbor na sítích :								2	100
								1	97.75
								0.5	93.97
								0.35	91.24
30	18.2	21	21	0.2115	18	18.2115	0.0682	80.81	
60	16.4	21	21	0.2115	16.2	16.4115	0.0497	72.82	
120	13.8	21	21	0.2115	13.6	13.8115	0.0365	61.28	
180	12.4	21	21	0.2115	12.2	12.4115	0.0304	55.07	
300	10.2	21	21	0.2115	10	10.2115	0.0243	45.31	
900	6.8	21	21	0.2115	6.6	6.8115	0.0146	30.22	
2880	4.6	21	21	0.2115	4.4	4.6115	0.0084	20.46	
5400	4.4	21	21	0.2115	4.2	4.4115	0.0061	19.57	
85740	2.2	21	21	0.2115	2	2.2115	0.0016	9.81	



Obr. 6. Křivka zrnitosti – nový vzorek – V2¹⁸

¹⁸ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

5.1 Vyhodnocení měření

Zrnitostní křivka prvního původního vzorku se se současnými vzorky shoduje až na drobné odchylky, které mohou být způsobeny chybou měření.

Zrnitostní křivka druhého původního vzorku se od současných vzorků liší ve větší míře a to zejména v obsahu jílovitých a prachových částí do velikosti zrna 0,015 mm.

Současné zrnitostní křivky byly získány pomocí hustoměrné metody (hustoměrná metoda Cassagrande). Zrnitostní rozbor zrn velikosti 0,35 mm až 2 mm byl proveden na sítích.

6 Popis dešťového simulátoru

Simulátor se skládá z pohybového kapilárního generátoru vodních kapek a pevné nosné konstrukce. Generátor je zavěšen na kladkách pevné nosné konstrukce a tvoří ho tlaková krabice z organického skla o rozměrech 0,700 x 0,700 x 0,05 m, v jejímž dně je umístěno 1024 skleněných kapilár ve sponu 17,5 mm. Krabice je upevněna na výkyvném rámu spojeném pružinami s rámem nosným. Dále se skládá z rotametru, nádrže konstantního tlaku, která zásobuje tlakovou krabici s kapilárami vodou a z podtlakové nádrže, která umožňuje čištění kapilár. Na nosném rámu jsou upevněny na otočných válci grafy, které vyjadřují vztah rotometru a schéma zapojení generátoru.

Pevná nosná konstrukce je složena ze čtyř kovových stojek rozepřených mezi podlahou a stropem. Stojky zároveň plní vodící funkci pro pohyblivý generátor.

Simulátor je napojen na vodovod, který je zaústěn do nádrže konstantního tlaku. Přebytečná voda z nádrže přepadá přes okraj do odpadní nádrže, odkud odtéká.

Jednotlivé části generátoru jsou samostatně proplachovány. Po ukončení proplachování je voda přivedena do zavzdušněné tlakové krabice. Po naplnění jsou zavzdušňovací otvory uzavřeny a nastává kapkový výtok vody z kapilár.

Po dosažení ustáleného průtoku je možné nastavit požadované fyzikální parametry umělého deště. Původní generátor je ve výšce cca 3,5 metrů nad podlahou, dráha pádu kapky byla 3,2 m, a během provozu je plynule vychylován z rovnovážné polohy tak, aby nedocházelo ke tvorbě důlkové eroze pod jednotlivými kapilárami. Tato výška neumožňovala dosáhnout skutečné kinetické energie deště. Stávající generátor je umístěn ve výšce cca 8 m, dráha pádu kapky je 6,7 m.

Půdní vzorek je připraven v plechové vzorkovnici o rozměrech 0,500 x 0,500 x 0,150 metru, která má čtvercový půdorysný tvar vertikálně přizpůsobený úhlu sklonu povrchu půdy. Má

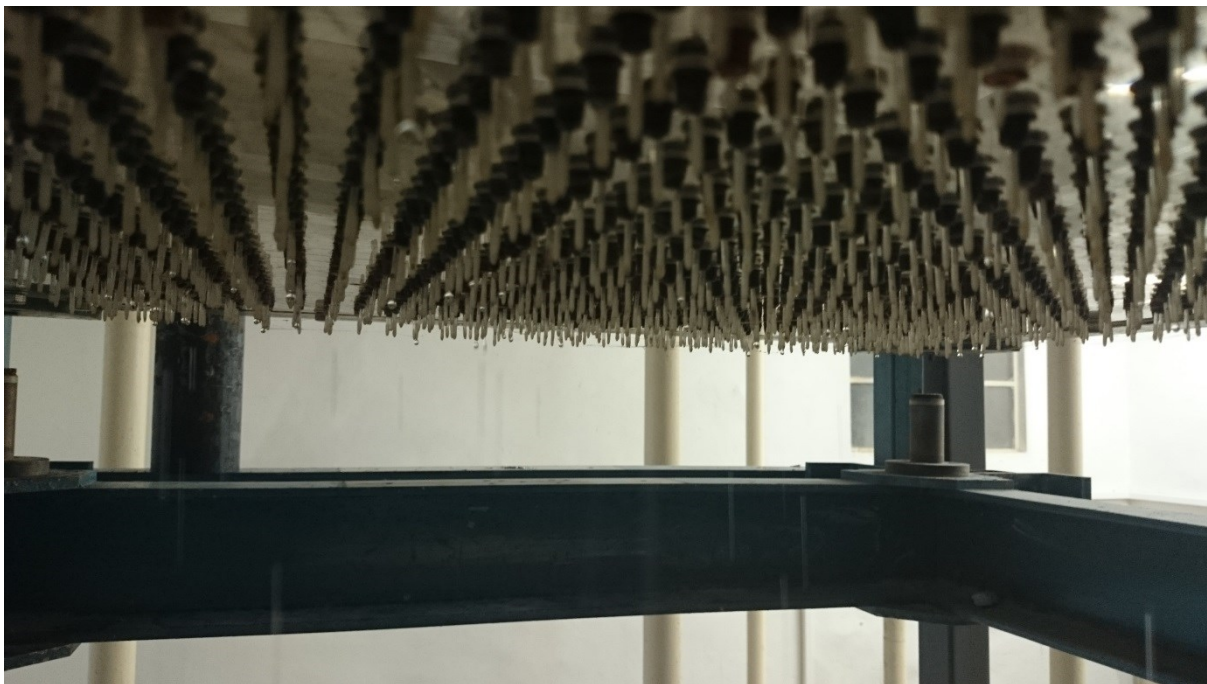
vertikálně pohyblivou přední a zadní stěnu, což umožňuje u silně erodovatelných půd zachovat během testování konstantní sklon povrchu půdní výplně vzorkovnice. Erozní základnu tvoří odnímatelný a vertikálně pohyblivý svodný žlábek, jímž se zachycuje a odvádí povrchově stékající půdní suspenze. Podpovrchový odtok procházející perforovaným dnem vzorkovnice, přitéká do spodní krabice, ze které je po skloněném dně dále odváděn k měrnému zařízení. Proti ztrátám půdní suspenze rozstříkem je vzorkovnice chráněná nástavcem z organického skla.

Nosná konstrukce umožňuje měnit výškovou polohu generátoru kapek a tím i některé fyzikální charakteristiky umělého deště. Simulátor deště v uvedené úpravě je schopen vytvářet umělé deště s homogenním spektrem velikostí kapek o náhradním průměru $d = 2,78$ mm a intenzitách od 0,5 do 3,5 mm/min.



Obr. 7. Kapilární generátor kapek a pevná nosná konstrukce¹⁹

¹⁹ Banzetová D. Fotografie kapilárního generátoru



Obr. 8. Kapilární generátor kapek – detail²⁰



Obr. 9. Vzorkovnice s ochranným nástavcem²¹

²⁰ Banzetová D. Fotografie kapilárního generátoru

²¹ Banzetová D. Fotografie vzorkovnice



Obr. 10. Půdní vzorek ve vzorkovnici - před simulovaným deštěm²²



Obr. 11. Půdní vzorek ve vzorkovnici – po skončení simulovaného deště²³

²² Banzetová D. Fotografie vzorkovnice

²³ Banzetová D. Fotografie vzorkovnice



Obr. 12. Odebraný povrchový odtok ²⁴

6.1 Postup měření na simulátoru deště

Simulace srážkoodtokového jevu v laboratorních podmínkách se provádí na dvou součástech tohoto jevu. Produkce simulovaného deště se provádí pomocí kapilárového produktoru kapek a modelu povrchu umístěného ve vzorkovnici s nastavitelným sklonem. Porušený půdní vzorek se upraví do vzorkovnice a zhutní se, aby se připravil povrch blízky skutečnosti a původním úpravám vzorků u instalace v Kníničkách. Před měřením se musí nastavit intenzita deště pomocí ombrometru, kdy se nejdříve zjistí okamžitá intenzita deště (objem deště/ čas, za který napršel) a podle toho se mění přítok do produktoru kapek na zvolenou intenzitu. Po celou dobu pokusu je nutné udržovat stálou intenzitu pomocí rotametru, přívod vody na simulátor je velmi citlivý na tlakové poměry ve vodovodní síti budovy. Vzorkovnice se umístí pod generátor kapek a nasadí se na ni ochranný nástavec z organického skla, který zajišťuje, že rozstříknuté kapky se nedostanou mimo vzorek a měřený odtok. Vzorkovnice je nahoře zajištěna poklopem. Ve chvíli, kdy je nastavena správná intenzita, může se odkrýt vzorkovnice a může začít samotné měření.

²⁴ Banzetová D. Fotografie vzorků

K měření odtoku a obsluze simulátoru deště je zapotřebí tým lidí. Jeden člen týmu (vánek), pohybuje s generátorem kapek, aby kapky nepadaly jen na jedno místo, a tím aby se dostatečně simulovaly podmínky skutečného deště, a zároveň udržuje průtok vody do generátoru kapek ovládním rotometru. Odtok ze vzorkovnice přepadá do svodného žlábků, do nějž se zachycuje a odvádí. S odtékající vodou je unášena ve formě suspenze rozrušená půda. Druhý člen týmu je u vzorkovnice, kde do připravené nádoby zachytává vznikající odtok. Musí se přesně zaznamenat čas, ve kterém započal povrchový odtok, dále se uvažuje konstantní časový krok. Po časovém kroku (5 minut), se nádoba vymění za prázdnou a třetí člen týmu změří objem smyvu a přelije jej do připravených nádob, kde se nechává do druhého dne usadit. Průběh celého pokusu se zaznamenává na časové ose – odtoky a smyv. Celý proces trvá tak dlouho, než se objem odtoku ustálí. U intenzity $i = 1,52 \text{ mm/min}$ trvalo měření 35 minut. U nižší intenzity $i = 0,96 \text{ mm/min}$ bylo měřeno 40 minut, což je způsobeno nižší kinetickou energií působící na vzorek. Ustálené hodnoty odtoku se dosahují při hodnotě celkové sumy přetvárné energie $1200 - 1300 \text{ J/m}^2$. Měření na simulátoru je tedy velmi náročné, jak na čas, tak na dostatečný počet lidí. V rozsahu diplomové práce tedy nebylo možno provádět více měření, a proto jsme zvolili jen dvě měření při různých intenzitách. Pevné částice byly získány druhý den po slití, vysušení a následného zvážení.

7 Teorie modelování srážkoodtokových a erozních jevů

Metoda využití simulátoru deště a laboratorních postupů je podmíněna přijetím platnosti hypotézy, že filtrační deformace půdy deštěm, jakož i množství deštěm rozpojené a přemístěné půdy, je závislé na množství práce, kterou dešť vykoná na povrchu půdy, a že práce deště je úměrná celkové plošné hustotě jeho kinetické energie $W_k \text{ (J/m}^2\text{)}$ za dobu trvání deště t . Celková kinetická energie simulovaného deště je vyjádřena W'_k .

K dosažení minimálně nutné podobnosti příčinných vlastností přirozeného a umělého deště s homogenním spektrem velikostí průměru kapky $d'(m)$ - veličina přísluší simulovanému dešti, a velikosti průměru kapky $d(m)$ – veličina přísluší dešti přirozenému, musí být splněny podmínky:

$$d'_k = d_{k(50)} \quad (1)$$

$$W'_k = W_k \quad (2)$$

a kde podle vztahu Lawse a Parsonse je mediánní průměr kapky $d_{k(50)}$ v přirozeném dešti o intenzitě i_s (m/s)

$$d_{k(50)} = 0,0193 i_s^{0,182} \quad (3)$$

Celková plošná hustota kinetické energie deště W_k na jednotku plochy a dobu trvání deště t_d je vyjádřena vztahem:

$$W_k = w_k t_d \quad (4)$$

kde:

$$w_k = 500 i_s \{67,5 - 27,5 \exp. (-50000 i_s)\} \quad (5)$$

Rovnici 5 použil docent Kasprzak ve svých úvahách na původním simulátoru deště.

Tyto úvahy nám dovolí při porovnání velikostí kinetických energií nahradit skutečný déšť deštěm umělým. Simulátor deště instalovaný ve VVÚ VSH v Kníničkách však neumožňoval dosáhnout kapkám konečné pádové rychlosti a tedy intenzita deště na simulátoru neměla požadovanou kinetickou energii, kterou lze získat vyčíslením rovnice 5. Aby déšť na simulátoru měl srovnatelnou energii, jako déšť přirozený musela být zvýšená energie – dosaženo zvýšeným průtokem (simulátor produkuje stále stejně velké kapky, nezávisle na průtoku simulátorem).²⁵

Skutečně dosahované hodnoty w_k jsou na simulátoru zjištěny pomocí tří aspektů. Nejdříve je w_{k1} určena rovnicí 5. Dále po změření skutečné pádové výšky 6,7 m a zjištěním pádové rychlosti za pomoci grafu (obr 12) a rovnice 6 je určena w_{k2} .

$$w_k = 500 i_s S v^2 \quad (6)$$

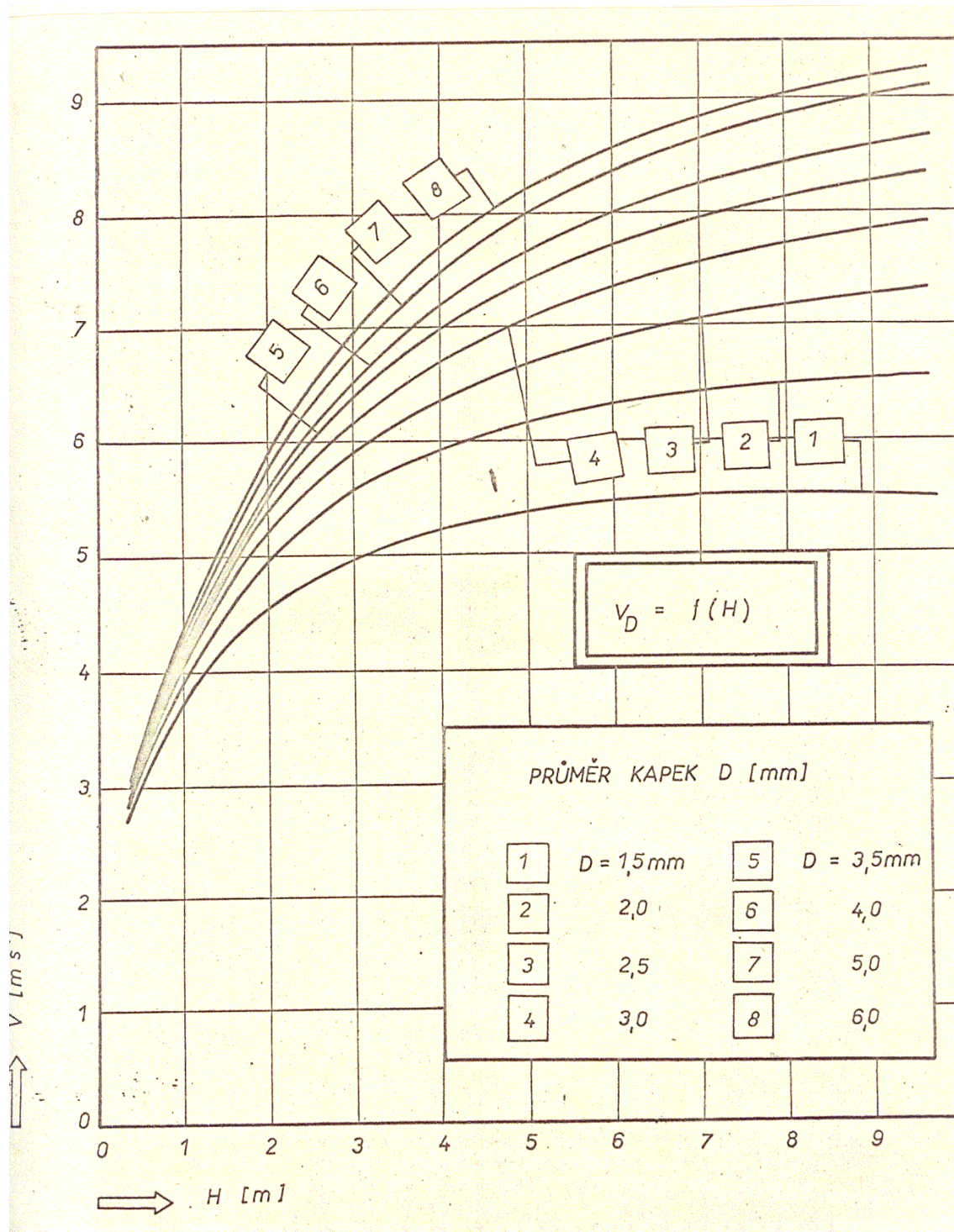
S - plocha, na kterou spadl déšť (m^2),

v – rychlost pádu dešťové kapky (m/s),

Rovnice 6 pro výpočet kinetické energie je upravená docentem Kasprzakiem.²⁶

²⁵ KASPRZAK, K. *Teoretické a praktické vyhodnocení zatravněných ploch namáhaných erozními účinky srážkové vody*. Brno: VUT Brno. 1980, s. 18-20

