

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra biotechnických úprav krajiny



Bakalářská práce

Prostorová distribuce simulované srážky

Autor práce: Lucie Vávrová

Vedoucí práce: Ing. Jan Petruš

© 2017 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Lucie Vávrová

Územní technická a správní služba

Název práce

Prostorová distribuce simulované srážky

Název anglicky

Spatial variability of simulated rainfall

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je stanovení prostorové distribuce simulované srážky pro různé intenzity deště a následné porovnání jednotlivých metod stanovení.

Metodika

Měření prostorové distribuce srážky bude probíhat v erodologické laboratoři na simulátoru deště. Získaná data budou zpracována v programu GIS a vyhodnocena pomocí Christiansenova koeficientu rovnoměrného rozložení srážky. Výsledky Christiansenova koeficientu budou porovnány s jinými metodami stanovení prostorové distribuce srážky.

Doporučený rozsah práce

30 stran

Klíčová slova

simulátor deště, Christiansenův koeficient rovnoměrnosti, srážkové charakteristiky, eroze půdy

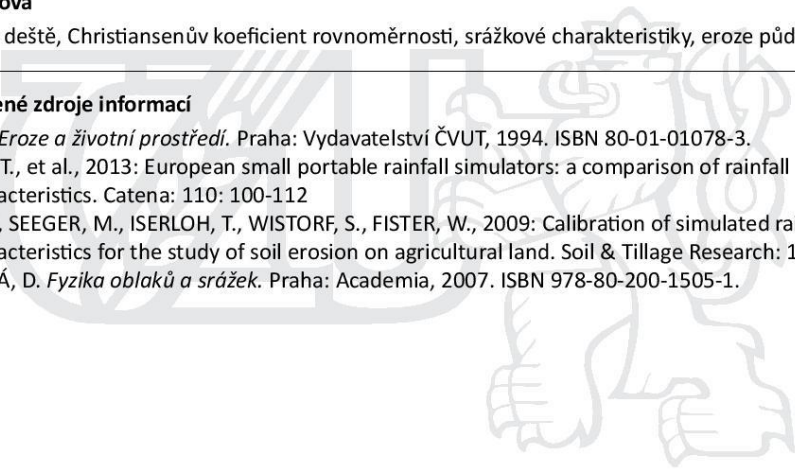
Doporučené zdroje informací

HOLÝ, M. *Eroze a životní prostředí*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994. ISBN 80-01-01078-3.

ISERLOH, T., et al., 2013: European small portable rainfall simulators: a comparison of rainfall characteristics. *Catena*: 110: 100-112

RIES, J. B., SEEGER, M., ISERLOH, T., WISTORF, S., FISTER, W., 2009: Calibration of simulated rainfall characteristics for the study of soil erosion on agricultural land. *Soil & Tillage Research*: 106: 109-116

ŘEZÁČOVÁ, D. *Fyzika oblaků a srážek*. Praha: Academia, 2007. ISBN 978-80-200-1505-1.



Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Jan Petrů

Garantující pracoviště

Katedra biotechnických úprav krajiny

Elektronicky schváleno dne 16. 3. 2017

prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 17. 3. 2017

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 14. 04. 2017

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Prostorová distribuce simulované srážky" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 17. dubna 2017

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Janu Petřů za odborné vedení, pomoc při získávání dat, čas věnovaný konzultacím bakalářské práce, cenné rady a připomínky.

Prostorová distribuce simulované srážky

Abstrakt

Práce se zabývá zkoumáním prostorového rozložení simulované srážky v laboratorních podmínkách. Měření bylo prováděno v erodologické laboratoři České zemědělské univerzity v Praze. Bylo použito 5 intenzit srážek. Jednotlivé sběrné nádoby se zachycenými srážkami byly změřeny a zaznamenány. Hodnoty byly použity jako vstupní data pro rovnici Christiansenova koeficientu rovnoměrného rozložení srážky a dalších 8 rovnic od různých autorů. Zjištěné koeficienty byly vyhodnoceny a porovnány mezi sebou. Základní předpoklad byl, že se se zvyšující intenzitou srážky budou koeficienty rovnoměrnosti klesat. Předpoklad nebyl potvrzen. Výsledné hodnoty Christiansenova koeficientu se nacházely v rozmezí od 75,5 do 79,0 %.

Klíčová slova: simulátor deště, Christiansenův koeficient rovnoměrnosti, srážkové charakteristiky, eroze půdy

Spatial variability of simulated rainfall

Abstract

The thesis examines spatial distribution of simulated rainfall in laboratory conditions. The measurements were made in the erodological laboratory of Czech University of Life Sciences Prague. 5 intensities of rainfall were used. Each collecting container with captured precipitations was measured and recorded. These values were used as input data for the equation of Christiansen's coefficient of uniformity and for other 8 equations from different authors. Stated coefficients were evaluated and compared with each other. The fundamental assumption was that with the increasing rainfall intensity the uniformity coefficient would decrease. The assumption was not confirmed. The results of Christiansen's coefficient of uniformity ranged from 75,5 to 79,0 %.

Keywords: rainfall simulator, Christiansen's coefficient of uniformity, rainfall characteristics, soil erosion

OBSAH

1 Úvod	10
2 Cíl práce	12
3 Rešerše	13
3.1 Dešťová srážka	13
3.1.1 Vznik srážky.....	13
3.1.1.1 Vývoj srážek ve smíšených oblacích	14
3.1.1.2 Vývoj srážek ve vodních oblacích (koalescence).....	14
3.2 Srážkové charakteristiky	14
3.2.1 Velikost a tvar dešťové kapky.....	14
3.2.2 Distribuce velikostí kapek (DSD)	16
3.2.2.1 Měření DSD.....	17
3.2.3 Rychlost pádu dešťové kapky	18
3.2.4 Intenzita deště.....	20
3.2.5 Kinetická energie	21
3.2.5.1 Vyjádření KE	22
3.2.5.2 Vztah KE a intenzity deště.....	23
3.3 Simulátory deště	25
3.3.1 Historie.....	27
3.3.2 Rozdělení.....	28
3.3.3 Vybrané příklady simulátorů.....	29
3.3.3.1 Převozný polní simulátor deště VÚMOP	29
3.3.3.2 Malý dešťový simulátor dle Kamphorsta	30
3.3.3.3 Infiltrometr.....	31
3.3.3.4 Dešťový simulátor s rotačním diskem	33
3.4 Koeficienty rovnoměrného rozložení srážky.....	34
3.4.1 Christiansenův koeficient rovnoměrnosti	34
3.4.2 Další koeficienty rovnoměrnosti	35
4 Metodika měření	38
4.1 Univerzitní simulátor deště	38
4.2 Průběh měření.....	40
4.3 Výsledky měření.....	42
5 Diskuze	50
6 Závěr	53
7 Zdroje	55

8	Obrazové přílohy a tabulky	59
----------	---	-----------

1 Úvod

Půda bývá uváděna jako jeden z nejcennějších přírodních zdrojů. Je téměř neobnovitelná a závisí na ní život na Zemi. Přesto, že je tak nesmírně důležitá, je půda degradována mnoha způsoby (a to především lidmi a jejich způsobem zacházení), například zasolením, odčerpáním živin, vysušením, zamokřením, zastavením budov a komunikací, těžbou, zhutněním, či vodní a větrnou erozí. I když je eroze půdy přirozený proces, bývá značně urychlena lidským působením. V současné době je eroze velkým celosvětovým problémem, z celosvětové degradace půdy je 56 % způsobeno vodní erozí. V České republice je přibližně polovina zemědělských půd vodní erozí ohrožena (Janeček et al. 2008, CENIA).

Na zemědělských půdách dochází vlivem nesprávného obhospodařování, pěstování nevhodných plodin (pro dané místo nevhodných) a následných účinků intenzivních srážek k erozi, kdy je nejsvrchnější část půdy (ornice) transportována a následně ukládána jinam. Této ztrátě lze zabránit, či ji alespoň z velké části omezit, vhodnými zemědělskými postupy a protierozními opatřeními.

Pro výzkumy, související s těmito zemědělskými postupy a ověřením užitých protierozních opatření, se často používají simulátory deště. Začaly vznikat téměř na počátku 20. století a s dalšími znalostmi, které se týkaly nových, v podstatě revolučních, zákonitostí a informací ohledně dešťových srážek, byly simulátory vylepšovány. Byly zjištěny charakteristiky deště, jako velikosti kapek, rychlost s jakou kapky padají a jaký mají účinek na zemský povrch. Těmto a poznatkům se snaží výzkumníci při výrobě simulátorů vyhovět, aby se simulovaná srážka co nejvíce podobala té přirozené (Cerdà 1999). Není možné, aby stroj vytvořil naprosto přesnou přirozenou srážku a tak dochází ke zjednodušení a kompromisům.

Nicméně některé vlastnosti musí být pro všechny druhy simulátorů zachovány a jedním z nich je i prostorové rozložení srážky. Jako první se tímto tématem zabýval J. E. Christiansen v roce 1942 a zavedl „svůj“ koeficient rovnoměrného rozložení. Na tento výzkum navázala řada dalších autorů, například Wilcox, Swailes, Hart, Reynolds nebo Benami, kteří také zavádí „své“ koeficienty.

V současné době tyto poznatky ve svých pracích využívají například Ries, Maroufpoor, Lascelles či Iserloh, kdy provádí výzkumy na simulátorech deště.

Existuje mnoho výzkumů s touto tematikou a mnoho autorů koeficientům rovnoměrného rozložení dává velkou důležitost, která mnohé o simulátoru deště vypovídá. Z tohoto důvodu byl výzkum proveden i na univerzitním simulátoru deště.

2 Cíl práce

Cílem práce je určit prostorovou distribuci simulované srážky pro různé intenzity srážky, pomocí 9 rovnic stanovit 9 koeficientů prostorového rozložení srážky a výsledky porovnat a zhodnotit.

K výzkumu bude použit simulátor deště. Aby pokus mohl být platný, bude opakován třikrát pro každou intenzitu. Získané výstupy z měření budou pro lepší názornost zpracovány v programu ArcGIS.

3 Rešerše

3.1 Dešťová srážka

Dešťová srážka patří mezi takzvané hydrometeory. Tento výraz, podle slovníku cizích slov, má následující definici: Hydrometeor je atmosférický jev vytvořený soustavou vodních kapiček nebo ledových krystalů padajících, vznášejících se v atmosféře nebo usazených na předmětech (například atmosférické srážky, mlha, rosa, námraza, jíní, zvířený sníh a podobně).

Kromě toho, déšť je vertikální srážka padající z oblaků, jejíž kapky jsou o průměru větším než 0,5 mm (Řezáčová et al. 2007, Soukupová 2011).

Srážky můžeme i dále dělit, například podle příčin vzniku na nefrontální, frontální a orografické (Soukupová 2011). Každá srážka vzniká v jiném typu oblaků a jiné zeměpisné šířce. Mezi nefrontální, tedy srážky vzniklé z jedné vzduchové hmoty, řadíme srážky konvekční, což jsou většinou přeháňky, které se poměrně často vyskytují s bouřkou. Na našem území se vyskytují převážně v létě. Mezi frontální patří takzvané cyklonální srážky, které vznikají v oblasti střetu teplého a studeného vzduchu jako přeháňky i trvalý déšť. Srážky orografické vznikají díky velkým terénním překážkám nebo na pevninském a mořském rozhraní.

3.1.1 Vznik srážky

Vodní páry se dostávají do atmosféry, kde sytí vzduch. Pokud je vzduch již přesycen a má správnou teplotu, nastává proces zvaný nukleace, při které vznikají zárodečné kapky mikrometrických rozměrů. A protože v atmosféře je větší množství aerosolových částic, které fungují jako centra kondenzace (takzvaná kondenzační jádra), tak zárodečné kapky vznikají procesem heterogenní nukleace vody. Homogenní nukleace vody by nastala v případě, pokud by zárodečné kapky byly vytvořeny v čisté atmosféře, ale to by vyžadovalo ještě vyšší přesycení, ke kterému nedochází (Řezáčová et al. 2007).

Oblak obsahuje velké množství těchto kapiček, přibližně kolem 10^4 v krychlovém centimetru (Bednář 2003), ne všechny ale dorostou do větších rozměrů z důvodu nedostatečného množství vodní páry. Tyto jevy, růst kapek na úkor ostatních, v současnosti popisují dvě teorie (Bednář 2003, Soukupová 2011):

- 1) Vývoj srážek ve smíšených oblacích
- 2) Vývoj srážek ve vodních oblacích (koalescence)

3.1.1.1 Vývoj srážek ve smíšených oblacích

Ve vyšších a mírných zeměpisných šířkách je potřebné, aby se v oblaku nacházely ledové částice, které jsou spouštěcím mechanismem srážek. Při teplotách pod 0°C se kondenzační jádra mění v ledové krystaly, na které se přichycují molekuly vodní páry a přimrzají k povrchu. Pokud kapka překročí kritickou velikost, začne padat dolů a při překročení hranice 0°C zmrzlá kapka roztaje a stává se z ní kapka dešťová (Soukupová 2011).

3.1.1.2 Vývoj srážek ve vodních oblacích (koalescence)

Tento proces nastává v nízkých zeměpisných šířkách při vzniku tropických lijáků. Zde se nevyskytují klasická, ale obří kondenzační jádra, která jsou pravděpodobně tvořená hygroskopickými krystaly mořských solí. Na těchto obřích jádrech splývají srážející se kapky (proces koalescence), zvětšují se a z oblaků vypadávají. Pokud jsou kapky příliš velké, nedokáže je povrchové napětí udržet a kapky se rozpadnou, následně jsou uneseny vzhůru a proces koalescence se opakuje (Bednář 2003).

3.2 Srážkové charakteristiky

Fyzikální charakteristiky srážky ovlivňují jejich erozní účinnost. Jednotlivé charakteristiky jsou úzce provázány a jedna druhou vzájemně ovlivňují.

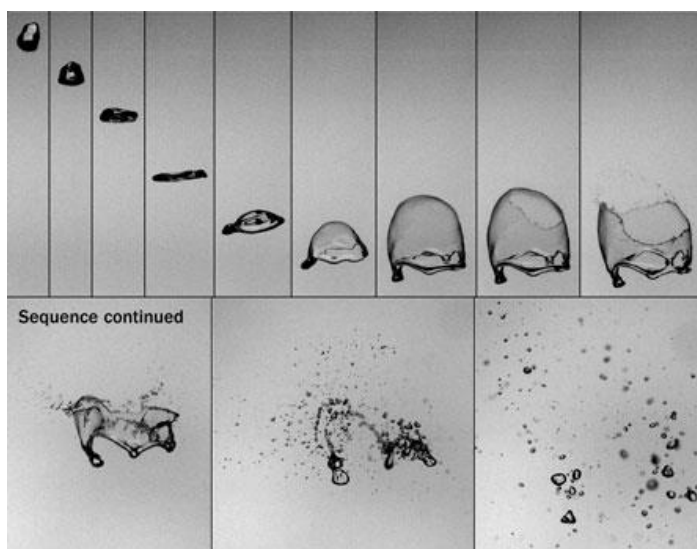
3.2.1 Velikost a tvar dešťové kapky

Již výše bylo zmíněno, že dešťová kapka má průměr větší než 0,5 mm, menší kapky bývají považovány za kapky oblačné (Řezáčová et al. 2007). Její maximální velikost je ovlivněna několika faktory. Závisí na druhu (intenzitě) deště, druhu mraku a jeho vzdálenosti od země (Janeček et al. 2008). Kapky z oblaků, které jsou blíže u země, mají menší velikost než ty, které jsou z vyšších mraků (Holubová 2016 ex

Morgan & Moran 1989). Regionální srážky o malé intenzitě mají kapky menší než přívalové deště (Holý 1994).

Soukupová (2011) uvádí, že nejčastější jsou kapky o průměru 1 – 2 mm a největší o průměru 6 – 7 mm. Holý (1994) ovšem říká, že maximální velikost je 5 mm (což bylo dokázáno autory jako N. Hudson a D. C. Blanchard). Ve výjimečných případech může velikost být až 10 mm (Dvořák 2003).

