

Vlastnosti uměle generovaných srážek využívaných pro studium eroze půdy

**MARTIN NEUMANN, DAVID ZUMR, PETR KAVKA, TOMÁŠ LABURDA,
LISBETH LOLK JOHANNSEN, NIVES ZAMBON, TOMÁŠ DOSTÁL, PETER STRAUSS, ANDREAS KLIK**

Klíčová slova: disdrometr – kinetická energie deště – intenzita deště – dešťový simulátor – eroze půdy

SOUHRN

Vodní eroze půdy se běžně studuje v laboratořích, experimenty bývají založeny na uměle generovaných srážkách s využitím dešťových simulátorů. Typicky je vyhodnocován vliv různých faktorů, jako jsou intenzita nebo úhrn srážky, půdní charakteristiky, zpracování půdy, posklizňové zbytky nebo sklon a délka erozní plochy na erozi. Výsledky experimentů slouží pro lepší pochopení erozních procesů, odhad transportovaného sedimentu v krajině nebo kalibraci matematických simulačních modelů. Vzhledem k tomu, že eroze je iniciována dešťovou srážkou, je pro přenositelnost výsledků z laboratoře do krajiny zásadní, aby se simulovaná srážka co nejvíce blížila charakteristikám přírodních srážek. Intenzita deště se kontroluje poměrně snadno, ale klíčový dopad na erozní procesy má kinetická energie deště. Cílem tohoto příspěvku je komplexní vyhodnocení charakteristik simulovaného deště a porovnání jeho kinetické energie s energií přírodních srážek. Součástí výsledků je i porovnání několika běžně využívaných disdrometrů a diskuse využitelnosti disdrometrů pro charakterizaci simulovaných srážek.

Experiment byl proveden na laboratorním dešťovém simulátoru Fakulty stavební ČVUT v Praze. Kinetická energie deště o různých intenzitách byla monitorována pomocí disdrometrů LPM (Thies Clima), Parsivel (OTT) a PWS100 (Campbell Sci.), za referenční údaj intenzity srážky byla považována data z překlopného srážkoměru MR3 (Meteoservis). Intenzitu deště měří všechny testované disdrometry uspokojivě. Přístroje naměřily 106 % (LPM), 79 % (Parsivel) a 116 % (PWS100) hodnoty naměřené pomocí překlopného srážkoměru. V případě měření kinetické energie nebyla nastavena žádná referenční hodnota, ale přístroje byly porovnávány mezi sebou. LPM oproti ostatním dvěma přístrojům měří výrazně nižší kinetickou energii, jím naměřené hodnoty odpovídají v průměru 83 % hodnot naměřených Parsivalem, resp. 59 % hodnot naměřených PWS100. Nejvyšší hodnoty kinetické energie měřil PWS100. Klíčovým závěrem je, že přívalová srážka simulovaná laboratorním dešťovým simulátorem má značně nižší kinetickou energii než přírodní srážky o shodných intenzitách.

ÚVOD

Úhrn, doba trvání, intenzita, případně časový průběh jsou běžně monitorované parametry dešťových srážek. Nicméně pro mnoho vědecky i prakticky orientovaných studií jsou podstatné i další charakteristiky srážek. Například pro studium eroze půdy je klíčová kinetická energie dopadajících kapek, která rozhoduje o míře degradace půdních agregátů a prvotní mobilizaci půdních částic. Dalšími obory, pro které je účelné sledovat srážky podrobněji, jsou dálkový průzkum země, telekomunikace (útlum mikrovlnných spojů), radarová

meteorologie, městská odvodnění (větší kapky s vyšší kinetickou energií snadněji uvolňují z chodníků a střech polutanty, které mohou být dále transportovány do vodních recipientů nebo ČOV) a další [1].