²⁶ KASPRZAK, K. *Simulátor deště a jeho použití ve výzkumu srážkoodtokových vztahů erozních jevů na zemědělských půdách, dílčí zpráva výzkumného úkolu II-7-4/2*. Brno: VUT Brno. 1977, s. 62 - 63



Obr. 13. Konečné rychlosti pádu vodních kapek²⁷

Po zjištění skutečné rychlosti kapky pomocí fotografování a dosazením zjištěné rychlosti do rovnice 6, je určena kinetická energie w_{k3} .

²⁷ KASPRZAK, K. *Simulátor deště a jeho použití ve výzkumu srážkoodtokových vztahů erozních jevů na zemědělských půdách, dílčí zpráva výzkumného úkolu II-7-4/2*. Brno: VUT Brno. 1977, s. 85

8 Laboratorní testování půdních vzorků

První půdní vzorek o intenzitě deště 1,52 l/min byl instalován pod simulátorem deště ve sklonu 8,5% (5°). Působení nárazové síly deště a unášecí síly povrchového odtoku působilo po dobu 35 – ti minut. Srážkoodtokový proces začal po 4,15 minutách.

Druhý půdní vzorek o intenzitě deště 0,96 l/min byl instalován ve stejném sklonu. Působení nárazové síly deště a unášecí síly povrchového odtoku byl po dobu 40 – ti minut.

Srážkoodtokový proces začal po 8,2 minutách.

Povrchový odtok byl odebírán po 5 minutách. Pevné částice (smyv) byly získány z povrchového odtoku druhý den slitím a odpařením.

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách (obr. 14 a 15).

Parametry návrhového přirozeného deště a jemu odpovídající parametry deště simulovaného na novém simulátoru deště jsou dle rovnice 5 následující:

Jako první testovací erodotvorný déšť byl zvolen přirozený déšť intenzity 1,52 mm/min, který má podle rovnice 5, měrnou plošnou hustotu kinetické energie $w_{k1} = 0,754 \text{ J/sm}^2$.

Druhý testovací erodotvorný déšť byl zvolen přirozený déšť intenzity 0,96 mm/min, s měrnou plošnou hustotou, podle rovnice 5, kinetické energie $w_{k1} = 0,439 \text{ J/sm}^2$.

Kinetické energie vypočtené pomocí rovnice 6 a odečtené rychlosti z grafu (obr. 12), pro velikost kapky $d = 2,78 \text{ mm}$, jsou pro déšť o intenzitě 1,52 mm/min $w_{k2} = 0,675 \text{ J/sm}^2$ a pro intenzitu 0,96 mm/min $w_{k2} = 0,426 \text{ J/sm}^2$

Po změření rychlosti pomocí fotografování (obr. 13) pohybující se kapky, je skutečná hodnota w_{k3} pro déšť o intenzitě 1,52 mm/min $w_{k3} = 0,801 \text{ J/sm}^2$ a pro intenzitu 0,96 mm/min $w_{k3} = 0,506 \text{ J/sm}^2$, kde výsledná změřená pádová rychlost kapky je 7,95 m/s.

Výsledná změřená rychlost byla stanovena jako průměrná hodnota ze zjištěných drah kapek pomocí fotografií (tab. 1).

Výsledky měření byly zpracovány, pro každou stanovenou energii při dané intenzitě, v grafické podobě. Grafy jsou zpracovány jako ombrologická infiltrační křivka, křivka povrchového odtoku a křivka sumárního erozního smyvu půdy.

Ombrologická infiltrační křivka je vyjádřena tříparametrickou rovnicí Hortonova typu:

$$V_i(W_k) = (V_{i0} - V_{iv}) \exp(-nw_k t) + V_{iv}, \quad (7)$$

kde

V_i - okamžitá rychlost infiltrace (mm s^{-1}),

V_{i0} - počáteční rychlost infiltrace (mm s^{-1}),

V_{iV} - vyrovnaná rychlost infiltrace (mm s^{-1}),

w_k - měrná plošná hustota kinetické energie deště ($\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}$),

n – exponent,

t - čas

Ombrologickou křivku okamžitého součinitele povrchového odtoku je možno vyjádřit tříparametrickou rovnicí:

$$\phi_0(W_k) = \phi_{\max} \{1 - \exp[-n(w_k t - C_1)]\} \quad (8)$$

kde

ϕ_0 - okamžitý součinitel povrchového odtoku,

ϕ_{\max} - vyrovnaná maximální hodnota součinitele povrchového odtoku

C_1 - konstanta, určující počátek odtoku.

Rovnice smyvu je vyjádřena dvouparametrickou rovnicí

$$M_e = k(w_k t - C_2) \quad (9)$$

kde

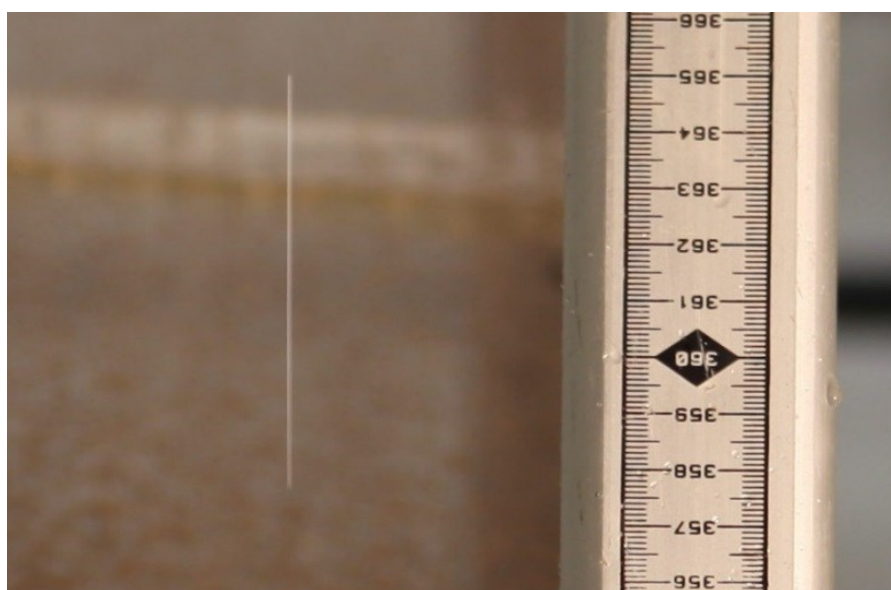
M_e – úhrnný smyv (kg/m^2)

k – konstanta

C_2 – konstanta, určena počátkem smyvu

Číslo měření	Pádová rychlost kapky
1	9
2	7.5
3	8
4	7
5	7.1
6	9.5
7	8.3
8	8.3
9	7
10	8
11	7.7
průměr	7.95

Tab. 1. Rychlost kapky²⁸



Obr. 14. Měření rychlosti pádu kapky²⁹

²⁸ Banzetová, D. Výpočet v programu Microsoft Excel

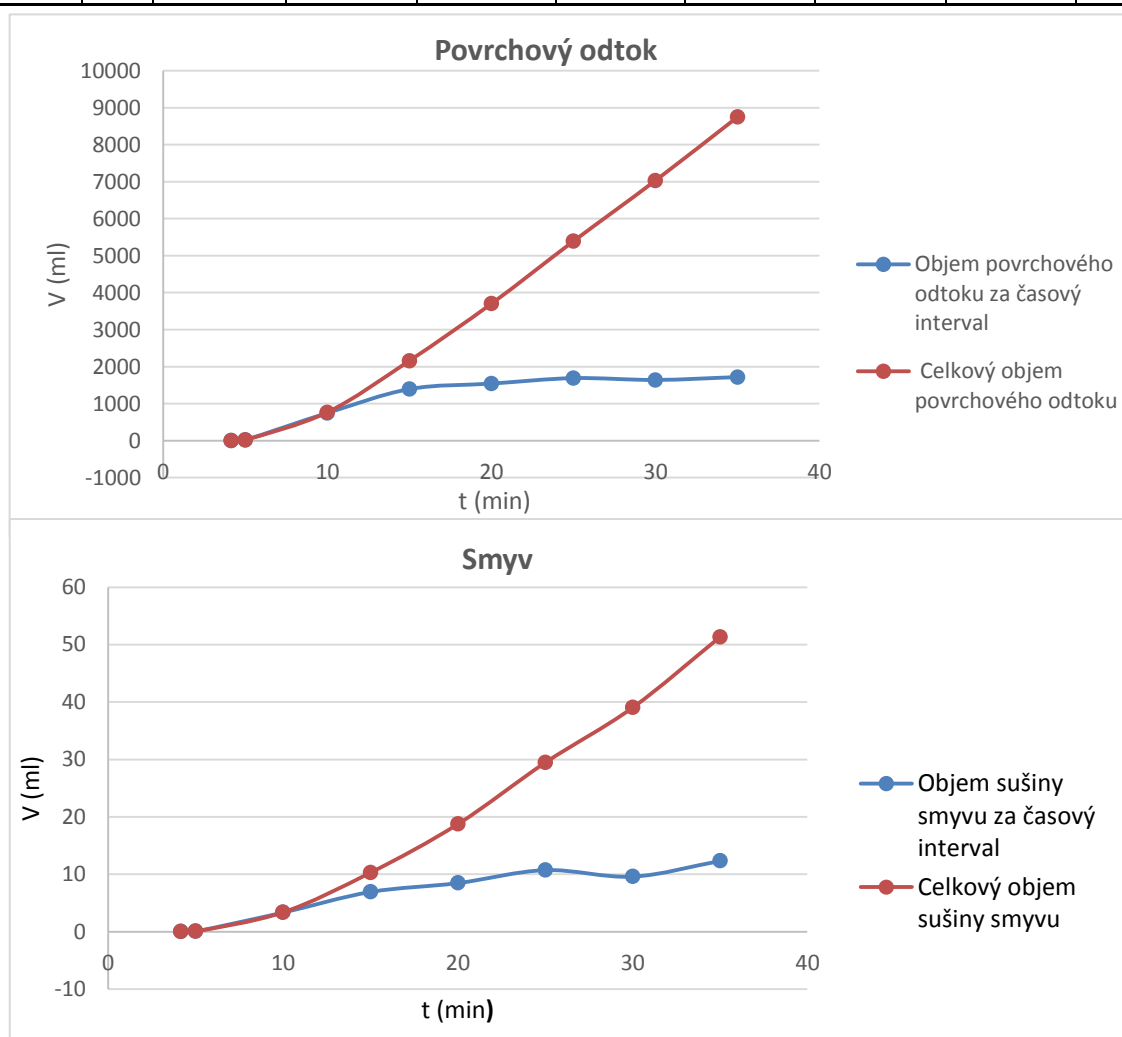
²⁹ Banzetová, D. Fotografie pádu kapky

Protokol o zkoušce erozních vlastností půdy

Vzorek č.: 1

i 1,52 mm/min

Číslo měření	Čas		Časový interval	Objem povrch. odtoku v čas intervalu	Hmotn. sušiny smyvu	Hmotn. sušiny smyvu	Celková hmotn. sušiny smyvu	Objem povrch. odtoku skut.	Celkový objem povrch. Odtoku
	od	do							
-	min	min	min	ml	g	ml	ml	ml	ml
1	0	4.15	4.15	0	0	0	0	0	0
2	4.15	5	0.85	20	0.1	0.03774	0.03774	19.96226	19.96226
3	5	10	5	750	8.8	3.32075	3.35849	746.6793	766.6415
4	10	15	5	1400	18.3	6.90566	10.26415	1393.094	2159.736
5	15	20	5	1550	22.4	8.45283	18.71698	1541.547	3701.283
6	20	25	5	1700	28.4	10.71698	29.43396	1689.283	5390.566
7	25	30	5	1650	25.4	9.58491	39.01887	1640.415	7030.981
8	30	35	5	1730	32.6	12.30189	51.32076	1717.698	8748.679



Obr. 15. Erozní vlastnosti půdy, $i = 1,52 \text{ mm/min}$ ³⁰

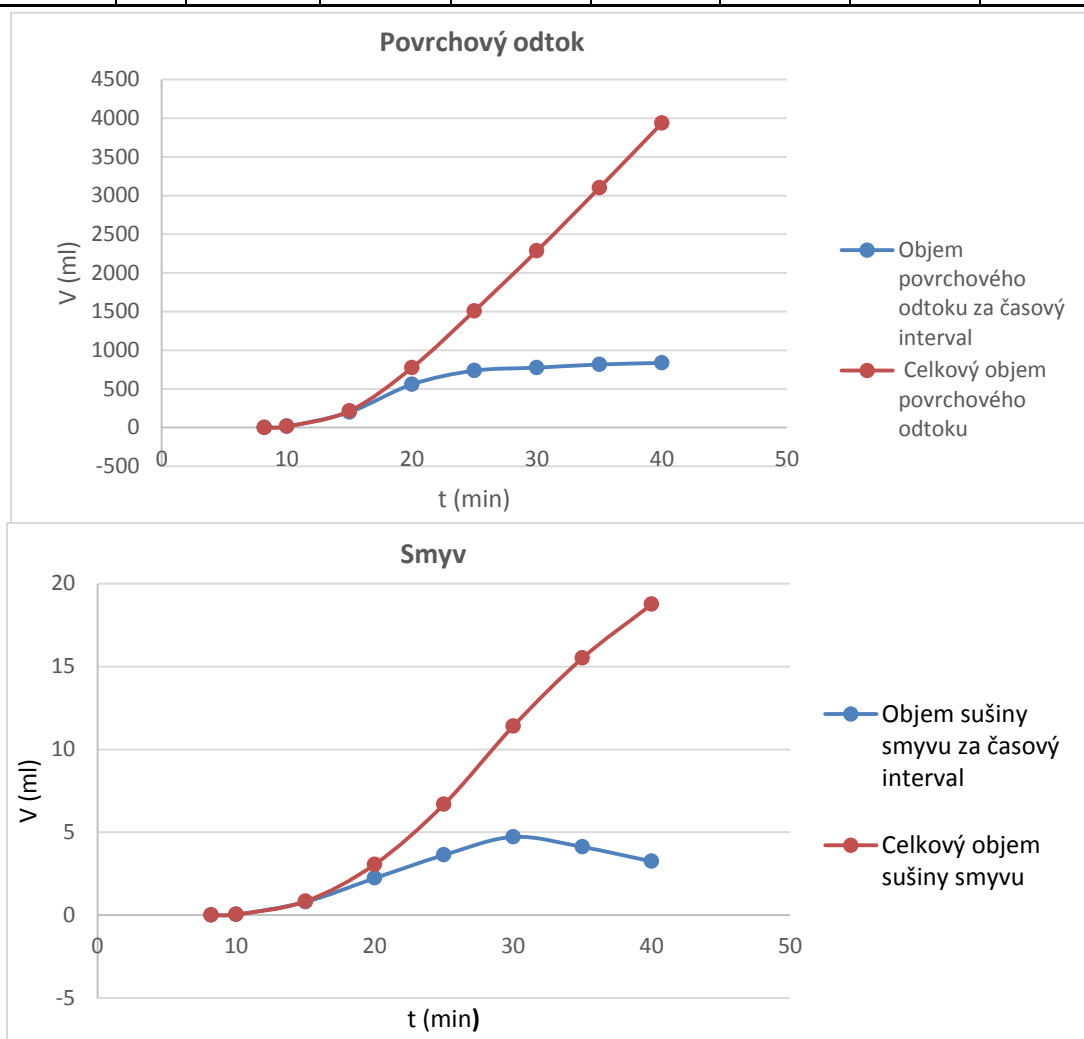
³⁰ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