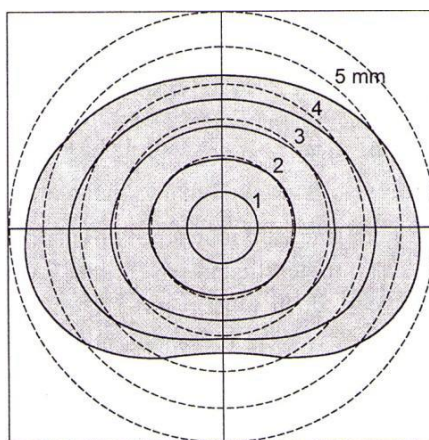
Až do velikosti 4,5 mm mohou být kapky stabilní, pokud jsou větší, tak dochází ke spontánnímu tříštění, což souvisí jak s tvarem, tak s narušením povrchového napětí (Řezáčová et al. 2007). Velké kapky nejprve padají ve tvaru koule a postupně se jejich tvar mění, uprostřed se vytvoří prohlubeň, která se zvětšuje, až mají kapky prstencovitý tvar s jakousi bublinou uprostřed, která praskne a rozpadne se na menší kapky (obrázek 1). Spontánní tříštění bývá méně časté, častěji se kapky tříští v důsledku srážek mezi sebou.



Obr. 1: Tříštění velkých vodních kapek (zdroj: www.unrealfacts.com)

Čím je kapka menší, tím pravidelnější tvar má. Kapky do velikosti přibližně 1 mm mají kulovitý tvar, s narůstající velikostí tvar bývá elipsoidní (obrázek 2). Pro její popis bývá používán termín ekvivalentní poloměr, což odpovídá poloměru koule o stejném objemu jako kulová kapka. Pro charakterizaci spektra velikostí se používá D_{50} , neboli střední průměr kapek. Tento index, který vychází ze vztahu objemu deště a velikostí kapek, určuje průměr kapek, kdy polovina objemu srážky spadne v kapkách s menším průměrem a druhá polovina v kapkách s průměrem větším. Výpočtem se

zabývali Linsley, Kohler a Paulhus, kteří uvedli rovnice 1 až 3 (Holý 1994). K jejich výpočtu je třeba znát intenzitu deště.



Obr. 2: Změna tvaru kapky s rostoucí velikostí (Zdroj: Řezáčová et al. 2007)

$$D_{stř} = 1,34 \cdot i^{0,182} \quad (1)$$

$$D_{stř} = 0,92 \cdot i^{0,21} \quad (2)$$

$$D_{stř} = 1,06 \cdot i^{0,199} \quad (3)$$

kde: $D_{stř}$ – střední průměr kapek (mm)

i – intenzita srážky ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

Simulovaná srážka obsahuje i kapky o menší velikosti než průměru 0,5 mm, záleží ale především na typu použitého simulátoru deště.

3.2.2 Distribuce velikostí kapek (DSD)

Distribuce velikostí kapek (DSD – drop size distribution) je počet dešťových kapek přítomných na jednotku objemu vzduchu. V prostoru a čase je proměnlivá, se změnou intenzity srážky se mění i distribuce (s větší intenzitou se vyskytují velikostně větší kapky, které mají také větší erozní účinky). Jinými slovy, koncentrace kapek klesá s jejich rostoucí velikostí (Řezáčová et al. 2007).

Pro vyjádření DSD se nejčastěji používá Marshallovo & Palmerovo rozdělení (záporné exponenciální rozdělení velikosti dešťových kapek), které sice není

dostatečně obecné, ale považuje se stále za vhodné. Je vhodné pro srážky o nižší intenzitě, používá se i pro odhad intenzity srážek na základě radarové odrazivosti (Řezáčová et al. 2007). Pro přesnější vyjádření DSD se používá rozdělení gama, které je vhodné pro intenzivnější srážky. Tyto dva modely nejsou jediné, jsou však pravděpodobně nejčastěji používané.

3.2.2.1 Měření DSD

Aby mohlo dojít ke zjištění DSD, je potřeba určit velikost dešťových kapek ve spektru. Pro tento účel se používá několik postupů, méně nebo více přesných. Pokud ovšem chceme naměřené výsledky z různých srážek mezi sebou porovnat, musíme používat pouze jednu metodu (Jameson & Kostinski 2001). Mezi často používané metody patří: plaster micro plot, indikační papír, Joss – Waldvogelův disdrometr, Thiesův laserový disdrometr nebo 2D videodisdrometr (Ries et al. 2009, Fišer et al. 2002).

3.2.2.1.1 Plaster micro plot

Nádoby s rychle tuhoucím cementem se přibližně na 2 vteřiny vystaví srážce. Vystavení by nemělo být příliš dlouhé, aby se kapky na povrchu nepřekrývaly. Po velmi krátké době materiál ztuhne a zůstanou v něm zaznamenané kapky, které se odlijí a změří.

Podobná, ale starší obdoba plaster micro plot je zachycování kapek na oleji nebo v mouce, kdy kapky vytvoří ztvrdlé pelety, které jsou podle velikosti rozděleny.

3.2.2.1.2 Indikační papír

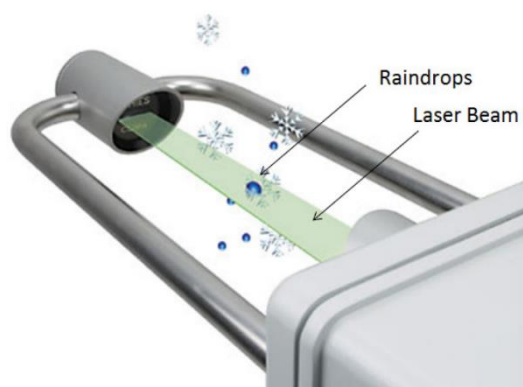
Zde je používán papír, který je citlivý na kontakt s vodou. Při dopadu kapky na povrch se vytvoří modrá skvrna. Tato metoda má opět velmi krátkou dobu expozice, kolem 4 vteřin.

3.2.2.1.3 Joss – Waldvogelův disdrometr

Do kruhové měřicí plochy o velikosti 50 cm² padají kapky, jejichž dopad je proměněn na elektrické impulsy. Tyto impulsy zaznamenají velikost kapky v rozsahu od 0,3 do 5 mm a roztřídí je do 127 velikostních skupin. S tímto disdrometrem je možno měřit až několik minut.

3.2.2.1.4 Thiesův laserový disdrometer

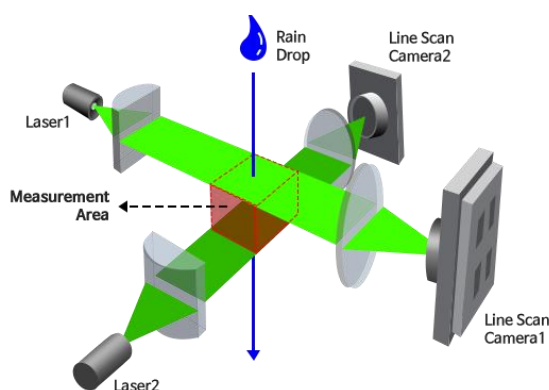
Kapky padají skrze laserový paprsek (plocha 48 cm²), který měří množství srážek, intenzitu, velikost a rychlost pádu. Přístroj (obr. 3) měří kapky v rozsahu od 0,16 do 8 mm, rychlost pádu od 2 do 20 m/s a intenzitu až do 250 mm/h (Ries et al. 2009).



Obr. 3: Thiesův laserový disdrometer, princip měření (zdroj: www.mdpi.com)

3.2.2.1.5 2D videodisdrometer

Tento přístroj s měřicí plochou 100 cm² (Fišer et al. 2002) měří především ekvivalentní průměr dešťových kapek. Dále také stanovuje čas průletu kapky, pádovou rychlost, zploštění nebo tvar kapky. Principem měření je snímání letící dešťové kapky v náryse a bokoryse pomocí 2 kamer a laserů (obr. 4).



Obr. 4: Princip měření kapek pomocí 2D distrometeru (zdroj: www.soletop.com)

3.2.3 Rychlost pádu dešťové kapky

Uvolněná kapka nejprve padá volným pádem. Působí na ni dvě síly a to gravitační, která kapku přitahuje k zemskému povrchu a odpor vzduchu, který kapku

zpomaluje. Po dosažení rovnováhy mezi těmito dvěma silami, již kapka padá ustálenou rychlostí, která se nazývá terminální. Heidorn (2003) uvádí, že kapka o velikosti 2 mm, pokud se již nevětšuje ani nezmenšuje, dosáhne terminální rychlosti už po 2 metrech klesání.

Čím je kapka menší, tím pomaleji padá. Je to zřejmé z grafu 1, který vychází z výzkumu Gunna & Kinzera z roku 1949 (Řezáčová et al. 2007), kdy kapka o průměru 0,1 mm padá rychlostí 0,27 m/s a kapka s velikostí 5,8 mm rychlostí 9,17 m/s. Výsledky tohoto výzkumu se vztahují pro podmínky u hladiny moře. Pádovou rychlost, kromě velikosti kapky, ovlivňuje i tříštění a spojování kapek, tlak nebo teplota vzduchu.

Na různé velikosti kapek ovšem tlak a teplota také různě působí, z tohoto důvodu Beard zavedl tři fyzikální režimy, podle kterých je rychlost počítána (Řezáčová et al. 2007 ex Beard 1976). Jinak se rychlost spočítá pro malé kulovité kapky a jinak i pro kapky, které již sférický tvar nemají. Tyto rovnice jsou poměrně velmi složité, pro ukázkou je zde uvedena rovnice pro 1. fyzikální režim (rovnice 4). Kromě Bearda, představil svůj výpočet také Slastichin (Holý 1994). Oproti Beardově rovnici je značně zjednodušený, uveden je jako rovnice 5. Rychlost pádu lze i měřit pomocí přístrojů (například 2D videodisdrometer, Thiesův laserový disdrometer, videokamera).

$$v = \left(1 + 1,26 \frac{\lambda_a}{R}\right) \cdot v_s \quad (4)$$

kde: v – pádová rychlost kapek v 1. režimu ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

λ_a – střední volná dráha molekul vzduchu (m) (při standard. podmínkách $\lambda_a = 6,6\cdot 10^{-8}$)

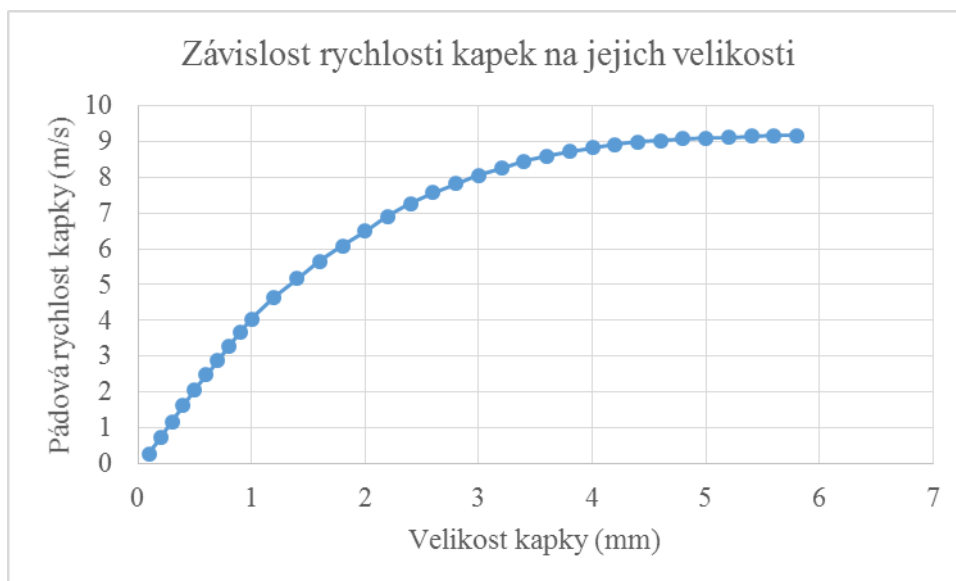
R – poloměr kapky (m)

v_s – rychlost vyjádřená pomocí Stokesova zákona

$$v_k = 13\sqrt{d} \quad (5)$$

kde: v_k – rychlost kapek ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

d – průměr kapek (cm)



Graf 1: Vztah velikosti kapek a pádové rychlosti při tlaku 1013 hPa a teplotě 20°C podle dat od Gunna & Kinzera (zdroj: Řezáčová et al. 2007)

3.2.4 Intenzita deště

Intenzita deště je objem vody, který dopadá na jednotku horizontálního povrchu během jednotky času. Lze ji vyjádřit jako okamžitou intenzitu srážky nebo jako intenzitu průměrnou za určité časové období. Je měřena v mm/h, tedy jako výška sloupce vody, který se vytvoří v milimetrech za hodinu.

Intenzita během srážky není stálá, neustále se mění. Začátek srážky ve většině případů začíná s malou intenzitou, která se zvětšuje a později, pokud ovšem během srážky intenzita několikrát nevystoupí na maximum, se opět snižuje (Kozlovská 2014 ex Habr 2005).

Lze najít různá rozdělení srážek podle intenzit. Pro ukázkou jsou zde uvedena rozdělení podle Soukupové (2011) v tabulce 1 a Rožnovského & Havlíčka (1998) v tabulce 2.

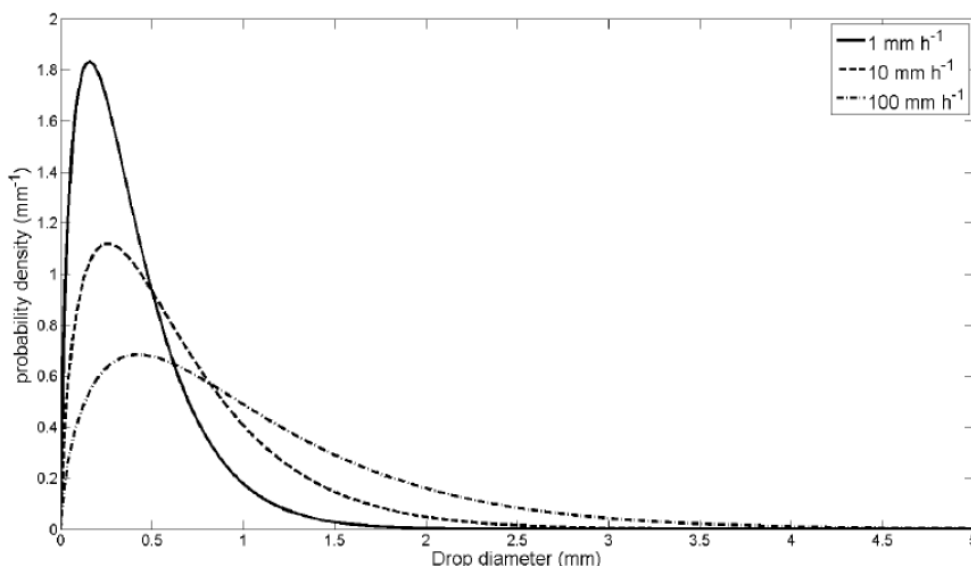
Na obrázku 5 je znázorněno pravděpodobné velikostní rozložení deště během 3 intenzit (1 mm/h, 10 mm/h a 100 mm/h). Je zřejmé, že ve srážce o nejnižší intenzitě je převážná většina kapek o malém objemu. S rostoucí intenzitou roste i pravděpodobnost výskytu větších kapek.

Kategorie deště	Intenzita (mm/h)
Velmi slabý	Neměřitelné
Slabý	0,1 – 2,5
Mírný	2,6 – 8,0
Silný	8,1 – 40,0
Velmi silný	> 40,0

Tab. 1: Intenzita deště podle Soukupové (2011)

Kategorie deště	Intenzita (mm/h)
Slabý	< 1,0
Mírný	1,1 – 5,0
Silný	5,1 – 10,0
Velmi silný	10,1 – 15,0
Liják	15,1 – 23,0
Příval	23,1 – 58,0
Průtrž mračen	> 58,1

Tab. 2: Intenzita deště podle Rožnovského & Havlíčka (1998)



Obr. 5: DSD během různé intenzity deště (zdroj: Bagree 2012)

3.2.5 Kinetická energie

Dopadající dešťové kapky působí na zemský povrch jistou silou, pro kterou se používá označení kinetická energie. Má velký význam pro erozi půd, jelikož kapky půdní povrch svou silou rozrušují, uvolňují drobné částice, které přemisťují a zhutňují půdu. Největších účinků dosahuje kinetická energie na počátku srážky, kdy na povrchu země ještě není vytvořena jakási ochranná vrstva již odtékající vody.

