

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

**Katedra vodního hospodářství a environmentálního
modelování**



Bakalářská práce

Nové trendy v simulaci deště a možné hydrologické aplikace

**New trends in rainfall simulation and possible hydrological
applications**

Autor práce: Pavel Crha

Vedoucí práce: Ing. Romanu Jurasovi, Ph.D.

© 2022 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Pavel Crha

Environmentální vědy
Aplikovaná ekologie

Název práce

Nové trendy v simulaci deště a možné hydrologické aplikace

Název anglicky

New trends in rainfall simulation and possible hydrological applications

Cíle práce

Zhodnotit současný stav řešení dešťových simulátorů pomocí literární rešerše a navrhnout využití nových technologií v praxi.

Metodika

Student provede literární rešerši, která poskytne přehled současných možností technického řešení, ale také použití simulátorů napříč vědeckými a technickými obory.

Práce se zaměří především na:

- Jak se měří odtok, eroze, infiltrace
- Jak se měří změny reliéfu zadešťované plochy – Lidar, Fotogrammetrie
- Měření kinetické energie kapky
- Základní charakteristiky přírodního deště (kapky) a možnosti jejich simulace

Doporučený rozsah práce

35

Klíčová slova

děšť, simulátor, eroze, infiltrace, senzory

Doporučené zdroje informací

Fister, W., Iserloh, T., Ries, J. B. and Schmidt, R.-G.: Comparison of rainfall characteristics of a small portable rainfall simulator and a portable wind and rainfall simulator, Zeitschrift für Geomorphol. Suppl. Issues, 55(3), 109–126, doi:10.1127/0372-8854/2011/0055S3-0054, 2011.

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

Vedoucí práce

Ing. Roman Juras, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 23. 3. 2022

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 24. 3. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 31. 03. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Nové trendy v simulaci deště a možné hydrologické aplikace vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 31.3.2022

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Romanu Jurasovi, Ph.D., za trpělivost, ochotu, připomínky, vstřícný přístup a odborné vedení. Dále bych rád poděkoval mé rodině za podporu při psaní této práce.

Nové trendy v simulaci deště a možné hydrologické aplikace

Abstrakt

Tato práce se zabývá technologiemi, které se používají k simulaci deště. První část formou rešerše popisuje základní charakteristiky vodní eroze, kterou lze studovat za pomoci aplikace simulovaných srážek, které mají replikovat atmosférické srážky. Dále popisuje dešťové simulátory a jejich vlastnosti. V druhé části jsou popsány simulace deště poháněným větrem a nové simulátory dle jejich vlastností a způsobu použití.

Cílem této práce je získat poznatky o současných možnostech simulace deště, porovnat design novějších dešťových simulátorů a způsoby získávání dat. Porovnání bylo provedeno s předešlými studiemi, které se zabývali více dešťovými simulátory.

Práce zjistila, že největší vývoj v simulaci deště je v oblasti získávání dat o rychlosti, velikosti a kinetické energii dešťových kapek pomocí zařízení jako jsou disdrometry a rychlostní kamery. Dále možnost využití fotogrammetrie k analýze úbytku půdy za pomoci smartphonů a dronů. Novinky v designu dešťových simulátorů se týkaly modernizace stávajících metod.

Klíčová slova: vodní eroze, déšť, dešťový simulátor, disdrometr, déšť poháněný větrem

New trends in rainfall simulation and possible hydrological applications

Abstract

This work deals with technologies that are used to simulate rain. The first part in the form of a search describes the basic characteristics of water erosion, which can be studied using the application of simulated precipitation to replicate atmospheric precipitation. It also describes simulators and their properties. The second part describes wind-driven rain simulations and new simulators according to their properties and method of use.

The aim of this work is to gain knowledge about the current possibilities of rain simulation, to compare the design of newer rain simulators and methods of data acquisition. The comparison was made with previous studies that looked at more rain simulators.

The work found that the biggest development in rain simulation is in the field of obtaining data on the speed, size and kinetic energy of raindrops using devices such as disdrometers and speed cameras. Furthermore, the possibility of using photogrammetry to analyze land loss with the help of smartphones and drones. Innovations in the design of rain simulators concerned the modernization of existing methods.

Keywords: water erosion, rain, rain simulator, disdrometer, wind driven rain

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Cíle práce	3
3.	Literární rešerše	4
3.1.	Eroze půdy.....	4
3.1.1.	Vodní eroze	4
3.1.2.	Povrchový odtok a infiltrace	5
3.1.3.	Eroze půdy v ČR	6
3.1.4.	Protierozní ochrana půdy	7
3.2.	Atmosférické srážky a jejich charakteristika.....	8
3.2.1.	Druhy srážek	8
3.2.2.	Velikost a tvar kapek	9
3.2.3.	Rychlost a kinetická energie kapek	10
3.2.4.	Prostorová distribuce deště	11
3.2.5.	Roční chod srážek.....	11
3.3.	Dešťový simulátor.....	12
3.3.1.	Druhy DS	12
3.4.	Design přenosných dešťových simulátorů	14
3.4.1.	Konstrukce	14
3.4.2.	Generátor kapek	14
3.5.	Měření charakteristických vlastností simulátorů	15
3.5.1.	Měření dešťových vlastností	15
3.5.2.	Měření půdních vlastností.....	18
3.6.	Systemy simulace větru s deštěm	19
3.7.	Nové dešťové simulátory.....	21
4.	Výsledné hodnocení.....	32
5.	Diskuze	35

6.	Závěr.....	38
7.	Reference	39

1. Úvod

Dešťové simulátory jsou užitečným nástrojem ke stanovení charakteristik půdy pod vlivem deště, jako je například rychlost infiltrace vody, vliv různých typů hospodaření s půdou na vlastnosti půdy až po specifické erozní procesy. Hlavní výhodou simulovaných srážek je, že se nemusí čekat na přirozené dešťové srážky. Simulované srážky navíc umožňují lepší kontrolu experimentálních podmínek a možnost opakování experimentů za stejných podmínek, což u přirozených srážek není možné (Alves Sobrinho et al., 2008).

Srovnávání dešťových simulátorů je složitým tématem kvůli jejich rozmanitosti v aplikaci a účelu. Dešťové simulátory jsou z velké části navrženy a vyrobeny tak, aby co nejlépe vyhovovaly daným výzkumným cílům. Proto jsou zde časté kompromisy ve výběrových kritériích mezi různými požadavky na dešťové simulátory (Yakubu et Yusop, 2017).

Simulátory dešťových srážek lze efektivně využít ke studiu procesů, jako je povrchový odtok, mechanismy infiltrace a tvorba a transport sedimentů v měřítku menších pozemků s důrazem na to, jak povrchové vlastnosti, jako je sklon svahu a vlastnosti půdy, ovlivňují tyto procesy (Boulangue et al., 2019).

Vodní eroze půdy je přírodní proces, při kterém dochází k rozrušování půdního povrchu působením vody. Jeden z hlavních problémů vodní eroze je eroze zrychlená, která je způsobena člověkem. Zrychlená eroze smývá půdní částice v takovém rozsahu, že nemohou být nahrazeny půdotvorným procesem, který probíhá mnohem pomaleji. Z uvedeného vyplývá, že vodní erozi nelze zcela eliminovat, lze ji však výrazně omezit a umožnit tak trvalé využívání půd k pěstování zemědělských plodin (Holý, 1994).

V českých podmínkách se jednotlivé typy degradace liší podle území, nejvýraznější je vodní eroze, která ohrožuje více než 45 % zemědělských ploch (Bořivoj Šarpatka et al., 2010). Velká část plochy půd ohrožených vodní erozí není ošetřena systematickou ochranou, která by omezovala ztráty půdy na stanovené přípustné hodnoty (Janeček et al., 2012).

Pro inspiraci k návrhu nového dešťového simulátoru na KVHEM FŽP budou v této práci porovnány různé ve světě používané dešťové simulátory, jejich vlastnosti tvorby umělého deště a způsoby získávání dat z těchto zařízení. Po zhodnocení budou formou diskuse navrženy neoptimálnější technologie a komponenty k výstavbě nového dešťového simulátoru.

2.Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je získat poznatky o současných technologiích, principech a možnostech simulace deště.

Zhodnotit způsoby získávání dat z dešťových simulátorů a porovnat různé novější dešťové simulátorů se simulátory z dřívějších studií.

Na konci proběhne diskuse o vhodnosti použití technologií ze zde popsaných simulátorů k dalšímu použití pro nové simulátory.

3. Literární řešení

Simulace deště je užitečný nástroj, pomocí kterého lze získat data o účinku deště na půdu. Přesněji lze získat informace o povrchovém odtoku, infiltraci, transportu sedimentu, proto jsou simulátory používány k vyhodnocování vodní eroze na zemědělsky obdělávaných půdách.

Simulovaný déšť má co nejpřesněji replikovat přirozený déšť, ale v praxi toho nebylo zatím dosaženo.

3.1. Eroze půdy

Eroze půdy je přírodní proces, kdy působením vody, větru a dalších faktorů dochází k degradaci půdy. Tento proces lze rozdělit do tří fází, kdy se v první fázi uvolňují částice z půdy. Druhou fází je transport částic uvedenými činiteli. Ve třetí fázi je ukládán transportovaný materiál, pokud již není dostatek energie k dalšímu transportu částice (Holý, 1994).

Mezi hlavní problémy spojenými s erozí patří ochuzování zemědělské půdy o nejrůdnější část: ornici, dochází k zhoršování fyzikálně-chemických vlastností půd, zmenšování mocnosti půdního profilu, zvyšuje se šterkovitost erodovaných půd a snižuje se obsah živin a humusu. Dále mohou transportované půdní částice a na nich navázané látky znečišťovat vodní zdroje a může znečišťovat či poškozovat různá vodní díla (Janeček et al., 2008).

3.1.1. Vodní eroze

Vodní eroze půdy je proces, kdy dochází k postupnému rozrušování půdního povrchu a následnému transportu půdních částic a jejich následnému usazování působením vody. Vodní eroze je jedním z nejvýznamnějších degradačních procesů u nás.

Začíná dopadem dešťové kapky na povrch půdy. Při pádu rozbíjejí půdní agregáty na menší částičky, které vyplňují mezery mezi agregáty. To může způsobit krustaci půdy a následné snížení infiltrace, které zvyšuje povrchový odtok. Povrchový odtok vzniká v okamžiku, kdy intenzita deště přesáhne vsakovací schopnost půdy (Janeček et al., 2008).

V Číně byla provedena studie, která se zabývala kontrolou míry úbytku půdy způsobené vodní erozí na různě využívaných půdách. Míra eroze na narušené půdě využívané pro zemědělství je řád vyšší než na nenarušené, dobře zarostlé půdě. Na konvenčně obhospodařované orné půdě může míra eroze výrazně převyšovat míru tvorby půdy, zatímco u půdy pod trvalou přirozenou vegetací tomu tak není (Zhao et al., 2022).

3.1.2. Povrchový odtok a infiltrace

Povrchový odtok lze jednoduše popsat jak část pevných nebo kapalných srážek, které rychle odtékají po povrchu terénu do toku. Vzniká při přívalových nebo bouřkových deštích, které obvykle mají větší intenzitu a srážkový úhrn.

Jednou z možností vzniku povrchového odtoku je při srážkách, jejichž intenzita přesahuje infiltrační kapacitu půdy. Tento druh povrchového odtoku, jinak zvaný Hortonovský odtok, většinou nastává při krátkých, ale intenzivních srážkách a nejčastěji se vykytuje na půdách, které mají větší podíl jílové frakce. V České republice mají půdy relativně vysokou schopnost infiltrace, proto se zde vyskytuje ojediněle. Druhou možností je povrchový odtok, který vzniká při úplném nasycení půdy. Voda se už nemůže vsakovat a dochází ke vzniku povrchového odtoku (UCAR, ©2010)

Množství vyprodukovaného odtoku však do značné míry závisí na místních fyzikálních vlastnostech, jako je typ půdy, nasycení půdy, vegetační pokryv, zhutnění půdy a morfologické vlastnosti (Nielsen et al., 2019).

Infiltrace je gravitační pohyb vody směrem do země. Tímto pohybem voda prostupuje nejen půdními póry, ale využívá i různě vzniklých mezer a puklin v zemském povrchu. Schopnost infiltrace je podmíněná půdními charakteristikami jako jsou zrnitost, struktura půdy. Dále může být ovlivněna vegetačními poměry nebo způsobem zpracování půdy. Rychlost infiltrace je ovlivněna různými půdními typy. U jílovitých půd se může pohybovat mezi 1–5 mm za hodinu a u písčitých půd až 100–150 mm za hodinu (Bořivoj Šarpatka, 2014).

(Tabulka 1) popisuje skupiny půd podle jejich hydrologických vlastností a potenciální rychlosti infiltrace. Rozdělení do těchto skupin se používá u některých

hydrologických modelů, například pro stanovení hodnot CN u Metody CN křivek (Janeček, 2008).