Pro experimentální výzkum erozních procesů se často využívají uměle generované srážky s využitím laboratorních nebo terénních dešťových simulátorů. Cílem zadržovacích experimentů je simulovat takový dešť, který má srovnatelné charakteristiky s přirozenou dešťovou srážkou. Obvykle je kontrolována intenzita deště, trvání deště (celkový srážkový úhrn), případně prostorová a časová rovnoměrnost postřiku. Je známý fakt, že trysky vytváří odlišné spektrum velikostí kapek, než má přírodní dešť [2], kapky z dešťových simulátorů jsou obvykle menší. Vzhledem ke konstrukci většiny terénních i laboratorních simulátorů zpravidla kapky nedosahují terminální pádové rychlosti odpovídající přírodnímu dešti. Uměle generovaný dešť má proto typicky nižší kinetickou energii než přírodní srážka se stejnou intenzitou a dobou trvání, a nutně tak vyvolává jiný erozní účinek [3, 4]. Kinetická energie uměle generovaného deště, která má fundamentální vliv na iniciační fázi eroze půdy, běžně během experimentů měřena není.

Typicky požadovanými parametry srážek jsou rozlišení hydrometeorů (dešť, sníh, kroupy, mlha atd.), distribuce velikostí a rychlostí kapek, kinetická energie deště nebo viditelnost. Většinu zmíněných parametrů lze pozorovat, měřit, případně vypočítat i bez složitého technického vybavení. Například distribuce velikostí kapek se historicky určovala pomocí testů s moukou [5], kdy byla po dopadu kapek do mouky manuálně měřena plocha jejich otisku. Obdobně bývaly dešťové kapky zachytávány do misky s olejem o specifické viskozitě a opět manuálně analyzovány. Díky své jednoduchosti je pro určité aplikace tato metoda občas využívána, byť v mírně modifikované formě, i v současnosti [6]. Pro analýzu delších časových řad a monitorování srážek v reálném čase však nejsou tyto metody vhodné.

Relativně moderní, byť už poměrně rozšířenou, technologií pro automatizované a komplexní monitorování srážek jsou disdrometry. Většinou se jedná o soběstačná bezúdržbová zařízení s kontinuálním záznamem počtu, efektivního průměru a pádové rychlosti jednotlivých frakcí dešťových kapek. Nejčastěji využívané disdrometry lze dělit podle principu měření na tři základní typy [7]: (i) elektromechanické disdrometry, které přímo měří kinetickou energii dopadajících kapek na podložku (měřeny jsou mechanické vibrace nebo akustická odezva); (ii) video disdrometry (1D nebo 2D), které pomocí vysokorychlostního CCD snímače zaznamenávají tvar a počet kapek, z čehož lze vypočítat efektivní průměr, pádovou rychlost, kinetickou energii i úhel dopadu dešťové kapky [8]; (iii) optické (typicky laserové) disdrometry, které měří útlum intenzity svazku rovnoběžných laserových paprsků vlivem propadávajících kapek. Na základě útlumu lze vypočítat počet, velikost a pádovou rychlost kapek.



Obr. 1. Disdrometry zleva: Thies LPM, PWS100, Parsivel

Fig. 1. Tested disdrometers (from left): Thies LPM, PWS100, Parsivel

Laserové disdrometry jsou schopny pracovat po dlouhou dobu téměř bez obsluhy, výstupní data lze zpracovávat téměř v reálném čase. Oproti překlopným srážkoměrům nevyžadují časté čištění ani kalibraci, což je předurčuje i pro monitorování intenzity deště. To, spolu s relativní finanční dostupností a spolehlivostí, laserové disdrometry předurčuje k masovému využívání nejen v meteorologii.

V literatuře lze dohledat výsledky experimentů a terénních monitorování, které mají za cíl porovnat disdrometry a standardizované metody na bázi překlopných srážkoměrů. Například porovnání elektromechanického disdrometru, radaru a optického disdrometru prováděli Sarkar a kol. [9]. Spolehlivost disdrometrů s ohledem na stanovení intenzity deště testovali Nakaya a kol. [10], Lanzinger a kol. [11], Martinez a kol. [12], typy srážek stanovovali Hannelore a kol. [13]. Pro výzkum a modelování eroze půdy je zásadní informace o kinetické energii kapek a její funkční závislosti na intenzitě deště. Přehled publikovaných vztahů mezi intenzitou přirozeného deště a kinetickou energií, odvozených s využitím disdrometrů, shrnuje Angulo-Martínez a kol. [14]. Vzhledem k dostupnosti disdrometrů přibývá literatury s podrobnými charakteristikami různých typů srážek, začínají být testovány i charakteristiky uměle generovaných srážek. Avšak komparativní studie výstupů disdrometrů od různých výrobců při monitorování přirozených srážek ukazuje systematicky odlišné výsledky [12]. To je dáno jak různými principem měření, tak rozdíly v konstrukčních a technologických detailech jednotlivých disdrometrů, jako jsou např. rozdílné detektory intenzity záření, různé vlnové délky laserových paprsků, různé úhly mezi detektory rozptýleného záření nebo jiný systém klasifikace velikosti kapek. Variabilita měřených charakteristik deště byla zjištěna dokonce i při použití stejného typu přístroje, jak ukazuje na srovnání pěti disdrometrů Thies LPM Frasson a kol. [15] nebo dvou disdrometrů PWS100 [16].