Protokol o zkoušce erozních vlastností půdy

Vzorek č.: 2

$i = 0,96 \text{ mm/min}$

Číslo měření	Čas		Časový interval	Objem povrch. odtoku v čas. intervalu	Hmotn. sušiny smyvu	Objem. sušiny smyvu	Celkový objem. sušiny smyvu	Objem povrch. odtoku v čas. Intervalu	Celkový objem povrch. odtoku
	od	do							
-	min	min	min	ml	g	ml	ml	ml	ml
1	0	8.2	8.2	0	0	0	0	0	0
2	8.2	10	1.8	15	0.1	0.037736	0.037736	14.96226	14.96226
3	10	15	5	200	2.1	0.792453	0.830189	199.2075	214.1698
4	15	20	5	560	5.9	2.226415	3.056604	557.7736	771.9434
5	20	25	5	740	9.6	3.622642	6.679245	736.3774	1508.321
6	25	30	5	780	12.5	4.716981	11.39623	775.283	2283.604
7	30	35	5	820	10.9	4.113208	15.50943	815.8868	3099.491
8	35	40	5	840	8.6	3.245283	18.75472	836.7547	3936.245



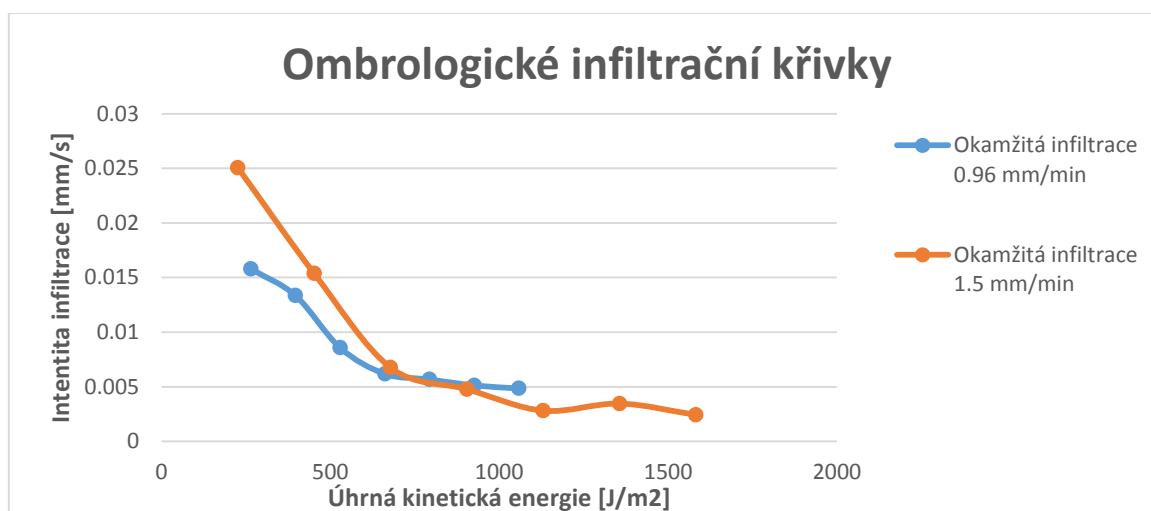
Obr. 16. Erozní vlastnosti půdy, $i = 0,96 \text{ mm/min}$ ³¹

³¹ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

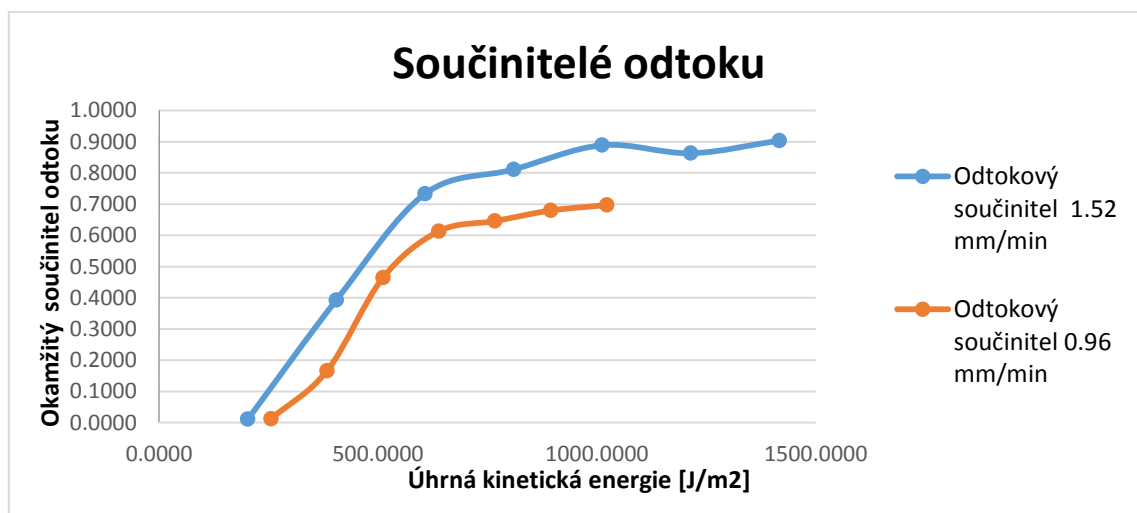
Osa x následujících grafů, byla pro srovnání účinků deště na vzorky zpracována v hodnotách vykonané práce (celkové energie) způsobené dopadajícím deštěm. Do grafů byly vyneseny průběhy infiltrace a odtokového součinitele, vždy pro dvě intenzity deště při energiích w_{k1} , w_{k2} , w_{k3} .

Při zkoumání průběhu dešťové infiltrace J. Morinem a kolektivem bylo pomocí experimentů dokázáno, že při disipaci kinetické energie deště, ztrácí půda vsakovací schopnost. Rychlost a velikost vsakovací schopnosti je závislá na druhu půdy a celkové kinetické energii deště.³²

Podle teorie odtoku z nechráněné půdy by měly být účinky deště při stejné dosažené úhrnné energii stejné, průběhy grafů by se tedy měly velmi přibližovat.



Obr. 17. Ombrologické infiltrační křivky pro w_{k1} ³³

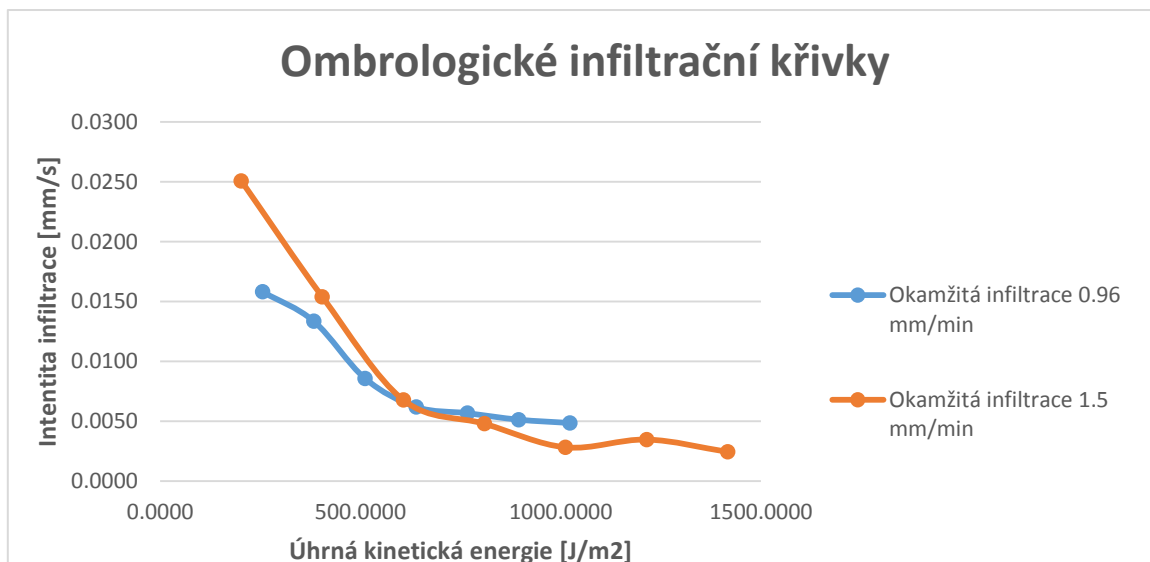


Obr. 18. Součinitel odtoku pro w_{k1} ³⁴

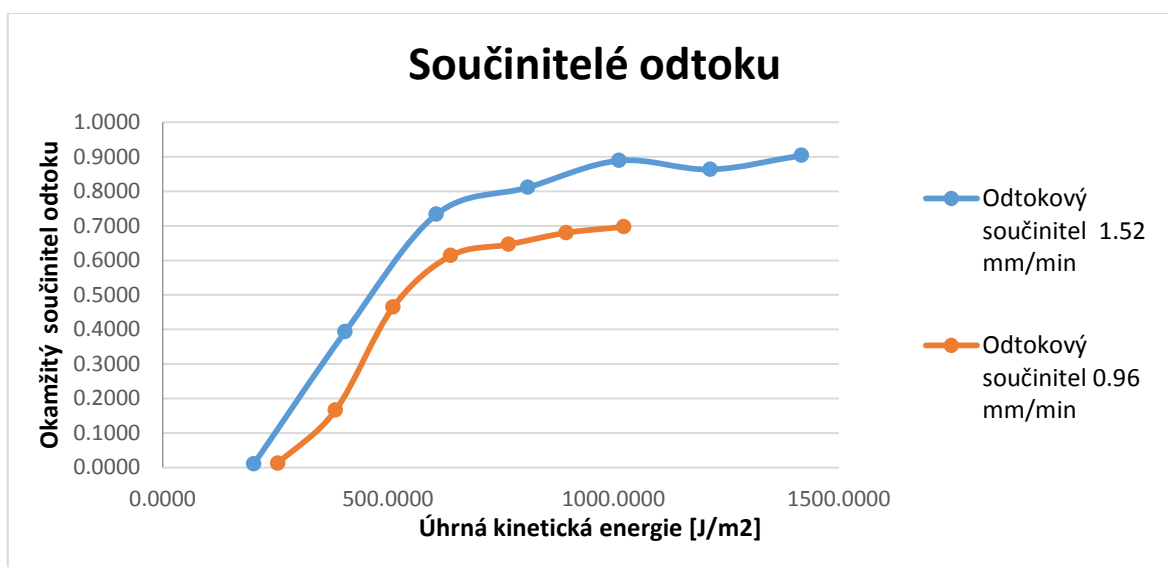
³² KASPRZAK, K. *Teoretickoexperimentální výzkum vlivu kulturní vegetace a antropogenních forem přetváření pedosféry na infiltraci srážkového vod do půdy, dílčí zpráva M03 dílčího výzkumného úkolu II-5-5-/02.* Brno: VUT Brno, 1984, s. 9

³³ Banzetová D. Graf v programu Microsoft Excel

³⁴ Banzetová D. Graf v programu Microsoft Excel



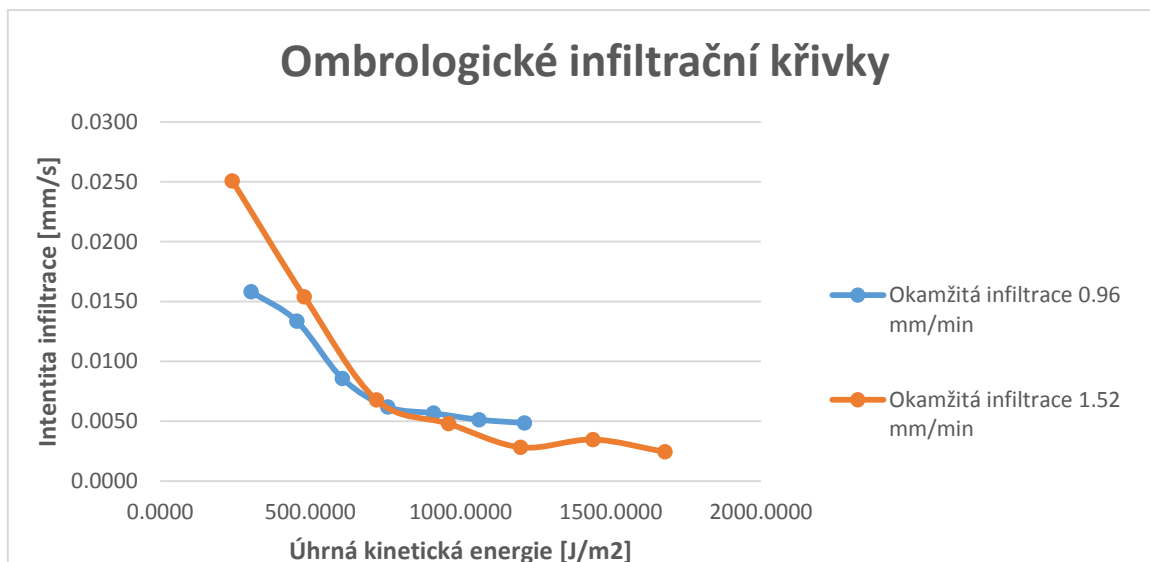
Obr. 19. Ombrologické infiltrační křivky pro w_{k2} ³⁵



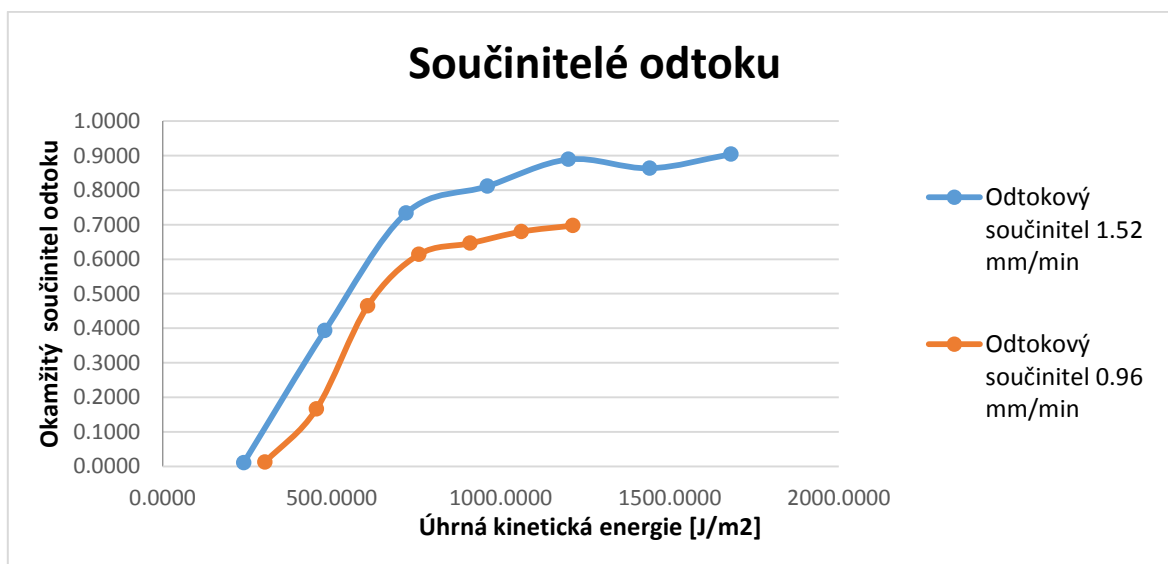
Obr. 20. Součinitelé odtoku pro w_{k2} ³⁶

³⁵ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

³⁶ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel



Obr. 21. Ombrologické infiltrační křivky pro w_{k3} ³⁷



Obr. 22. Součinitelé odtoku pro w_{k3} ³⁸

Z výše předložených grafů je zřejmé, že intenzita deště má vliv na jednotlivé charakteristiky (infiltrace, odtokový součinitel), což se projevuje na jejich rozdílném průběhu v závislosti na kinetické energii a celkové práci.