Tabulka 1: Popis skupin půd podle jejich hydrologických vlastností. (www.chmi.cz)

Skupina	Charakteristika hydrologických vlastností	Rychlost infiltrace [mm.min ⁻¹]	Rychlost infiltrace [mm.den ⁻¹]
A	Půdy s vysokou rychlostí infiltrace i při úplném nasycení, zahrnující převážně hluboké, dobře až nadměrně odvodněné písky nebo štěrky	> 0,12	> 172
B	Půdy se střední rychlostí infiltrace i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy středně hluboké až hluboké, středně až dobře odvodněné, hlinitopísčité až jílovitohlinité	0,06 – 0,12	86,4 – 172
C	Půdy s nízkou rychlostí infiltrace i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy s málo propustnou vrstvou v půdním profilu a půdy jílovitohlinité až jílovité	0,02 – 0,06	28,8 – 86,4
D	Půdy s velmi nízkou rychlostí infiltrace i při úplném nasycení, zahrnující především jíly s vysokou bobtnavostí, půdy s trvale vysokou hladinou podzemní vody, půdy s vrstvou jílu na povrchu nebo těsně pod ním a mělké půdy nad téměř nepropustným podložím	< 0,02	< 28,8

3.1.3. Eroze půdy v ČR

Půdy v ČR jsou více než z poloviny ohroženy vodní erozí, nejrozšířenějším typem degradace půd u nás. Během jedné erozní události může být spláchnuto až několik cm půdy a dojít tak k její nenávratné ztrátě. V případě eroze se k degradaci půdy přidávají ještě další negativní efekty způsobené přenosem půdního materiálu a dochází tak k ohrožování obecního a soukromého majetku, zanášení vodních toků a nádrží a zhoršování jakosti povrchových vod (Janeček, 2008). Vážné projevy degradace půdy erozí jsou každoročně mapovány při aktualizacích bonitovaných půdně ekologických jednotek, což se projevuje i výrazným snížením průměrné ceny pozemků (EAGRI, ©2009)

Orná půda pokrývá přibližně 42 % plochy České republiky. Hlavními půdními jednotkami jsou: kambizem (45 %), luvizem (18 %) a černozem (12 %) (Novotný et al., 2016).

Dle Šarpatka et al. (2010) je nejvýraznější vodní eroze (Obrázek 1), která ohrožuje více než 45 % zemědělských ploch. (Miloslav Janeček, 2012) říká, že až 50 % orné půdy ohroženo vodní erozí a téměř 10 % větrnou.

V některých případech intenzivních dešťů dochází ke ztrátám přesahujícím desítky tun na hektar a není neobvyklé, že dochází ke ztrátám půdy větším než 100 tun na hektar. Míry jsou rozdílné v závislosti na vlastnostech terénu a typu půdy, přičemž černozem a luvizem ve sprašových oblastech jsou nejvíce ohroženy kvůli jejich vysoké erodovatelnosti (Zádorová et al., 2011).



Obrázek 1: Ohrožení půdy vodní erozí (<https://mapy.vumop.cz>)

3.1.4. Protierozní ochrana půdy

Systematická ochrana před úbytkem půdy není na většině zemědělské půdy prováděna, což je zhoršeno vysokým reliéfem území a velkou rozlohou zemědělských pozemků v ČR. Velikost těchto pozemků v souvislosti s intenzifikací zemědělské výroby v minulosti (zejména 1950–1990). Současné využití půdy neposkytuje dostatečné nástroje pro snížení odtoku vody v důsledku intenzifikace zemědělství (Novotný et al., 2016).

Protierozní opatření je možné dělit na organizační, agrotechnická a technická. Hlavními účely těchto opatření je chránit půdu před dopadajícími kapkami deště, podporovat infiltraci vody do půdy a omezovat unášecí sílu vody a povrchového odtoku (Janeček et al., 2008).

3.2. Atmosférické srážky a jejich charakteristika

Základním procesem ke vzniku atmosférických srážek a tvorbě oblaků je kondenzace vodní páry v atmosféře. Ke kondenzaci dochází pomocí aerosolových částic neboli kondenzačních jader. Tyto částice jsou přírodního nebo antropogenního původu a bývají zárodky vodních kapiček (Soukupová, 2012). Je to veškerá voda obsažená v atmosféře, která vypadává z různých druhů oblaků v pevném či kapalném skupenství, nebo se usazuje na zemském povrchu (Kobzová, 1998).

Oblaky jsou tvořeny z vodních kapek a ledových částic. Ledové částice se v oblacích vyskytují v mnoha formách od jednotlivých ledových krystalů dále jako sněhové vločky až po malé krupky či kroupy. Ty pak mohou vypadávat z letní bouřkové oblačnosti (Řezáčová et al., 2007).

Vodní kapky a ledové částice, ze kterých jsou tvořeny oblaky můžeme dělit do dvou základních skupin. První skupinou jsou malé vodní kapky a ledové krystaly, které jsou unášeny prouděním v oblaku. Jejich pádová rychlost vzhledem k proudění je zanedbatelná. Označují se jako oblačné částice. U větších kapalných a ledových částic proudění vzduchu v oblaku nepřekoná pádovou rychlost. Tyto částice označujeme jako srážkové (Řezáčová et al., 2007).

3.2.1. Druhy srážek

Srážky lze klasifikovat podle skupenství (kapalné, tuhé a smíšené), původu (způsobu vzniku), délky výskytu a příčin vzniku. Srážky podle původu dělíme na vertikální a horizontální neboli na padající a usazené. Mezi vertikální řadíme například déšť, sníh apod., k usazeným srážkám rosa, jinovatka, námraza a další.

Konvekční srážky jsou podobné přeháňkám. Mají krátkou dobu trvání a často větší intenzitu. Často jsou doprovázeny bouřkou a krupobitím. Vypadávají zejména z oblaků typu cumulus a cumulonimbus. V ČR se vyskytují formou velmi silného deště s velkými kapkami a v zimě mokrým sněhem (Kobzová, 1998).

Frontální srážky jsou především cyklonální. Mají formu přeháněk nebo trvalého deště v závislosti na druhu a rychlosti postupu fronty (Soukupová, 2012).

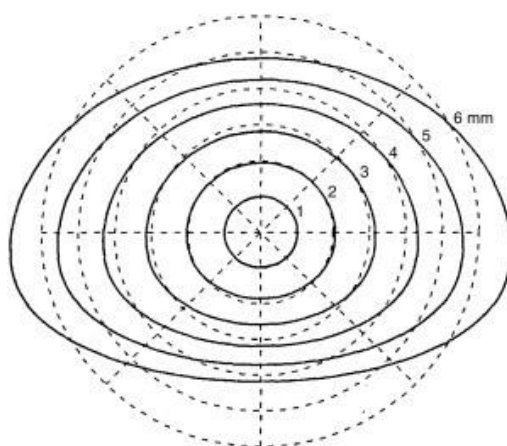
Teplá fronta je fronta, která se pohybuje na stranu studeného vzduchu, po jejím přechodu se většinou oteplí. Před teplou frontou vzniká charakteristický oblačný systém, začínající vysokou oblačností (stovky km před frontou), pokračující střední a dále nízkou oblačností blíže před frontou, kde se vyskytuje pásmo trvalých srážek široké až 400 km (Řezáčová et al., 2007).

Studená fronta je fronta, která se pohybuje na stranu teplého vzduchu, většinou přináší ochlazení. Typicky se na ní vyskytují kupovitá oblaka typu cumulonimbus, je doprovázena dešti v přeháňkách, v letním období i bouřkami (Řezáčová et al., 2007).

Orografické srážky se vytvářejí či zesilují působením velkých terénních překážek jako jsou horské hřebenů nebo pásma. Vzduchová hmota je nucena vystoupat po svazích vzhůru, což podporuje vývoj oblačnosti a způsobuje vypadávání srážek na návětrné straně horských překážek. Orograficky mohou zesilovat i frontální srážky (Soukupová, 2012).

3.2.2. Velikost a tvar kapek

Děšť a mrholení lze považovat za jediné čistě kapalně srážky. Mrholení se vyznačuje nízkým srážkovým úhrnem a průměrem vodních kapiček menších než 0,5 mm. Děšť se může projevovat různými intenzitami. Od slabého deště po extrémní srážkové úhrny. Dešťové kapičky (Obrázek 2) mají, na rozdíl od mrholení, průměr větší než 0,5 mm, ale mohou v případě velkých srážek dosáhnout až 7 mm (Beard et al., 2010).



Obrázek 2: Schéma tvaru kapky v závislosti na průměru (Beard et al., 2010)

Velikost kapek se neustále mění vlivem intenzity vypadávání kapek z mraků, koagulací kapek, gravitačního spojování kapek, tříštění kapek nadměrné velikosti. Velikost kapek také ovlivňuje vzdálenost mraku od země. Obecně velikost kapek roste

se zvyšující se vzdáleností od základu dešťového mraku. U velmi intenzivních srážek hraje roli proces spojování a drolení kapek (Janeček et al., 2012).

Tvar kapky se během pádu mění. Bylo dokázáno, že tvar padající kapky není dokonale obtékané těleso. Kapky o průměru 0,28 mm a menší mají při pádu tvar koule. Se zvyšujícím průměrem kapky nabývají tvar elipsoidu, u větších kapek dochází k prohnutí spodní plochy dovnitř. Od průměru cca 6 mm se kapky stávají nestabilní a mají zvýšenou náchylnost k rozpadu (Obrázek 3). Při fázi rozpadu se z původní kapky stává toriod, který má 8x větší průměr než původní kapka. Toroid se následně rozpadá až na 12 nových kapek (Janeček et al., 2012).



Obrázek 3: Schéma tříštění padající kapky (www.meteopress.cz)

3.2.3. Rychlost a kinetická energie kapek

Rychlost je přímo závislá na poloměru a hmotnosti kapky. Rychlost se v průběhu pádu zvětšuje, dokud nedosáhne terminální rychlosti. To je způsobeno gravitační silou a silou aerodynamického odporu. Dešťové kapky zrychlují vlivem gravitační síly. Zároveň odpor vzduchu během pádu kapky roste. Terminální neboli konečná rychlost kapky nastává ve chvíli, kdy se tyto síly vyrovnají (Abudi et al., 2012). Terminální rychlost se může zvyšovat v případě, že je ovlivněna silou větru (Iserloh, Fister, et al., 2013).

Kinetická energie srážek může být vyjádřena několika způsoby. Ve studiích, které se zabývají simulováním dešťových srážek se nejčastěji používá KE_{mm} neboli objemově specifická kinetická energie s jednotkou ($J \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$) (Sanchez-Moreno et al., 2012).

Pro intenzity nižší než $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ byly zjištěny vysoké hodnoty kinetické energie nad $70 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$. Tyto extrémní hodnoty odpovídají začátku srážek, kdy srážky nemusí sledovat exponenciální rozložení. Dešťové události začínají velkými

dešťovými kapkami s vyšší rychlostí, po nichž následují částice střední velikosti. Výsledkem tohoto jevu je vysoká kinetická energie i při relativně nízké intenzitě srážek (Sanchez-Moreno et al., 2012).

Rovnice KE_{mm} vykazují vysoký rozptyl na kinetické energii v důsledku výskytu velkých dešťových kapek na začátku bouřky, vlivů větru a také na rozptylu vytvořeném na datech nepravdivými korelacemi. Zároveň rovnice časově specifické kinetické energie KE_{time} s mocninnou rovnicí produkovala vyšší koeficient determinace ($R^2 = 0,96$) a menší rozptyl než KE_{mm} . Z těchto důvodů je ve studii preferována tato rovnice KE_{time} . Erozní modely by měly být opatrné při používání rovnic KE_{mm} nebo by měly být přizpůsobeny pro použití vztahů KE_{time} (Sanchez-Moreno et al., 2012).

3.2.4. Prostorová distribuce deště

Prostorová distribuce deště je mírou toho, jak rovnoměrně je voda aplikována na zavlažovanou plochu rozstřikovači a při simulování srážek dešťovými simulátory. Rovnoměrnost distribuce by neměla být zaměňována s koeficientem uniformity (CU) dále v kapitole 4.5.1., který je často preferován pro popis zavlažovacích systémů (Christiansen, 1942).

3.2.5. Roční chod srážek

Roční průměrné srážky kolísají v rozmezí 400–1500 mm s maximem srážek v letních měsících a v horských oblastech (Žižala et al., 2021).

V ročním rozdělení se nejvyšší úhrny srážek vyskytují v červenci (těsně následuje červen) a nejnižší v únoru. Průměrné měsíční úhrny za prosinec, leden, březen a srpen jsou v Čechách vyšší než na Moravě a Slezsku, zatímco v květnu až červenci a září až listopadu je situace opačná (Řehoř et al., 2021).

3.3. Dešťový simulátor

Umělé zadešťování je jednou z metod, jak studovat erozi půdy a získávat data, bez čekání na náhodné srážky. Umělé zadešťování nemůže nahradit erozní působení přirozených srážek a sněhu, ale má mnohé výhody, které nám pomáhají studovat a zkoumat erozi. Jedná se především o rychlost, účinnost, ovladatelnost a přizpůsobivost zařízení (Janeček et al., 2008).

Hlavním účelem dešťových simulátorů je co nejpřesněji replikovat přirozené srážky. Zároveň pomocí simulátoru můžeme řídit intenzitu a trvání srážek, které je jinak náhodné. Výhodou dešťových simulátorů je, že nemusíme čekat na přirozené srážky v námi požadované intenzitě, čímž eliminujeme nepředvídatelnost počasí (Aksoy et al., 2012). Další výhodou simulovaných srážek je sběr dat za relativně jednotných podmínek (Abudi et al., 2012).

Simulátory dešťových srážek se používají při hydrologických a erozních studiích od 30. let 20. století. Jsou navrženy tak, aby aplikovaly kontrolované množství vody na testovanou plochu nebo pozemek. Simulátory jsou používány ze dvou hlavních důvodů, obtížnost měření odtoku a eroze vyplývající z přírodních dešťových srážek a potřeba izolovat hlavní faktory, které tyto procesy ovlivňují. Zařízení, které dokáže měřit odtok z deště a sedimentu z pozemku nebo na svahu, by bylo nákladné a obtížné na provoz. Simulace dešťových srážek je výhodnější, protože umožňuje kontrolu nad aplikačními dávkami vody a počátečními podmínkami je pro měření odtoku a eroze na daných lokalitách s menšími náklady (Paige et al., 2004).