Kinetická energie závisí na velikosti kapek. Větší kapky mají větší hmotnost a větší pádovou rychlost, ale již z obrázku 5 je vidět, že při různých intenzitách deště se

vyskytuje mnohem více kapek o menší velikosti. Z toho je zřejmé, že největší podíl na KE mají kapky malých rozměrů (Fox 2004).

Samotná kinetická energie se poměrně obtížně měří, má prostorovou i časovou variabilitu a jednotlivé dešťové kapky působí příliš malou silou, než aby bylo možné ji přímo měřit, bylo by za potřebí velmi citlivého přístroje, který by si poradil i s vlivem větru (Holý 1994). Z tohoto důvodu se kinetická energie odvozuje pomocí DSD (přímé stanovení) nebo intenzity deště (nepřímé stanovení). Kinetická energie je součet všech kinetických energií jednotlivých kapek (Holý 1994).

3.2.5.1 Vyjádření KE

KE se vyjadřuje dvěma způsoby, jako objemově-specifická nebo časově-specifická. Objemově-specifická KE je vyjádřena jako výška srážky na jednotku plochy. Její jednotkou je $J.m^{-2}.mm^{-1}$ a vypočte se podle rovnice 6 (Salles et al. 2002). Objemově-specifická KE je častěji používaná především ze dvou důvodů, které pramení v historii. Dříve se DSD zjišťovalo bez pomoci techniky (viz. Plaster micro plot nebo indikační papír) a měřící doba byla velmi krátká, což nedovolovalo určit časově-specifickou KE. Intenzitu srážky bylo možno jednoduše zjistit, následně z naměřeného množství srážky bylo snazší kinetickou energii odvodit.

$$KE_{mm} = 10^{-3} \frac{\rho \sum_i X(D_i) D_i^3 V_t^2(D_i)}{2 \sum_i X(D_i) D_i^3} \quad (6)$$

kde: ρ – hustota vody za normálních podmínek ($kg.m^{-3}$)

$X(D_i)$ – počet kapek o průměru D_i v cm, které dopadají za jednotku času na jednotku plochy ($kapky.m^{-2}.s^{-1}$)

$V_t(D)$ – terminální pádová rychlost kapky o velikosti D_i ($m.s^{-1}$)

Časově-specifická kinetická energie vychází z intenzity deště, je vyjádřena jako energie vydaná na jednotku plochy za jednotku času. Jednotku má $J.m^{-2}.h^{-1}$, vypočte se rovnicí 7 (Salles et al. 2002).

$$KE_{time} = 3,6 \cdot 10^{-3} \frac{\rho\pi}{12} \sum_i X(D)_i D_i^3 V_t^2(D_i) \quad (7)$$

Tato dvě vyjádření kinetické energie jsou ve vzájemném vztahu podle rovnice 8 s pomocí intenzity deště I.

$$KE_{time} = c \cdot I \cdot KE_{mm} \quad (8)$$

kde: c – konstanta upravující rozdíly v jednotkách času (pro $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ je $c = 1/3\ 600$; pro $J \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ je $c = 1$)

I – intenzita srážky ($mm \cdot h^{-1}$)

3.2.5.2 Vztah KE a intenzity deště

Autoři Wischmeier & Smith navrhli vztah KE a intenzity deště (rovnice 9), ze kterého dále vycházelo v různých modifikacích mnoho dalších autorů, z nichž některé jsou užívané v rovnici RUSLE (Salles et al. 2002).

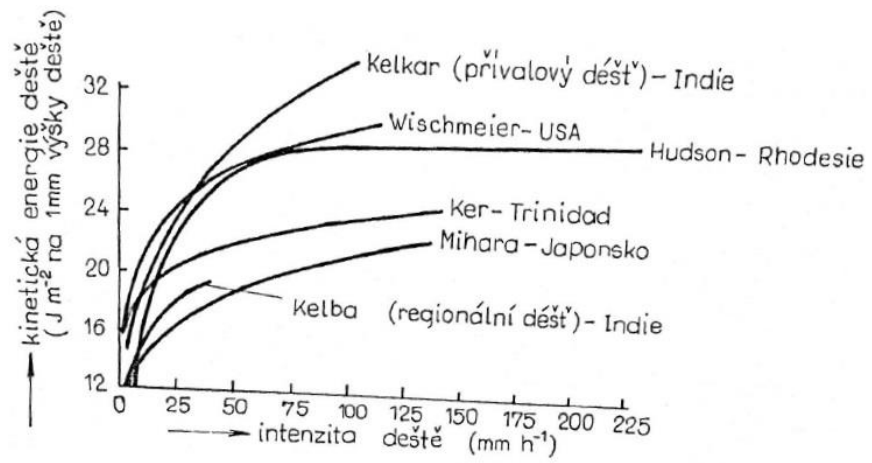
$$KE_{mm} = a + b \log_{10} I \quad (9)$$

kde: a, b – odvozené konstanty

Vztah časově-specifické KE a intenzity je definován mnoha autory. Některé rovnice jsou exponenciální, pokud je ovšem intenzita srážky větší než 20 mm/h, používají se rovnice lineární. Příkladem exponenciální rovnice je rovnice číslo 10, podle Ulbricha (Salles et al. 2002).

$$KE_{time} = 1288,17 \cdot \mu^{-1,34} \cdot I^{1+1,34\beta} \quad (10)$$

Rovnice se také liší použitím podle konkrétní geografické lokace (obrázek 6), proto KE nemá univerzální, ale mnoho řešení.



Obr. 6: Vztah KE a intenzity srážky pro různé geografické lokace (zdroj: Holý 1994)

3.3 Simulátory deště

Z důvodu nepravidelného a náhodného výskytu srážek je poněkud obtížné je využívat pro výzkumné účely. Pro zhodnotitelné výsledky je nepraktické na přirozený déšť čekat. Z toho důvodu jsou konstruovány dešťové simulátory, se kterými lze získat opakovaně srážku se stejnými vlastnostmi, kdykoli a kdekoli je potřeba. Simulátory nedokáží sice zcela nahradit přírodní déšť, ale získané informace z nich (a samozřejmě i z přírodního deště) vytvářejí důležitý podklad pro další výzkum. Jsou vhodné pro výzkum relativní ochrany, kterou poskytuje vegetace (rozdílná hustota pěstovaného porostu; rozdílná ochrana během vegetačního období), výzkum relativní eroze, výzkum půdních infiltračních charakteristik nebo výzkum eroze a odtoku v závislosti na sklonu plodin pěstovaných v řádcích. Naopak, pro některé studie není vhodné použití simulátorů (Hudson 1993), například pro srovnávání protierozních opatření, které mezi sebou mají jen malé rozdíly (z důvodu nekontrolovatelných vlivů na pokusy v polních podmínkách). Nicméně, simulovat přirozenou srážku je obtížné a proto se při konstrukcích simulátorů setkáváme se zjednodušeními a kompromisy (Cerdà 1999, Grismer 2011).

Protože existuje mnoho typů simulátorů, je důležité si vybrat ten správný pro konkrétní pokus. Ten, který je pro jeden účel vhodný, může být pro jiný zcela nevhodný. Jako příklad uvádí Hudson (1993), že při studiu infiltrace a odtoku není nutné, aby simulovaná srážka měla přesně ty vlastnosti, které má srážka přirozená a naopak při výzkumu erozních procesů je důležité, aby se tyto vlastnosti mezi srážkami nelišily. O typu použitého simulátoru také často rozhoduje velikost testovací parcelky, malé plochy jsou vhodné pro zkoumání erodovatelnosti a větší jsou vhodnější pro měření rýhové eroze.

Podle Janečka et al. (2013) je u simulátorů důležité následující:

- Velikostní rozdělení kapek a rychlost jejich dopadu musí být podobné přirozené srážce (maximální rychlost kapky je 9 m/s);
- Úhel, pod kterým kapky dopadají, by měl být téměř vertikální;
- Simulovaná srážka je co nejméně ovlivněna větrem;
- Intenzita srážky je konstantní a vytváří střední až vysoký odtok a erozi;
- Srážku lze reprodukovat, zvolit intenzitu, dobu trvání;

- Rozdělení velikosti kapek je náhodné (ale pro deště v mírném podnebí jsou typické malé a střední velikosti kapek, zatímco tropické deště o vysoké intenzitě mají větší množství velkých kapek)
- Simulátor má dostatečnou plochu působení;
- Simulátor je přenosný a není příliš drahý.

Mezi hlavní výhody simulátorů podle Hudsona (1993) patří:

- Schopnost provádět mnohá měření bez potřeby čekání na přírodní srážku;
- Schopnost pracovat s konstantní a kontrolovanou srážkou (vyhnutí se náhodným, nevyrovnaným a nepředvídatelným variacím přírodní srážky);
- Obvykle je rychlejší a snadnější nastavit simulátor na již stávajícím protierozním opatření, než na nově založeném opatření na zkoumaných odtokových parcelkách;
- Jednoduché a levné použití malých simulátorů;
- Simulovaná srážka je rovnoměrně rozložená na testované ploše.

Naopak mezi nevýhody (Hudson 1993) patří:

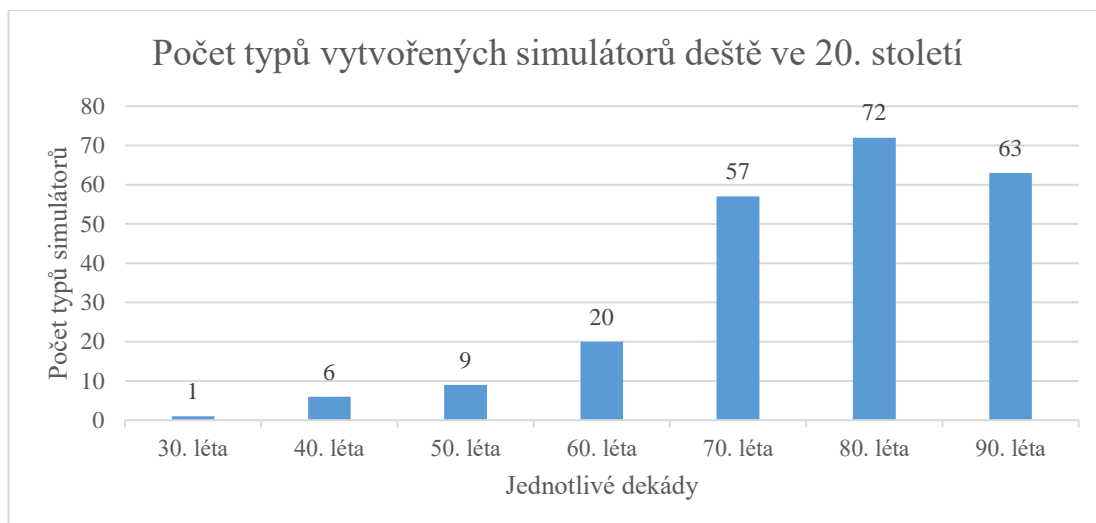
- Simulátory pro zkoumané plochy 100 m² a více jsou drahé, velké a těžkopádné;
- Data z měření, získaná na malých měřících plochách, často nemohou být aplikována na polní podmínky, jsou však vhodná například pro srovnání relativních hodnot erodovatelnosti různých typů půd nebo pro porovnání pěstovaných plodin za různých podmínek;
- Simulátory, které jsou používány v polních podmínkách, mohou být ovlivněny vnějšími podmínkami (vítr).

3.3.1 Historie

Cerdà (1999) se ve své studii zmiňuje o historii dešťových simulátorů. Ty začaly vznikat od 30. let 20. století., kdy se začala zkoumat a počítat infiltrace, v USA došlo k velkému rozvoji během meziválečných let. Z dnešního pohledu se mohou zdát tyto simulátory primitivní, ne však z důvodu nedostatku technických prostředků (kromě počítačů, které by umožnily automatizaci), ale z nedostatku znalostí fyzikálních vlastností srážky. U simulátorů, které byly sestaveny před 2. světovou válkou, se neuvažovalo nad tím, jak vypouštěná simulovaná srážka dopadá na povrch, teprve až po zveřejnění studií srážkových charakteristik (Cerdà 1999 ex Laws & Parsons 1943; Cerdà 1999 ex Gunn & Kinzer 1949), se začalo uvažovat o spojitosti mezi intenzitou srážky a velikostí kapek. Simulátory se začaly vylepšovat a byla zde snaha se přiblížit přirozené srážce. V dalších studiích se ukázal velký význam srážek na ztrátu půdy erozí a také došlo k rozvoji rovnic (1978 Wischmeier & Smith, 1987 Wilson & Rice) které vycházely z erozních experimentálních studií. Pozornost se obrací i na kinetickou energii dešťových kapek a v 60. letech se simulátory podobají přirozené srážce nejen ve velikostní distribuci kapek, ale i v jejich kinetické energii. V 70. a 80. letech se simulátory vyvíjí i v jiných zemích, než tomu bylo do té doby, kdy byly vyvíjeny převážně v USA. Jako důvod pro další rozvoj simulátorů bylo nejen jejich použití v erodologii, ale i v dalších oborech, jako jsou hydrologie, pedologie, geomorfologie nebo i stavebnictví. Přehled počtu vytvořených typů dešťových simulátorů ve 20. století je uveden v grafu 2.

Na našem území se simulátory deště začaly používat v 60. letech a to na vysokých školách v Brně (Vysoké učení technické), v Praze (Vysoká škola zemědělská) a v Českých Budějovicích (Vysoká škola zemědělská) (Banzetová 2015 ex Kasprzak 1977).

V současné době existují komerční výrobci dešťových simulátorů, ale výzkumníci se stále snaží vybudovat si simulátory vlastní. K dispozici mají velké množství podkladů a studií, stále je však běžné (a i výhodnější) upravovat a vylepšovat stávající konstrukce, než začínat zcela od začátku (Hudson 1993).



Graf 2: Přehled počtu typů jednotlivých dešťových simulátorů vytvořených během jednotlivých desetiletí ve 20. století (zdroj: Cerdà 1999)

3.3.2 Rozdělení

Běžně lze přístroje rozdělit do dvou základních skupin podle toho, jak je dešť vytvářen. Rozdělujeme je tedy na:

- a) Kapkovací
- b) Tryskové

U kapkovacích simulátorů je voda dopravena do nádrže, která je umístěna nad zkoumanou plochou. Ve dně nádrže jsou otvory s trubičkami nebo vlákny, po kterých voda gravitací odkapává na povrch. Trubičky mohou být vyrobeny z ocele, skla, mosazi nebo polyethylenu, vlákna jsou bavlněná nebo azbestová (Janeček et al. 2013). Tyto přístroje jsou vhodnější pro laboratorní použití, malé plochy a oblasti s nedostatkem vody. Jejich nedostatkem je kinetická energie kapek, která je nižší než u přírodního deště, ani velikostní rozložení kapek přirozené srážce neodpovídá a kapky dopadají na stejná místa (Iserloh et al. 2013).

Do tryskových simulátorů je voda potrubím přivedena a z trysek rozstříkována pod tlakem na plochu. Trysky bývají otočené směrem dolů a rychlost kapek i jejich velikost se blíží přirozenému dešti. Intenzitu je možno nastavit pohybem trysek a přerušováním proudu. Těchto simulátorů je nejvíce (Cerdà 1999).

3.3.3 Vybrané příklady simulátorů

3.3.3.1 Převozný polní simulátor deště VÚMOP

Tento simulátor (obrázek 7) byl vyvinut ve Výzkumném ústavu meliorací a ochrany půd. Vzhledem k jeho velikosti jím lze zjišťovat, jaký má vliv způsob obdělávání půdy. Simulátor má jednoduchou konstrukci, která je vysoká 3 m. Skládá se z duralových tyčí, které jsou smontovány do tvaru písmene „A“, a ocelovým ramenem hlavního rámu. Měřená plocha je před větrem chráněna PVC folií o velikosti 1 m.