Ukazuje se, že během simulovaných srážek jsou často generovány kapky mimo detekční limity některých disdrometrů (malé kapky s vysokou rychlostí), různé přístroje tak měří různou kinetickou energii. Srovnávací studie, která by vyhodnocovala variabilitu měřených charakteristik simulovaných dešťů s využitím různých typů disdrometrů, dosud chybí. Cílem tohoto příspěvku je porovnání tří typů nejčastěji používaných optických laserových disdrometrů v podmínkách uměle generovaného deště. Druhým cílem příspěvku je porovnání měřené kinetické energie simulovaných srážek s vypočítanou kinetickou energií přirozených srážek.

METODIKA

V laboratorních podmínkách jsme uskutečnili sérii pokusů s uměle generovaným deštěm o různých intenzitách a opakovaně jsme měřili jeho charakteristiky pomocí tří, v praxi běžně používaných, disdrometrů. Výsledky měření

pomocí disdrometrů a referenčního překlopného srážkoměru jsme porovnali. Charakteristika simulovaného deště byla následně porovnána s teoretickými parametry přírodní srážky o shodné intenzitě. Kinetická energie přirozeného deště byla vypočítána podle v literatuře publikovaných vztahů.

MONITOROVÁNÍ CHARAKTERISTIK SIMULOVANÉHO DEŠTĚ

Pro monitorování charakteristik deště byly využity tři disdrometry, jako referenční měření byla intenzita deště měřena člunkovým překlopným srážkoměrem (měrná plocha 500 cm², rozlišení 0,1 mm). Všechny disdrometry jsou optické, laserového typu, měří a zaznamenávají efektivní průměr a pádovou rychlost dešťových kapek. Kapky jsou automaticky klasifikovány do několika velikostních a rychlostních tříd. Jednotlivé disdrometry (LPM Thies Clima, PWS100 Campbell Sci., Parsivel OTT) se od sebe liší vlnovou délkou laseru, měrnou plochou, rozsahem měřitelných velikostí a rychlostí kapek, počtem velikostních a rychlostních tříd (tj. rozlišením histogramů). Na obr. 1 jsou použité disdrometry znázorněny.

LPM – (LASER PRECIPITATION MONITOR)

Disdrometr Thies LPM je vyráběn v Německu firmou Thies Clima, konkrétní přístroj je distribuován pod označením 5.4110.10.000. Tento disdrometr je velmi často využíván zejména při monitorování laboratorních experimentů a ve výzkumu erozních procesů [17]. Důvody jeho častého využívání jsou relativně malá velikost, jednoduchost použití a interpretace výsledků a výrazně nižší pořizovací cena oproti ostatním disdrometrům.

Thies LPM využívá infračervený paralelní světelný paprsek o vlnové délce 786 nm, měřená plocha užitého přístroje je 44,1 cm². Přesná velikost měrné plochy se pro konkrétní přístroje liší a musí být upravena pomocí korekčního koeficientu od výrobce pro daný výrobek. Opomenutí korekce vede k chybné charakterizaci deště [15]. Rozsah měřitelných průměrů kapek je 0,16–8 mm a pádových rychlostí 0,2–20 m.s⁻¹. Podle velikosti jsou kapky tříděny do 34 kategorií, podle pádové rychlosti do 34 kategorií (1 156 kombinací průměru a rychlosti kapky). Rozsah měřitelné intenzity srážky udávaný výrobcem je 0,001–250 mm.h⁻¹. Vnitřní algoritmus disdrometru rozeznává typ srážky (vodní kapky, sníh, kroupy, mlha) [13]. Součástí disdrometru je software Thies LNM View, v jehož prostředí lze sledovat měřené veličiny, vizualizovat distribuční funkce velikostí a rychlostí kapek a vypočítat další parametry srážky (intenzita, průměrná velikost kapek, průměrná rychlost kapek, kinetická energie deště).