3.3.1. Druhy DS

Simulátory lze dělit dle mnoha kritérií. Jedním z těchto kritérií je způsob tvorby simulovaného deště. Aksoy et al. (2012) uvedl, že simulátory lze dělit na simulátory tvořící kapky bez tlaku v systému trubek, tudíž pomocí gravitace. Nevýhodou těchto simulátorů je, že kapky nedosahovaly terminální rychlosti při pádu z nižší výšky. Druhým typem jsou simulátory s tryskami. Tryskové dešťové simulátory produkují dešťové kapky prostřednictvím jedné nebo více trysek, do kterých je voda vháněna pod tlakem. Tento typ simulátorů produkuje uspokojivé rychlosti kapek a hodnoty kinetické energie při nižších výškách pádu než přirozený déšť, ale intenzita a rychlosti kapek jsou obvykle přehnané, když se voda uvolňuje pod tlakem. V důsledku nepřetržitého postřiku z trysky může vznikat déšť o intenzitách přesahující bouře.

Výhodou malých přenosných simulátorů dešťových srážek ve srovnání s většími simulátory je schopnost provádět experimenty na různých specifických površích s vysokým počtem opakování a také snadná manipulace a kontrola testovacích podmínek (Iserloh et al., 2012).

Od dešťových simulátorů s velkými rozměry se obecně předpokládají reprezentativnější výsledky s ohledem na chápání odtokových procesů při různých sklonech testovacích pozemků. S velikostí pozemku se ovšem zvyšují nároky na čas a obsluhu, stejně jako finanční a technické problémy, například dostupnost vody nebo rozměrné konstrukce apod. (Mayerhofer et al., 2017). Obecně jsou tedy při terénních výzkumech nepraktické, protože je obtížné je použít pro terénní výzkumy v odlehlých oblastech.

Simulátory srážek na malých pozemcích (<1 m²) představují důležitou kategorii, protože umožňují rozlišit různé dílčí procesy související s tvorbou odtoku a eroze (Iserloh et al., 2012).

Aksoy et al. (2012) řekl, že dešťové simulátory jsou nástroje používané v hydrogeomorfologických nebo hydrologických studiích, v terénu i v laboratoři. Boulange et al. (2019) používal přenosného dešťového simulátoru ve studiích transportu herbicidů v horských oblastech.

Pokud srážky generované dešťovými simulátory dosahují stejné či podobné intenzity srážek jako srážky přirozené, lze ty simulátory používat pro analýzy experimentálních výsledků zabývajících se vztahem půdy a srážek, přiblížení chování půdy během přirozených srážek a k přizpůsobení empirických modelů k predikci vztahů mezi půdou a srážkami při různých typech a intenzitách srážek (Assouline et al., 1996).

3.4. Design přenosných dešťových simulátorů

3.4.1. Konstrukce

Konstrukce většiny přenosných simulátorů se obvykle sestává z centrálního rámu, či základny, kde bývá umístěno zařízení ke generování srážek a další přístroje nebo konstrukce, které pomáhají upravovat vlastnosti generovaných srážek. Tato základna simulátoru je pomocí různých konstrukcí umístěna nad povrchem země v různých výškách. Výška může být upravována pomocí teleskopických noh, přidáním nosných trubek do konstrukce simulátoru apod.

3.4.2. Generátor kapek

Kapkové

Většina kapkových dešťových simulátorů používá k tvorbě kapek různé kapiláry (jehly, dírky nebo malé trubičky). Cottenot et al. (2021) použil k vytváření kapek porézní trubky. Tento způsob tvorby kapek vytváří kapky, které padají pod gravitačním tlakem vody. Vyvrtané otvory, jehly, kapiláry apod. určují simulovaný průměr kapky, který v kombinaci s jejich výškou nad zemí, určuje intenzitu a kinetickou energii (Yakubu et Yusop, 2017). Závislost na gravitaci je nepraktická, protože kapky potřebují vzdálenost alespoň 10 m k dosažení terminální rychlosti (Aksoy et al., 2012).

Ke zvýšení prostorové rozložení dopadajících kapek a rozbití velkých kapek na menší kapky jsou u těchto simulátorů používána různá pletiva či síťoviny s malými čtvercovými otvory např. 3 mm (Mayerhofer et al., 2017).

Cottenot et al. (2021) použil simulátor kapkový simulátor, který umožňuje nezávisle měnit charakteristiky srážek: intenzita srážek závisí na tlaku přiváděné vody, zatímco velikost kapky a kinetická energie závisí na velikosti ok pletiva a výšce pádu.

Tryskové

Simulátory deště s tryskami vytvářejí dešťové kapky pomocí jedné nebo více tlakových trysek. Jedním z nejoblíbenějších druhů trysek jsou trysky VeeJet a trysky s postřikem ve tvaru plného kužele. Základní rozdíl mezi nimi je princip vystřikování vody. Tryska VeeJet má lineární vzor postřiku a tryska s plným kuželem má kruhový tvar rozstříku (Mhaske et al., 2019).

Ve srovnání s kapkovými simulátory mohou produkovat dostatečné rychlosti kapiček a odpovídající kinetické energie při mnohem menší výšce pádu (Aksoy et al., 2012). Ačkoli produkují dostatečné hodnoty rychlosti a kinetické energie kapek, hodnoty bývají zvětšeny, protože voda proudí v důsledku použitého tlaku (Abudi et al., 2012). Ke snížení zvětšení hodnot jsou používány různé koncepty přerušení postřiku, rotující rameno, oscilace trysek, které snižují přehnané účinky (Mhaske et al., 2019). Zároveň tyto mechanismy zlepšují distribuci kapek, díky které jsou kapky distribuovány s vyšší rovnoměrností (Abudi et al., 2012).

Simulátory tryskového typu jsou provozovány pod vysokým tlakem, vyvíjejí širokou škálu velikostí kapek s možností předat podstatnou počáteční rychlost menším kapkám. Vyšší aplikovaný tlak obecně produkuje dobré rozložení velikosti kapek s potenciálem překročit požadovanou intenzitu srážek, zatímco nižší tlaky dávají špatné rozložení velikosti kapek a prostorovou rovnoměrnost srážek (Grismer, 2012).

3.5. Měření charakteristických vlastností simulátorů

3.5.1. Měření dešťových vlastností

Nejpodstatnějšími a nejkritičtějšími vlastnostmi simulovaných srážek jsou distribuce velikosti kapek, rychlost pádu kapek a prostorové rozložení srážek na ploše pozemku (Iserloh, Ries, et al., 2013)

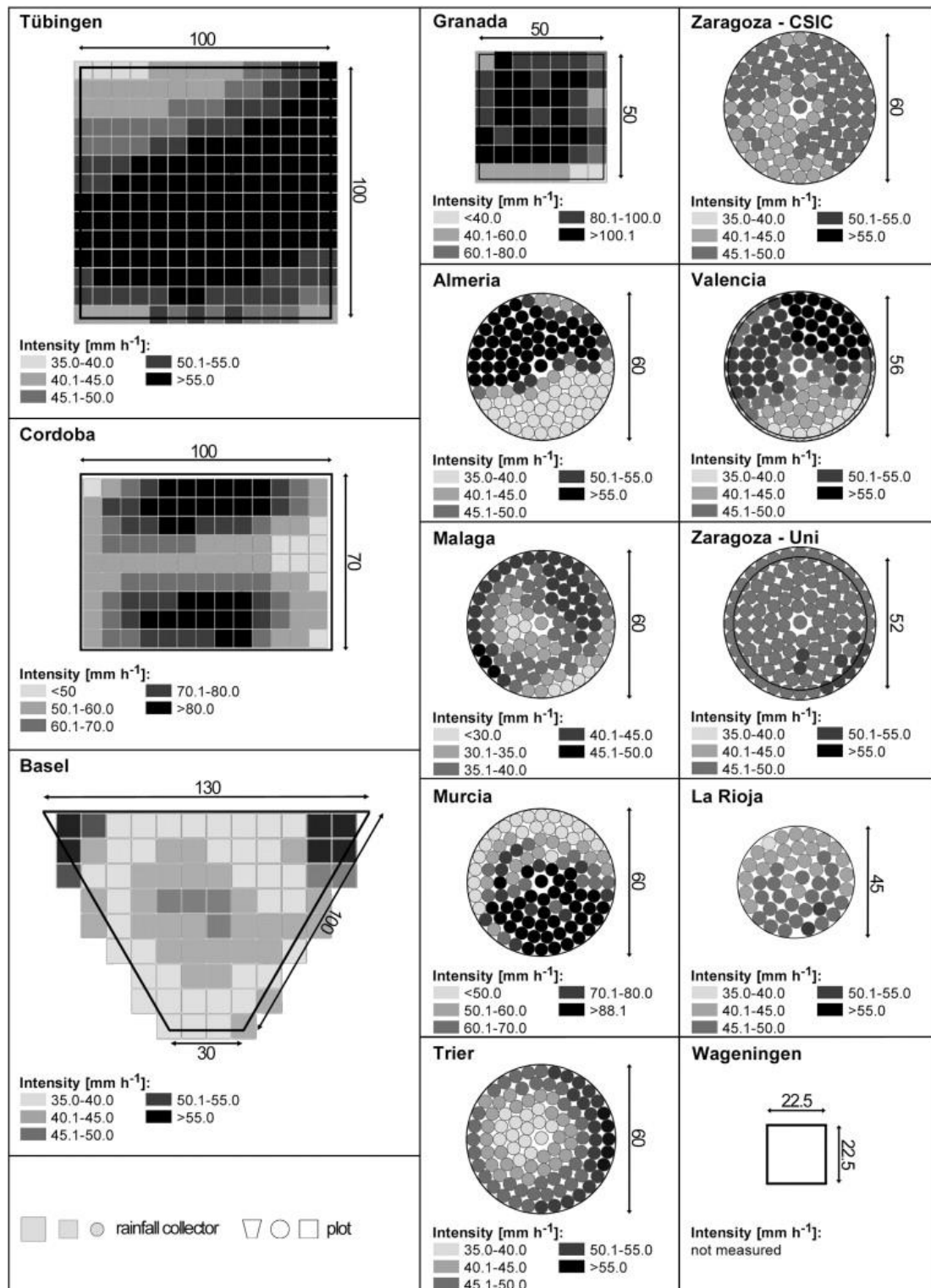
Distribuce kapek

Množství a prostorové rozložení simulovaných srážek lze snadno a efektivně získat a změřit s nízkými náklady pomocí dešťových kolektorů, které pokrývají celý testovací pozemek. Aby bylo možné porovnat výsledky mezi různými simulátory, používá se střední koeficient Christiansenovy uniformity dále (CU), který je počítán rovnicí (Christiansen, 1942).

$$Cu = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{\bar{X} * n}\right)$$

Kde je suma součet absolutních odchylek od středního množství vody všech dešťových kolektorů [ml], X_i je individuální množství vody na dešťový kolektor [ml], \bar{X} je aritmetický průměr použitého množství vody na dešťový kolektor [ml] a n je celkový počet dešťových kolektorů. (Obrázek 4) znázorňuje CU pro různé dešťové

simulátory. Nejvyšší CU měla Zaragoza – Uni, kde CU bylo 96 % a nejmenší CU bylo u simulátoru Almeria s 60 % (Iserloh, Ries, et al., 2013).



Obrázek 4: Grafy měření CU pro 13 dešťových simulátorů (Iserloh, Ries, et al., 2013)

Rozměry a kinetická energie kapek

V raných studiích byly používány různé manuální techniky pro získání dat týkajících se kapek. Jednalo se například o metodu skvrn, metodu mouky, olejové metody atd. Všechny jsou příklady metod, které poskytují měření počtu a velikosti dešťových kapek. V posledním desetiletí je nejúspěšnější použití disdrometru díky schopnosti vyvinout velké množství měření (Kavian et al., 2018).

Existuje mnoho dostupných nástrojů pro měření srážek. Srážkoměry jsou celosvětově nejrozšířenějším přístrojem, který dokáže měřit pouze intenzitu a dobu trvání srážek. S rozvojem optických a elektronických technik od 70. let 20. století byla vyvinuta řada přístrojů založených na různých principech, které mohou měřit velikost, tvar a rychlost částic srážek. Zejména pak disdrometry, které mohou měřit distribuci velikosti kapek (Liu et al., 2013).

Disdrometry

V souvislosti s hydrologickými studii umožňuje disdrometr měření dat přímo související s distribucí dešťových kapek, které je třeba u tradičních srážkoměrů odvodit nebo měřit v delších časových intervalech (Sanchez-Moreno et al., 2012).

Disdrometry lze dělit podle principu měření na 3 základní druhy: elektromechanické, video disdrometry a optické (typicky laserové) disdrometry.

Elektromechanické disdrometry měří mechanické vibrace nebo akustickou odezvu kapek, které dopadají na podložku. Video disdrometry (1D nebo 2D), získávají data pomocí vysokorychlostního CCD snímače, který zaznamenává tvar a počet kapek, z čehož lze vypočítat efektivní průměr, pádovou rychlost, kinetickou energii i úhel dopadu dešťových kapek (Liu et al., 2013).

Optické disdrometry snímají kapky procházející laserovým paprskem a každou minutu hlásí jejich počet, velikost a rychlost pádu (Cottenot et al., 2021). Optické disdrometry jsou stále dostupnější technologií. Většinou již po zakoupení jsou zkalibrovány a připraveny k nasazení v terénu, což zjednodušuje jejich použití. (Angulo-Martínez et al., 2016). Nejčastěji je používán Disdrometr Thies LPM, který je vyráběn v Německu firmou Thies Clima (Iserloh, Ries, et al., 2013).