Na této konstrukci se nachází pevně zavěšené trysky a přívodní hadice. Těchto trysek je 8, jsou typu FULLJET ½ HH 30 WSQ od firmy Spraying System Co. Jak z názvu vyplývá, tyto trysky vytváří rozstřík ve tvaru plného kužele, v tomto případě s rozstříkovým úhlem 104° (při tlaku 34,5 kPa). Také velikost vytvořených kapek je podobná přirozenému dešti. Trysky dokáží zavlažovat plochu 3 x 12 m až 3 x 24 m. Takto vytvořený déšť je ovšem příliš intenzivní (2 mm/min) a proto byly před trysky dány elektromagnetické ventily, kterými se proud vody periodicky přerušuje a tím je dosaženo snížení intenzity na polovinu (v případě potřeby i na čtvrtinu). Jako zdroj proudu pro elektromagnetické ventily je zde použita automobilová baterie.

Voda při terénním použití je zajištěna díky cisterně, z ní voda putuje samospádem do laminátové nádoby (o velikosti přibližně 1 m³) a přenosným čerpadlem HONDA WB 20X je voda dopravována, přes ochranný filtr, k tryskám. K systému je připojen tlakoměr a impulsní vodoměr, který je propojen s počítačem a sleduje množství vody, které proteče za zvolený časový interval. Pro zachycení povrchového odtoku a smyvu půdy je zde použit příčný žlab. Voda tudý teče do připravených nádob, které se po přibližně po 2 minutách vyměňují. Také se odebírají vzorky pro zjištění koncentrace nerozpuštěných látek.

Konstrukci není potřeba demontovat pro převoz na místo potřeby. Má pojezdová kola a je možno ji převážet na automobilovém přívěsu. (Janeček et al. 1995; Janeček et al. 2013)



Obr. 7: Polní simulátor deště VÚMOP (autor: Jan Frydrych, zdroj: www.biom.cz)

3.3.3.2 Malý dešťový simulátor dle Kamphorsta

Tento kapkový dešťový simulátor (obrázek 9) pochází z Nizozemské Zemědělské univerzity ve Wageningenu, v současné době je vyráběn firmou Eijkelkamp. Pro svou velikost je vhodný pro laboratorní použití (zkoumání absorpce, adsorpce a desorpce cizorodých látek), používá se však i pro polní měření (snadno se přenáší, má malou potřebu vody). Dále je vhodný pro zkoumání erodovatelnosti a odtoku.

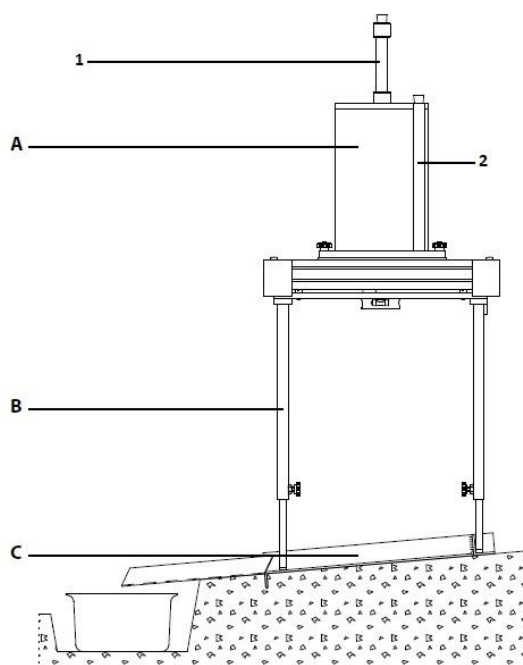
Simulátor váží 22 kg (bez vody) a skládá se 3 částí (obrázek 8). Skládá se z postřikovače (A na obrázku 8) se zabudovaným regulátorem tlaku pro produkci standardní srážky, podpěrou postřikovače (B) a nerezovým rámem (C), který je položen na zkoumané ploše a zabraňuje vodě z okolí přístupu na měřenou plochu.

Postřikovač se skládá z válcovité kalibrované nádržky o přibližné kapacitě 1,2 l a rozměrech 330 x 330 mm, která je spojena s postřikovací hlavici. Hladinu vody lze zjistit na měřicí trubici. Voda je vypouštěna z postřikovací hlavice přes 49 kapilár, které vytváří kapky o průměru 5,9 mm. Tlak v hlavici, délka a vnitřní průměr kapilár ovlivňují rychlost uvolňování. Tlak lze zvýšit či snížit posouváním zavzdušňovací trubice. Spodní konce kapilár jsou opatřeny krátkými trubičkami, vnitřní a vnější

průměr tohoto potrubí určuje velikost kapek a frekvenci odkapávání. Intenzita deště je 6 mm/min, kinetická energie deště je 72 J/m². Postřikovač se může naplnit skrze plnicí otvor, který je jinak uzavřen.

Podpěra, o základním rozměru 305 x 305 mm, je nastavitelná, používá se pro polohování a vyrovnání postřikovače. Při použití v terénu může být kolem ní být ochrana proti větru.

Nerezový rám (345 x 320 mm) je uchycen v půdě (při polním použití) v zemi 4 hřeby. Vytváří zadeš'ovanou plochu o velikosti 0,0625 m². Sklon je nastavitelný do 40%. (Janeček et al. 2013; Eijkelkamp Rainfall Simulator manual)



Obr. 8: Malý dešťový simulátor dle Kamphorsta; A – postřikovač; B – podpěry; C – rám; 1 – zavzdušňovací trubice; 2 – měřící trubice (Zdroj: www.eijkelkamp.com, upraveno autorem)



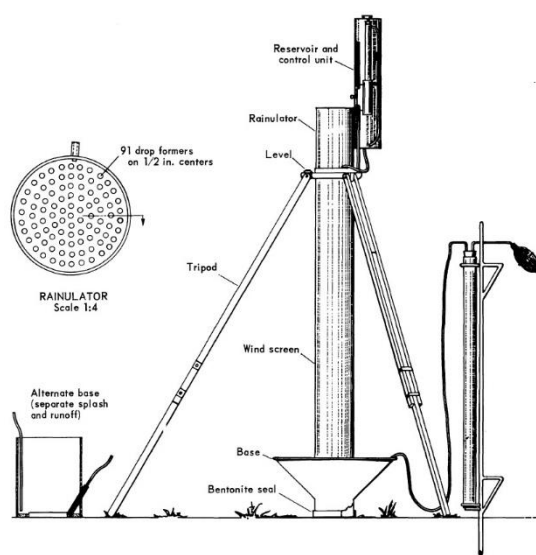
Obr. 9: Malý dešťový simulátor dle Kamphorsta (autor: Jan Frydrych; zdroj: www.biom.cz)

3.3.3.3 Infiltrometr

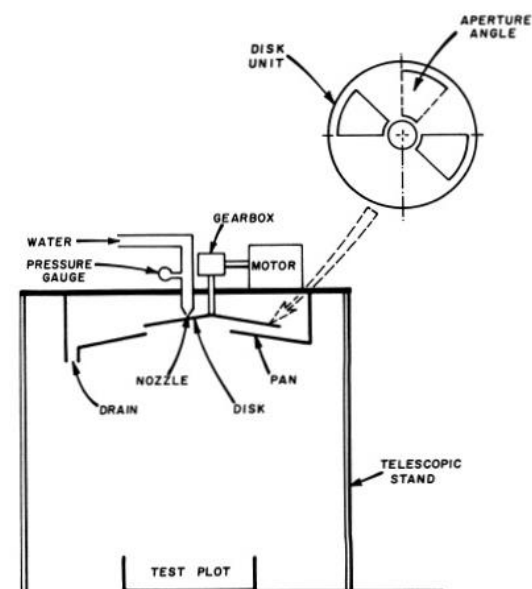
Malý přenosný kapkový simulátor – infiltrometr (obrázek 10) byl vyvinut I. S. McQueenem v Geologické službě USA roku 1963 (McQueen 1963). Simulátor, i když je poměrně malý, má použití i v polních podmínkách, snadno se instaluje a má charakteristiky podobné přívalovému dešti. Je vhodný pro zjišťování erodovatelnosti mezi řádky okopanin, infiltraci vody a různorodosti hydrologických vlastností půd, ale

nehodí se pro velké plochy. Je poměrně přesný a dokáže zachytit rozdíly mezi různými povrchy a pokryvy půd. Simulovaná srážka se od přírodní poněkud liší, rychlost dopadu je menší a velikost kapek je větší než u srážky přírodní, ale vytváří velmi podobnou kinetickou energii.

Přístroj se skládá ze zadešťovací hlavy (kapkovač), zásobníku vody a regulátoru, stojanu, protivětrnou ochranou. Všechny části jsou zavěšeny na geodetickém stojanu. Použitá voda je destilovaná, ze zásobní nádrže (o velikosti přibližně 20 l) teče do kapkovače. Kapkovač má tvar roury, je vyroben z organického skla a má výšku 230 mm (světlou 190 mm). V jeho dně, o ploše 283,4 cm² (zadešťovaná plocha má stejnou velikost) je 127 děr s průměrem 1,1 mm, ve kterých jsou drátky. Drátky vedou ven, vyčnívají 5 mm pod okraj dna. Kapky, o průměrné velikosti 5,5 mm, odkapávají přibližně po 16 vteřinách a vytváří intenzitu deště 1,51 mm/min. Plovákovým jehlovým ventilem je udržován v kapkovači přetlak, nastavuje se jím intenzita deště (od 1 do 2 mm/min). Kapky padají skrze tubus, který je chrání proti větru, z výšky 1,6 m na plochu, kolem které je kovový prstenec. Prstenec, o velikosti 200 mm, má tvar obráceného komolého kužele. Z něj se odsává povrchová voda do odměrného válce (Janeček et al. 2013; Janeček et al. 1995).



Obr. 10: Přenosný dešťový simulátor - infiltrometr (zdroj: McQueen 1963)



Obr. 11: Rotační dešťový simulátor univerzity v Guelph (zdroj: Pall et al. 1983)

3.3.3.4 Dešťový simulátor s rotačním diskem

Přenosný tryskový simulátor (obrázek 11) byl vyvinut pro výzkumný erozní program na univerzitě v Guelph v Kanadě. Rotační disk používají i jiné konstrukce (Pall et al. 1983). Zde jsou dva disky o tvaru komolých kuželů s otvory, které se při rotaci překrývají a otevírají, skrze ně stříkají trysky. Trysky jsou dvě, rozprašují ve tvaru plného kuželu (FullJet 1,5H30 a 1HH12 firmy Spraying Systems Co.) v úhlu 90°. Disk je napájen elektromotorem. Zadešťovaná parcelka má rozměr 848 x 742 mm.

3.4 Koeficienty rovnoměrného rozložení srážky

3.4.1 Christiansenův koeficient rovnoměrnosti

Pro určení homogenity aplikovaných srážek jsou používány různé koeficienty a různé způsoby jejich vypočtení. Christiansenův koeficient rovnoměrnosti (rovnoměrného rozložení) (Christiansen 1942) je první, ověřená a pravděpodobně nejpoužívanější metoda výpočtu (Maroufpoor et al. 2010 ex Topak et al. 2005). Pro výpočet lze použít následující rovnici:

$$CU = 100 * \left(1 - \frac{\sum |R_i - m|}{n * m} \right) \quad (11)$$

kde: CU – Christiansenův koeficient rovnoměrnosti (%)

R_i – množství vody naměřené v jednotlivých sběrných nádobách (ml)

n – počet sběrných nádob

m – aritmetický průměr množství vody ze všech sběrných nádob (ml)

Čím vyšší je hodnota koeficientu, tím je srážka rovnoměrnější. V praxi nelze dosáhnout 100 %, ale tento koeficient by neměl klesnout pod hodnotu 84 % (Kara et al. 2008 ex Keller & Bliesner 1990). Jinou minimální akceptovatelnou hodnotu uvádí Korven (1968), který tvrdí, že stačí 76 %. Lascelles et al. (2000) ovšem tvrdí, že tento koeficient rovnoměrnosti bývá v literatuře přeceňovaný a ve skutečnosti není příliš vhodný (není dostatečně citlivý) indikátor rovnoměrnosti simulované srážky a je třeba provést mnohem komplexnější analýzu, jak popisuje ve své studii. Koeficient nepopisuje prostorové rozmístění srážky, je tedy možné mít dva velice odlišné vzory prostorového rozložení se stejnou hodnotou koeficientu.

Koeficient rovnoměrnosti se zjišťuje především při návrhu nového nebo hodnocení stávajícího zavlažovacího systému, kdy koeficient lze ovlivnit a to typem postřikových trysek, provozním tlakem, průměrem trysek, výškou umístění trysek, rozstupem mezi tryskami (se zvětšujícími rozestupy rovnoměrnost klesá). Dále je ovlivněn i rychlostí větru, teplem či vlhkem (ve venkovních podmínkách). Experimentální určení Christiansenova koeficientu lze použít i při měření na jedné

trysce, přináší dostatečné a uspokojivé výsledky ohledně rozložení srážky (Kara et al. 2008).

3.4.2 Další koeficienty rovnoměrnosti

Hodnotit simulátory deště a zavlažovací systémy lze i podle jiných koeficientů rovnoměrnosti, kdy většinou záleží na konkrétních zkušebních podmínkách. Maroufpoor et al. (2010) ve své práci využívá i následující koeficienty.

Wilcoxův a Swailesův (1947) koeficient má, podle jeho tvůrců, minimální akceptovatelnou hodnotu 70 %. Tento koeficient se vypočítá podle rovnice:

$$U = 100 \left(1 - \frac{\sigma}{\mu} \right) \quad (12)$$

kde: U – koeficient rovnoměrnosti (%)

σ – standardní odchylka od celkového množství vody (ml)

μ – průměrná naměřená hloubka (aplikované množství) (ml)

Hart a Reynolds (1965) navrhli distribuční účinnost DE_{pa} , hodnotu založené na numerické integraci funkce normálního rozdělení. DE_{pa} je určena vybráním cílové hodnoty distribučního koeficientu a cílového požadovaného zavlažení plochy v procentech, které se nachází v rozmezí 50 – 100 %. Za normální rozložení lze považovat CU v intervalu 70 – 100 %. Substitucí původní rovnice dostaneme tvar:

$$CU \cong 100 \left[1 - \left(\frac{0,798\sigma}{\mu} \right) \right] \quad (13)$$

kde: σ – standardní odchylka od celkového množství vody (ml)

μ – průměrná naměřená hloubka (aplikované množství) (ml)

Criddle et al. (1956) a Beale s Howellem (1966) používají, stejně jako Christiansen, odchylku od průměru. V prvním případě (rovnice 14) se však provádí výpočty ne s celkovou hloubkou (množstvím) naměřené srážky, ale pouze s nejnižší

čtvrtinou. V rovnici Bealea a Howella (rovnice 15) se naopak používá čtvrtina s nejvyššími hodnotami.

$$CU = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{\frac{n}{4}} |X_i - \mu|}{\mu \cdot \frac{n}{4}} \right) \quad (14)$$

$$CU = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=\frac{3}{4}n+1}^n |X_i - \mu|}{\mu \cdot \frac{n}{4}} \right) \quad (15)$$

kde: n – počet sběrných nádob

X_i – naměřený objem (hloubka) (ml)

μ – průměrná naměřená hloubka (aplikované množství) (ml)

V kapitole Christiansenův koeficient rovnoměrnosti je řečeno, že nelze dosáhnout stoprocentního CU. Benami a Hore (1964) představili vlastní distribuční koeficient, v následující rovnici, který hodnotu 100 % může i přesáhnout (Korven, 1968). Dostatečná hodnota koeficientu je 80 %.

$$A = 166 \left(\frac{N_a}{N_b} \right) \left(\frac{2T_b + D_b M_b}{2T_a + D_a M_a} \right) \quad (16)$$

kde: A – koeficient rovnoměrnosti (%)

M_a, M_b - průměr naměřených objemů (hloubek), které jsou větší a menší než průměrný naměřený objem (hloubka), v tomto pořadí (ml)

N_a, N_b – počet sběrných nádob, ve kterých byl naměřen objem (hloubka) větší a menší než průměrný naměřený objem (hloubka), v tomto pořadí

T_a, T_b – suma naměřených objemů (hloubek), které jsou větší a menší než M_a a M_b (ml), v tomto pořadí

D_a, D_b – rozdíly mezi počty sběrných nádob, ve kterých byl naměřený objem (hloubka), větší a menší než M_a a M_b , v tomto pořadí

Merriam a Keller (1978) definují svůj distribuční koeficient, který je poměrně často používaný, v rovnici číslo 17. Pokud dosahuje více než 90 % je vynikající, hodnoty v rozmezí 83 – 90 % jsou přijatelné, 77 – 82 % jsou špatné a pod 77 % velmi špatné.

$$DU = 100 \left(\frac{D_{lq}}{\mu} \right) \quad (17)$$

kde: DU – koeficient rovnoměrnosti (%)

D_{lq} – průměr nejnižší čtvrtiny naměřených hodnot objemů (hloubky)(ml)

μ – průměrná naměřená hloubka (aplikované množství) (ml)

Specialisté havajské společnosti pro pěstování třtiny (1978) pro výpočet distribuce užívají vlastní rovnici (rovnice 18):

$$CU = \left[1 - \left(\frac{2}{\pi} \right)^{0,5} \left(\frac{\sigma}{\mu} \right) \right] \cdot 100 \quad (18)$$

kde: σ – standardní odchylka od celkového množství vody (ml)

μ – průměrná naměřená hloubka (aplikované množství) (ml)

4 Metodika měření

4.1 Univerzitní simulátor deště

V erodologické laboratoři katedry biotechnických úprav krajiny, Fakulty životního prostředí, se nachází dešťový simulátor tryskového typu Norton Ladder Rainfall Simulator (obr. 12). Simulátor byl navržen Scottem McAfee a Darrelem Nortonem pro použití v USDA (US Department of Agriculture) v Národní laboratoři pro výzkum eroze půdy na Purdueově univerzitě ve městě West Lafayette (Indiana, USA) (Blanquies et al. 2003).