S ohledem na malý počet pokusů nelze dělat z dosažených průběhů hodnotící závěry.

³⁷ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

³⁸ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

8.1 Vyhodnocení laboratorních měření

Výsledky měření v závislosti na celkové energii (w_{k1} , w_{k2} , w_{k3}) byly proloženy náhradními křivkami. Rovnice křivek (7,8,9), které k jejich vytvoření zvolil doc. Kasprzak, mají parametry, které jsme získali z původních zpráv. Tento způsob vyhodnocení nám umožní srovnání měření, která byla prováděná ve VVÚ VSH s našimi měřeními za pomoci srovnání nových a původních parametrů těchto rovnic.

Protokol o zkoušce erozních vlastností půdy								
Vzorek č.:	1 - rovnice 5		$w_{k1} =$	0.753684	J/m ² s			
i	1,52 mm/min		k=	0.00046	$c_2 =$	400		
Číslo měření	Čas		Časový interval	Hmotn. sušiny smyvu	Hmotn. sušiny smyvu	Souhrnný smyv	Rovnice smyvu	Kinetická energie
	od	do						
-	min	min	min	g	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	J/m ²
1	0	4.15	4.15	0	0	0	0	187.6672
2	4.15	5	0.85	0.1	0.0004	0.0004	-0.0800	226.1051
3	5	10	5	8.8	0.0352	0.0356	0.0240	452.2102
4	10	15	5	18.3	0.0732	0.1088	0.1280	678.3153
5	15	20	5	22.4	0.0896	0.1984	0.2320	904.4204
6	20	25	5	28.4	0.1136	0.312	0.3360	1130.5255
7	25	30	5	25.4	0.1016	0.4136	0.4401	1356.6307
8	30	35	5	32.6	0.1304	0.544	0.5441	1582.7358

Souhrnný smyv

Úhrnný smyv [kg/m²]

Úhrnná kinetická energie [J/m²]

— Souhrnný smyv měřený
— Rovnice smyvu

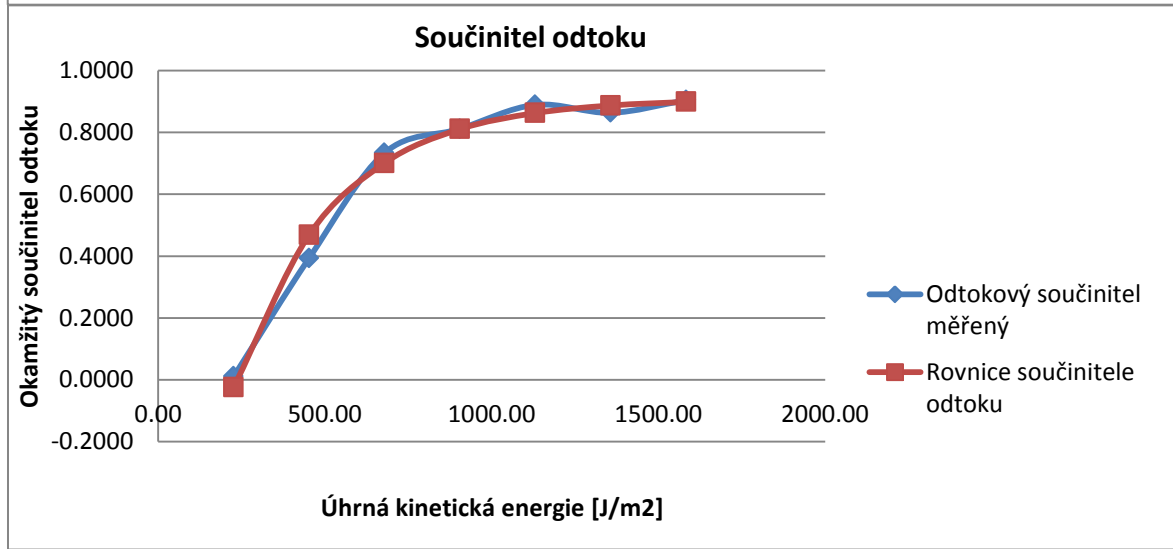
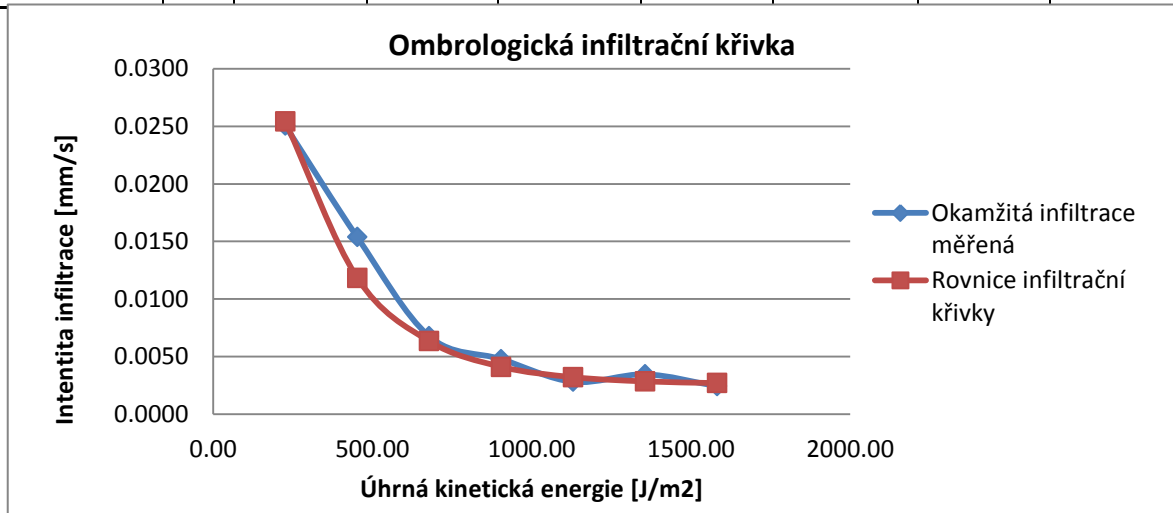
Obr. 23. Souhrnný smyv pro $i = 1,52$ mm/min, w_{k1} ³⁹

³⁹ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

Protokol o zkoušce erozních vlastností půdy

Vzorek č.: 1 - rovnice 5 $W_{k1} = 0.753684 \text{ J/m}^2\text{s}$
 $i = 1,52 \text{ mm/min}$

Číslo měření	Čas		Časový interval	Okamžitá infiltrace v_i	Odtokový součinitel	Kinetická energie	Okamžitá infiltrace v_i (rovnice)	Odtokový součinitel (rovnice)
	od	do						
-	min	min	min	mm/s		J/m ²	mm/s	
1	0	4.15	4.15	0	0	187.6672	0	0
2	4.15	5	0.85	0.0251	0.0105	226.1051	0.0254	-0.0241
3	5	10	5	0.0154	0.3930	452.2102	0.0118	0.4682
4	10	15	5	0.0068	0.7332	678.3153	0.0063	0.7008
5	15	20	5	0.0048	0.8113	904.4204	0.0041	0.8106
6	20	25	5	0.0028	0.8891	1130.5255	0.0032	0.8625
7	25	30	5	0.0035	0.8634	1356.6307	0.0028	0.8870
8	30	35	5	0.0024	0.9041	1582.7358	0.0027	0.8986



Obr. 24. Ombrologická křivka a součinitel odtoku pro $i = 1,52 \text{ m/min}$, W_{k1} ⁴⁰

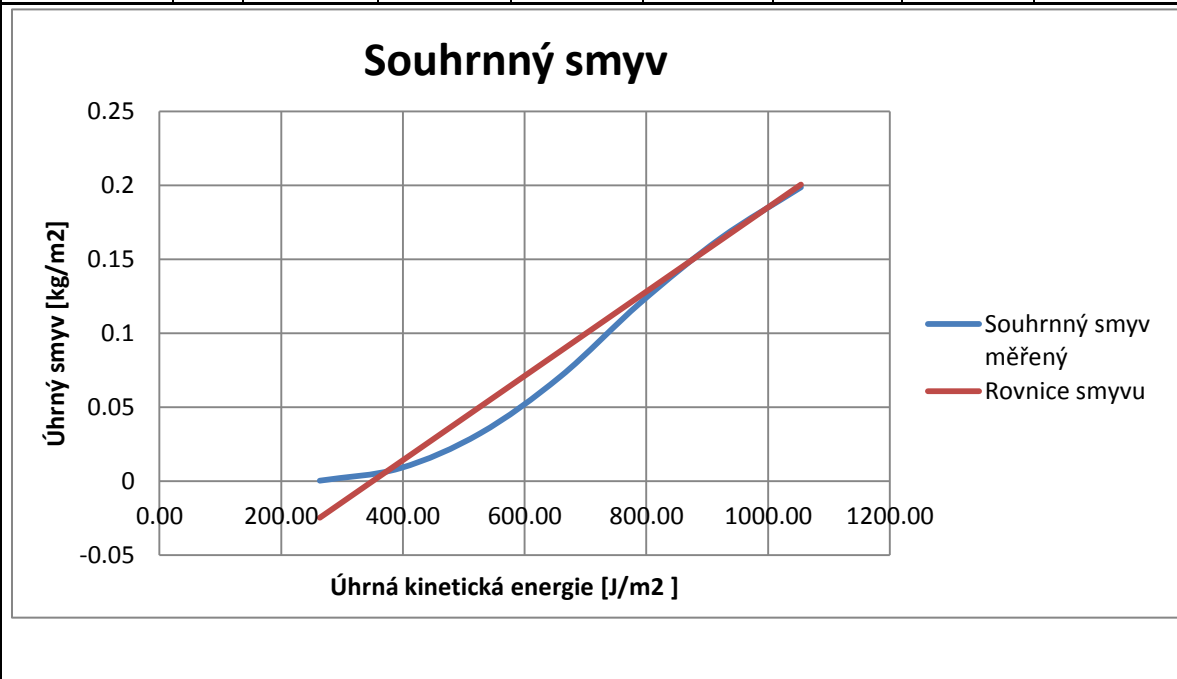
⁴⁰ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

Protokol o zkoušce erozních vlastností půdy

Vzorek č.: 2 - rovnice 5 $w_{kl} = 0.439148 \text{ J/m}^2\text{s}$

$i = 0,96 \text{ mm/min}$ $k = 0.000285$ $c_2 = 350$

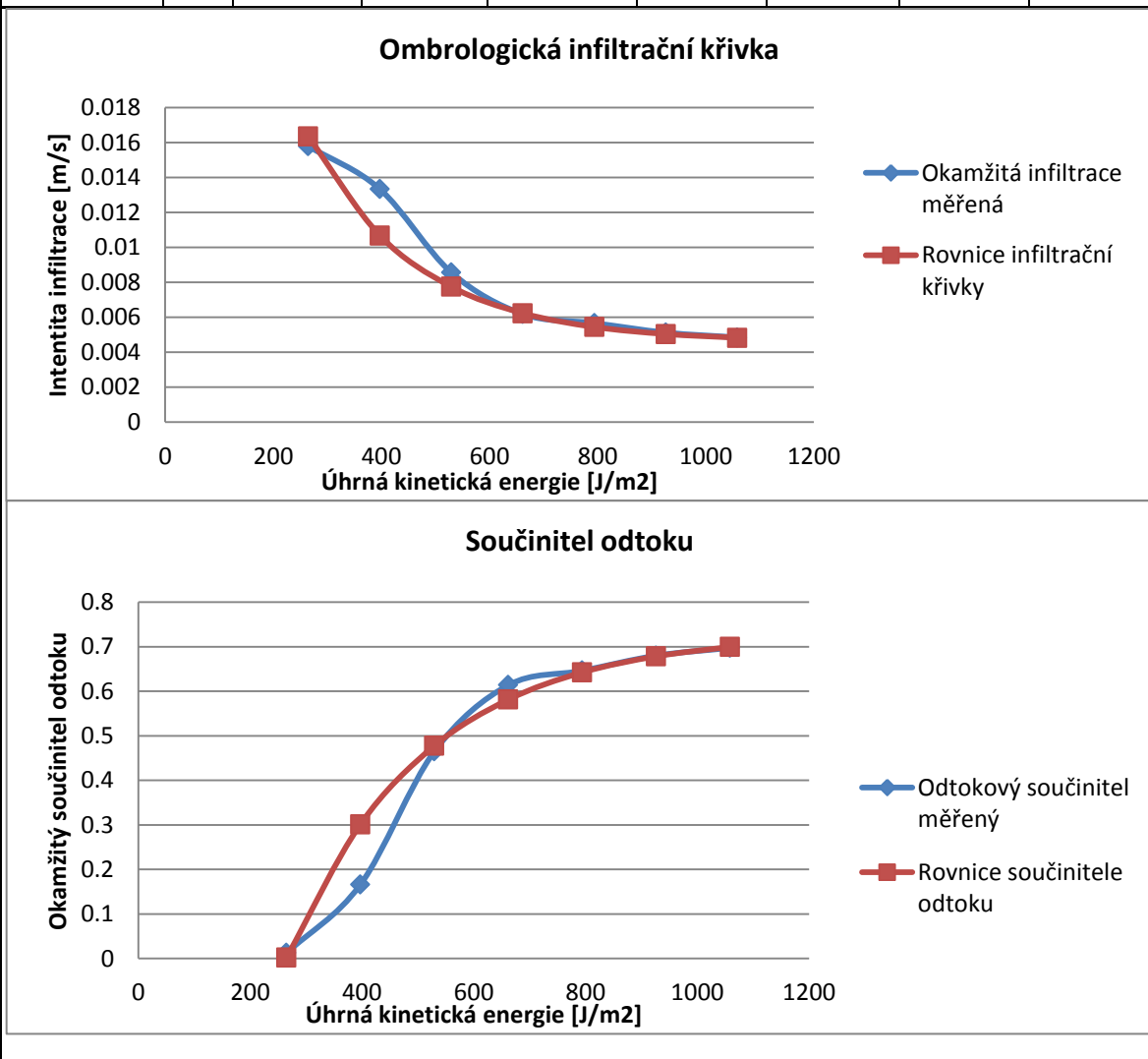
Číslo měření	Čas		Časový interval	Hmotn. sušiny smyvu	Hmotn. sušiny smyvu	Souhrnný smyv	Rovnice smyvu	Kinetická energie
	od	do						
-	min	min	min	g	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	J/m ²
1	0	4.15	4.15	0	0	0	0	216.0606
2	4.15	5	0.85	0.1	0.0004	0.0004	-0.0247	263.4886
3	5	10	5	2.1	0.0084	0.0088	0.0129	395.2329
4	10	15	5	5.9	0.0236	0.0324	0.0504	526.9772
5	15	20	5	9.6	0.0384	0.0708	0.0880	658.7214
6	20	25	5	12.5	0.05	0.1208	0.1255	790.4657
7	25	30	5	10.9	0.0436	0.1644	0.1631	922.2100
8	30	35	5	8.6	0.0344	0.1988	0.2006	1053.9543