PWS100 – (PRESENT WEATHER SENSOR)

PWS100 je distribuován firmou Campbell Scientific (Velká Británie), standardně jako součást velkých meteorologických stanic. Optický disdrometr využívá paprsek v IR spektru o vlnové délce 830 nm, měřená oblast je 40 cm². Rozsah měřitelných průměrů kapek je 0,1–30 mm a pádových rychlostí 0,16–30 m.s⁻¹. Podle velikosti jsou kapky tříděny do 22 kategorií, podle pádové rychlosti do 20 kategorií (440 kombinací průměru a rychlosti kapky). Rozsah měřitelné intenzity srážky udávaná výrobcem je 0–999,9 mm.h⁻¹ s rozlišením 0,0001 mm. Data z disdrometru jsou zaznamenávána datalogerem a ukládána na SD kartu.

PARSIVEL

Parsivel je vyráběn společností OTT (Německo). V současnosti je v distribuci už druhá generace disdrometru pod označením Parsivel², která má mírně odlišné charakteristiky a v rámci této studie nebyla testována. Parsivel první generace využívá paprsek o vlnové délce 650 nm, monitorovaná plocha je 54 cm² (180 × 30 mm). Rozsah měřitelných průměrů kapek je 0,2–5 mm (pevné částice do 25 mm) a pádových rychlostí 0,2–20 m.s⁻¹. Podle velikosti jsou kapky tříděny do 32 kategorií, podle pádové rychlosti do 30 kategorií (1 024 kombinací průměru a rychlosti kapky). Rozsah měřitelné intenzity srážky udávaná výrobcem je 0,001–1 200 mm.h⁻¹. Obdobně jako Thies LPM byl Parsivel připojen k PC se spuštěným programem pro záznam a vyhodnocení charakteristik deště.