Obr. 12: Univerzitní dešťový simulátor Norton Ladder Rainfall Simulator (autor: Lucie Vávrová)

Základní konstrukcí simulátoru jsou dvě spojené rovnoběžné hliníkové části o délce 5 m, šířce 0,76 m a hloubce 0,25 m. Na tomto „žebříku“ jsou připevněny 4 trysky VeeJet 80100 v rozestupech 1,37 m.

U trysek VeeJet 80100 uvádí výrobce použití především pro snížení množství poletujícího prachu, pro průmyslové mytí a pro protipožární ochranu. Tlakové rozpětí může být poměrně velké, od 34 do 3 400 kPa a průtok od 13,2 do 132 l/min (Blanquies et al. 2003). Aplikace vody je tedy vysokotlaká, vysokorychlostní a vysoko objemová, což je v rozporu s charakteristikami přirozeného deště. Ovšem při tlaku vody 41 kPa

tryska produkuje srážku o velikosti a intenzitě i kinetické energii, která je srovnatelná s přirozeným deštěm. Průměrná velikost takto vytvořené kapky je 2,3 mm.

Trysky univerzitního simulátory jsou připevněny ve výšce 2,75 m od země (kapka ovšem urazí vzdálenost pouze 205 cm, vzhledem k umístěnému žlabu), použitý tlak vody je 41 kPa. Trysky mají plochý vodní paprsek a pohybují se kmitavým pohybem, který je rovnoběžný s vodorovnou osou, tímto způsobem by měla být zajištěna rovnoměrná distribuce vody. Četnost kmitů (a tím i intenzitu) lze nastavit přes řídicí jednotku (Koláčková & Paříková).

Řídicí jednotkou je možno nastavit 10 různých intenzit, které se rozdělují na provedení single (S) nebo double (D). Při provedení single tryska vykoná jeden kmit a při provedení double tryska vykoná za stejný čas kmity dva. Intenzity se nachází v rozmezí 10,66 mm/hod pro 1S až 126,40 mm/hod pro 5S, podrobněji jsou popsány v tabulce 3.

	I (mm/h)	I (mm/min)	KE
1S	10,66	0,31	288,62
1D	32,40	0,54	464,91
2S	35,03	0,58	536,93
2D	53,59	0,89	689,85
3S	48,42	0,81	673,49
3D	69,85	1,16	808,16
4S	59,15	0,99	761,33
4D	76,03	1,27	862,44
5S	66,31	1,11	795,74
5D	126,40	2,11	1184,23

Tab. 3: Intenzity a kinetická energie jednotlivých variací srážky. Tučně zvýrazněné intenzity byly použity v našem měření.

Pod simulátorem se nachází 4 sklopné žlaby o velikosti 110 x 110 cm, které jsou umístěny v řadě. Jejich sklon lze nastavit. Voda ze žlabů je svedena do průtokoměrů a následně odvedena.

4.2 Průběh měření

Měření probíhalo v období od února 2016 do dubna 2016 na univerzitním simulátoru deště Norton Ladder Rainfall Simulator, který je popsán v kapitole 4.1. Měření neprobíhalo na celém simulátoru, ale byla vybrána jedna reprezentativní tryska a jeden sklopný žlab. Použití pouze jedné trysky nemělo vliv na výsledky měření, všechny trysky mají stejné charakteristiky.

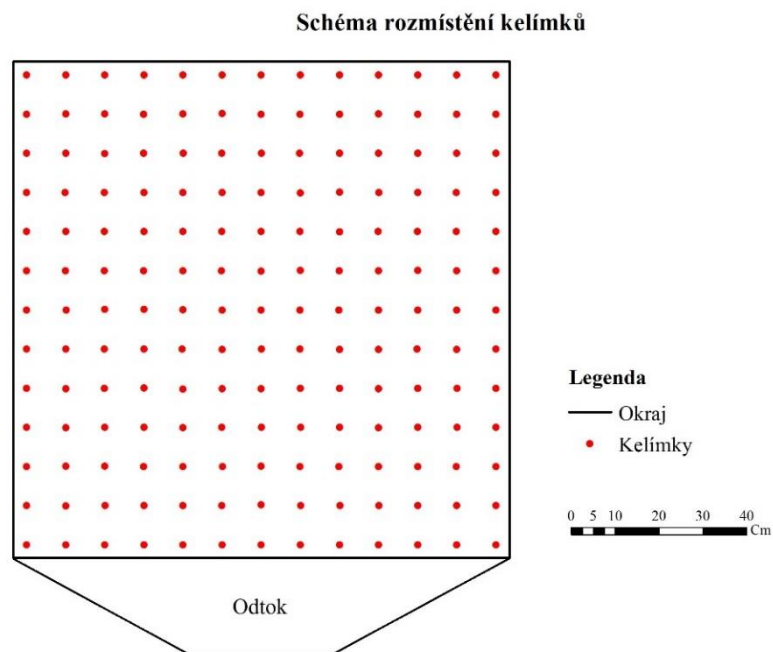


Obr. 13: Rozmístění sběrných nádob na sběrném žlabu (foto: Lucie Vávrová)

Na sklopném žlabu (obrázek 13) bylo v pravidelném rozestupu rozestaveno 196 sběrných nádob (kelímků). Kelímky byly seřazeny ve 13 řadách a 13 sloupcích s rozstupem přibližně 8,5 cm a 4 cm od krajů, což je znázorněno na schématu (obrázek 14). Odtok, který je zde ve spodní části vykreslen, ve výsledných obrazech 15 až 19 nebyl důležitý a proto nebyl znázorněn. Simulátor byl umístěn ve výšce 205 cm nad středem erozního kontejneru, pouze u prvního a druhého měření 1S byla výška 172 cm.

Simulátor byl pomocí počítače nastaven na požadované intenzity 1S, 2S, 3S, 4S a 4D, podrobnosti jsou uvedeny v tabulce 3. Tyto hodnoty byly použity z důvodu dostatečného rozptylu srážky a malých sběrných kelímků, které by se při vyšší intenzitě příliš rychle naplnily. Každá intenzita byla měřena trojnásobným opakováním. Každé

opakování probíhalo 15 minut, kromě 4D, které trvalo 10 minut (z důvodu rychlého naplnění kelímku). Po každém měření byly jednotlivé kelímky zváženy a tyto hodnoty zaznamenány. Aby nedocházelo ke zkreslení výsledků následujícího měření zbytkem vody v kelímku, byly kelímky po každém pokusu řádně usušeny. Celkem proběhlo 15 měření.



Obr. 14: Schéma rozmístění sběrných kelímků a odtoku

Naměřené hodnoty pro jednotlivé intenzity byly pro přesnost a vyhnutí se náhodným chybám zprůměrovány a z těchto průměrů byl spočítán Christiansenův koeficient rovnoměrnosti (viz. Kapitola 3.4.1). Tyto zprůměrované hodnoty byly také použity pro grafické znázornění prostorového rozložení simulované srážky v programu ESRI ArcGIS, konkrétně při použití interpolačního nástroje IDW.

Metoda vážené inverzní vzdálenosti (IDW, anglicky Inverse Distance Weighted) byla vybrána z toho důvodu, že nepřekračuje vstupní hodnoty, současně však jimi také přímo neprochází a ani nevznikají hodnoty záporné. IDW vychází z předpokladu, že hodnoty, které jsou prostorově blíže u sebe, si jsou podobnější než ty, které jsou prostorově vzdálenější. Jinými slovy, hodnoty na daném (zjišťovaném) místě jsou více ovlivněny bližšími naměřenými hodnotami než hodnotami vzdálenějšími. Hodnota na zjišťovaném místě je počítána jako vážený průměr ze vstupních dat podle jeho vzdálenosti. Nevýhodou tohoto nástroje je, že vytváří

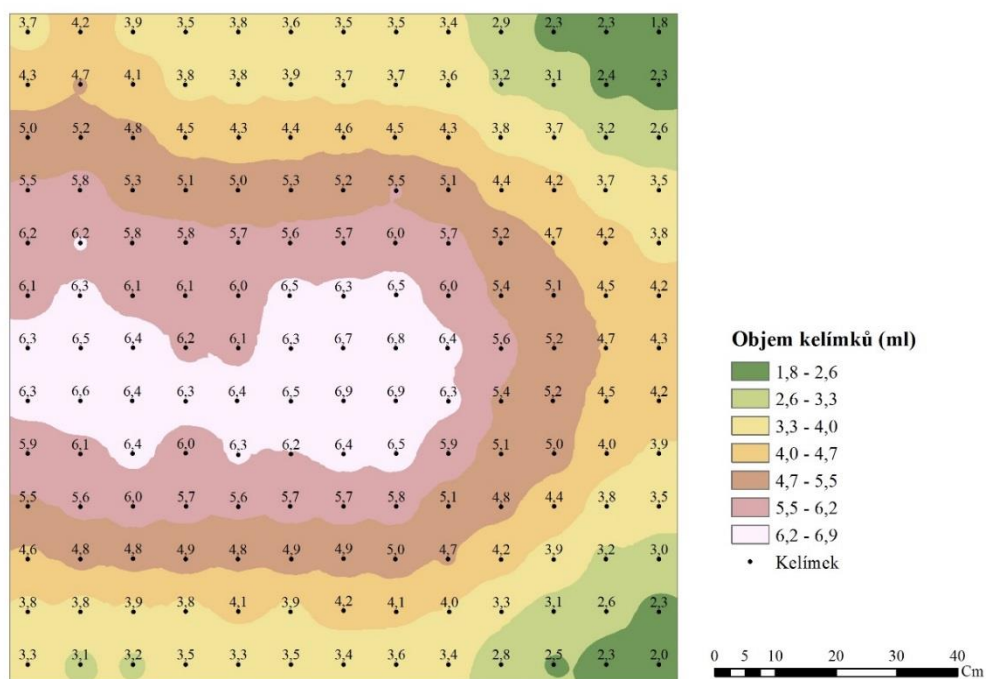
takzvané „bull eyes“ kolem vstupních bodů, které mají na své blízké okolí velký vliv (Křikavová 2009).

4.3 Výsledky měření

Naměřené hodnoty objemu simulované srážky pro jednotlivé intenzity jsou zobrazeny na obrazech 15 až 19. Uvedené hodnoty v obrazech představují zprůměrované hodnoty získaných objemů v ml, které pocházejí ze tří měření pro každou intenzitu. Hodnoty z každého měření byly rozděleny do sedmi klasifikačních tříd podle ekvivalentního rozdělení hodnot. Nebylo možné použít jednu hodnotovou stupnici pro všechna měření z důvodu velkého rozpětí hodnot naměřených objemů mezi jednotlivými intenzitami 1S až 4D.

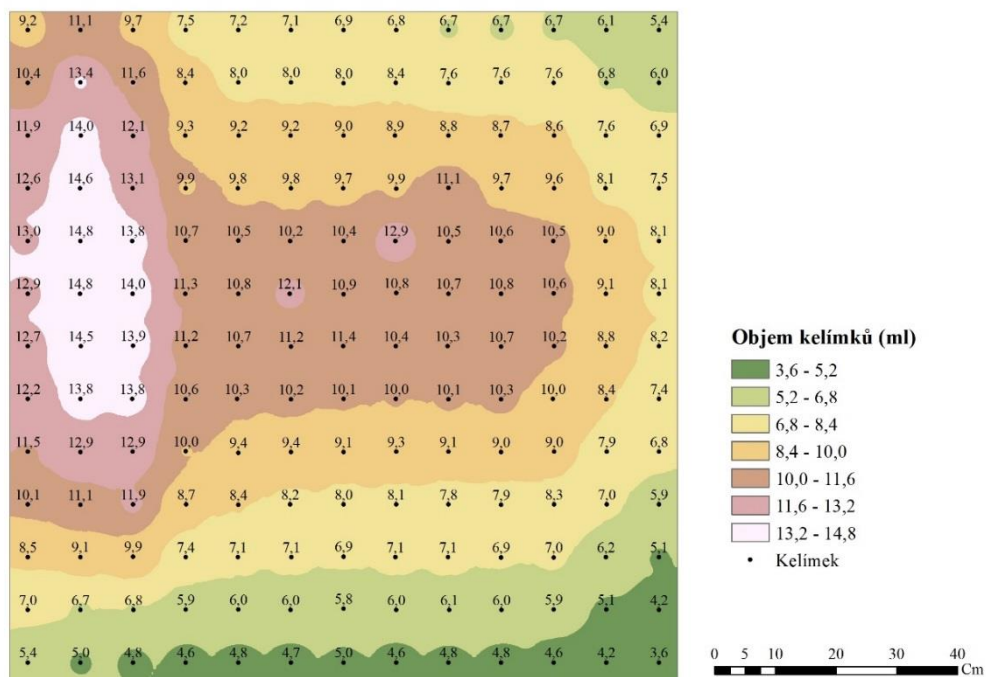
Na obrázku 15 je znázorněno prostorové rozložení objemu srážky pro intenzitu 1S, které se nachází v rozmezí od 1,4 ml až 7,0 ml. Intenzita 2S je na obrázku 16, hodnoty objemu jsou od 3,2 ml do 14,9 ml. Pro 3S, na obrázku 17, jsou hodnoty objemu od 4,8 ml do 24,6 ml. Pro 4S, na obrázku 18, jsou hodnoty objemu od 6,1 ml do 31,0 ml. Pro 4D, na obrázku 19, jsou naměřené hodnoty objemu od 9,6 ml do 41,4 ml. Výsledné obrazce, které znázorňují zachycený objem, jsou si poměrně podobné, pouze v případě intenzity 1S je obrazec odlišný. Místo s nejvyššími naměřenými hodnotami srážek má stejnou pozici, u levého okraje uprostřed, v případě 1S se tato oblast rozšiřuje až do středu plochy. Ve středu plochy i v ostatních případech jsou vyšší hodnoty. Naopak nejmenší množství srážek bylo zaznamenáno v horním a dolním pravém rohu.