Obr. 25. Souhrnný smyv pro $i = 0,96 \text{ mm/min}$, w_{kl} ⁴¹

⁴¹ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

Protokol o zkoušce erozních vlastností půdy								
Vzorek č.:		2 - rovnice 5		$W_{kl} =$		0.439148 J/m ² s		
i		0,96 mm/min						
Číslo měření	Čas		Časový interval	Okamžitá infiltrace v_i	Odtokový součinitel	Kinetická energie	Okamžitá infiltrace v_i (rovnice)	Odtokový součinitel (rovnice)
	od	do						
-	min	min	min	mm/s		J/m ²	mm/s	
1	0	4.15	4.15	0		217.0446	0	0
2	4.15	5	0.85	0.015801	0.012469	264.6886	0.016357	0.002008
3	5	10	5	0.013344	0.166006	397.0329	0.010685	0.301233
4	10	15	5	0.008563	0.464811	529.3772	0.007749	0.477469
5	15	20	5	0.006182	0.613648	661.7214	0.00623	0.581266
6	20	25	5	0.005663	0.646069	794.0657	0.005443	0.6424
7	25	30	5	0.005122	0.679906	926.41	0.005036	0.678406
8	30	35	5	0.004843	0.697296	1058.754	0.004826	0.699613



Obr. 26. Ombrologická křivka a součinitel odtoku pro $i = 0,96$ mm/min, w_{kl} ⁴²

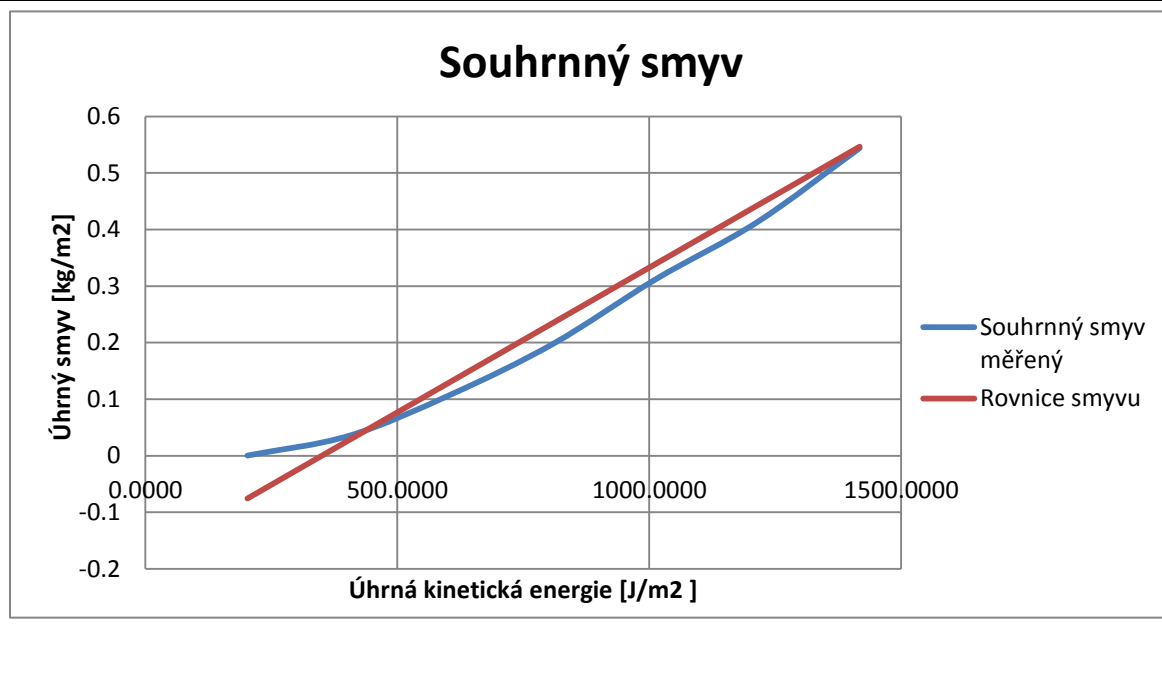
⁴² Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

Protokol o zkoušce erozních vlastností půdy

Vzorek č.: 1 - rovnice 6 a obr. 12 $w_{k2} = 0.675007 \text{ J/m}^2\text{s}$

$i = 1,52 \text{ mm/min}$ $k = 0.000512$ $c_2 = 350$

Číslo měření	Čas		Časový interval	Hmotn. sušiny smyvu	Hmotn. sušiny smyvu	Souhrnný smyv	Rovnice smyvu	Kinetická energie
	od	do						
-	min	min	min	g	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	J/m ²
1	0	4.15	4.15	0	0	0	0	168.0767
2	4.15	5	0.85	0.1	0.0004	0.0004	-0.0755	202.5020
3	5	10	5	8.8	0.0352	0.0356	0.0282	405.0040
4	10	15	5	18.3	0.0732	0.1088	0.1318	607.5060
5	15	20	5	22.4	0.0896	0.1984	0.2355	810.0080
6	20	25	5	28.4	0.1136	0.312	0.3392	1012.5100
7	25	30	5	25.4	0.1016	0.4136	0.4429	1215.0120
8	30	35	5	32.6	0.1304	0.544	0.5466	1417.5140

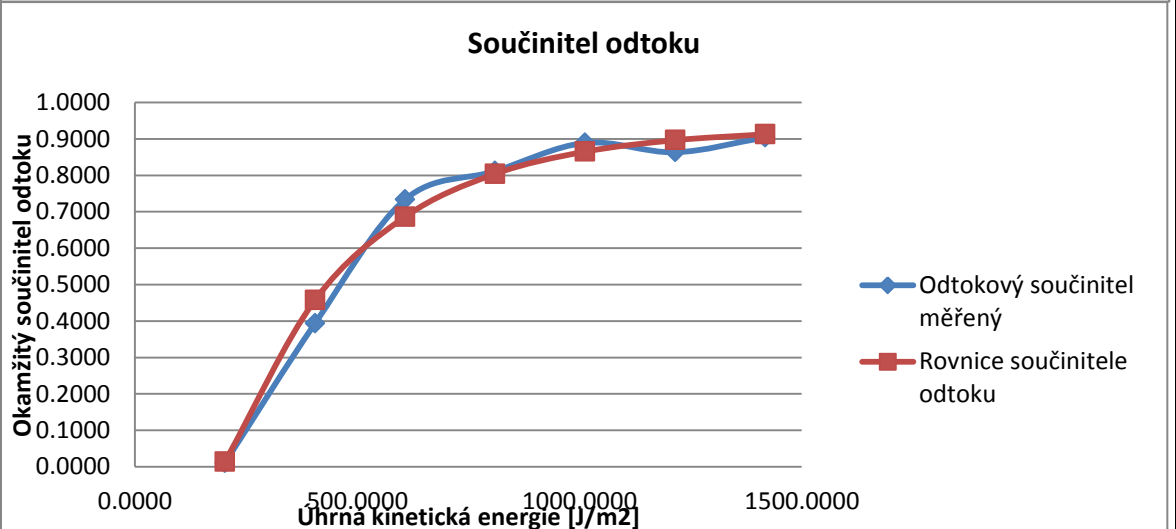
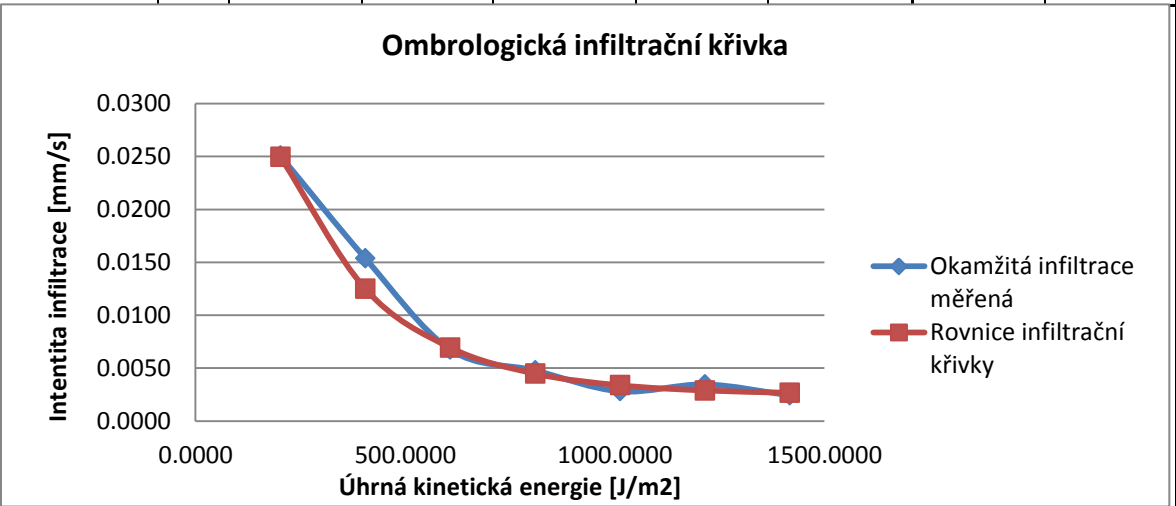


Obr. 27. Souhrnný smyv pro $i = 1,52 \text{ mm/min}$, w_{k2} ⁴³

⁴³ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

Protokol o zkoušce erozních vlastností půdy
 Vzorek č.: 1 - rovnice 6 a obr. 12 $w_{k2} = 0.675007 \text{ J/m}^2\text{s}$
 $i = 1,52 \text{ mm/min}$

Číslo měření	Čas		Časový interval	Okamžitá infiltrace v_i	Odtokový součinitel	Kinetická energie	Okamžitá infiltrace v_i (rovnice)	Odtokový součinitel (rovnice)
	od	do						
-	min	min	min	mm/s		J/m ²	mm/s	
1	0	4.15	4.15	0	0	168.0767	0	0
2	4.15	5	0.85	0.0251	0.0105	202.5020	0.0250	0.0136
3	5	10	5	0.0154	0.3930	405.0040	0.0125	0.4571
4	10	15	5	0.0068	0.7332	607.5060	0.0069	0.6859
5	15	20	5	0.0048	0.8113	810.0080	0.0045	0.8040
6	20	25	5	0.0028	0.8891	1012.5100	0.0034	0.8650
7	25	30	5	0.0035	0.8634	1215.0120	0.0029	0.8965
8	30	35	5	0.0024	0.9041	1417.5140	0.0027	0.9127



Obr. 28. Ombrologická křivka a součinitel odtoku pro $i = 1,52 \text{ mm/min}$, w_{k2} ⁴⁴

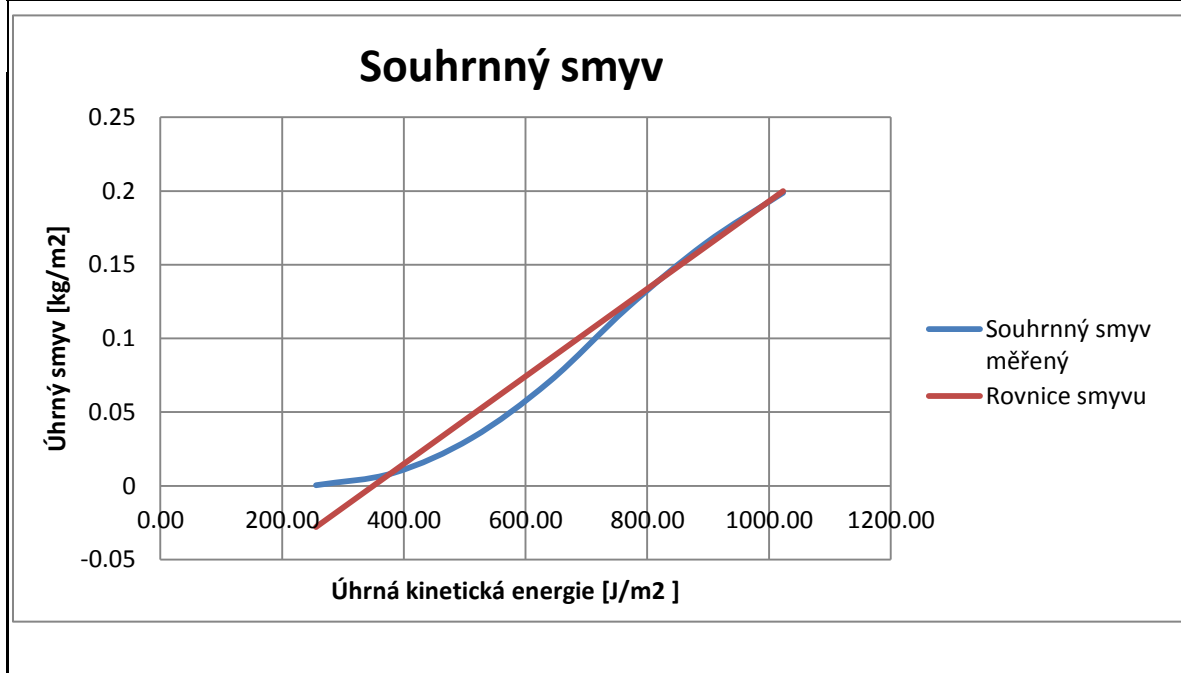
⁴⁴ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

Protokol o zkoušce erozních vlastností půdy

Vzorek č.: 2 - rovnice 6 a obr. 12 $w_{k2} = 0.42632 \text{ J/m}^2\text{s}$

$i = 0,96 \text{ mm/min}$ $k = 0.000297$ $c_2 = 350$

Číslo měření	Čas		Časový interval	Hmotn. sušiny smyvu	Hmotn. sušiny smyvu	Souhrnný smyv	Rovnice smyvu	Kinetická energie
	od	do						
-	min	min	min	g	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	J/m ²
1	0	4.15	4.15	0	0	0	0	209.7494
2	4.15	5	0.85	0.1	0.0004	0.0004	-0.0280	255.7920
3	5	10	5	2.1	0.0084	0.0088	0.0100	383.6880
4	10	15	5	5.9	0.0236	0.0324	0.0480	511.5840
5	15	20	5	9.6	0.0384	0.0708	0.0860	639.4800
6	20	25	5	12.5	0.05	0.1208	0.1240	767.3760
7	25	30	5	10.9	0.0436	0.1644	0.1619	895.2720
8	30	35	5	8.6	0.0344	0.1988	0.1999	1023.1680