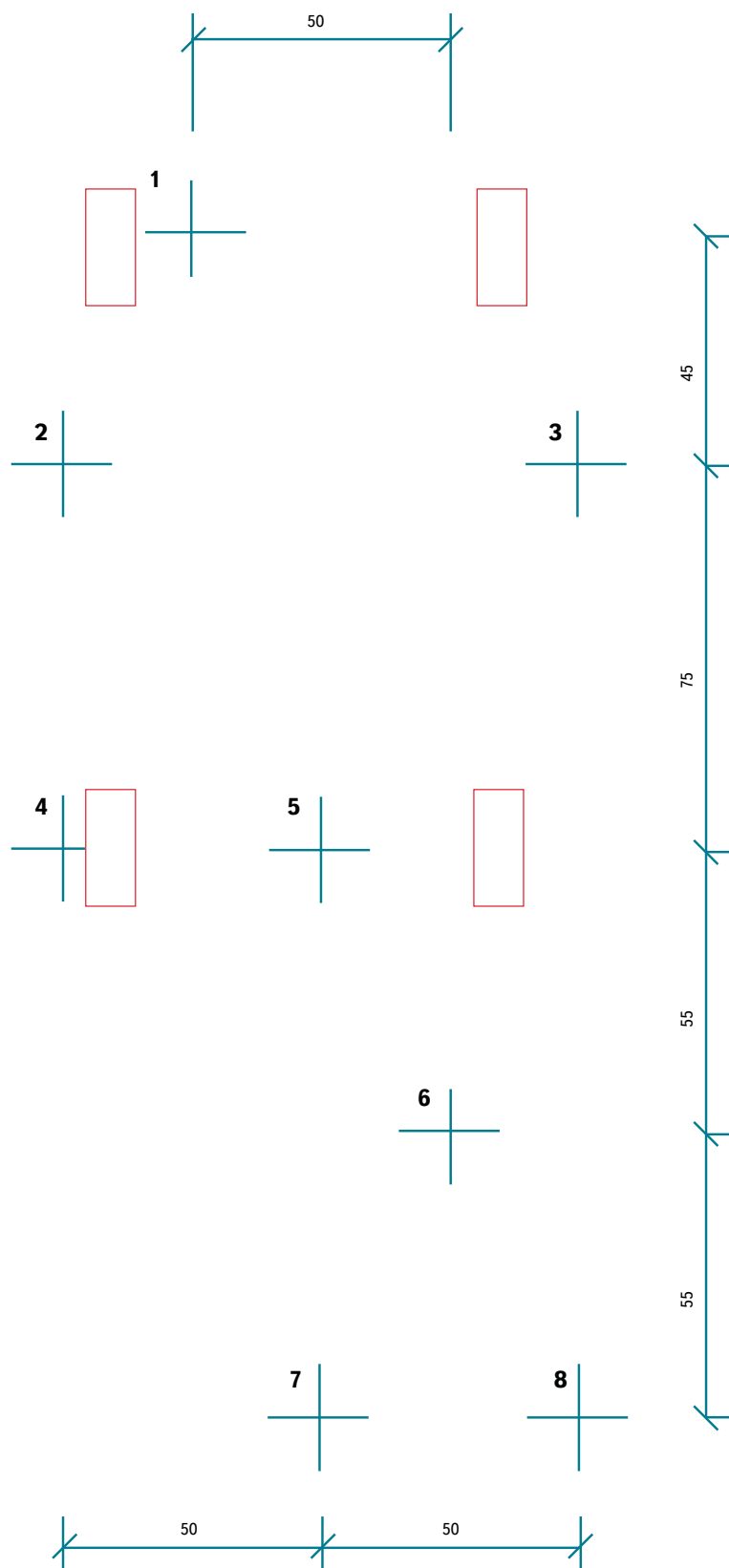
SIMULACE DEŠTĚ

Pro simulaci srážky byl použit laboratorní tryskový dešťový simulátor typu Norton Ladder, umístěný ve vodohospodářské laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze [18]. Simulátor je osazen osmi kyvnými tryskami Veejet 80100 ve dvou řadách, které pracují při vodním tlaku 41 kPa [19]. Trysky jsou neustále otevřené, intenzita deště na ploše pod tryskami je regulována nastavením frekvence kyvů trysek a délkou prodlevy mezi jednotlivými kyvy. Pádová výška kapek je 2,6 m, simulátor je vhodný pro použití při intenzitě 20–80 mm.h⁻¹. Běžně užívaná experimentální plocha pro zadešťování má rozměr 1 × 4 m, teoreticky lze využít prostor o rozměrech přibližně 1,5 × 6 m.

Pro testování disdrometrů jsme využili skutečnosti, že rozložení intenzity srážky není v ploše pod tryskami simulátoru zcela rovnoměrné, na okrajích experimentální plochy má dešť nižší intenzitu, přímo pod tryskami vysokou intenzitu. Pod dešťovým simulátorem bylo vytipováno osm pozic s rozdílnou intenzitou simulovaného deště v rozmezí cca 20–80 mm.h⁻¹ (obr. 2). Na tyto pozice byly v průběhu simulované srážky opakovaně umísťovány testované disdrometry a srážkoměr tak, že vždy geometrický střed měrné oblasti konkrétního disdrometru byl nad stejným bodem. Disdrometry byly orientovány rovnoběžně s hlavním ramenem dešťového simulátoru. Mimo disdrometry a srážkoměru byly pro kontrolu na vytipovaných pozicích rozmístěny odměrné nádoby s definovanou sběrnou plochou (srážkový totalizátor).

Přemísťování jednotlivých disdrometrů a srážkoměru mezi vytipovanými pozicemi bylo prováděno bez přerušování simulace deště, aby nedocházelo k tlakovým rázům v systému simulátoru, a tak kolísání intenzity srážky. Všechny přístroje zaznamenávaly údaje v minutovém kroku, na každé pozici byly umístěny 30 minut. Pro vyhodnocení bylo využito monitorování ze středních 24 minut.