Prostorové rozložení srážky při variantě 1S



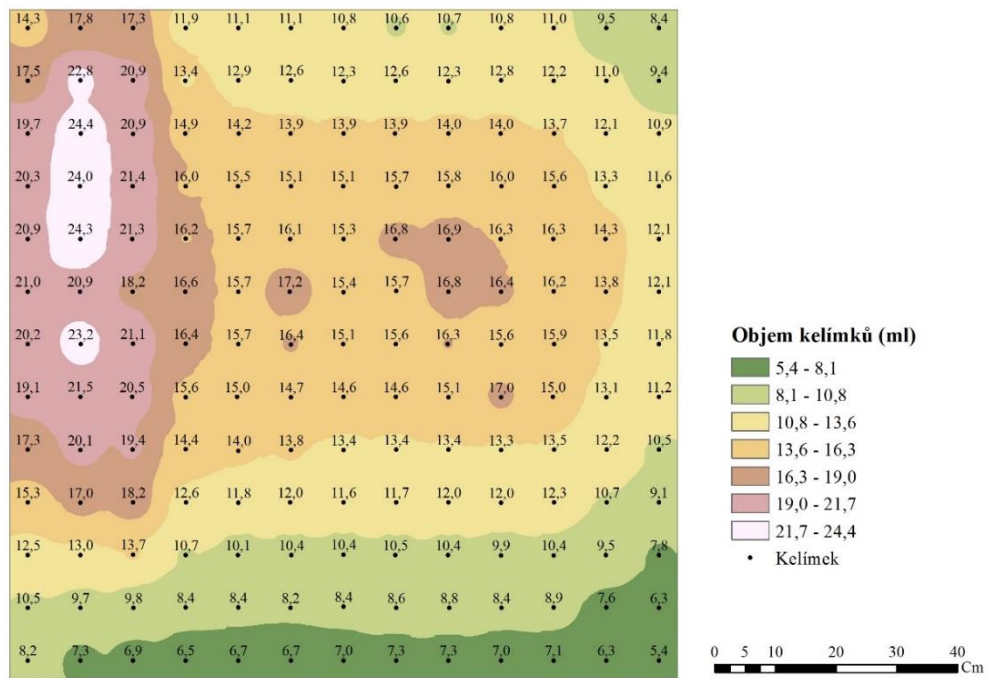
Obr. 15: Prostorové rozložení objemu srážky 1S

Prostorové rozložení srážky při variantě 2S



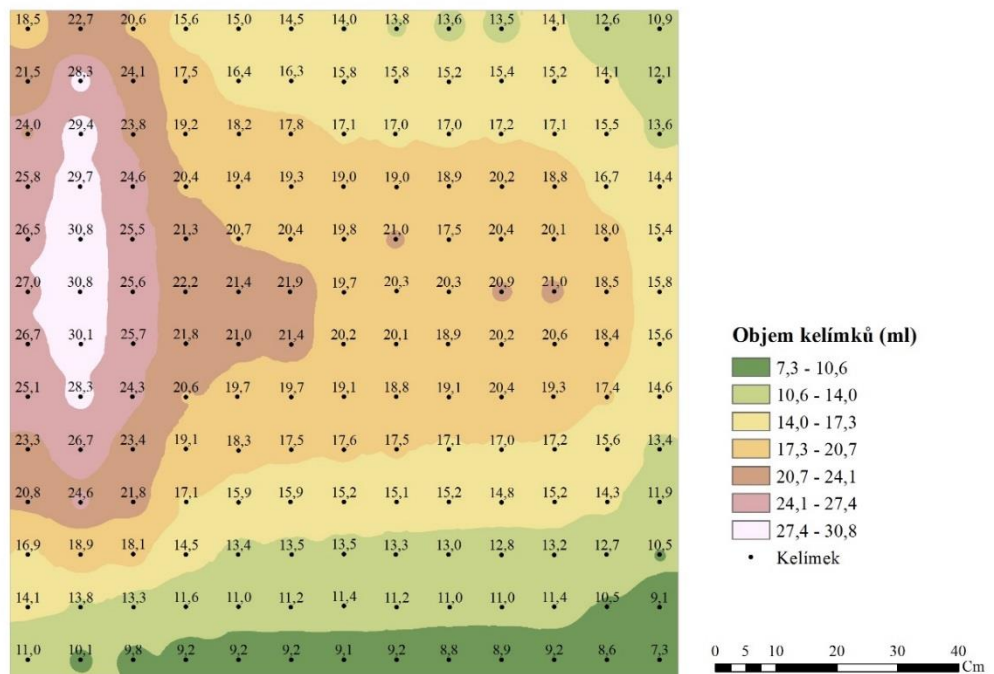
Obr. 16: Prostorové rozložení objemu srážky 2S

Prostorové rozložení srážky při variantě 3S



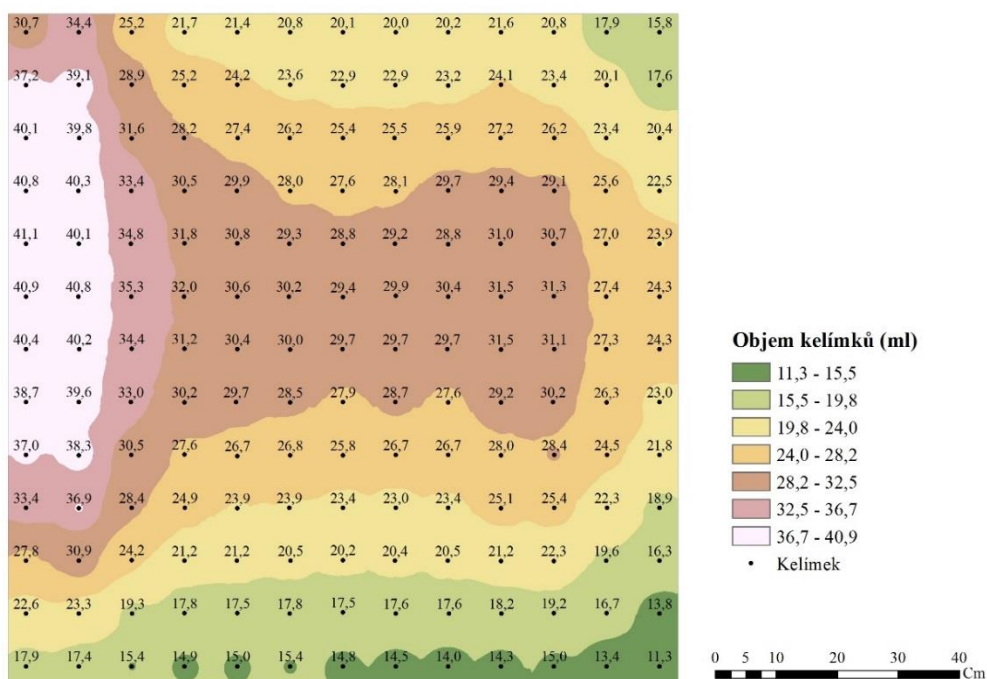
Obr. 17: Prostorové rozložení objemu srážky 3S

Prostorové rozložení srážky při variantě 4S



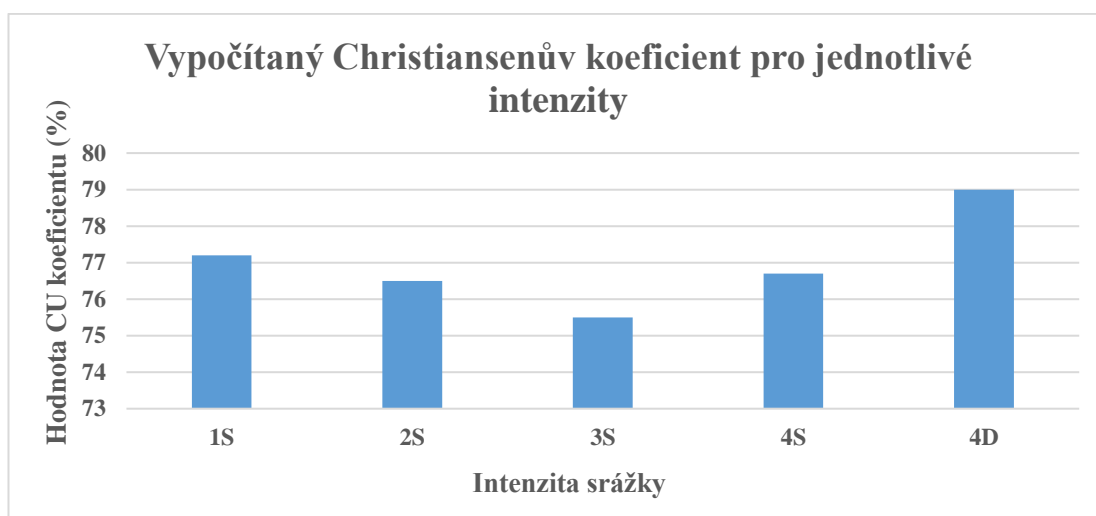
Obr. 18: Prostorové rozložení objemu srážky 4S

Prostorové rozložení srážky při variantě 4D



Obr. 19: Prostorové rozložení objemu srážky 4D

Vypočtené hodnoty Christiansenova koeficientu rovnoměrnosti pro jednotlivá zprůměrovaná měření, které byly spočítány podle rovnice (11), jsou uvedeny v grafu 3. Horizontální osa představuje intenzity srážek 1S až 4D a vertikální osa velikost Christiansenova koeficientu v procentech. Hodnota CU pro 1S je 77,2 %, pro 2S 76,5 %, pro 3S 75,5 %, pro 4S 76,7 % a pro 4D 79,0 %.



Graf 3: Velikost CU koeficientu pro jednotlivé intenzity

Pro srovnání s tímto, pravděpodobně nejpoužívanějším koeficientem prostorové distribuce srážky, byly vypočteny i koeficienty uvedené v kapitole 3.4.2 podle rovnic 12 až 18. Výsledky jsou v tabulce 4. Nejvyšší hodnoty (117,7 %) bylo dosaženo při intenzitě 1S a rovnici Benami & Hore a nejnižší hodnoty (62,0 %) pro intenzitu 4S a rovnici Beale & Howell.

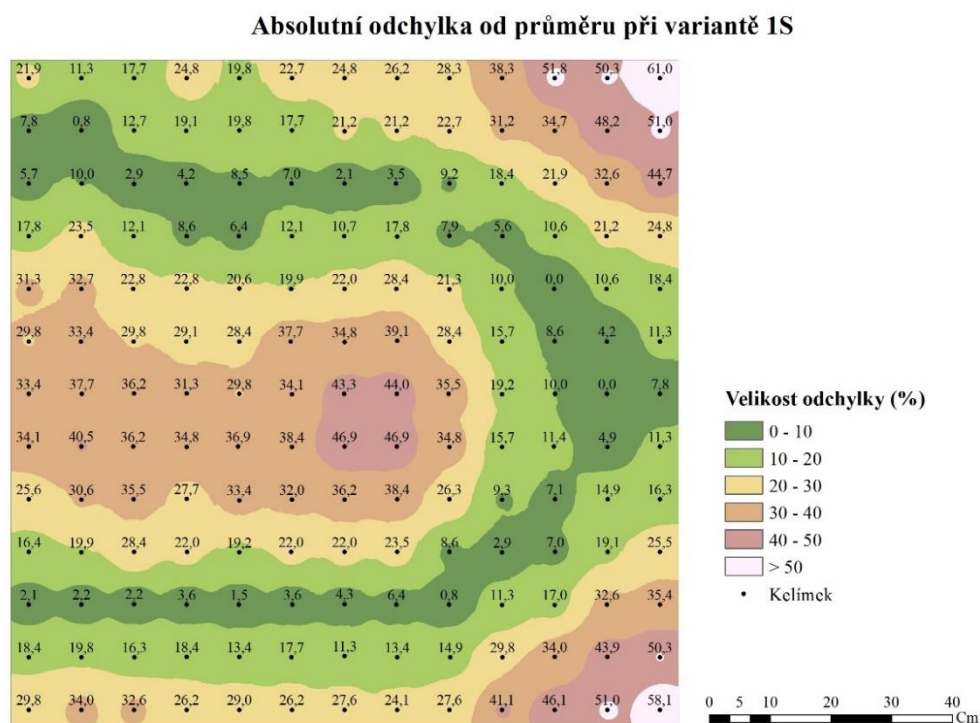
	1S	2S	3S	4S	4D
Christiansen (1942)	77,2	76,5	75,5	76,7	79,0
Wilcox & Swailes (1947)	73,5	71,3	69,2	70,9	73,9
Hart & Reynolds (1965)	78,8	77,1	75,4	76,8	79,2
Criddle et al. (1956)	65,9	64,1	62,4	64,3	67,0
Beale & Howell (1966)	66,2	62,5	59,5	62,0	66,6
Benami & Hore (1964)	117,7	92,3	83,0	80,4	98,8
Merriam & Keller (1978)	65,9	64,1	62,4	64,3	67,0
Havajští specialisté (1978)	78,9	77,1	75,4	76,8	79,2

Tab. 4: Souhrnné výsledky jednotlivých distribučních koeficientů

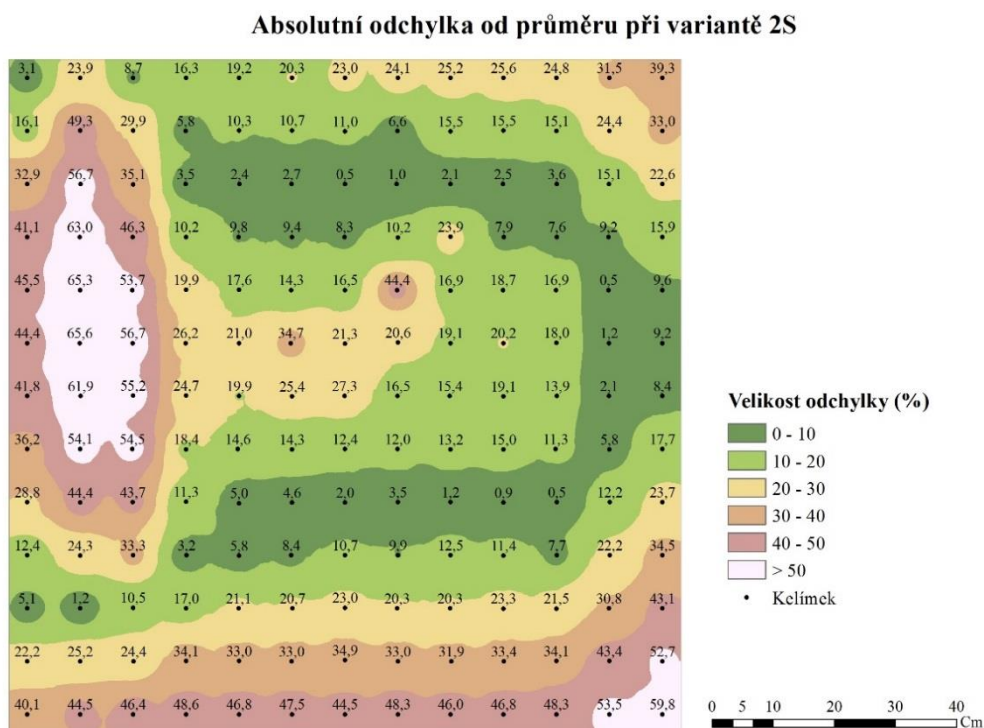
	Maximální naměřený objem (ml)	Minimální naměřený objem (ml)	Průměrný objem (ml)	Směrodatná odchylka (ml)	Variační koeficient (%)
1S	6,9	3,7	4,7	1,2	26,5
2S	14,8	7,0	9,0	2,6	28,7
3S	24,4	10,7	13,7	4,2	30,8
4S	30,8	13,8	17,6	5,1	29,1
4D	41,1	21,2	26,2	6,8	26,1