Obr. 29. Souhrnný smyv pro $i = 0,96 \text{ mm/min}$, w_{k2} ⁴⁵

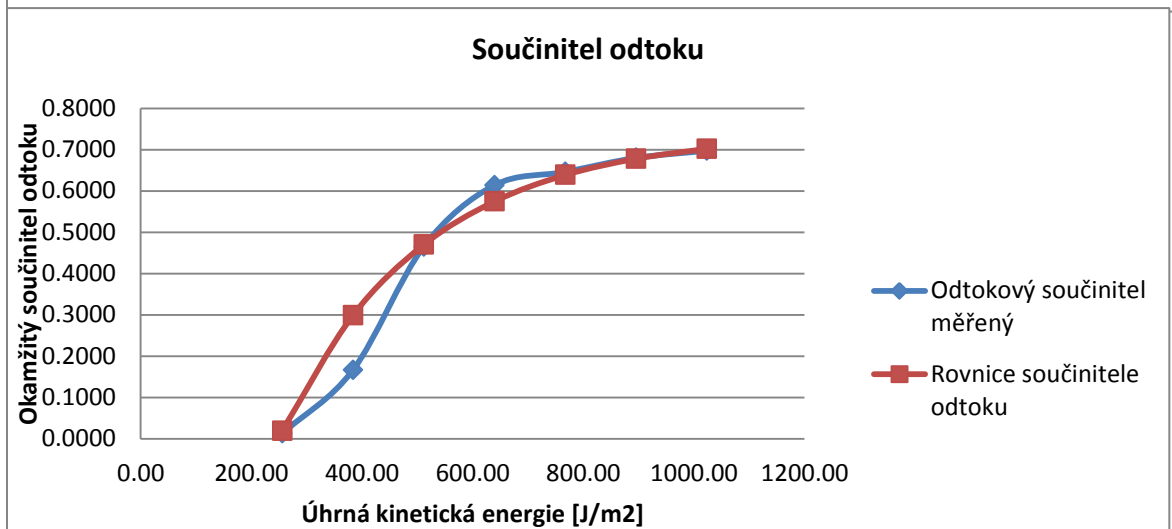
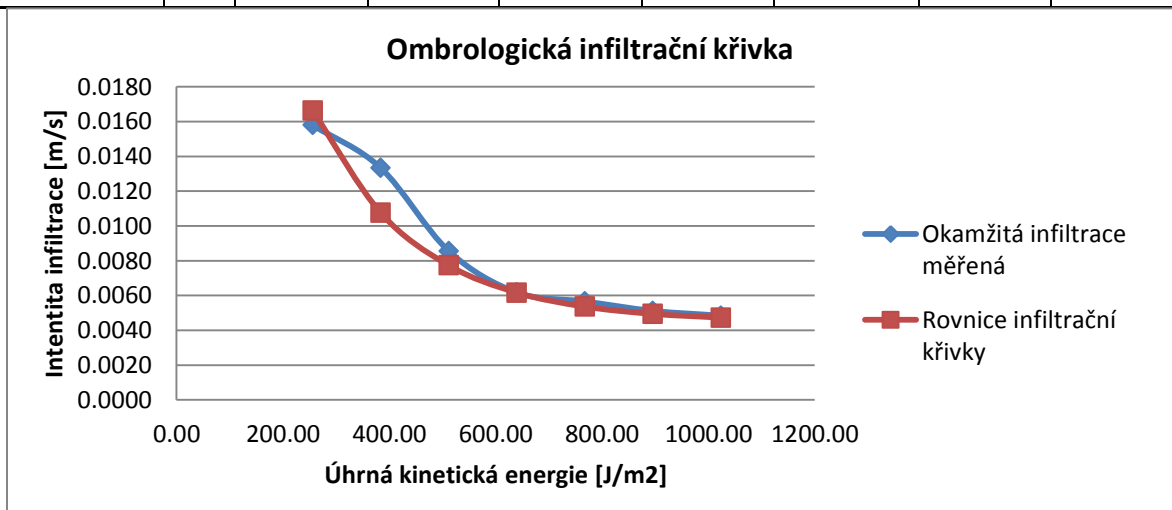
⁴⁵ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

Protokol o zkoušce erozních vlastností půdy

Vzorek č.: 2 - rovnice 6 a obr. 12 $w_{k2} = 0.42632 \text{ J/m}^2\text{s}$

$i = 0,96 \text{ mm/min}$

Číslo měření	Čas		Časový interval	Okamžitá infiltrace v_i	Odtokový součinitel	Kinetická energie	Okamžitá infiltrace v_i (rovnice)	Odtokový součinitel (rovnice)
	od	do						
-	min	min	min	mm/s		J/m^2	mm/s	
1	0	4.15	4.15	0		209.7494	0	0
2	4.15	5	0.85	0.0158	0.0125	255.7920	0.0166	0.0190
3	5	10	5	0.0133	0.1660	383.6880	0.0108	0.2984
4	10	15	5	0.0086	0.4648	511.5840	0.0077	0.4696
5	15	20	5	0.0062	0.6136	639.4800	0.0062	0.5744
6	20	25	5	0.0057	0.6461	767.3760	0.0054	0.6386
7	25	30	5	0.0051	0.6799	895.2720	0.0049	0.6779
8	30	35	5	0.0048	0.6973	1023.1680	0.0047	0.7019



Obr. 30. Ombrologická křivka a součinitel odtoku pro $i = 0,96 \text{ mm/min}$, w_{k2} ⁴⁶

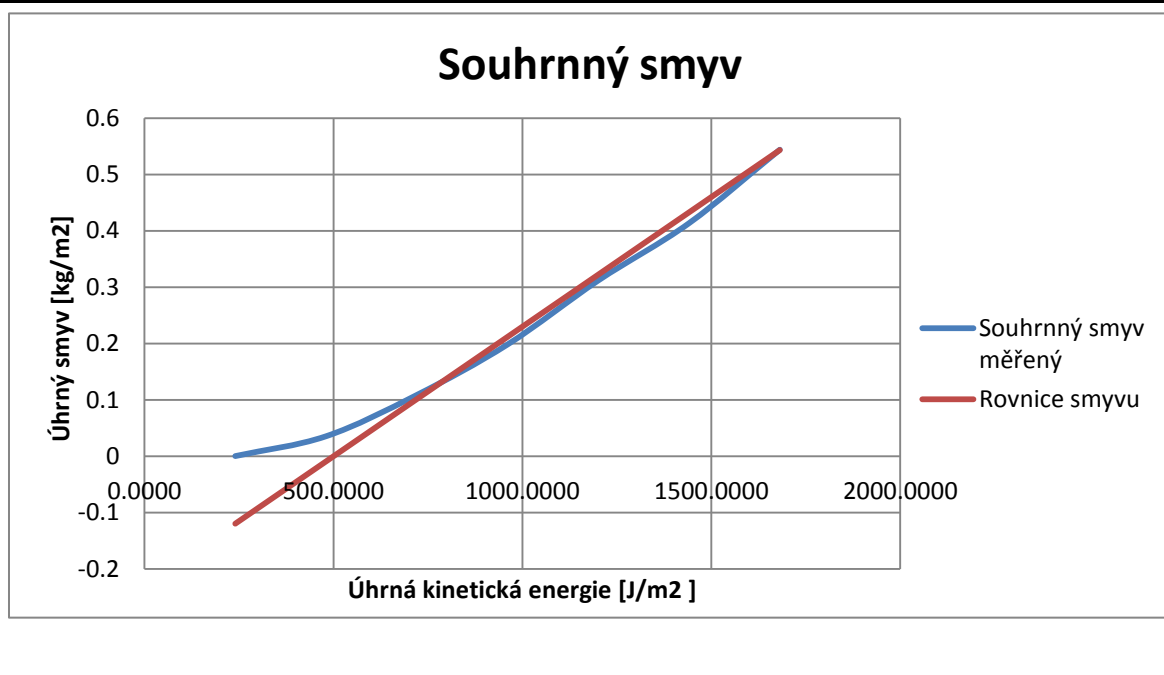
⁴⁶ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

Protokol o zkoušce erozních vlastností půdy

Vzorek č.: 1 - rovnice 6 $w_{k3} = 0.800565 \text{ J/m}^2\text{s}$

$i = 1,52 \text{ mm/min}$ $k = 0.00046$ $c_2 = 500$

Číslo měření	Čas		Časový interval	Hmotn. sušiny smyvu	Hmotn. sušiny smyvu	Souhrnný smyv	Rovnice smyvu	Kinetická energie
	od	do						
-	min	min	min	g	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	J/m ²
1	0	4.15	4.15	0	0	0	0	199.3407
2	4.15	5	0.85	0.1	0.0004	0.0004	-0.1195	240.1695
3	5	10	5	8.8	0.0352	0.0356	-0.0090	480.3390
4	10	15	5	18.3	0.0732	0.1088	0.1014	720.5085
5	15	20	5	22.4	0.0896	0.1984	0.2119	960.6780
6	20	25	5	28.4	0.1136	0.312	0.3224	1200.8475
7	25	30	5	25.4	0.1016	0.4136	0.4329	1441.0170
8	30	35	5	32.6	0.1304	0.544	0.5433	1681.1865



Obr. 31. Souhrnný smyv pro $i = 1,52 \text{ mm/min}$, w_{k3} ⁴⁷

⁴⁷ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

Protokol o zkoušce erozních vlastností půdy

Vzorek č.: 1 - rovnice 6

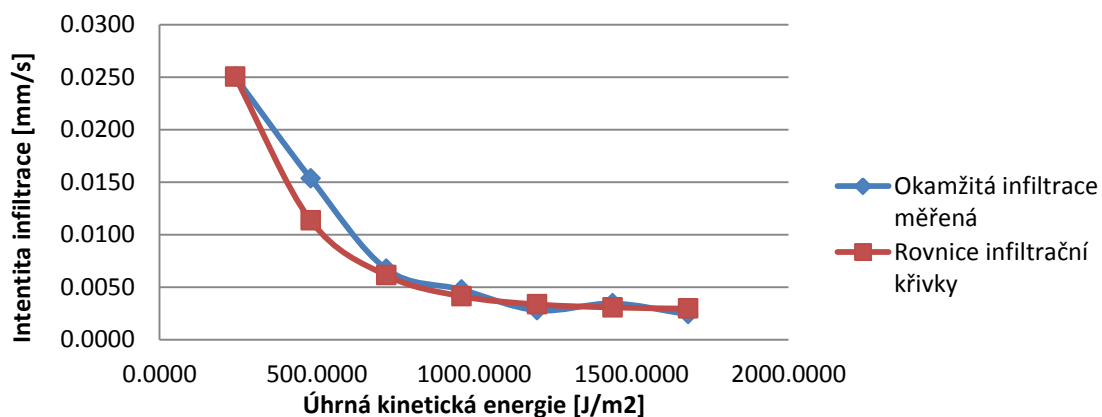
$w_{k3} =$

0.800565 J/m²s

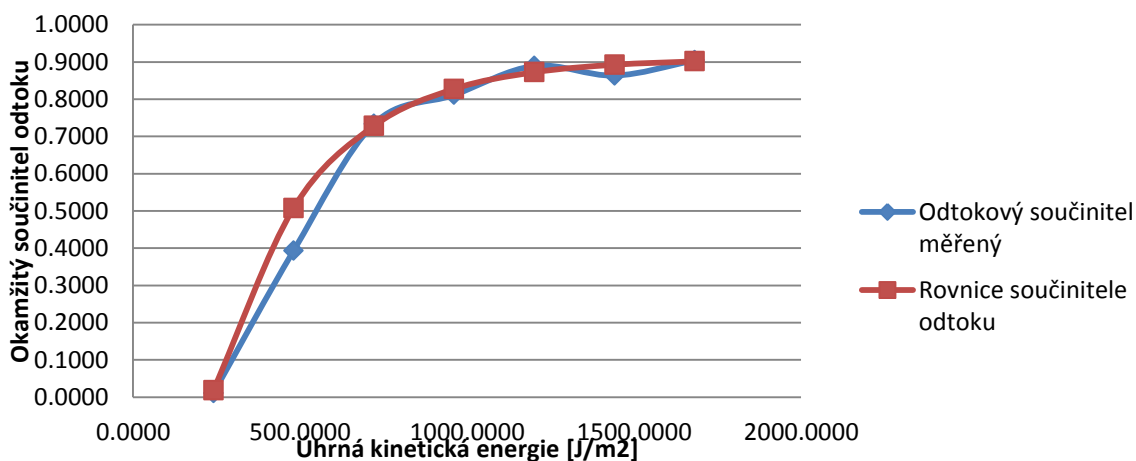
$i = 1,52$ mm/min

Číslo měření	Čas		Časový interval	Okamžitá infiltrace v_i	Odtokový součinitel	Kinetická energie	Okamžitá infiltrace v_i (rovnice)	Odtokový součinitel (rovnice)
	od	do						
-	min	min	min	mm/s		J/m ²	mm/s	
1	0	4.15	4.15	0	0	199.3407	0	0
2	4.15	5	0.85	0.0251	0.0105	240.1695	0.0251	0.0184
3	5	10	5	0.0154	0.3930	480.3390	0.0114	0.5075
4	10	15	5	0.0068	0.7332	720.5085	0.0061	0.7280
5	15	20	5	0.0048	0.8113	960.6780	0.0041	0.8274
6	20	25	5	0.0028	0.8891	1200.8475	0.0034	0.8722
7	25	30	5	0.0035	0.8634	1441.0170	0.0031	0.8924
8	30	35	5	0.0024	0.9041	1681.1865	0.0030	0.9015

Ombrologická infiltrační křivka



Součinitel odtoku



Obr. 32. Ombrologická křivka a součinitel odtoku pro $i = 1,52$ mm/min, w_{k3} ⁴⁸

⁴⁸ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

Protokol o zkoušce erozních vlastností půdy

Vzorek č.: 2 - rovnice 6

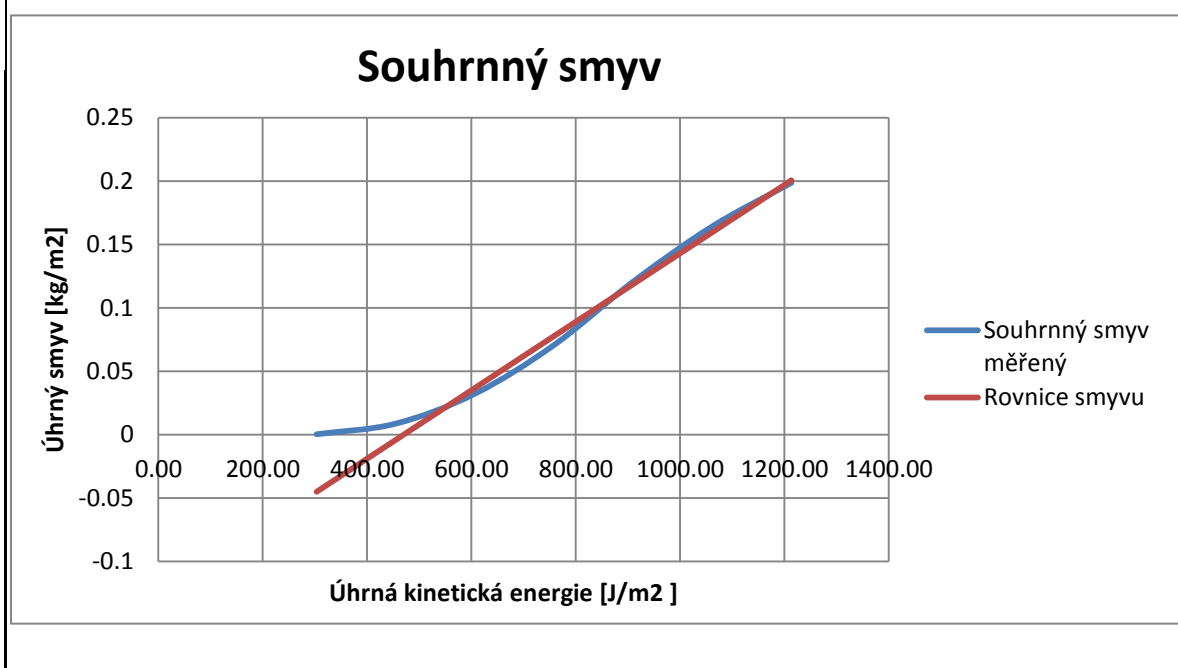
$w_{k3} = 0.50562 \text{ J/m}^2\text{s}$