(Neumann et al., 2019) porovnával ve své práci přesnost měření pomocí různých laserových disdrometrů. Byly zkoumány disdrometry (LPM Thies Clima,

PWS100 Campbell Sci. a Parsivel OTT). Jednotlivé disdrometry se od sebe liší vlnovou délkou laseru, měrnou plochou, rozsahem měřitelných velikostí a rychlostí kapek, počtem velikostních a rychlostních tříd.

Vysokorychlostní kamery

Jedním z dalších způsobů získávání dat o velikosti a rychlosti pádů kapek je použití vysoko snímkových kamer. Při správně kalibrovaném obrazu může software vypočítat rychlost a velikost natočených objektů (Abudi et al., 2012).

Starší metody

Mouková metoda spočívá v krátkodobé simulaci deště, který je zachycen do vrstvy mouky obsažené v různých nádobách (Lora et al., 2016). Jakmile kapky deště dopadnou na povrch hladké mouky, proniknou do povrchu a vytvoří na něm kruhové otisky své velikosti. Nádoba je následně umístěna do horkovzdušné pece, aby ztverdly otisky kapek v povrchu mouky. Otisky jsou vyfotografovány a analyzovány softwarem pro analýzu obrazu (Mhaske et al., 2019).

V olejové metodě se používá směs motorového a minerálního oleje obsažená v Petriho miskách. Petriho misky umístěné v testovací ploše simulátoru jsou přikryty nepropustným víkem. Následně je spuštěn simulátor. Po ustálení deště je víko odstraněno a po 2 sekundách vráceno nad Petriho misku. Po expozici je pořízen digitální snímek vzorku s vysokým rozlišením. Tento postup by měl být opakován alespoň šestkrát pro každou trysku. Snímky jsou dále analyzovány pro získání výstupních dat (Vergni et al., 2018).

3.5.2. Měření půdních vlastností

Dešťové simulátory získávají data o odneseném půdním materiálu pomocí různých kolektorů, které zachycují odtok z testovací plochy. Nádoby s odtokem a sedimentem jsou po odběru zváženy, vysušeny a poté znovu zváženy (Hösl et Strauss, 2016).

Rychlosti pozemního proudění na testovaných pozemcích lze měřit pomocí roztoku elektrolytu a fluorescenčního barviva. Pohyb barviva z aplikačního bodu do bodu výstupu je měřen stopkami. Transport elektrolytu v toku je měřen odporovými senzory. Data lze pozorovat v reálném čase s grafickým výstupem pomocí softwaru

LoggerNet a dataloggeru CR10X od Camp-bell Scientific (Polyakov et al., 2018). Vlhkost půdy lze měřit například s použitím senzoru EC-5 (Kesgin et al., 2018).

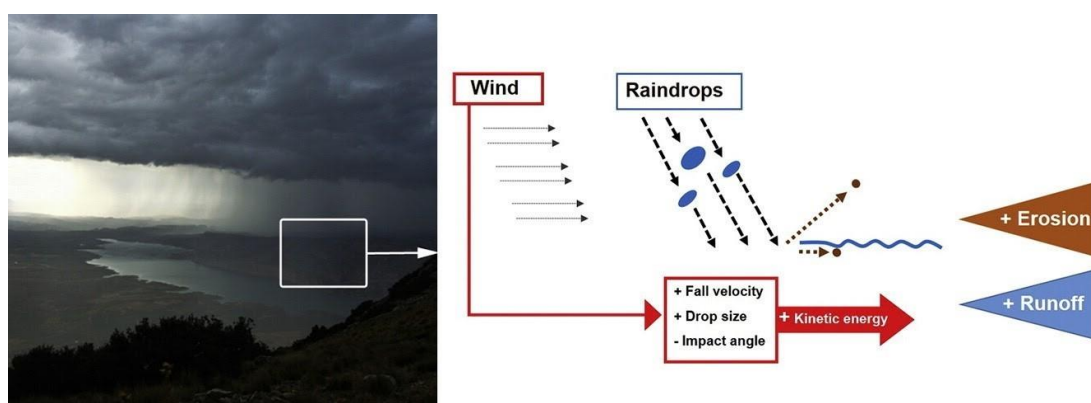
Fotogrammetrie

Fotogrammetrie se používá k vyhodnocování prostorových dat z fotografických snímků. Funguje na principu analýz digitálního výškového modelu, z anglického (digital elevation model) zkráceně DEM (Balaguer-Puig et al., 2017). Metoda založená na změně nadmořské výšky povrchu je schopna detekovat topografické změny v průběhu času. Spoléhá na DEM, které lze použít jako základní topografické informace k odvození morfometrických atributů a kvantifikaci rychlosti eroze půdy a depozice (Prosdocimi et al., 2017).

Velkou výhodou fotogrammetrie je, že snímky lze pořizovat vestavěnými fotoaparáty smartphonů, které produkují stejně uspokojivé výsledky jako snímky pořízené digitálními fotoaparáty (Prosdocimi et al., 2017).

3.6. Systémy simulace větru s deštěm

Přírodní dešť se často vyskytuje ve formě bouřek, kde vítr působí na padající dešťové kapky. Vítr ovlivňuje rychlost pádu kapky, kdy může zvýšit konečnou rychlost pádu oproti větrem nepoháněným kapek. Dále vítr mění úhel dopadu kapek a může měnit i velikost a počet kapek. (Iserloh et al., 2013) Navíc vítr sám může přinášet a přepravovat jednotlivé půdní částice a malé agregáty (Obrázek 5).



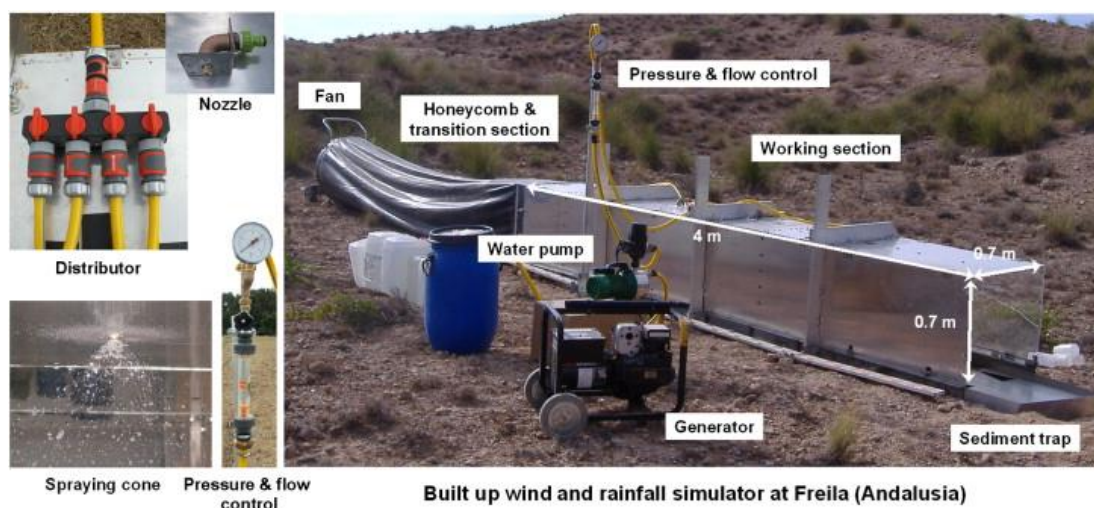
Obrázek 5: Princip fungování větru na dešť (Marzen et al., 2017)

Pro zkoumání vlastností deště poháněného větrem byl sestaven přenosný simulátor větru a deště (Obrázek 6). Simulátor se skládá z větráku s plochou 163 cm².

K minimalizaci větších turbulencí větru byl prodloužen přechodový úsek z PVC fólie. Velikost tunelu je 0,7 x 0,7 metru (výška a šířka) a jeho délka činí 4 m. Testovací plocha má rozlohu 2,2 m². Simulátor používá čtyři rozstřikovací tlakové trysky směřující dolů (Lechler typ 460.608). Jejich umístění se mění dle typu simulovaného deště, aby se kompenzovaly změněné trajektorie kapek. Pro sběr povrchového odtoku a větrem hnaného materiálu zde byl použit kombinovaný lapač sedimentu (Fister et al., 2012).

Použití tohoto simulátoru ukázalo, že zdaleka nejvyšší množství erodovaného materiálu bylo shromážděno během simulací dešťů poháněných větrem. Ve srovnání se simulacemi bez větru se zvýšilo o 113 % až na 1108 %. To představuje dvojnásobek až dvanáctinásobek erodovaného materiálu během simulací s větrem ve srovnání se simulacemi bez větru. V porovnání s nárůstem erodovaného materiálu je nárůst odtoku během větrem poháněných dešťů spíše nízký s 15 % až 71 % (Iserloh, Fister, et al., 2013).

Marzen et al. (2016) uvedli, že větrem poháněný déšť nejen zvyšuje erozi půdy, ale také urychluje tvorbu odtoku. Zjistili, že míra eroze větrem hnaným deštěm ve srovnání s bezvětrnými podmínkami vzrostla o 31,5 %, zatímco míra odtoku vzrostla o 11,8 %.

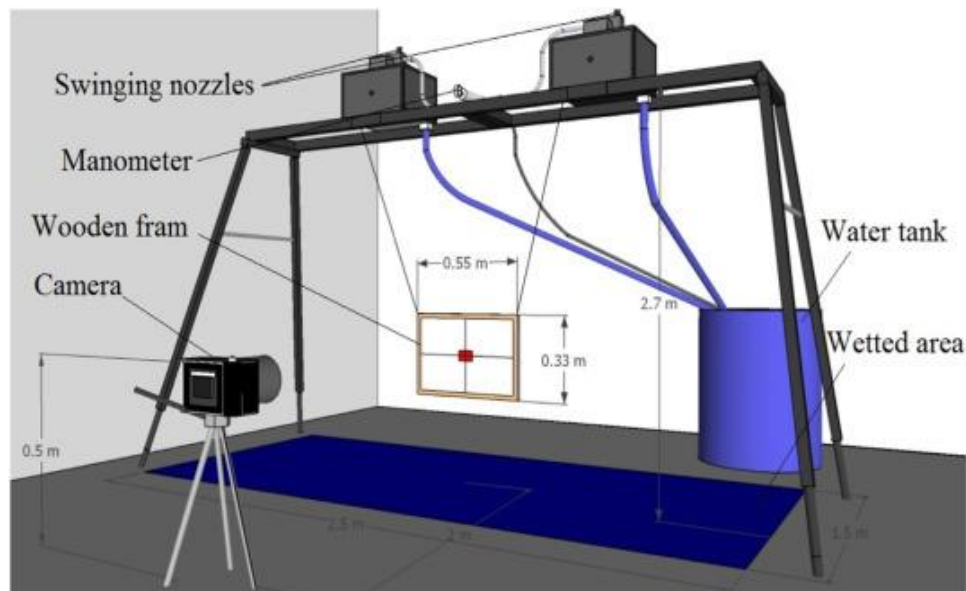


Obrázek 6: Dešťový simulátor určený k simulaci deště s větrem (Fister et al., 2012)

3.7. Nové dešťové simulátory

Kavian et al. (2018) navrhl přenosný dešťový simulátor (Obrázek 7) s kovovou konstrukcí ve výšce 2 m až 2,7 m. Konstrukce je opatřena teleskopickými nastavitelnými nohama, které lze použít i ve svažitém terénu a v případě potřeby je lze nastavit až do délky 4 m. Jsou zde použity dvě pohyblivé trysky Veejet 80100 s průměrem otvoru 4,5 mm. Voda je do trysek poháněná elektrickým čerpadlem a pod každou tryskou je umístěna železná kostka, která odvádí přebytečnou vodu zpět do nádrže. Tlak a průtok jsou řízeny pomocí ventilu instalovaného ve vodovodním potrubí. Řídící deska byla navržena pro programování deseti různých dešťových událostí. Na tomto ovládacím panelu lze nastavit kolísání rychlosti trysek, dobu srážek od 1 min do 1 h a úhel kmitání trysek od 0° do 60°. Velikost zadešťované plochy činí 1,5 m x 2,5 m.

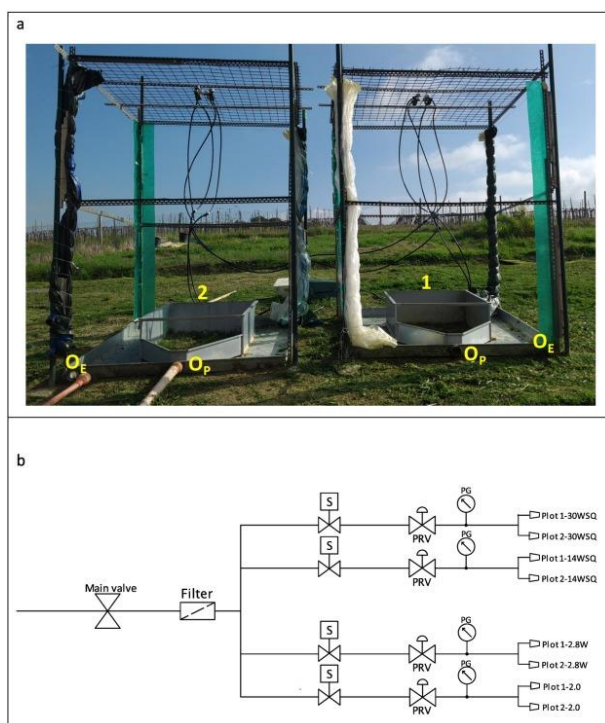
Vlastnosti generovaných srážek byly získány za použití vysoko snímkových kamer. Dešťové kapky dosahovaly průměru 0,2 až 9,9 v závislosti na tlaku použitém při simulaci deště. Pro kalibraci dešťového simulátoru byl použitý tlak v rozmezí 20–80 kPa. Výsledky ukázaly, že minimální a maximální velikost kapek se zmenšila zvýšením provozního tlaku z 20 na 80 kPa. Při experimentu bylo zjištěno, že větší kapky mohou snadno dosáhnout terminální rychlosti.