Tab. 5: Vybrané charakteristiky jednotlivých intenzit

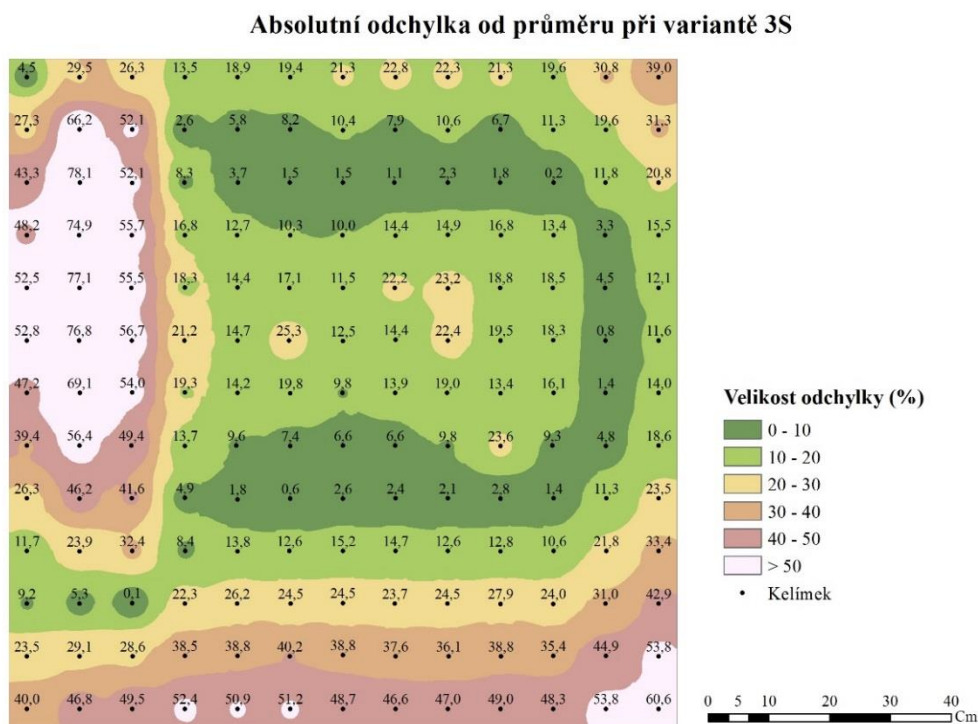
Odchyly v ml, stejně tak jako maximální, minimální a průměrný objem v ml jsou v tabulce 5, kde i pro porovnání jednotlivých intenzit je uvedena relativní směrodatná odchylna (variační koeficient). Variační koeficienty, které se v našem případě vyskytují v rozmezí od 26,1 % pro 4D až 30,8 % pro 3S, dosahují velmi vysokých hodnot a značí nehomogenitu jednotlivých naměřených objemů. Je také patrné, že intenzita 3S má největší variabilitu. Na obrazech 20 až 24 jsou znázorněny odchyly pro jednotlivé intenzity a jednotlivé naměřené hodnoty. Odchyly jsou, pro snadnější srovnání, uvedeny v procentech. Jsou rozděleny do 6 skupin po 10 % kromě poslední, která znázorňuje 50 % a výše.



Obr. 20: Absolutní odchylna od průměru 4,7 ml při intenzitě 1S

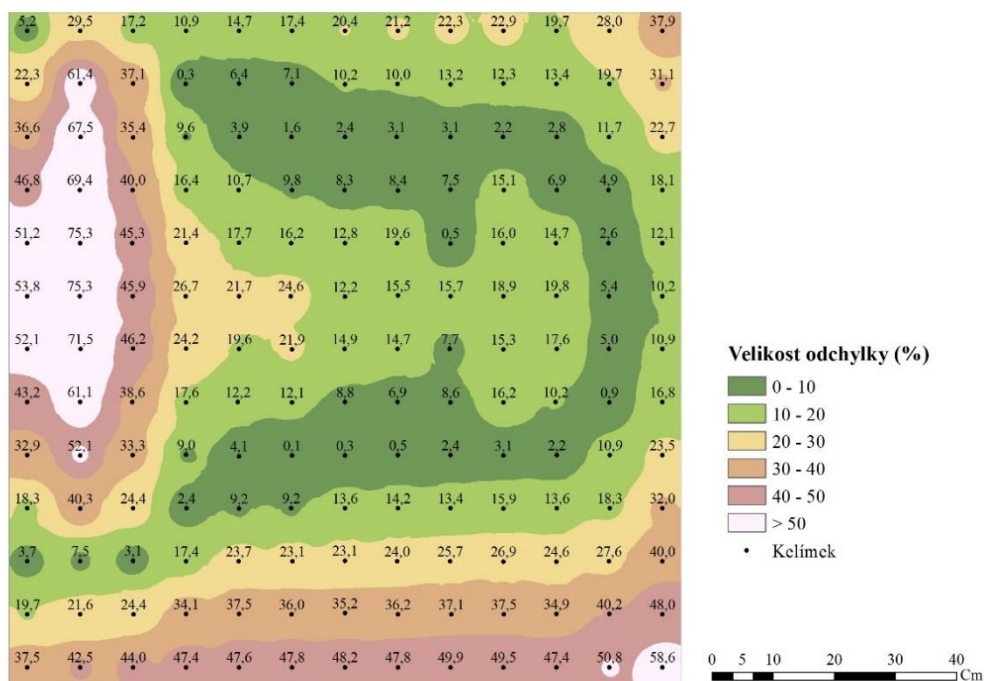


Obr. 21: Absolutní odchylka od průměru 9,0 ml při intenzitě 2S



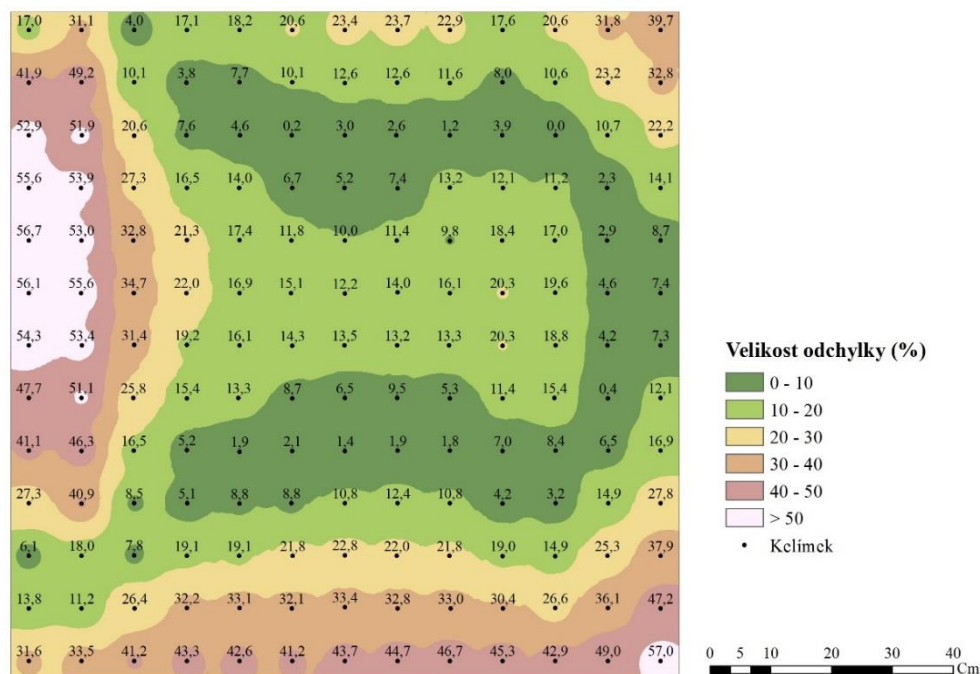
Obr. 22: Absolutní odchylka od průměru 13,7 ml při intenzitě 3S

Absolutní odchylka od průměru při variantě 4S



Obr. 23: Absolutní odchylka od průměru 17,6 ml při intenzitě 4S

Absolutní odchylka od průměru při variantě 4D

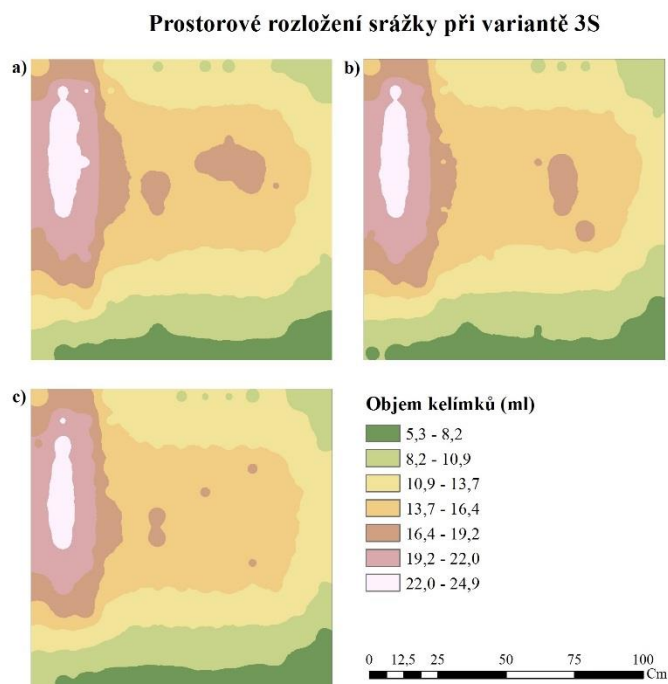


Obr. 24: Absolutní odchylka od průměru 26,2 ml při intenzitě 4D

5 Diskuze

Je známo, že prostorovou distribuci srážky ovlivňují mnohé faktory. Autoři, jako například Iserloh et al. (2000), Ries et al. (2009) nebo Kara et al. (2008), poměrně shodně uvádějí tyto faktory – velikost a typ trysky, provozní tlak, rozmístění trysek, typ simulátoru či intenzita srážky (viz. Kapitola 3.4.1).

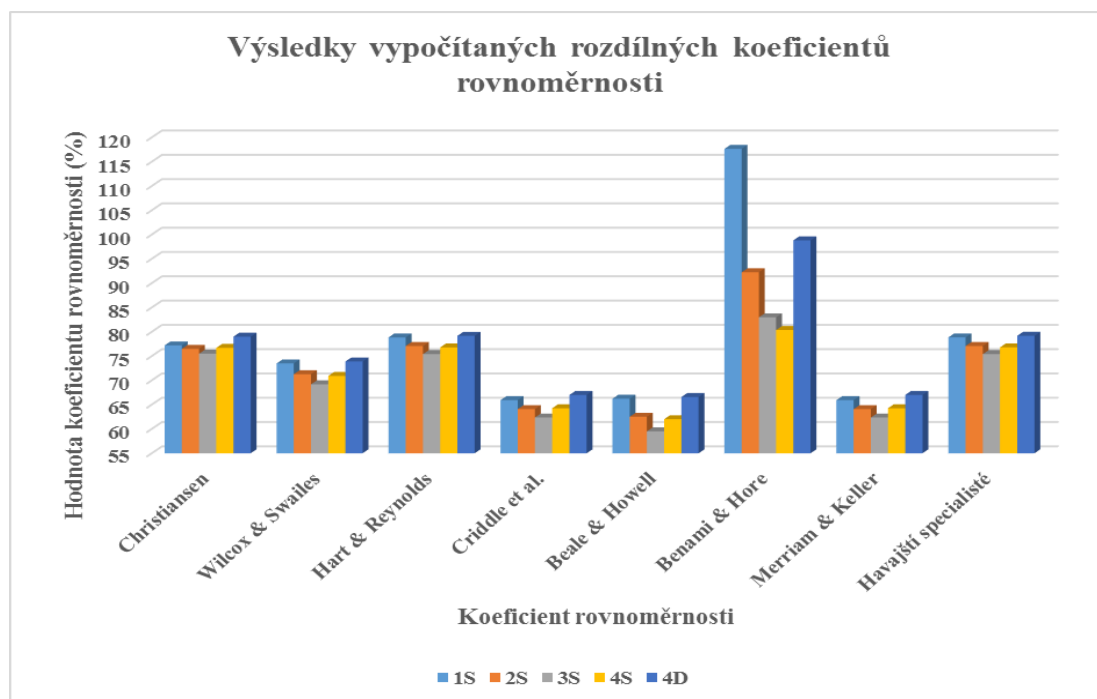
Lascelles et al. (2000) uvádí dvě složky, které ovlivňují tyto prostorové variace – deterministickou a stochastickou. Deterministická složka obsahuje známé informace a předpokládané chování, v podstatě již má předdefinované výsledky a existenci těchto komponentů lze redukovat či plně odstranit správnou kalibrací přístroje. Složka stochastická obsahuje náhodné vlivy, které nelze předpokládat a ani je nelze odstranit. Z tohoto důvodu se naše měření opakovalo (a následně zprůměrovalo) pro každou intenzitu simulované srážky třikrát, protože i když výsledné obrazce prostorové distribuce jsou si velmi podobné, nikdy nelze dosáhnout naprosto stejného výsledku, což lze vidět na obrázku 25. V našem případě by se ovšem dalo říct, že tato stochastická složka malá a má pravděpodobně velmi malý efekt na celkové výsledky. Nabízí se zde i otázka, zdali by delší doba měření způsobila jednotnější výsledný obrazec.



Obr. 25: Prostorové rozložení srážky při variantě 3S, a) první b) druhé c) třetí měření

Podle výsledků spočítaných koeficientů rovnoměrnosti nelze s jistotou stanovit, že se vzrůstající intenzitou srážky koeficient klesá, z výsledků však nelze ani tvrdit opak. Žádná z použitých intenzit nemá CU alespoň 84 % a podle prvního předpokladu z kapitoly 3.4.1 by tudíž simulátor měl být nevyhovující. Pokud bychom však naši nejnižší hodnotu, 75,5 % pro 3S, zaokrouhlili, tak podle Korvena (1968) by se i takto nízký koeficient dal hodnotit jako dostatečný. Nicméně je to hraniční hodnota a rovnoměrnost simulované srážky je nízká.

Při hodnocení souhrnné tabulky dalších koeficientů (tabulka 4) je patrné, že stejně jako u Christiansena, nelze určit jednoznačné tvrzení související se zvyšující se intenzitou. Ve všech případech je koeficient s nejnižší hodnotou u intenzity 3S, kromě hodnoty získané z rovnice Benami & Hore, kde 4S má nejnižší hodnotu. Bohužel ani tato rovnice nepotvrzuje předpoklad, že se zvyšující se intenzitou klesá hodnota koeficientu, protože při nejvyšší použité intenzitě 4D je tato hodnota příliš vysoká, je to dobře patrné v souhrnném grafu číslo 4. Z tohoto grafu je také patrné, že všechny hodnoty pro intenzitu 4D jsou vyšší, i když pouze nepatrně, než hodnoty pro intenzitu 1S. Toto tvrzení se však opět netýká výsledků z rovnice Benami & Hore.



Graf 4: Další vypočítané koeficienty rovnoměrnosti

U koeficientu Wilcox & Swailes je potřeba dosáhnout 70 %, to splňují všechny intenzity, kromě 3S s 69,2 % i když celkově jsou jeho hodnoty nižší než u Christiansena. Hart & Reynolds má stejné hodnocení jako předchozí rovnice. V tomto případě minimální hodnotu 70 % splňují všechny intenzity a jsou velmi podobné výsledkům z Christiansenovy rovnice. Koeficient Benami & Hore by měl být větší než 80 %, to je zde ve všech intenzitách splněno. U vyhodnocení rovnice Merriam & Keller se všechny hodnoty nachází v rozmezí od 62,4 % pro 3S do 67,0 % pro 4D, jsou tedy nižší než minimální přijatelná hodnota 83 %, a tudíž velmi špatné. Výsledky vyhodnocení jsou pro přehlednost uvedeny v tabulce 6.

Pro koeficienty Criddle et al., Beale & Howell a výpočet havajských specialistů zde není vyhodnocení z důvodu nedostatečných nebo chybějících podkladů. Pro tyto koeficienty bylo možné nalézt pouze vzorec bez následné kategorizace výsledku. Jsou zde uvedeny pouze jako příklad výsledných hodnot.