$i = 0,96 \text{ mm/min}$

$k = 0.00027$

$c_2 = 470$

Číslo měření	Čas		Časový interval	Hmotn. sušiny smyvu	Hmotn. sušiny smyvu	Souhrnný smyv	Rovnice smyvu	Kinetická energie
	od	do						
-	min	min	min	g	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	J/m ²
1	0	4.15	4.15	0	0	0	0	248.7650
2	4.15	5	0.85	0.1	0.0004	0.0004	-0.0450	303.3720
3	5	10	5	2.1	0.0084	0.0088	-0.0040	455.0580
4	10	15	5	5.9	0.0236	0.0324	0.0369	606.7440
5	15	20	5	9.6	0.0384	0.0708	0.0779	758.4300
6	20	25	5	12.5	0.05	0.1208	0.1188	910.1160
7	25	30	5	10.9	0.0436	0.1644	0.1598	1061.8020
8	30	35	5	8.6	0.0344	0.1988	0.2007	1213.4880



Obr. 33. Souhrnný smyv pro $i = 0,96 \text{ mm/min}$, w_{k3} ⁴⁹

⁴⁹ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

Protokol o zkoušce erozních vlastností půdy

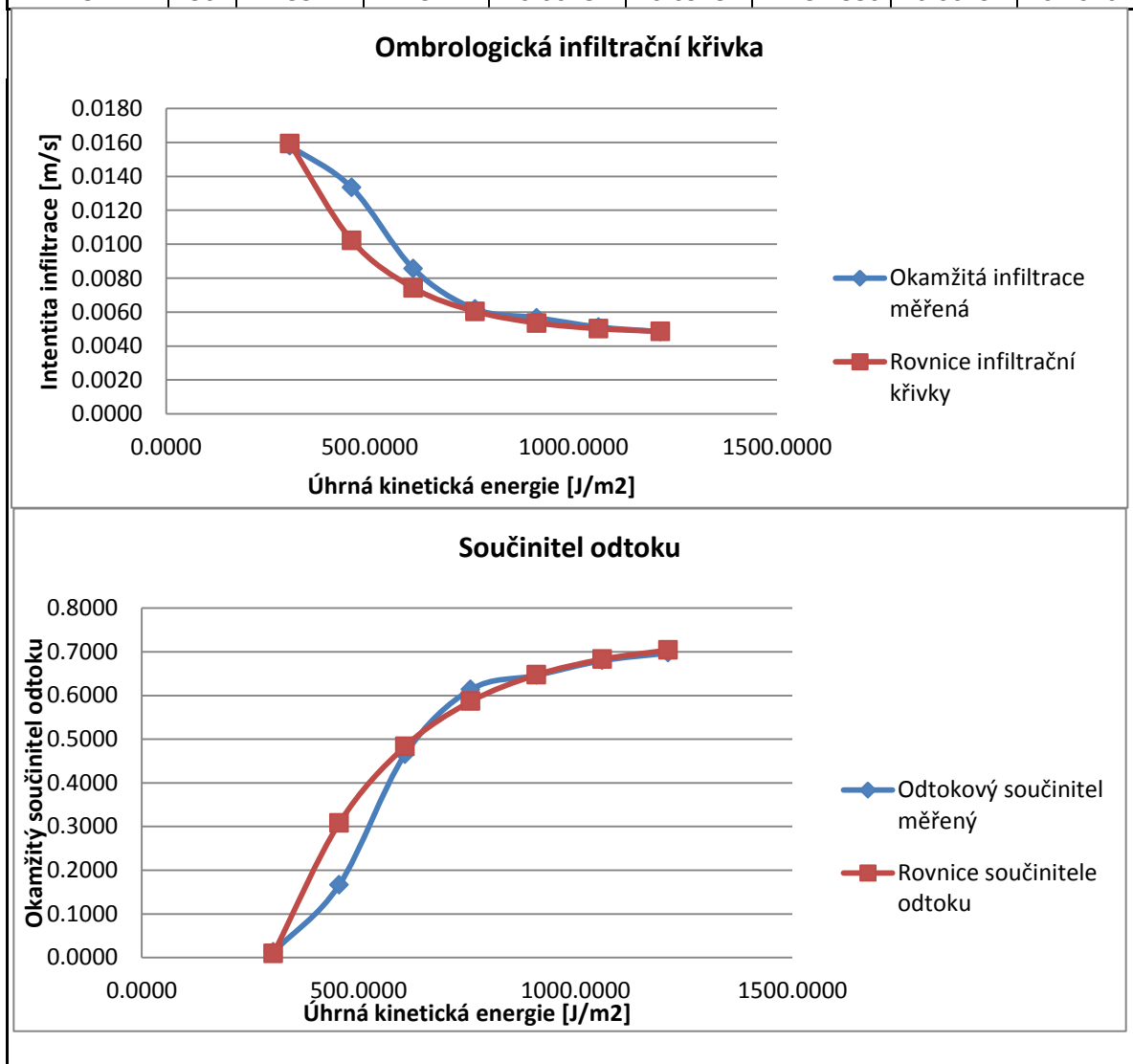
Vzorek č.: 2 - rovnice 6

wk3=

0.50562 J/m²s

i 0,96 mm/min

Číslo měření	Čas		Časový interval	Okamžitá infiltrace v _i	Odtokový součinitel	Kinetická energie	Okamžitá infiltrace v _i (rovnice)	Odtokový součinitel (rovnice)
	od	do						
-	min	min	min	mm/s		J/m ²	mm/s	
1	0	4.15	4.15	0	0	248.7650	0	0
2	4.15	5	0.85	0.0158	0.0125	303.3720	0.0159	0.0086
3	5	10	5	0.0133	0.1660	455.0580	0.0102	0.3074
4	10	15	5	0.0086	0.4648	606.7440	0.0074	0.4831
5	15	20	5	0.0062	0.6136	758.4300	0.0060	0.5865
6	20	25	5	0.0057	0.6461	910.1160	0.0054	0.6472
7	25	30	5	0.0051	0.6799	1061.8020	0.0050	0.6830
8	30	35	5	0.0048	0.6973	1213.4880	0.0049	0.7040



Obr. 34. Ombrologická křivka a součinitel odtoku pro $i = 0,96 \text{ mm/min}$, w_{k3} ⁵⁰

⁵⁰ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

Souhrnné parametry z jednotlivých intenzit při daných energiích (w_{k1} , w_{k2} , w_{k3}) jsou zpracovávány do tabulek v následující kapitole, kde jsou porovnávány s hodnotami z původního simulátoru deště.

Jako nej přesnější energie se jeví kinetická energie w_{k3} , která je vypočítána z přímo naměřené pádové rychlosti kapky a pomocí rovnice 6, kde je uvažována skutečná rychlost a skutečná intenzita deště.

Energie w_{k1} však přímo odpovídá udávané kinetické energii na původním simulátoru deště, tedy, že při intenzitě 1,5 mm/min je energie $w_k = 0,750 \text{ J/m}^2$, tato energie odpovídá v přirozených podmínkách energii 100 letého deště.⁵¹

Na původním simulátoru byla energie s největší pravděpodobností vypočítána pomocí pádové rychlosti odečtené z grafu konečných pádových rychlostí dešťových kapek a za pomoci rovnice 6, tedy stejně jako energie w_{k2} , kdy se uvažovalo, že díky nedostatečné výšce generátoru, je při zvýšené intenzitě možné dosáhnout požadované hodnoty energie právě v závislosti na výšce, rychlosti a intenzitě deště. Tyto předpoklady umožnily vyhodnotit parametry jako pro požadovanou zkoumanou intenzitu, pro kterou vychází požadovaná energie $w_k = 0,750 \text{ J/m}^2$.

9 Porovnání funkce simulátoru

Naměřené hodnoty na původním simulátoru (průměrné hodnoty mnoha měření)

Podmínky měření:

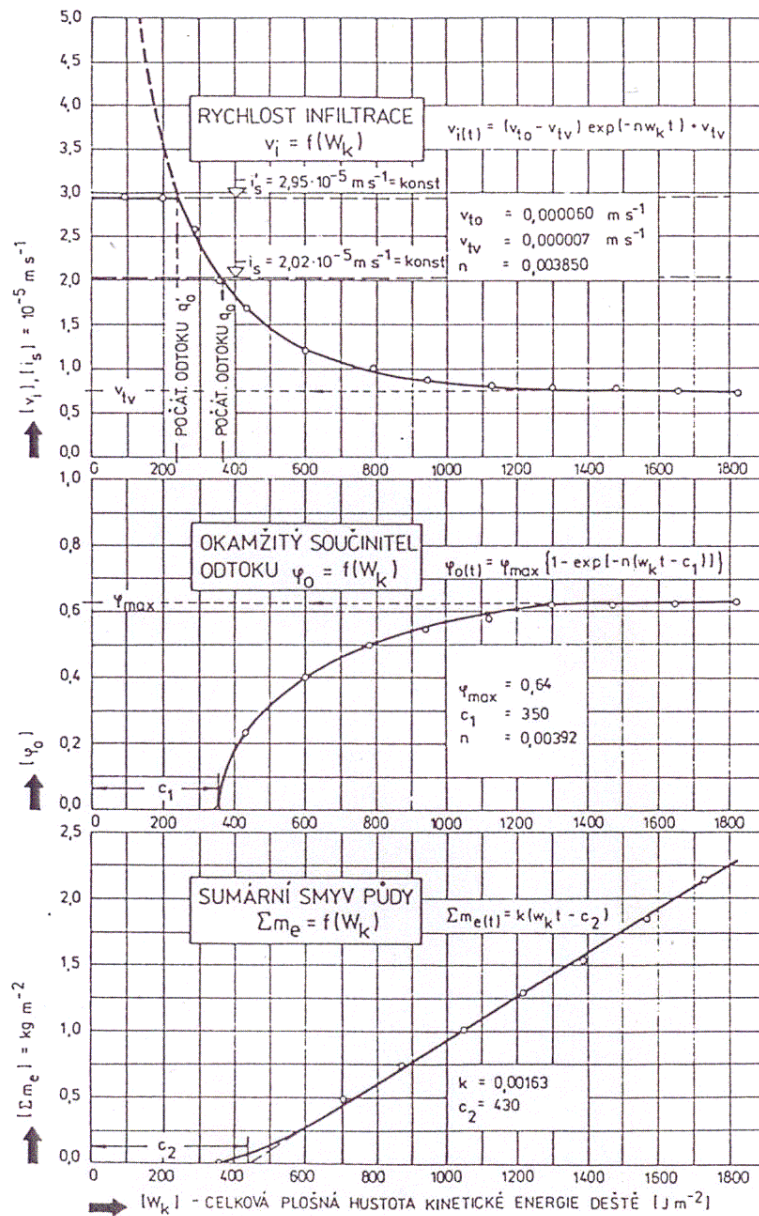
- Suchá kyprá půda
- Hlinitopísčítá lokalita Kníničky
- Intenzita deště 2.34 mm/min = 0.000039 m/s
- Intenzita redukováná 1.507 mm/min = 2.51167E-05 m/s
- Energie deště 0.75 J/sm²
- Plocha vzorkovnice 2500 cm² = 0.25 m²
- Sklon povrchu 8.5 %

⁵¹ KASPRZAK, K. *Teoretické a praktické vyhodnocení zatravněných ploch namáhaných erozními účinky srážkové vody*. Brno: VUT Brno. 1980, s. 68 - 70

Číslo měření	Infiltrace			Povrchový odtok			Smyv	
	v_{i0}	v_{iv}	n	Φ_{max}	$C1$	n	k	$C2$
	mm/s							
Kasprzak	0.06	0.007	0.0039	0.64	350	0.00392	0.00163	430

Tab. 2. Naměřené průměrné hodnoty na původním simulátoru deště⁵²

Průměrné charakteristiky působení deště na holou půdu naměřené na simulátoru dešťů v Kníničkách.



Obr. 35. Erozní vlastnosti půdy, $i = 1.507 \text{ mm/min}$ ⁵³

⁵² MILERSKI, R., Laboratorní testování vybraných hydrologických vlastností orné půdy transformované na pastvinu a jeho výsledky. Brno: VUT FAST Ústav vodního hospodářství krajiny. 1995, s. 10

⁵³ MILERSKI, R., Laboratorní testování vybraných hydrologických vlastností orné půdy transformované na pastvinu a jeho výsledky. Brno: VUT FAST Ústav vodního hospodářství krajiny. 1995, s. 10

Naměřené hodnoty na novém simulátoru deště

Podmínky měření:

- Suchá kyprá půda
- Hlinitopísčítá lokalita Kníničky
- Intenzita deště 1 1,52 mm/min = 0.000025 m/s
- Intenzita deště 2 0,96 mm/min = 0.000016 m/s
- Energie deště 1 – wk1 0.754 J/sm²
- Energie deště 1 – wk2 0.675 J/sm²
- Energie deště 1 – wk3 0.801 J/sm²
- Energie deště 2 – wk1 0.439 J/sm²
- Energie deště 2 – wk2 0.426 J/sm²
- Energie deště 2 – wk3 0.506 J/sm²
- Plocha vzorkovnice 2500 cm² = 0.25 m²
- Sklon povrchu 8.5 %

Číslo měření	Infiltrace			Povrchový odtok			Smyv	
	v _{i0}	v _{iv}	n	Φmax	C1	n	k	C2
	mm/s		J/m ²		J/m ²	J ⁻¹		
wk1	0.059	0.0026	0.004	0.93	3.7	0.178	0.00046	400
wk2	0.053	0.0025	0.004	0.93	3.3	0.196	0.00051	350
wk3	0.0608	0.0029	0.004	0.909	3.9	0.199	0.00046	500

Tab. 3. Parametry rovnic křivek pro i = 1,52 mm/min⁵⁴

Číslo měření	Infiltrace			Povrchový odtok			Smyv	
	v _{i0}	v _{iv}	n	Φmax	C1	n	k	C2
	mm/s		J/m ²		J/m ²	J ⁻¹		
wk1	0.0505	0.0047	0.3	0.73	4.4	0.24	0.00029	350
wk2	0.05	0.0045	0.31	0.74	4.15	0.23	0.00030	350
wk3	0.051	0.0047	0.28	0.734	5	0.21	0.00027	470

Tab. 4. Parametry rovnic křivek pro i = 0,96 mm/min⁵⁵

⁵⁴ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

⁵⁵ Banzetová D. Výpočet a graf v programu Microsoft Excel

Pro porovnání parametrů vlivu deště na půdu uvádím dále tabulku parametrů změřených v roce 1995 na půdních vzorcích zkoumaných jako přechod orné půdy na zatravněnou. V tabulce jsou uvedeny hodnoty získané v prvním měsíci zatravnění.

Číslo měření	Infiltrace			Povrchový odtok		
	v_{i0}	v_{iv}	n	Φ_{max}	$C1$	n
	mm/s		J/m^2		J/m^2	J^{-1}
1	0.045	0.018	0.01	0.25	25	0.005
2	0.045	0.018	0.009	0.35	160	0.005
3	0.045	0.018	0.002	0.45	700	0.0015

Tab. 5. Parametry rovnic křivek pro srovnání⁵⁶

Pro srovnání smyvu byla vybrána hodnota smyvu při dosažení přetvárné sumy energie 1000 J/m².

Srovnání velikosti smyvu (odečtené hodnoty z grafů)

Číslo měření	Smyv půdy při 1000 J/m ²
1,52 mm/min	
w_{k1} (kg/m ²)	0.28
w_{k2} (kg/m ²)	0.32
w_{k3} (kg/m ²)	0.23

Tab. 6. Množství smyvu, $i = 1,52$ mm/min⁵⁷

Číslo měření	Smyv půdy při 1000 J/m ²
0,96 mm/min	
w_{k1} (kg/m ²)	0.18
w_{k2} (kg/m ²)	0.19
w_{k3} (kg/m ²)	0.14

Tab. 7. Množství smyvu, $i = 0,96$ mm/min⁵⁸

Číslo měření	Smyv půdy při 1000 J/m ²
Kasprzak (kg/m ²)	0.9

Tab. 8. Množství smyvu původní simulátor⁵⁹

Aby bylo možno porovnávat účinky simulátoru původní a nové instalace, byla, jak bylo uvedeno výše, použita pro diplomovou práci stejná půda, viz zrnitostní rozbor a odběr půdy byl z přibližně stejné lokality.