Obrázek 7: dešťový simulátor navrhnutý (Kavian et al., 2018)

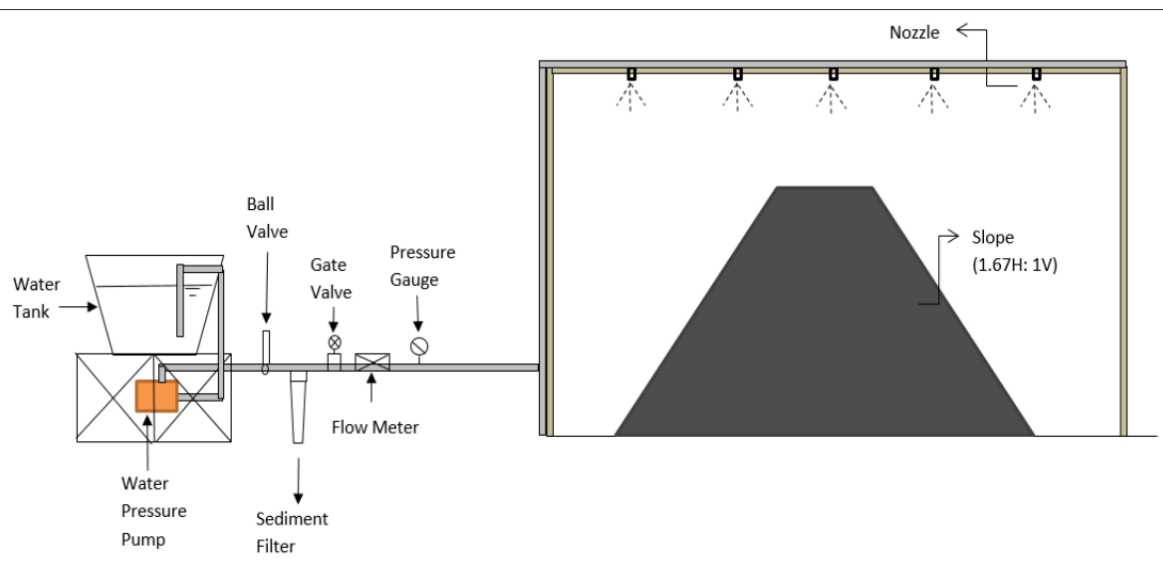
Vergni et al. (2018) používají simulátor deště (Obrázek 8) se 4. různými tryskami ve výšce 2,8 m nad zemí. Jedná se o trysky EE2.8W, FF14WSQ, FF30WSQ od firmy Jet System Srl, které prokázaly dobrý výkon z hlediska rovnoměrnosti během kalibračních experimentů. Déšť je simulován na dvě testovací plochy s rozměry 1 m x 0,92 m a se sklonem 16 %. Zbytek testovací plochy je nepropustný a odvádí testovaný odtok a zároveň vodu, která dopadá mimo testovací plochu. Experimenty s jednou nebo více tryskami jsou řízeny čtyřmi počítačem řízenými solenoidovými ventily (1", 9 Volt, Hunter Industries), jejichž výstupní tlak je regulován čtyřmi nízko průtokovými regulačními ventily (PRV, Bermad).

Pro experimenty byl použit provozní tlak 110, 70 a 45 kPa. Čtvrtá tryska EE2.0 pracuje při velmi vysokém tlaku (400 kPa) vytváří jemnou mlhu, která je používána ke zvýšení počátečního obsahu vody na povrchu pozemku se zanedbatelnou kinetickou energií srážek. CU pro jednotlivé trysky i jejich kombinace dosáhl vždy nad 92 %. Simulovaný déšť na tomto zařízení dosahuje intenzity od 10 do 130 mm.h⁻¹. Průměry kapek dosahovaly velikostí 0,5 mm až 4 mm a byly zjištěny pomocí olejové metody. Aplikovaná kinetická energie je mnohem nižší, než se očekává pro přirozené dešťové jevy s podobnou intenzitou. Je to způsobeno především omezenou výškou pádu a výstupním tlakem, který zvyšuje procento malých kapek.



Obrázek 8: Dešťový simulátor navrhnutý (Vergni et al., 2018)

MD Isa et al. (2018) představili simulátor (Obrázek 9) dešťových srážek určený k provádění experimentů ve svahu. Velké rozměry přístroje umožňuje výzkumníkovi pracovat v odlehlých oblastech a na strmých svazích. Konstrukce simulátoru se skládá ze čtvercové plošiny 6 x 6 m, výška rámu je 2 m, skládající se z kostry z ocelových trubek. Déšť byl generovaný pomocí 25 mikro-sprejových trysek, které byly instalovány ve výšce 2 m nad povrchem země a jejich vzdálenost od ostatních trysek činila 1 m. Trysky v této studii byly zvoleny tak, aby zmenšily velikost kapek, čímž se minimalizovala kinetická energie nárazu a snížila se eroze půdy dopadem kapek. Voda do trysek byla vháněna vodním tlakovým čerpadlem z nádrže o objemu 760 l, která poskytuje vodu na 50 až 60 minut simulace deště. Systém trubek byl opatřen průtokoměrem pro záznam celkového množství rozprášené vody v daném časovém intervalu.

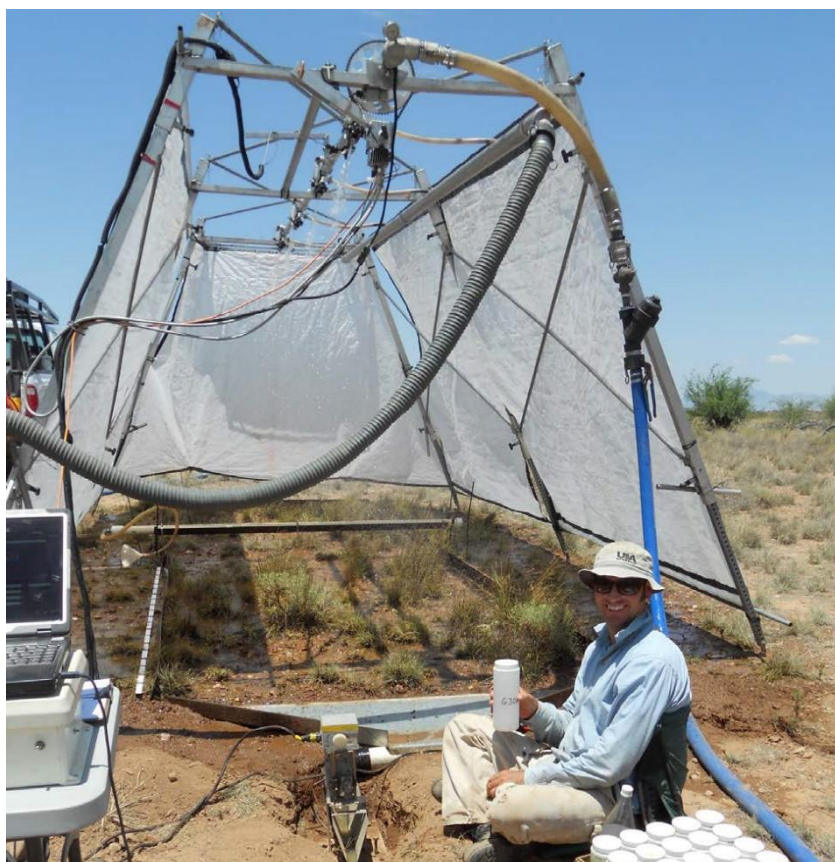


Obrázek 9: Dešťový simulátor navrhnutý (MD Isa et al., 2018)

Simulátor byl používán při třech různých tlacích (0.5, 0.75 a 1.0 bar) a třech časových intervalech (10, 15 a 30 minut). Simulátor vytvořil déšť o intenzitě v rozmezí 90 až 125 mm.h¹. CU dosahoval hodnot od 67 % do 78.5 %.

Polyakov et al. (2018) používají dešťový simulátor navrhnutý (Paige et al., 2004). Tento simulátor (Obrázek 10) generuje déšť za pomoci trysek VeeJet 80100 na testovací plochu 2 m x 6,1 m. Centrální trubka konstrukce o délce 6,1 m je podpírána třemi teleskopickými nohama. Její maximální výška je 3,3 m. Trubka je vybavena jednoduchým oscilačním výložníkem a nese čtyři trysky V-jet ve výšce 2,4 m s překrývajícím se rozsahem postřiku. Kmitání je řízeno motorem s vysokým točivým momentem, který mění rychlost kmitu trysek, pomalejší na koncích kmitu a rychlejší uprostřed, když jsou trysky namířeny přímo dolů. Tento přístup zlepšuje rovnoměrnost aplikace vody na pozemek. Doba a sekvence stříkání jsou řízeny třicestnými solenoidy. Pro nastavení různých dešťových programů se používá počítač a ovladač.

Vypočtená kinetická energie při tlaku 55 kPa je $271 \text{ kJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$. CU je u tohoto simulátoru 92,7 % při intenzitách od 13 do 130 mm/h. velikost kapek se pohybovala mezi 0,276 a 6,87 mm a průměr byl 2,87 mm. Rychlost odtoku z pozemku byla měřena pomocí žlabu ve tvaru V umístěného ve 4 % sklonu a vybaveného elektronickým hloubkoměrem. Hloubka průtoku byla zaznamenávána ručně a následně převedena na rychlost průtoku.



Obrázek 10: Dešťový simulátor navrhnutý (Paige et al., 2004)

Boulangue et al. (2019) navrhli simulátor (Obrázek 11), jehož rám vyroben z hliníkových trubek o průměru 45 mm a je připevněný ke dvěma teleskopickým nohám, které mohou zvyšovat nebo snižovat výšku zařízení, aby bylo možné upravit stabilitu na členitém terénu. Tento simulátor byl vyvinut pro použití na pozemku 1 m x 5 m. Simulátor je opatřen dvěma typy silikonových trysek (TCRN-ST a STRMN-5) vyráběné firmou TECHNOCORE Co., Ltd (Saitama, Japonsko), které mohou být umístěny do maximální výšky 2,3 m. Když je na trysky aplikován dostatečný tlak vody (0,15 až 0,20 MPa a 0,42 až 0,50 MPa pro TCRN-ST a SRMN-5), začnou vibrovat a tím zvýší rozsah aplikace vody do oblasti větší než 2,5 m od centrálního umístění trysky. Kromě toho jsou trysky připojeny ke dvěma hliníkovým trubkám namontovaným na hlavní konstrukční rámové jednotce s motorem, který způsobuje oscilaci dvou trubek (maximální rotace 35 stupňů). Voda je do trysek dopravována za pomoci elektrického čerpadla (TOC-SPY-V100, TECHNOCORE Co., Ltd., Saitama, Japonsko).

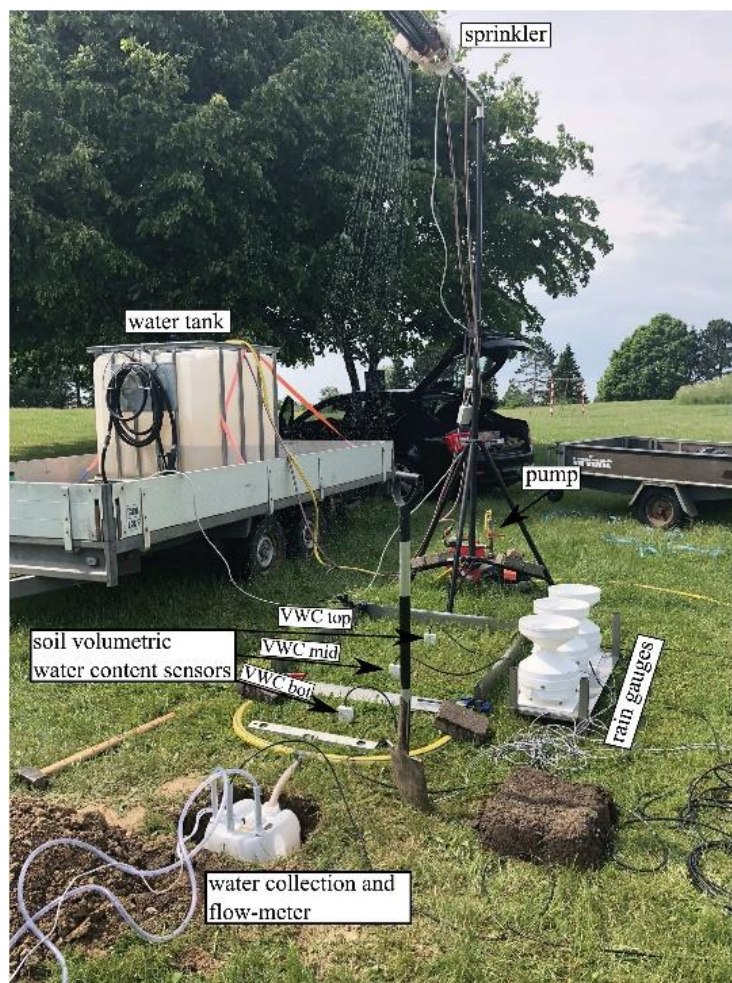
Tento simulátor poskytuje intenzitu srážek mezi 20 a 100 mm.h⁻¹. CU získaný v terénu je vhodný a pohybuje se od 79 % do 94 % pro intenzity srážek v rozmezí od 30 do 70 mm/h. Rychlosti dešťových kapek s průměrem menším než 1,2 mm dosahovaly konečných rychlostí, zatímco kapky deště menší než 2,0 mm dosahovaly rychlostí přiměřeně blízkých konečné rychlosti přirozených srážek a jejich velikost se pohybovala v rozmezí 0,4 mm až 7 mm. Kinetická energie kapek představovala přibližně 78 % - 86,5 % kinetické energie, kterou mají deště o stejné intenzitě.