	1S	2S	3S	4S	4D
Christiansen (1942)	N / A	N / A	N / A	N / A	N / A
Wilcox & Swailes (1947)	A	A	N	A	A
Hart & Reynolds (1965)	A	A	A	A	A
Criddle et al. (1956)	-	-	-	-	-
Beale & Howell (1966)	-	-	-	-	-
Benami & Hore (1964)	A	A	A	A	A
Merriam & Keller (1978)	N	N	N	N	N
Havajští specialisté (1978)	-	-	-	-	-

Tab. 6: Vyhodnocení dostatečnosti nebo nedostatečnosti hodnoty koeficientu. N - nedostatečné, A - akceptovatelné, "-" - nehodnoceno. U Christiansena je uvedeno hodnocení pro 84% a 76%, v tomto pořadí.

V průběhu měření mohlo dojít chybám. Především měření intenzity 1S mohlo být ovlivněno změnou výšky trysek ze 172 cm na 205 cm, což bylo již zmíněno. Vzhledem ke třem opakování každého měření byly případné chyby a náhodné jevy sníženy na minimum. I během přepisu získaných dat mohlo dojít ke špatnému opsání, hodnoty však byly několikrát kontrolovány a pravděpodobně k nim nedošlo.

6 Závěr

Z rešerše ohledně výzkumu srážkových charakteristik bylo zjištěno, že existuje uspokojivé množství informací o těchto charakteristikách. Je již známo poměrně mnoho informací, ve srovnání s počátkem 20. století, jak uvádí Cerdà (1999) a znalosti se prohlubují. Na jednotlivých podrobnostech o srážkových charakteristikách se autoři většinou shodují, odlišný názor byl ale nalezen u velikostí dešťových kapek, kde se zdroje v minimální i maximální velikosti rozcházejí. I ve způsobech měření srážkových charakteristik došlo k pokroku, především díky rozvoji techniky, kdy měření nejsou tak náročná a lze získat přesnější a větší vzorek dat.

Autoři ve svých studiích uvádí mnohé rovnice (například pro výpočet rychlosti pádu kapky), kterými se sice zjišťuje stejná charakteristika, vstupní data do rovnice se ale liší, v některých případech jich není potřeba tolik (viz. rovnice 4 a 5, kde u rovnice 5 je vstupním parametrem pouze průměr kapky). Protože se nestává příliš často, aby autoři ve svých studiích počítali charakteristiky podle více rovnic (například pro porovnání), ale používají pouze jednu, není příliš jasné, jak moc přesné tyto výsledky jsou. Lze ale předpokládat, že čím více vstupních parametrů máme, tím přesnější výsledek by mohl být.

S rostoucími znalostmi ohledně srážek jsou vylepšovány i dešťové simulátory. Existuje jim mnoho typů, jak komerčních, tak i nekomerčních. Ve studiích, kde bývají používány, bývá přítomen i jejich popis. Od použitého typu simulátoru se odvíjí i zjištěné výsledky a musí být zohledněno, že ne všechny simulátory jsou vhodné pro všechny výzkumy. Z práce také vyplývá, že je lepší použít či upravit již existující simulátor než vymýšlet zcela nový. Vzhledem k poměrně velkému množství literárních podkladů, by to nemuselo být příliš obtížné. Nebylo nalezeno mnoho českých podkladů k tomuto tématu, i když je zřejmé, že i u nás jsou simulátory deště využívány.

Z výsledků měření byl vyvrácen původní předpoklad. Se zvyšující se intenzitou srážky neklesá koeficient rovnoměrného rozložení srážky, jak bylo předpokládáno. Nelze také s jistotou určit, proč z výsledků měření není možné stanovit jednoznačný závěr, který by zněl obdobně jako předpoklad.

Při vyhodnocení několika koeficientů rovnoměrného rozložení se dospělo k závěru, že univerzitní simulátor srážku sice vhodně distribuuje, ve většině případů však dosahuje pouze minimálních potřebných hodnot. Nejužívanější koeficient je stále Christiansenův a při jeho vyhodnocení by simulátor byl uznán za vhodný pouze v případě, pokud by se hodnotilo podle Korvena (1968), stále by to však byly minimální přípustné hodnoty.

Ze studií jiných autorů byla zjištěna pouze jedna studie obdobného charakteru, tedy se zaměřením čistě na distribuční koeficienty. Maroufpoor et al. (2010) ji prováděl a uvádí, že koeficienty se liší svým použitím podle vhodných polních podmínek. Blíže je však nspecifikuje a je poměrně obtížné najít další vhodné zdroje, protože ve většině případů lze nalézt pouze Christiansenův koeficient. Vyhodnocení koeficientů se tedy stává problémem.

Ne všichni autoři souhlasí s důležitostí distribučních koeficientů, Lascelles et al. (2000) poukazuje na jejich přeceňování. Dle jeho názoru by bylo vhodnější, pokud by byl simulátor testován komplexněji, je tedy potřeba zabývat se i srážkovými charakteristikami, s čímž autor této práce souhlasí. Tento názor určuje směr pro další možné studie, studovat simulátor komplexněji.

7 Zdroje

Bagree, R., 2012: Characterization and design of a readout circuit for piezoelectric-based acoustic disdrometer. Delft University of Technology, Delft, 78 s.

Banzetová, D., 2015: Srovnání účinků deště na starém a novém simulátoru dešťů. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno. 49 s. (diplomová práce).

„nepublikováno“. Dostupné z

<<https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/37427/23690.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

Bednář, J., 2003: Meteorologie. Úvod do studia dějů v zemské atmosféře. Portál, Praha, 223 s.

Blanquies, J., Scharff, M., Hallock, B., 2003: The design and construction of a rainfall simulator. In: EICA, 34th Annual conference and expo., Las Vegas, Nevada, February 24-28, 2003.

CENIA, ©2013: Eroze půdy (online) [cit. 13.4.2017], dostupné z <http://vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=eroze_pudy&site=puda>.

Cerdà, A., 1999: Simuladores de lluvia y su aplicación a la Geomorfología. Estado de la cuestión. Cuadernos I. Geográfica 25: 45-84.

Dvořák, P., 2003: Ilustrovaný atlas počasí. Svět křidel, Cheb, 138 s.

Eijkelkamp ©2012: Small rainfall simulator (online) [cit. 22.3.2017], dostupné z <<https://en.eijkelkamp.com/products/field-measurement-equipment/rainfall-simulator.html>> .

Fišer, O., Schönhuber, M., Pešice, P., 2002: First results of DSD measurement by videodisdrometer in the Czech republic in 1998-1999. *Studia Geophysica et Geodaetica*: 46: 485-505.

Fox, N.I, 2004: Technical note: The representation of rainfall drop-size distribution and kinetic energy. *Hydrology and earth system sciences*: 8 (5): 1001-1007.

Grismer, M.E., 2011: Rainfall simulation studies - a review of designs, performance and erosion measurement variability (online) [cit. 28.2.2017], dostupné z <<http://www.ucanr.org/sites/californiaagriculture/files/145682.pdf>>.

- Heidorn, K.C., 2003: The weather doctor's weather almanac: The energy of a rainshower (online) [cit. 22.3.2017], dostupné z <<http://islandnet.com/~see/weather/almanac/arc2003/alm03apr.htm>>.
- Holubová, N., 2016: Způsoby měření srážkových charakteristik. Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí, Katedra biotechnických úprav krajiny, Praha, 54 s. (bakalářská práce). „nepublikováno“. Dep. SIC ČZU v Praze.
- Holý, M., 1994: Eroze a životní prostředí. České vysoké učení technické, Praha, 383 s.
- Hudson, N. W., 1993: Field measurement of soil erosion and runoff. (online) [cit. 1.3.2017], dostupné z <<http://www.fao.org/docrep/T0848E/t0848e00.htm#TopOfPage>>.
- Christiansen, J. E., 1942: Irrigation by sprinkling. California Agriculture Experiment Station Bulletin. 670.
- Iserloh, T., Ries, J.B, Arnáez, J., Boix-Fayos, C., Butzen, V., Cerda, A., Echeverría, M.T., Fernández-Gálvez, J., Fister, W., Geissler, C., Gómez, J.A., Gómez-Macpherson, H., Kuhn, N.J., Lázaro, R., León, F.J., Martínez-Mena, M., Martínez-Murillo, J.F., Marzen, M., Mingorance, M.D., Ortigosa, L., Peters, P., Regüés, D., Ruiz-Sinoga, J.D., Scholten, T., Seeger, M., Solé-Benet, A., Wengel, R., Wirtz, S., 2013: European small portable rainfall simulators: a comparison of rainfall characteristics. *Catena*: 110: 100-112.
- Jameson, A.R., Kostinski, A.B., 2001: What is a raindrop size distribution? *Bulletin of the American Meteorological Society*: 82 (6): 1169-1177.
- Janeček, M. a kolektiv autorů, 2008: *Základy erodologie*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha, 172 s.
- Janeček, M., 1994: Simulátor deště – významný pomocník při výzkumu eroze. *Úroda*: 94 (9): 40-41.
- Janeček, M., Kubátová, E., Procházková, E., 2013: Využití simulátorů deště ve výzkumu eroze. *Vodní hospodářství*: 63 (5): 168-172.

Janeček, M., Tippl, M., Bohuslávek, J., 1995: Využití polního simulátoru deště při sledování půdoochranné účinnosti variant pěstování kukuřice. Rostlinná výroba: 41 (10): 485-490.

Kara, T., Ekmekci, E., Apan, M., 2008: Determining the uniformity coefficient and water distribution characteristics of some sprinklers. Pakistan Journal of Biological Sciences: 11 (2): 214-219.

Koláčková, J., Paříková, P., 2002: Využití dešťového simulátoru pro výzkum půdní eroze. (Online) [cit. 29.12.2016], dostupné z <<http://destovy.simulator.sweb.cz/spindl2002.html>>.

Korven, H.C., 1968: An evaluation of three coefficients as a measure of uniformity of water application by sprinklers. Canadian agricultural engineering: 10 (2): 83-84.

Kozlovská, S., 2014: Analýza srážkových řad z hlediska vlivu srážek na vodní erozi. Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Brno. 132 s (diplomová práce). „nepublikováno“. Dostupné z <http://theses.cz/id/hrbnxe/zaverecna_prace.pdf>.

Kraus, J. a kolektiv autorů, 2008: Nový akademický slovník cizích slov. Academia, Praha, 879 s.

Křikavová, L., 2009: Interpolace bodových dat v GIS. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra mapování a kartografie, Praha. 55 s. (bakalářská práce). „nepublikováno“. Dostupné z <http://maps.fsv.cvut.cz/diplomky/2009_BP_Krikavova_Interpolace_bodovych_dat_v_GIS.pdf>.

Lascelles, B., Favis-Mortlock, D. T., Parsons, A. J., Guerra, A. J. T., 2000: Spatial and temporal variation in two rainfall simulators: Implications for spatially explicit rainfall simulation experiments. Earth Surface Processes and Landforms: 25: 709-721.

Maroufpoor, E., Faryabi, A., Ghamarnia, H., Moshrefe, G.Y., 2010: Evaluation of uniformity coefficients for sprinkler irrigation systems under different field conditions in Kurdistan province (northwest of Iran). Soil & Water Research: 5 (4): 139-145.

McQueen, I. S., 1963: Development of a hand portable rainfall simulator-infiltrimeter. U. S. Geological Survey Circular 482. Washington D. C.

Pall, R., Dickinson, W.T., Beals, D., McGirr, R., 1983: Development and calibration of a rainfall simulator. *Canadian agricultural engineering*: 25 (2): 181-187.

Ries, J. B., Seeger, M., Iserloh, T., Wistorf, S., Fister, W., 2009: Calibration of simulated rainfall characteristics for the study of soil erosion on agricultural land. *Soil & Tillage Research*: 106: 109-116.

Rožnovský, J., Havlíček, V., 1998: Bioklimatologie. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, 155 s.

Řezáčová, D., Novák, P., Kašpar, M., Setvák, M., 2007: Fyzika oblaků a srážek. Academia, Praha, 576 s.

Salles, Ch., Poesen, J., Sempere-Torres, D., 2002: Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity. *Journal of hydrology*: 257: 256-270.

Soukupová, J., 2011: Atmosférické procesy (základy meteorologie a klimatologie). Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha, 204 s.

8 Obrazové přílohy a tabulky

Obr. 2: Tříštění velkých vodních kapek (online) [cit. 1.3.2017], dostupné z <<https://unrealfacts.com/shape-raindrops-tear-shaped/>>

Obr. 2: Změna tvaru kapky s rostoucí velikostí (Řezáčová et al. 2007)

Obr. 3: Thiesův laserový distrometer (online) [cit. 1.3.2017], dostupné z <<http://www.mdpi.com/2073-4441/8/1/29/htm>>

Obr. 4: Princip měření kapek pomocí 2D distrometeru (online) [cit. 1.3. 2017], dostupné z <<http://www.soletop.com/kor/products/product02d.html>>

Obr. 5: DSD během různé intenzity deště (Bagree 2012)

Obr. 6: Vztah KE a intenzity srážky pro různé geografické lokace (Holý 1994)

Obr. 7: Polní simulátor deště VÚMOP, Frydrych, J. (online) [cit. 1.3.2017], dostupné z <<http://biom.cz/cz/obrazek/polni-simulator-deste-vumop-praha>>

Obr. 8: Malý dešťový simulátor dle Kamphorsta (online) [cit. 1.3. 2017], dostupné z <<https://en.eijkelkamp.com/products/field-measurement-equipment/rainfall-simulator.html>> upraveno autorem

Obr. 9: Malý dešťový simulátor dle Kamphorsta, Frydrych, J. (online) [cit. 1.3.2017], dostupné z <<http://biom.cz/cz/obrazek/prenosny-simulator-deste-dle-kamphorsta-vumop-praha>>

Obr. 10: Přenosný dešťový simulátor - infiltrometr (McQueen 1963)

Obr. 11: Rotační dešťový simulátor univerzity v Guelph (Pall et al. 1983)

Obr. 12: Univerzitní dešťový simulátor Norton Ladder Rainfall Simulator (autor)

Obr. 13: Rozmístění sběrných nádob na sběrném žlabu (autor)

Obr. 14: Schéma rozmístění sběrných kelímků a odtoku (autor)

Obr. 15: Prostorové rozložení objemu srážky 1S (autor)

Obr. 16: Prostorové rozložení objemu srážky 2S (autor)

Obr. 17: Prostorové rozložení objemu srážky 3S (autor)

Obr. 18: Prostorové rozložení objemu srážky 4S (autor)

Obr. 19: Prostorové rozložení objemu srážky 4D (autor)

Obr. 20: Absolutní odchylka od průměru 4,7 ml při intenzitě 1S (autor)

Obr. 21: Absolutní odchylka od průměru 9,0 ml při intenzitě 2S (autor)

Obr. 22: Absolutní odchylka od průměru 13,7 ml při intenzitě 3S (autor)

Obr. 23: Absolutní odchylka od průměru 17,6 ml při intenzitě 4S (autor)

Obr. 24: Absolutní odchylka od průměru 26,2 ml při intenzitě 4D (autor)

Obr. 25: Prostorové rozložení srážky při variantě 3S (autor)

Graf 2: Vztah velikosti kapek a pádové rychlosti při tlaku 1013 hPa a teplotě 20°C podle dat od Gunna & Kinzera (Řezáčová et al. 2007)

Graf 2: Přehled počtu typů jednotlivých dešťových simulátorů vytvořených během jednotlivých desetiletí ve 20. století (Cerdà 1999)

Graf 3: Velikost CU koeficientu pro jednotlivé intenzity (autor)

Graf 4: Další vypočítané koeficienty rovnoměrnosti (autor)

Tab. 1: Intenzita deště podle Soukupové (2011) (Soukupová 2011)

Tab. 2: Intenzita deště podle Rožnovského & Havlíčka (1998) (Rožnovský & Havlíček 1998)

Tab. 3: Intenzity a kinetická energie jednotlivých variací srážky (manuál simulátoru deště v erodologické laboratoři ČZU v Praze)

Tab. 4: Souhrnné výsledky jednotlivých distribučních koeficientů (autor)

Tab. 5: Vybrané charakteristiky jednotlivých intenzit (autor)

Tab. 6: Vyhodnocení dostatečnosti nebo nedostatečnosti hodnoty koeficientu (autor)