Rozhodující vliv na měřené hodnoty mají půdní vlastnosti a celková kinetická energie deště, přeneseně intenzita. Viz výzkum J. Morina a kolektivu a Kasprzaka.⁶⁰

⁵⁶ MILERSKI, R., Laboratorní testování vybraných hydrologických vlastností orné půdy transformované na pastvinu a jeho výsledky. Brno: VUT FAST Ústav vodního hospodářství krajiny. 1996, s. 3

⁵⁷ Banzetová D. Výpočet a odečet z grafu v programu Microsoft Excel

⁵⁸ Banzetová D. Výpočet a odečet z grafu v programu Microsoft Excel

⁵⁹ Banzetová D. Odečet z grafu (obr. 33)

⁶⁰ KASPRZAK, K. *Teoretickoexperimentální výzkum vlivu kulturní vegetace a antropogenních forem přetváření pedosféry na infiltraci srážkového vodu do půdy, dílčí zpráva M03 dílčího výzkumného úkolu II-5-5-/02.* Brno: VUT Brno. 1984, s. 9

Dále byla zvolena stejná intenzita deště pro vyhodnocení do diplomové práce, jako byla u původního simulátoru deště redukována intenzita. Tedy intenzita přibližně 1,5 mm/min, nastavení intenzity deště na simulátoru se provádí poměrně složitě pomocí měření ombrometrem, tedy po zjištění okamžité intenzity – objem/čas, je změněn přítok do produktoru kapek, činnost se opakuje tak dlouho, dokud není dosažena požadovaná intenzita deště. Udržování stálé intenzity deště je prováděno za pomoci rotametru. Přívod vody do simulátoru je citlivý na tlakové poměry ve vodovodní síti budovy.

Kinetická energie umělého deště byla vypočítána třemi různými způsoby (viz kapitola 8) tak, aby bylo možno dostatečně posoudit a porovnat nové parametry s původními parametry. Z naměřených hodnot je zřejmé, že již při nižší intenzitě ($i=0,96\text{mm/min}$) jsou hodnoty některých parametrů blízké původním průměrným naměřeným hodnotám u starého simulátoru deště.

9.1 Srovnání hodnot pomocí ombrologické infiltrační křivky

Parametry ombrologických infiltračních křivek nám ukázaly na rozdíly v působení deště na současnou a původní instalaci simulátoru deště.

Hodnoty v_{i0} , které nám popisují půdní vlastnosti, jsou srovnatelné a ukazují na velkou podobnost zkoumaných vzorků (půda, hutnění, vlhkost).

U hodnot v_{iv} , které nám ukazují vliv dopadu kapek (přetvoření a kolmatace povrchové vrstvy půdy) na vzorek, pozorujeme velký rozdíl mezi původní instalací a novou instalací, ale i mezi námi zvolenými intenzitami. I při nižší intenzitě deště (nižší energie) došlo k utužení povrchu vzorku a nižší konečné vyrovnané infiltraci oproti původní instalaci.

9.2 Srovnání hodnot pomocí odtokového součinitele

Pro hodnocení odtoku je rozhodující maximální hodnota odtokového součinitele Φ_{\max} . Na současnou instalaci simulátoru je dosažena hodnota Φ_{\max} značně vyšší než na původní instalaci a to i při nižší intenzitě deště ($i = 0,96 \text{ mm/min}$). Domnívám se, že to mohou způsobovat značně vyšší hodnoty nárazové síly kapek, která je závislá na konečné pádové rychlosti, která je dána tím, že současná instalace simulátoru má umístěn generátor ve výšce 6,7 m, a kapky dosahují rychlosti blízké konečné.⁶¹ Zatímco u původního simulátoru deště byl generátor umístěn ve výšce 3,2 m nad vzorkem půdy a kinetická energie deště byla doplněna

⁶¹ KASPRZAK, K. *Simulátor deště a jeho použití ve výzkumu srážko-odtokových vztahů erozních jevů na zemědělských půdách, dílčí zpráva výzkumného úkolu II-7-4/2*. Brno: VUT Brno. 1977, s. 85 - 87

zvýšením jeho intenzity ($i = 2,34$ mm/min). Toto zjištění nám ukazuje, že pouhé posouzení stejné kinetické energie je nedostatečné, pokud kapky nedosahují hodnotu pádové rychlosti blízké její konečné hodnotě.

9.3 Srovnání hodnot pomocí smyvu z půdy při přetvárné energii 1000 J/m^2

Posouzení smyvu způsobeného původní a současnou instalací. Posouzení je provedeno za pomoci srovnání celkového množství smyté půdy při dosažení celkové přetvárné energie působícího deště ve velikosti 1000 J/m^2 . Kritérium je navrženo docentem Kasprzakiem⁶² jako dobře popisující průběh eroze povrchu, tj. působení sil simulátoru v případě stejné půdy. Původní simulátor dosahuje mnohem vyšších hodnot smyvu, než jsme dosáhli u nové instalace simulátoru deště. Tohoto jevu je dosaženo přesto, že u nové instalace je vyšší odtokový součinitel a nižší vsak. Domnívám se, že je to způsobeno větším množstvím spadeného deště na původním simulátoru deště a vzhledem k tomu, že na původním simulátoru byla intenzita $2,34$ mm/min tedy o přibližně $0,8$ mm/min víc než na současné instalaci, tato zvýšená intenzita (pohyb vody po vzorku - odtok) způsobovala větší schopnost vody odnést deštěm rozvolněné částičky půdy.

9.4 Srovnání hodnot s vzorky s přechodem na zatravněnou půdu

S hodnotami na současném umístění simulátoru lze taktéž porovnat hodnoty Φ_{\max} a infiltrační charakteristiky, které byly získány na původní instalaci simulátoru při výzkumu vlivu zatravnění půdy na tyto charakteristiky. Zde je jednoznačně vidět, vliv i velmi mladého porostu, který způsobuje řádové zvýšení vyrovnané infiltrace v_{iv} a velmi nízké hodnoty pro odtokový součinitel Φ_{\max} . Tyto poznatky ukazují na důležitost kinetické energie na přetváření povrchu půdy a změny odtokových charakteristik. Snížení popř. celková disipace kinetické energie již velmi mladého porostu trávy je velmi významná.

Vzhledem k tomu, že nebylo v možnostech diplomové práce provést rozsáhlejší měření na staticky významném počtu vzorků nelze generalizovat závěry uvedené výše.

⁶² KASPRZAK, K. *Teoretické a praktické vyhodnocení zatravněných ploch namáhaných erozními účinky srážkové vody*. Brno: VUT Brno. 1980, s. 71 - 77

10 Závěr

Diplomová práce srovnává účinky simulovaného deště na nové instalaci simulátoru, který byl přestěhován z VVÚ VSH VUT s jeho původní instalací. Rozdíl mezi původní a současnou instalací je pouze ve výšce generátoru kapek nad vzorkovnicemi, která je u nové instalace vyšší o 3,5m, je tedy dvojnásobná. V diplomové práci je provedeno srovnání účinků simulovaného deště v nové instalaci oproti známým účinkům a průběhům zkoušek na instalaci původní. Srovnání je provedeno na stejném půdním vzorku, při stejné intenzitě deště ($i = 1,52\text{mm/min}$), a dále při nižší intenzitě ($i = 0,96\text{ mm/min}$) pro srovnání účinků deště při různých intenzitách. Kinetická energie byla vyjádřena třemi možnými způsoby, pomocí rovnice, která vychází pouze z intenzity deště a ze střední velikosti kapky. Dále pomocí upravené rovnice pro výpočet kinetické energie a grafu pro stanovení pádové rychlosti kapky a pomocí zjištění skutečné pádové rychlosti kapky dosažené do předchozí rovnice. Pro každou kinetickou energii byly stanoveny parametry křivek pro ombrologickou infiltrační křivku, odtokový součinitel a smyv. Srovnání bylo provedeno pomocí těchto parametrů a průměrných původních parametrů. Hodnoty popisující půdní vlastnosti jsou srovnatelné, což nám jen poukazuje na to, že jsme užili stejnou půdu, u parametru pro vliv pádu kapek se již značně lišíme, což je dáno, jak se domnívám, právě nedostatečnou výškou generátoru na původním simulátoru deště. Při hodnocení odtokového součinitele jsou nové hodnoty mnohem vyšší, což je pravděpodobně způsobeno nedostatečnou výškou u původní instalace a tedy nedosažení hodnot blízkých konečné pádové rychlosti kapky a tím schopnosti jednotlivé kapky destruovat povrch půdy. Při srovnání původních hodnot smyvu a nových hodnot smyvu bylo zjištěno, že nové hodnoty jsou mnohem nižší, což je způsobeno větším množstvím spadlého deště, o 0,8 mm/min více, na původním simulátoru.

Pro jasné vyvracení, či potvrzení teorií uvedených v diplomové práci by bylo potřeba většího počtu měření, které by bylo relevantní pro vytvoření jasných závěrů.

11 Seznam použitých zdrojů

11.1 Literatura

1. HOLÝ, M., *Protierozní ochrana*, Praha: SNTL a ALFA. 1978.
2. JANEČEK, M., et al., *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy. 2002. ISBN: 978-80-254-0973-2
3. JANEČEK, M., et al., *Základy erodologie*, Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. 2008. ISBN 978-80-213-1842-7.
4. LABURDA, T., et al., *Výzkum eroze půdy na Laboratorním dešťovém simulátoru*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2012. ISBN 978-80-01-05107-8.
5. KLIK, A., et al. *Bestimmung von Erodierbarkeitskennwertern österreichischer Ackerboden zur Beschreibung des flächenmassigen Bodenabtrages*, Wien. 1999
6. KOLÁČKOVÁ, J., PAŘÍKOVÁ, P. *Využití dešťového simulátoru pro výzkum půdní eroze*. Praha: ČVUT v Praze, 2002. ISBN 80-01-02644-2
7. KUTÍLEK, M., *Vodohospodářská pedologie*. Praha: SNTL. 1978.
8. PAŘÍKOVÁ, P., Koláčková, J., Laboratorní dešťový simulátor pro stanovování erodovatelnosti půdy. In: *Stavební obzor*. 2003, roč. 12, č. 6, ISSN 1210-4027
9. RISLER, E. *Geologie Agricole*. Paříž: HACHETTE BNF. 1895 ISBN: 20-126-6487-3
10. SCHWARZOVÁ, P., et al., *Simulace přívalových srážek na Laboratorním dešťovém simulátoru*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04876-4.
11. VOPRAVIL, J. *Půda a její hodnocení v ČR*, Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy v.v.i.. 2009. ISBN: 978-80-87361-02-3

11.2 Výzkumné zprávy z VVÚ VSH

1. KASPRZAK, K., *Simulátor deště a jeho použití ve výzkumu srážkoodtokových vztahů erozních jevů na zemědělských půdách*. Brno: VUT Brno. 1977, dílčí zpráva výzkumného úkolu II-7-4/2
2. KASPRZAK, K., Teoretické a praktické vyhodnocení zatravněných ploch namáhaných erozními účinky srážkové vody. Brno: VUT Brno. 1980, závěrečná zpráva – vývojového úkolu č. 8/A-5

3. KASPRZAK, K., *Teoretickoexperimentální výzkum vlivu kulturní vegetace a antropogenních forem přetváření pedosféry na infiltraci srážkových vod do půdy*. Brno: VUT Brno. 1984, dílčí zpráva M03 dílčího výzkumného úkolu II-5-5-/02
4. KASPRZAK, K., *Vliv vegetačně aktivní zóny půdního profilu na infiltraci srážkových vod*. Brno: VUT Brno. 1978, výzkumná zpráva II-7-4/2
5. MILERSKI, R., *Laboratorní testování vybraných hydrologických vlastností orné půdy transformované na pastvinu a jeho výsledky*. Brno: VUT FAST Ústav vodního hospodářství krajiny. 1995
6. MILERSKI, R., *Laboratorní testování vybraných hydrologických vlastností orné půdy transformované na pastvinu a jeho výsledky*. Brno: VUT FAST Ústav vodního hospodářství krajiny. 1996

11.3 Internetové zdroje

1. Ekolist. [online]: 2014-08-23. Dostupné z:
<http://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/unikatni-simulator-deste-pomaha-ceskym-vedcum-proti-pudni-erozi>
2. Vítejte na zemi. [online]: 2014-09-02. Dostupné z:
http://vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=eroze_pudy&site=puda

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1. Křivka zrnitosti – původní vzorek	9
Obr. 2. Křivka zrnitosti - původní vzorek (ornice)	9
Obr. 3. Křivka zrnitosti – nový vzorek – V1	10
Obr. 4. Křivka zrnitosti – nový vzorek – V2	11
Obr. 5. Křivka zrnitosti – nový vzorek – V1	12
Obr. 6. Křivka zrnitosti – nový vzorek – V2	13
Obr. 7. Kapilární generátor kapek a pevná nosná konstrukce	15
Obr. 8. Kapilární generátor kapek – detail	16
Obr. 9. Vzorkovnice s ochranným nástavcem	16
Obr. 10. Půdní vzorek ve vzorkovnici - před simulovaným deštěm	17
Obr. 11. Půdní vzorek ve vzorkovnici – po skončení simulovaného deště	17
Obr. 12. Odebraný povrchový odtok	18
Obr. 13. Konečné rychlosti pádu vodních kapek	21
Obr. 14. Měření rychlosti pádu kapky	23
Obr. 15. Erozní vlastnosti půdy, $i = 1,52$ mm/min	24
Obr. 16. Erozní vlastnosti půdy, $i = 0,96$ mm/min	25
Obr. 17. Ombrologické infiltrační křivky pro w_{k1}	26
Obr. 18. Součinitelé odtoku pro w_{k1}	26
Obr. 19. Ombrologické infiltrační křivky pro w_{k2}	27
Obr. 20. Součinitelé odtoku pro w_{k2}	27
Obr. 21. Ombrologické infiltrační křivky pro w_{k3}	28

Obr. 22. Součinitel odtoku pro w_{k3}	28
Obr. 23. Souhrnný smyv pro $i = 1,52$ mm/min, w_{k1}	29
Obr. 24. Ombrologická křivka a součinitel odtoku pro $i = 1,52$ m/min, w_{k1}	30
Obr. 25. Souhrnný smyv pro $i = 0,96$ mm/min, w_{k1}	31
Obr. 26. Ombrologická křivka a součinitel odtoku pro $i = 0,96$ mm/min, w_{k1}	32
Obr. 27. Souhrnný smyv pro $i = 1,52$ mm/min, w_{k2}	33
Obr. 28. Ombrologická křivka a součinitel odtoku pro $i = 1,52$ mm/min, w_{k2}	34
Obr. 29. Souhrnný smyv pro $i = 0,96$ mm/min, w_{k2}	35
Obr. 30. Ombrologická křivka a součinitel odtoku pro $i = 0,96$ mm/min, w_{k2}	36
Obr. 31. Souhrnný smyv pro $i = 1,52$ mm/min, w_{k3}	37
Obr. 32. Ombrologická křivka a součinitel odtoku pro $i = 1,52$ mm/min, w_{k3}	38
Obr. 33. Souhrnný smyv pro $i = 0,96$ mm/min, w_{k3}	39
Obr. 34. Ombrologická křivka a součinitel odtoku pro $i = 0,96$ mm/min, w_{k3}	40
Obr. 35. Erozní vlastnosti půdy, $i = 1.507$ mm/min	42
Tab. 1. Rychlost kapky	23
Tab. 2. Naměřené průměrné hodnoty na původním simulátoru deště	42
Tab. 3. Parametry rovnic křivek pro $i = 1,52$ mm/min	43
Tab. 4. Parametry rovnic křivek pro $i = 0,96$ mm/min	43
Tab. 5. Parametry rovnic křivek pro srovnání	44
Tab. 6. Množství smyvu, $i = 1,52$ mm/min	44
Tab. 7. Množství smyvu, $i = 0,96$ mm/min	44
Tab. 8. Množství smyvu původní simulátor	44