Obrázek 11: Dešťový simulátor navrhnutý (Boulangue et al., 2019)

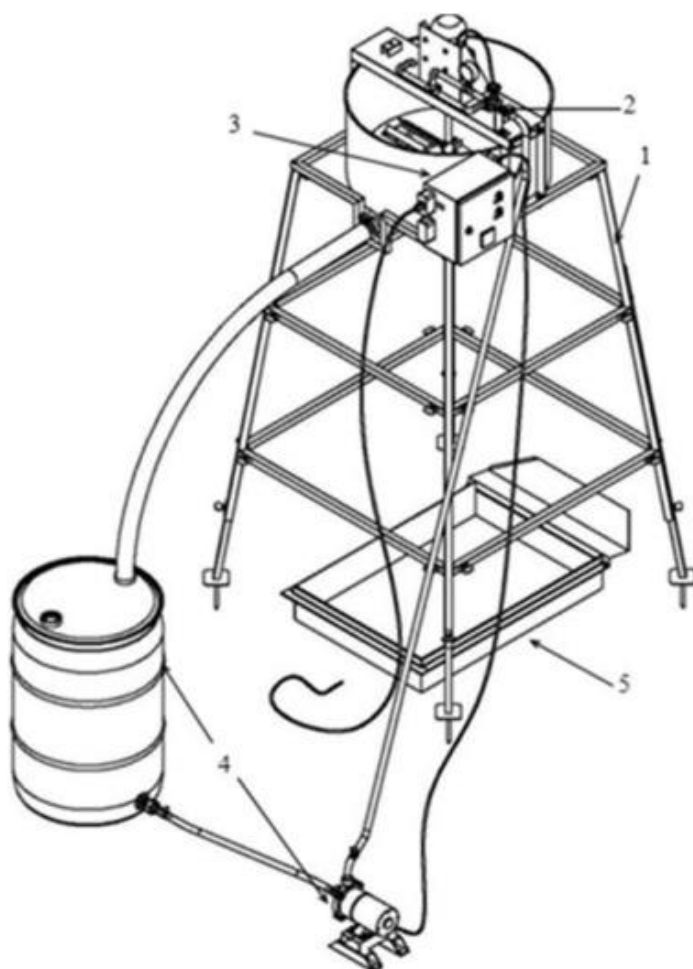
Nielsen et al. (2019) navrhli simulátor (Obrázek 12) s jednou tryskou umístěnou na jednoduché konstrukci, se kterou tryska může být až ve výšce 3 m. Vodu dodává čerpadlo a tryska je komerčně dostupná oscilační tryska Gardena Aquazoom®. Přívod vody do simulátoru je regulován dvěma elektromagnetickými ventily, které jsou ovládány s časově závislou frekvencí otevírání/zavírání, aby bylo dosaženo požadované průměrné intenzity srážek v požadovaném časovém intervalu. Testovací plocha u tohoto simulátoru je 1 m x 1 m. Odtok z testovací plochy je vymezen třístranným ocelovým rámem, který zabraňuje povrchovému odtoku unikat. Čtvrtá strana se skládá z ocelového příkopu (strana po proudu), která shromažďuje odtok a směřuje ho do odtokové nádoby. K odhadu průtoku měřením změny hladiny vody použili snímače tlaku Campbell Scientific CS451.

Průměrně naměřené hodnoty CU byly v této studii 95 % a intenzita srážek dosahovala hodnot 110-165 mm.h⁻¹. průměrná aplikovaná kinetická energie simulovaných srážek činila 34,9 J m⁻².mm⁻¹.



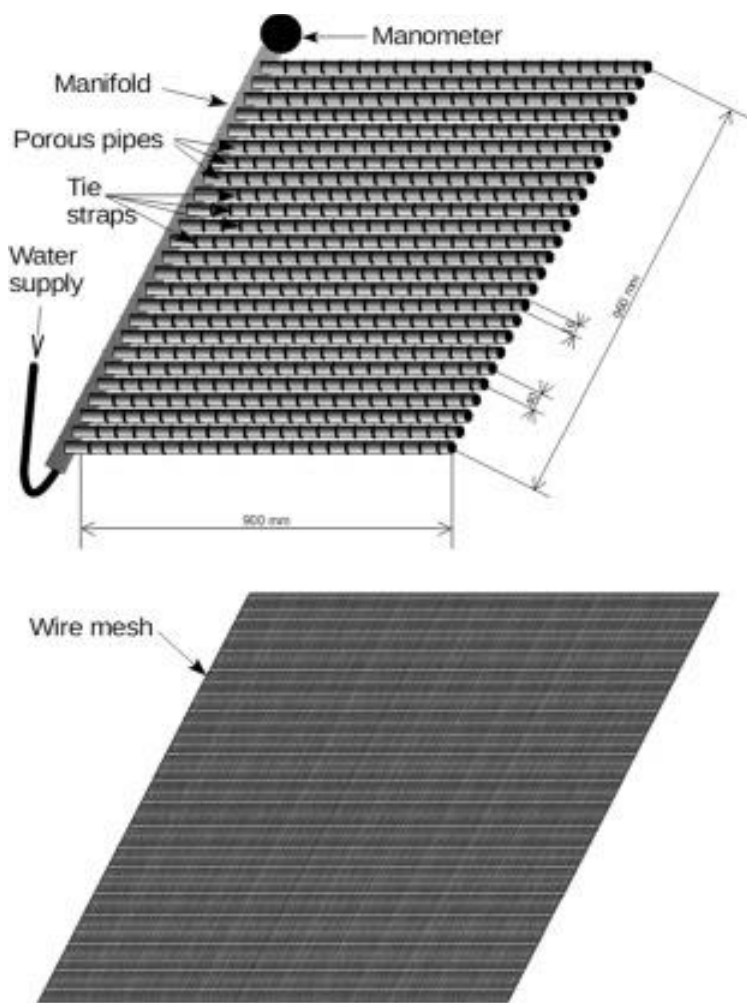
Obrázek 12: Dešťový simulátor navrhnutý (Nielsen et al., 2019)

Menezes Sanchez Macedo et al. (2021) a Carvalho et al. (2022) ve své studii používali dešťový simulátor InfiAsper (Obrázek 13), vyvinutý (Alves Sobrinho et al., 2008). Tento simulátor používá dvě rozprašovací trysky řady Veejet 80.100 a 80.150 (Spraying Systems Co), které jsou během provozu umístěny ve výšce 2,3 m nad zemí. První model produkuje kapky o středním průměru (D_{50}) 1,8 mm při pracovním tlaku 32,7 kPa, zatímco druhý model vytváří kapky D_{50} 2 mm při pracovním tlaku 36,5 kPa. Voda rozstříkovaná tryskami je přerušována rotujícím kotoučem, který snižuje a reguluje intenzitu srážek a zároveň zajišťuje konstantní srážky s minimálními změnami této intenzity. Rotující disk do značné míry určuje intenzitu srážek, která se pohybuje v rozmezí od 20 do 150 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$. Rozměry testovací plochy jsou 1 m x 0,7 m. CU simulovaných srážek se pohyboval mezi 81,4 a 85,1 %. Odhadovaná kinetická energie deště produkovaného simulátorem byla 83–87 % v porovnání s přirozenými dešťovými srážkami.



Obrázek 13: Dešťový simulátor InfiAsper navržený
(Alves Sobrinho et al., 2008)

Cottenot et al. (2021) navrhli kapkový dešťový simulátor (Obrázek 14), který ke generování deště používá porézní trubky, tedy trubky s póry, kterými prochází voda. Tyto porézní trubky jsou připojeny na centrální rozdělovací trubku a jejich druhý konec je vždy uzavřen zátkou. Celkově simulátor používá 25 trubek o délce 0,9 m s roztečí mezi trubkami 24 mm a jsou umístěny ve výšce 6,6 m nad testovanou plochou. Tato sestava trubek je připojena pomocí plastových spojovacích pásek k železné konstrukci. Stahovací pásky jsou klíčové pro dosažení homogenního prostorového rozložení kapek, protože shromažďují vodu vycházející z potrubí a jsou místem, kde vznikají padající kapky. Pro rozbití velkých kapek a zvýšení diverzity dopadu kapek je 65 cm pod generátorem kapek umístěno drátěné pletivo se čtvercovými otvory 3 x 3 mm. Rozdělovací trubka je připojena k vodnímu čerpadlu. Dále je na rozdělovací trubce instalován digitální manometr, který umožňuje monitorování tlaku a nastavení intenzity srážek.



Obrázek 14: Dešťový simulátor navržený (Cottenot et al., 2021)

Tento simulátor srážek byl používán při čtyřech provozních tlacích vody (0,25, 0,50, 0,86 a 1,40 bar). Pro tento rozsah tlaku se intenzita srážek pohybovala mezi 24 a 75 mm.h⁻¹. CU byl vždy nad 90 %. Simulátor produkoval kapky se středním váženým průměrem 3,0 mm. Kinetická energie srážek byla v rozmezí 18–23 J·m²·mm⁻¹. Tyto hodnoty jsou velmi blízké, to znamená, že kinetická energie deště nezávisela na intenzitě srážek. Zadešťovaná plocha je na čtvercové ploše 0,5 x 0,5 m.

Současná konstrukce umožňuje nezávisle měnit charakteristiky srážek: intenzita srážek závisí na tlaku přiváděné vody, zatímco velikost kapky a kinetická energie závisí na velikosti ok drátěného pletiva a výšce pádu.

(Singh et Kumar, 2020, 2021) používají přenosný simulátor dešťových srážek, který je schopen produkovat srážky podobné přírodním srážkám s intenzitou v rozsahu $37,7 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ až $127,3 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. CU byl v rozsahu od 82,81 % do 93,52 % a velikost kapek se pohybovala v rozsahu 2,96 mm až 4,81 mm s koncovou rychlostí dešťových kapek v rozmezí od 8,39 m/s do 10,69 m/s. Nosná konstrukce simulátoru je tvořena rámem o rozměrech 3,4 m x 1,4 m. Na rámu je upevněno 6 trubek, ze kterých ústí injekční jehly upevněné ve vzdálenosti 20 cm x 20 cm. Rám s jednotkou generující srážky byla udržována ve výšce 6 m od povrchu země. Nosná konstrukce byla vyrobena pomocí čtvercových trubek z měkké oceli.

Přenosný systém pro simulaci deště o délce 3,4 m a šířce 1,4 m byl vyvinut pomocí hypodermických jehel upevněných ve specifikovaném rozestupu. Jednotka generování srážek je umístěna ve výšce 6,0 m od země na rámu z měkkých ocelových trubek. Celý systém simulace srážek se skládá ze tří jednotek jako základna, nosná konstrukce, generování srážek a jednotky zásobování vodou. Celou sestavu lze snadno rozložit a sestavit a byla namontována na kolečkách pro usnadnění snadného přesunu z jednoho místa na druhé.



Obrázek 15: Simulátor navržený (Singh et Kumar, 2020)

Kontrola srážkových parametrů byla prováděna regulací tlaku vody pomocí regulačního ventilu namontovaného na vodovodním řadu. Tlak vody byl zaznamenáván pomocí tlakoměru umístěného těsně před periferním přívodním potrubím, které přijímá tlakovou vodu z monoblokového odstředivého čerpadla.

Jednotka pro generování srážek byla podepřena na obdélníkovém rámu o rozměrech 3,40 m × 1,40 m vyrobeného z lehkých čtvercových trubek z měkké oceli. Nosný rám se skládá ze dvou vertikálních stojanů namontovaných na čtvercovém základním rámu. Nosný rám byl osazen ve výšce 6 m pomocí trubek z měkké oceli, které zajišťovaly pevnost jednotky pro vytváření srážek.

4. Výsledné hodnocení

Měření

(Neumann et al. (2019) hodnotil disdrometry LPM Thies Clima zkráceně LPM, PWS100 Campbell Sci. zkráceně PWS 100 a Parsivel OTT zkráceně Parsivel. Výsledky ukázaly že všechny tři zkoumané přístroje udávají srovnatelné výsledky intenzit deště. Přístroje naměřily 106 % (LPM), 78 % (Parsivel) a 116 % (PWS100) ve srovnání se srážkoměrem.

V případě kinetické energie byly přístroje porovnávány mezi sebou. Průzkum ukázal, že LPM oproti ostatním dvěma přístrojům měří výrazně nižší kinetickou energii. Ve srovnání s Parsivelem měřil 83 % hodnot naměřených Parsivelem a 59 % hodnot naměřených PWS100. Nejvyšší hodnoty měřil PWS100 (Neumann et al., 2019).

Jako nevhodné metody měření jsou považovány olejová metoda a mouková metoda, protože při měření na stejném simulátoru poskytují rozdílné výsledky o velikostech kapek (Iserloh, Ries, et al., 2013). Zároveň tyto metody nejsou schopny určit více parametrů deště a zbylé hodnoty se musí dopočítávat pomocí empirických modelů, které nemusí být přesné. Analyzování dat z těchto metod je náročné a zdlouhavé.

Větretem poháněné deště

Použití simulátoru, který je schopný generovat srážky s větrem ukázalo rapidní zvýšení erodovaného materiálu během simulací dešťů poháněných větrem. Ve srovnání s běhy bez větru se zvýšilo o 113 % až na 1108 % což představuje dvojnásobek až dvacetinásobek erodovaného materiálu. Simulace větrem poháněných dešťů také zvýšila tvorbu odtoku až o 12 % a míru eroze až o 31,5 %.

Měření na přírodních půdních površích i na nesoudržném písčitém substrátu ukázalo vysokou heterogenitu erozního dopadu větrem hnaných dešťů na celkovou míru eroze, ale obecně podpořilo tento teoreticky implikovaný, částečně drastický nárůst eroze půdy. Nicméně v závislosti na typu půdy mohou být tyto výsledky zkresleny, proto se navrhuje další studování vlastností těchto simulátorů na rozdílných typech půdy (Ries et al., 2014).

Tabulka 2: Porovnání 9 vybraných dešťových simulátorů a jejich charakteristik

Autor simulátoru	Střední objem kapky	Provozní tlak	Zadešťovaná plocha	Typ simulátoru	Kinetická energie	Max výška	intenzita srážek	Uniformita dle Christiansena
	D ₅₀ (mm)	(kPa)	(m)	Tryskový/ Kapkový	(J·m ⁻² ·mm ⁻¹)	(m)	(mm·h ⁻¹)	(%)
(Kavian et al., 2018)	1,2-2,9	20-80	1,5 x 2,5	Tryskový	x	2,7		x
(Vergni et al., 2018)	0,5 - 4	45-110	1 x 0,92	Tryskový	5,2-14,8	2,8	10 - 130	> 92
(MD Isa et al., 2018)	x	50-100	6 x 6	Tryskový	x	2	90 - 120	67 - 78,5
(Paige et al., 2004; Polyakov et al., 2018)	2,8-2,9	55	2 x 6	Tryskový	20,4 - 27,1	3,3	13 - 178	92,7
(Boulangue et al., 2019)	1,1-1,7	150-500	1 x 5	Tryskový	652–2394 J·m ⁻² ·h ⁻¹	2,3	20-100	79-94
(Nielsen et al., 2019)	x	x	1 x 1	Tryskový	34.9	3	110-165	95
(Alves Sobrinho et al., 2008; Menezes Sanchez Macedo et al., 2021; Carvalho et al., 2022)	1,8 - 2	32-35	0,7 x 1	Tryskový	17,82 - 23,73	2,3	20 - 150	54 - 85
(Cottenot et al., 2021)	3	25-140	0,5 x 0,5	Kapkový	18–23	6,6	24-75	> 90
(Singh & Kumar, 2020; 2021)	2,96 - 4,81	11,5-79	3,4 x 1,4	Kapkový	x	6	3,7 - 127,3	82-93,5

V porovnání s výzkumem provedeným (Iserloh, Ries, et al., 2013) byly přenosné dešťové simulátory v této práci schopny zadešťovat větší plochy, což ale vyplývá z větších konstrukcí u některých simulátorů (Tabulka 2).

Tabulka 3: Popis využití dešťových simulátorů

Autor simulátoru	Využití simulátoru
(Kavian et al., 2018)	analýza distribuce velikosti kapky a rychlosti pádu
(Vergni et al., 2018)	vztah mezi charakteristikami srážek a ztrátou půdy
(MD Isa et al., 2018)	analýza eroze na strmém terénu
(Paige et al., 2004; Polyakov et al., 2018)	odhadu rychlosti odtoku, mechanismy infiltrace a vodní eroze
(Boulangue et al., 2019)	odtok pesticidů, mechanismy infiltrace a tvorba a transport sedimentů
(Nielsen et al., 2019)	odtokové a infiltrační charakteristiky zatravněné městské oblasti
(Alves Sobrinho et al., 2008; Menezes Sanchez Macedo et al., 2021; Carvalho et al., 2022)	hodnocení dopadů vodní eroze na degradaci půdy, rychlosti infiltrace půdní vody
(Cottenot et al., 2021)	rozstřík částic nebo přenos herbicidů
(Singh & Kumar, 2020; 2021)	povrchový odtok a odtok sedimentů.

CU u zde popsaných simulátorů dosahovala uspokojivých hodnot, jelikož se ve většině případů pohybovala nad 70 %.

Průměrná objemově specifická kinetická energie KE_{mm} srážek vyprodukovaných zde zkoumanými dešťovými simulátory byla až dvojnásobná oproti (Iserloh, Ries, et al., 2013) a dosahovala podobných hodnot, které jsou uvedeny u dešťových simulátorů v práci (Abudi et al., 2012). Některé simulátory produkovaly nižší kinetickou energii záměrně kvůli způsobu využití simulátorů (Tabulka 3)

5. Diskuze

Měření

Jako nejvhodnější metody měření vlastností dešťů produkovaných simulátory je použití srážkoměrů, disdrometrů a vysokorychlostních kamer.

Obecně by měla být standardizována metoda měření přirozených a simulovaných dešťových srážek, aby se daly lépe interpretovat výsledky různých dešťových simulátorů. Pro měření průměrů kapek existují různé metody, které dávají různé výsledky. (Iserloh, Ries, et al., 2013) doporučili použití laserového Disdrometr Thies LPM oproti jiným metodám, protože umožňuje podrobné srovnání mezi přirozenými a simulovanými průměry dešťových kapek.

Ze studie, kterou provedl (Neumann et al., 2019) vyplývá, že ze tří porovnávaných disdrometrů je Disdrometr Thies LPM nejméně přesný při měřeních kinetické energie. Důvodem je pravděpodobně podhodnocená měřená pádová rychlost kapek. Nicméně i přes tyto nedostatky je jedním z nejčastěji využívaných disdrometrů. Jeho výhodou je výrazně nižší pořizovací cena oproti ostatním disdrometrům, malá velikost, jednoduchost použití a interpretace výsledků.

Kinetická energie deště je odvozována z dat získaných z disdrometrů či vysokorychlostních kamer. V případě dešťových simulátorů se nejčastěji používá KE_{mm} neboli objemově specifická kinetická energie s jednotkou ($J \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$). Rovnice KE_{mm} vykazují vysoký rozptyl na kinetické energii v důsledku různých faktorů. Proto by měly erozní modely ideálně používat časově specifické kinetické energie KE_{time} nebo uvádět obě interpretace kinetické energie způsobené deštěm (Sanchez-Moreno et al., 2012).

Fotogrammetrie se používá jako hodnotný nástroj k analyzování ztrát půdy během dešťových srážek.

Skutečnost, že vestavěné fotoaparáty smartphonů jsou stále kvalitnější je velkým bonusem pro fotogrammetrii. V praxi to znamená, že zemědělci budou moci pomocí smartphonů získávat fotky svých pozemků před a po erozní události. Tyto fotky pak mohou posílat k analyzování odborníkům.

Prosdocimi et al. (2017) doporučuje použití letecké fotogrammetrie pro erozní procesy, které se vyskytují na poli nebo v povodí. I toto je v současné době kladným faktorem pro fotogrammetrii, kvůli dostupnosti nových technologií. Například drony mohou sloužit jako užitečný nástroj, pomocí kterého bude možné získávat letecká data za nízkou cenu (Thomas et al., 2021).

Deště hnané větrem

Vliv dešťů hnaných větrem na erozi půdy je potenciálně velmi silný, avšak zvýšená variabilita rychlosti eroze půdy a tvorby odtoku ukazuje na nutnost dalšího výzkumu. Vliv větru na erozi deštěm je důležité téma, které není dostatečně prozkoumáno.

Ries et al. (2014) zmiňuje, že většina studií zaměřených na větrem hnané deště jsou testovány na vysoce narušeném substrátu. Tím pádem je zanedbána role přirozeně vyvinuté půdní struktury a struktury povrchu půdy. Dále navrhuje zkoumání větrem hnaných dešťů na autochtonních půdách a površích.

Návrhy na dešťové simulátory

Pro návrh dešťových simulátorů by mohl jako předloha posloužit simulátor navržený (Cottenot et al., 2021). Ačkoliv se jedná o kapkový simulátor, tak výsledné vlastnosti jsou vesměs stejné jako u ostatních simulátorů. Pouze intenzita srážek byla oproti ostatním simulátorům nižší. Lze uvažovat o výstavbě větších rozměrů simulátoru tohoto typu, protože ke generování deště jsou použity porézní trubice, které jsou cenově výhodné. Rozměry závlahy lze jednoduše zvětšit pomocí delších úseků porézních trubek. Nevýhodou by byla nosná konstrukce, která by zajišťovala požadovanou výšku porézních trubek a drátěného pletiva, pro uspokojivé hodnoty kinetické energie produkovaných dešťů

Vergni et al. (2018) používají simulátor, který by mohl sloužit jako inspirace pro návrh dešťového simulátoru určeného k použití na menší testovací plochy. Konstrukce obsahuje 4 různé trysky, které lze vzájemně kombinovat. Specialitou je zde vysokotlaková tryska, která se používá ke zvýšení počátečního obsahu vody na testované ploše, se zanedbatelnou kinetickou energií, takže vzorek lze dále použít k dalším testům.

Polyakov et al. (2018) používá dešťový simulátor středních rozměrů. Tento typ simulátoru se používá přibližně 20 let s uspokojivými výsledky. Trysky jsou připevněny na výložník, který způsobuje kmitání. Výložník je řízen motorem, který mění rychlost kmitu trysek, tak aby aplikace vody na pozemek rovnoměrnější.

Boulangé et al. (2019) ve svém simulátoru použili netradiční trysky oproti ostatním autorům. Jedná se o silikonové trysky (TCRN-ST a STRMN-5) vyráběné firmou TECHNOCORE Co., Ltd (Saitama, Japonsko). Jenda tato tryska je schopna zadešťovat plochu 1 x 5 m, přičemž na podobnou plochu jiné simulátory využívají více trysek. Při větším tlaku trysky začnou vibrovat a rozšíří tím aplikaci vody na plochu větší než 2,5 m od umístění trysky. Výhodou těchto trysek tedy je, že jedna tryska je schopná generovat déšť na plochu 5 x 5 m.

V budoucích návrzích dešťových simulátorů by mohl být využit 3D tisk, který by mohl usnadnit výrobu specializovaných komponentů pro dešťové simulátory.

6. Závěr

Největší rozmach v technologiích dešťových simulátorů za posledních pár let jsou rozhodně nové techniky měření. Od staromódního měření dešťových kapek pomocí technik jako je olejová či metoda mouky se technologie v měření posunuly k laserovým disdrometrům a rychlostním kamerám. Díky těmto přístrojům lze zjistit více informací o dešťových kapkách bez empirických modelů, které ne vždy byly přesné. S pomocí dat jako je rychlost kapek, počet kapek a jejich velikostní rozdělení můžeme lépe dopočítávat zbylé veličiny.

Údaje o úbytku půdy lze v současnosti monitorovat pomocí fotogrammetrie s využitím smartphonů, jejichž pomocí lze získat dostatečně kvalitní fotky k dalšímu zpracování odborníky. I na poli leteckých snímků se veřejnosti otevírá cesta kvůli relativně dostupným dronům.

Přestože existuje široké spektrum dešťových simulátorů, tak je nedostatek studií, které se týkají simulace deště s větrem v polních podmínkách. Proto se zde nabízí dále provádět výzkum tímto směrem.

V designu nových dešťových simulátorů nedošlo k žádné převratné změně. Spíše se modernizují a kalibrují stávající technologie, aby byly schopny replikovat déšť co nejblíže vlastnostem přirozených dešťů.

7. Reference

- Abudi, I., Carmi, G., Berliner, P. 2012. Rainfall simulator for field runoff studies. *Journal of Hydrology*. 454–455 . 76–81. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.05.056.
- Aksoy, H., Unal, N. E., Cokgor, S., Gedikli, A., Yoon, J., Koca, K., Inci, S. B., Eris, E. 2012. A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume. *Catena*. 98 . 63–72. doi: 10.1016/j.catena.2012.06.009.
- Alves Sobrinho, T., Gómez-Macpherson, H., Gómez, J. A. 2008. A portable integrated rainfall and overland flow simulator. *Soil Use and Management*. 24 (2). 163–170. doi: 10.1111/j.1475-2743.2008.00150.x.
- Angulo-Martínez, M., Beguería, S., Kysely, J. 2016. Use of disdrometer data to evaluate the relationship of rainfall kinetic energy and intensity (KE-I). *Science of the Total Environment*. 568 . 83–94. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.223.
- Balaguer-Puig, M., Marqués-Mateu, Á., Lerma, J. L., Ibáñez-Asensio, S. 2017. Estimation of small-scale soil erosion in laboratory experiments with Structure from Motion photogrammetry. *Geomorphology*. 295 . 285–296. doi: 10.1016/j.geomorph.2017.04.035.
- Beard, K. v., Bringi, V. N., Thurai, M. 2010. A new understanding of raindrop shape. *Atmospheric Research*. 97 (4). 396–415. doi: 10.1016/j.atmosres.2010.02.001.
- Boulangé, J., Malhat, F., Jaikaew, P., Nanko, K., Watanabe, H. 2019. Portable rainfall simulator for plot-scale investigation of rainfall-runoff, and transport of sediment and pollutants. *International Journal of Sediment Research*. 34 (1). 38–47. doi: 10.1016/j.ijsrc.2018.08.003.
- Carvalho, D. F. de, Macedo, P. M. S., Pinto, M. F., Almeida, W. S. de, Schultz, N. 2022. Soil loss and runoff obtained with customized precipitation patterns simulated by InfiAsper. *International Soil and Water Conservation Research*. doi: 10.1016/j.iswcr.2021.12.003.

- Cottenot, L., Courtemanche, P., Nouhou-Bako, A., Darboux, F. 2021. A rainfall simulator using porous pipes as drop former. *Catena*. 200 . doi: 10.1016/j.catena.2020.105101.
- Fister, W., Iserloh, T., Ries, J. B., Schmidt, R. G. 2012. A portable wind and rainfall simulator for in situ soil erosion measurements. *Catena*. 91 . 72–84. doi: 10.1016/j.catena.2011.03.002.
- Grismer, M. 2012. , July Standards vary in studies using rainfall simulators to evaluate erosion. *California Agriculture*.
- Holý, M. 1994. *Eroze a životní prostředí*. Praha. Vydavatelství ČVUT. ISBN: 80-01-01078-3.
- Hösl, R., Strauss, P. 2016. Conservation tillage practices in the alpine forelands of Austria - Are they effective? *Catena*. 137 . 44–51. doi: 10.1016/j.catena.2015.08.009.
- Iserloh, T., Fister, W., Marzen, M., Seeger, M., Kuhn, N. J., Ries, J. B. 2013. The role of wind-driven rain for soil erosion - An experimental approach. *Zeitschrift Fur Geomorphologie*. 57 (1 SUPPL. 1). 193–201. doi: 10.1127/0372-8854/2012/S-00118.
- Iserloh, T., Fister, W., Seeger, M., Willger, H., Ries, J. B. 2012. A small portable rainfall simulator for reproducible experiments on soil erosion. *Soil and Tillage Research*. 124 . 131–137. doi: 10.1016/j.still.2012.05.016.
- Iserloh, T., Ries, J. B., Arnáez, J., Boix-Fayos, C., Butzen, V., Cerdà, A., Echeverría, M. T., Fernández-Gálvez, J., Fister, W., Geißler, C., Gómez, J. A., Gómez-Macpherson, H., Kuhn, N. J., Lázaro, R., León, F. J., Martínez-Mena, M., Martínez-Murillo, J. F., Marzen, M., Mingorance, M. D., Ortigosa, L., Peters, P., Regüés, D., Ruiz-Sinoga, J. D., Scholten, T., Seeger, M., Solé-Benet, A., Wengel, R., Wirtz, S. 2013. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. *Catena*. 110 . 100–112. doi: 10.1016/j.catena.2013.05.013.
- Janeček, M. 2008. *Základy erodologie*. Praha. Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN: 978-80-213-1842-7.

- Janeček, M. 2012. Ochrana zemědělské půdy před erozí. Praha. Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN: 978-80-87415-42-9.
- Kavian, A., Mohammadi, M., Cerda, A., Fallah, M., Abdollahi, Z. 2018. Simulated raindrop's characteristic measurements. A new approach of image processing tested under laboratory rainfall simulation. *Catena*. 167 . 190–197. doi: 10.1016/j.catena.2018.04.034.
- Kesgin, E., Dogan, A., Agaccioglu, H. 2018. Rainfall simulator for investigating sports field drainage processes. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 125 . 360–370. doi: 10.1016/j.measurement.2018.05.001.
- Kobzová, E. 1998. Počasí. Olomouc. nakladatelství Rubico . ISBN: 80-85839-26-1.
- Liu, X. C., Gao, T. C., Liu, L. 2013. A comparison of rainfall measurements from multiple instruments. *Atmospheric Measurement Techniques*. 6 (7). 1585–1595. doi: 10.5194/amt-6-1585-2013.
- Lora, M., Camporese, M., Salandin, P. 2016. Design and performance of a nozzle-type rainfall simulator for landslide triggering experiments. *Catena*. 140 . 77–89. doi: 10.1016/j.catena.2016.01.018.
- Marzen, M., Iserloh, T., de Lima, J. L. M. P., Fister, W., Ries, J. B. 2017. Impact of severe rain storms on soil erosion: Experimental evaluation of wind-driven rain and its implications for natural hazard management. *Science of the Total Environment*. 590–591 . 502–513. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.190.
- Mayerhofer, C., Meißl, G., Klebinder, K., Kohl, B., Markart, G. 2017. Comparison of the results of a small-plot and a large-plot rainfall simulator – Effects of land use and land cover on surface runoff in Alpine catchments. *Catena*. 156 . 184–196. doi: 10.1016/j.catena.2017.04.009.
- MD Isa, S. F., Azhar, A. T. S., Aziman, M. 2018. Design, Operation and Construction of a Large Rainfall Simulator for the Field Study on Acidic Barren Slope. *Civil Engineering Journal*. 4 (8). 1851. doi: 10.28991/cej-03091119.

- Menezes Sanchez Macedo, P., Ferreira Pinto, M., Alves Sobrinho, T., Schultz, N., Altamir Rodrigues Coutinho, T., Fonseca de Carvalho, D. 2021. A modified portable rainfall simulator for soil erosion assessment under different rainfall patterns. *Journal of Hydrology*. 596 . doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126052.
- Mhaske, S. N., Pathak, K., Basak, A. 2019. A comprehensive design of rainfall simulator for the assessment of soil erosion in the laboratory. *Catena*. 172 . 408–420. doi: 10.1016/j.catena.2018.08.039.
- Neumann, M., Zumr, D., Kavka, P., Laburda, T., Lolk Johannsen, L., Zambon, N., Dostál, T., Strauss, P., Klik, A. (n.d.) Vlastnosti uměle generovaných srážek využívaných pro studium eroze půdy.
- Nielsen, K. T., Moldrup, P., Thorndahl, S., Nielsen, J. E., Duus, L. B., Rasmussen, S. H., Uggerby, M., Rasmussen, M. R. 2019. Automated rainfall simulator for variable rainfall on urban green areas. *Hydrological Processes*. 33 (26). 3364–3377. doi: 10.1002/hyp.13563.
- Novotný, I., Žížala, D., Kapička, J., Beitlerová, H., Mistr, M., Kristenová, H., Papaj, V. 2016. Adjusting the CPmax factor in the Universal Soil Loss Equation (USLE): areas in need of soil erosion protection in the Czech Republic. *Journal of Maps*. 12 . 58–62. doi: 10.1080/17445647.2016.1157834.
- Paige, G. B., Stone, J. J., Smith, J. R., Kennedy, J. R. 2004. THE WALNUT GULCH RAINFALL SIMULATOR: A COMPUTER-CONTROLLED VARIABLE INTENSITY RAINFALL SIMULATOR.
- Polyakov, V., Stone, J., Collins, C. H., Nearing, M. A., Paige, G., Buono, J., Gomez-Pond, R. L. 2018. Rainfall simulation experiments in the southwestern USA using the Walnut Gulch Rainfall Simulator. *Earth System Science Data*. 10 (1). 19–26. doi: 10.5194/essd-10-19-2018.
- Prosdocimi, M., Burguet, M., di Prima, S., Sofia, G., Terol, E., Rodrigo Comino, J., Cerdà, A., Tarolli, P. 2017. Rainfall simulation and Structure-from-Motion photogrammetry for the analysis of soil water erosion in Mediterranean vineyards. *Science of the Total Environment*. 574 . 204–215. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.036.

- Řehoř, J., Brázdil, R., Lhotka, O., Trnka, M., Balek, J., Štěpánek, P., Zahradníček, P. 2021. Precipitation in the czech republic in light of subjective and objective classifications of circulation types. *Atmosphere*. 12 (11). doi: 10.3390/atmos12111536.
- Řezáčová, D., Novák, P., Kašpar, M., Setvák, M. 2007. *Fyzika oblaků a srážek*. Praha. Academia. ISBN: 978-200-1505-1.
- Sanchez-Moreno, J. F., Mannaerts, C. M., Jetten, V., Löffler-Mang, M. 2012. Rainfall kinetic energy-intensity and rainfall momentum-intensity relationships for Cape Verde. *Journal of Hydrology*. 454–455 . 131–140. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.06.007.
- Šarpatka, Bořivoj 2014. *Pedologie a ochrana půdy*. Olomouc. Univerzita Palackého v Olomouci. ISBN: 978-80-244-3736-1.
- Šarpatka, Bořivoj, Bednář, M., Novák, P. 2010. *Analysis of Soil Degradation in the Czech Republic: GIS Approach*. Soil & Water Res.
- Singh, S. K., Kumar, A. 2020. Development of a Portable Rainfall Simulation System for Hydrologic Studies under Field Conditions. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 9 (1). 1639–1648. doi: 10.20546/ijemas.2020.901.181.
- Singh, S. K., Kumar, A. 2021. A portable rainfall simulator used for sediment and runoff studies with different land treatments. *The Pharma Innovation*. 10 (3). 924–931. doi: 10.22271/tpi.2021.v10.i3m.6014.
- Soukupová, J. 2012. *Atmosférické procesy (základy meteorologie a klimatologie)*. Praha. Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN: 978-80-213-2234-9.
- Thomas, H., Brigaud, B., Blaise, T., Saint-Bezar, B., Zordan, E., Zeyen, H., Andrieu, S., Vincent, B., Chirol, H., Portier, E., Mouche, E. 2021. Contribution of drone photogrammetry to 3D outcrop modeling of facies, porosity, and permeability heterogeneities in carbonate reservoirs (Paris Basin, Middle Jurassic). *Marine and Petroleum Geology*. 123 . doi: 10.1016/j.marpetgeo.2020.104772.

- Vergni, L., Todisco, F., Vinci, A. 2018. , August 1 Setup and calibration of the rainfall simulator of the Masse experimental station for soil erosion studies. Catena. Elsevier B.V.
- Yakubu, M. L., Yusop, Z. 2017. Adaptability of rainfall simulators as a research tool on urban sealed surfaces—a review. Hydrological Sciences Journal. 62 (6). 996–1012. doi: 10.1080/02626667.2016.1267355.
- Zádorová, T., Penížek, V., Šefrna, L., Rohošková, M., Borůvka, L. 2011. Spatial delineation of organic carbon-rich Colluvial soils in Chernozem regions by Terrain analysis and fuzzy classification. CATENA. 85 (1). 22–33. doi: 10.1016/J.CATENA.2010.11.006.
- Zhao, J., Wang, Z., Dong, Y., Yang, Z., Govers, G. 2022. How soil erosion and runoff are related to land use, topography and annual precipitation: Insights from a meta-analysis of erosion plots in China. Science of the Total Environment. 802 . doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149665.
- Žížala, D., Juřicová, A., Kapička, J., Novotný, I. 2021. The potential risk of combined effects of water and tillage erosion on the agricultural landscape in Czechia. Journal of Maps. 17 (2). 428–438. doi: 10.1080/17445647.2021.1942251.

Internetové zdroje

- Irrigation by sprinkling : Christiansen, Jerald Emmet, 1905-1989 : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive. Internet Archive: Digital Library of Free & Borrowable Books, Movies, Music & Wayback Machine [online]. Dostupné z: <https://archive.org/details/irrigationbyspri670chri>
- Runoff Processes: International Edition. Index of / [online]. Dostupné z: https://download.comet.ucar.edu/memorystick/hydro/basic_int/runoff/index.htm
- Vodní eroze půdy (Půda, eAGRI). [online]. Copyright © 2009 [cit. 20.03.2022]. Dostupné z: <https://eagri.cz/public/web/mze/puda/ochrana-pudy-a-krajiny/degradace-pud/vodni-eroze-pudy/>

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: OHROŽENÍ PŮDY VODNÍ EROZÍ (HTTPS://MAPY.VUMOP.CZ)	7
OBRÁZEK 2: SCHÉMA TVARU KAPKY V ZÁVISLOSTI NA PRŮMĚRU (BEARD ET AL., 2010).....	9
OBRÁZEK 3: SCHÉMA TŘÍŠTĚNÍ PADAJÍCÍ KAPKY (WWW.METEOPRESS.CZ)	10
OBRÁZEK 4: GRAFY MĚŘENÍ CU PRO 13 DEŠŤOVÝCH SIMULÁTORŮ (ISERLOH, RIES, ET AL., 2013)	16
OBRÁZEK 5: PRINCIP FUNGOVÁNÍ VĚTRU NA DEŠŤ (MARZEN ET AL., 2017)	19
OBRÁZEK 6: DEŠŤOVÝ SIMULÁTOR URČENÝ K SIMULACI DEŠŤE S VĚTREM (FISTER ET AL., 2012)	20
OBRÁZEK 7: DEŠŤOVÝ SIMULÁTOR NAVRHNUTÝ (KAVIAN ET AL., 2018).....	21
OBRÁZEK 8: DEŠŤOVÝ SIMULÁTOR NAVRHNUTÝ (VERGNI ET AL., 2018)	22
OBRÁZEK 9: DEŠŤOVÝ SIMULÁTOR NAVRHNUTÝ (MD ISA ET AL., 2018).....	23
OBRÁZEK 10: DEŠŤOVÝ SIMULÁTOR NAVRHNUTÝ (PAIGE ET AL., 2004)	24
OBRÁZEK 11: DEŠŤOVÝ SIMULÁTOR NAVRHNUTÝ (BOULANGE ET AL., 2019).....	25
OBRÁZEK 12: DEŠŤOVÝ SIMULÁTOR NAVRHNUTÝ (NIELSEN ET AL., 2019)	26
OBRÁZEK 13: DEŠŤOVÝ SIMULÁTOR INFIASPER NAVRŽENÝ (ALVES SOBRINHO ET AL., 2008)	27
OBRÁZEK 14: DEŠŤOVÝ SIMULÁTOR NAVRŽENÝ (COTTENOT ET AL., 2021).....	28
OBRÁZEK 15: SIMULÁTOR NAVRŽENÝ (SINGH ET KUMAR, 2020)	30

Seznam tabulek

TABULKA 1: POPIS SKUPIN PŮD PODLE JEJICH HYDROLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ. (WWW.CHMI.CZ)	6
TABULKA 2: POROVNÁNÍ 9 VYBRANÝCH DEŠŤOVÝCH SIMULÁTORŮ A JEJICH CHARAKTERISTIK	33
TABULKA 3: POPIS VYUŽITÍ DEŠŤOVÝCH SIMULÁTORŮ.....	33