Kinetickou energii deště lze vztahovat na určitý časový úsek KE_R (J.m⁻².h⁻¹), nebo na určitý srážkový úhrn KE (J.m⁻².mm⁻¹). První případ obecně charakterizuje kinetickou energii konkrétní srážkové události, která mohla mít v čase proměnlivou intenzitu. Druhý případ charakterizuje typ srážky. Literatura uvádí (např. [20]), že samotná intenzita deště nemusí mít významný vliv na distribuci



Obr. 2. Rozložení disdrometrů s číselným označením pozice, červeně je naznačena pozice trysek

Fig. 2. The tested positions under the rainfall simulator, red rectangles represent the nozzles

velikostí kapek. Avšak distribuce velikostí kapek je odlišná pro různý typ nebo lokalitu srážky (např. konvektivní vs. stratiformní, nebo kontinentální vs. přímořská oblast). Pro porovnání disdrometrů jsme použili oba způsoby vyjádření kinetické energie.

Intenzita srážky a kinetická energie srážky pro každý minutový úsek byla vypočítána z měřené distribuce kapek a jejich rychlostí podle vztahů:

$$I = \left(\frac{\pi}{6}\right) \left(\frac{3,6}{10^3}\right) \left(\frac{1}{At}\right) \sum_{i=1}^x n_i D_i^3 \quad (1)$$

$$KE_R = \left(\frac{\pi}{12}\right) \left(\frac{1}{10^6}\right) \left(\frac{3600}{t}\right) \left(\frac{1}{A}\right) \sum_{i=1}^x n_i D_i^3 V_{D,i} \quad (2)$$

$$KE = \frac{KE_R}{I} \quad (3)$$

kde I je intenzita srážky ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$),
 A měrná plocha laserového paprsku disdrometru (m^2),
 t doba sběru dat (s),
 KE kinetická energie ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$),
 KE_R kinetická energie ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$),
 N počet kapek v kategorii (-),
 D průměr kapky (mm),
 V_D rychlost kapky o průměru D ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

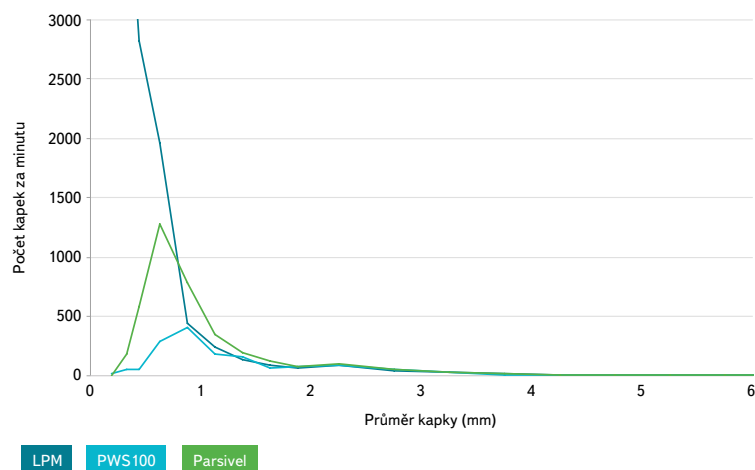
VÝSLEDKY

Průměrné hodnoty intenzity a kinetické energie na jednotlivých pozicích jsou uvedeny v tabulce 1 a znázorněny na obr. 4. Jde vždy o průměr z trojice osmi minutových intervalů (celkem 24 hodnot) měřených pomocí jednotlivých disdrometrů.

Tabulka 1. Průměrné hodnoty pro jednotlivé disdrometry na testovaných pozicích

Table 1. Average values of the kinetic energy and rainfall intensity recorded at the tested positions

Pozice	LPM		Intenzita ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	Parsivel		Intenzita ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	PWS100		Intenzita ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	Srážkoměr ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)
	Ekin ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	Ekin ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$)		Ekin ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	Ekin ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$)		Ekin ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	Ekin ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$)		
1	715	7,7	92	1 247	19,7	66	1 220	17,3	71	
2	804	11,3	71	1 107	17,8	62	1 298	17,5	74	69
3	451	9,6	47	649	16,6	40	833	16,3	51	
4	747	10,6	70	1 073	21,7	51	1 586	18,0	90	
5	1171	13,9	85	1 047	18,9	55	1 651	20,0	82	78
6	630	13,2	48	742	21,0	35	891	19,3	46	50
7	398	12,7	31	388	16,7	23	871	20,2	43	27
8	293	13,2	22	297	15,8	19	441	18,5	24	

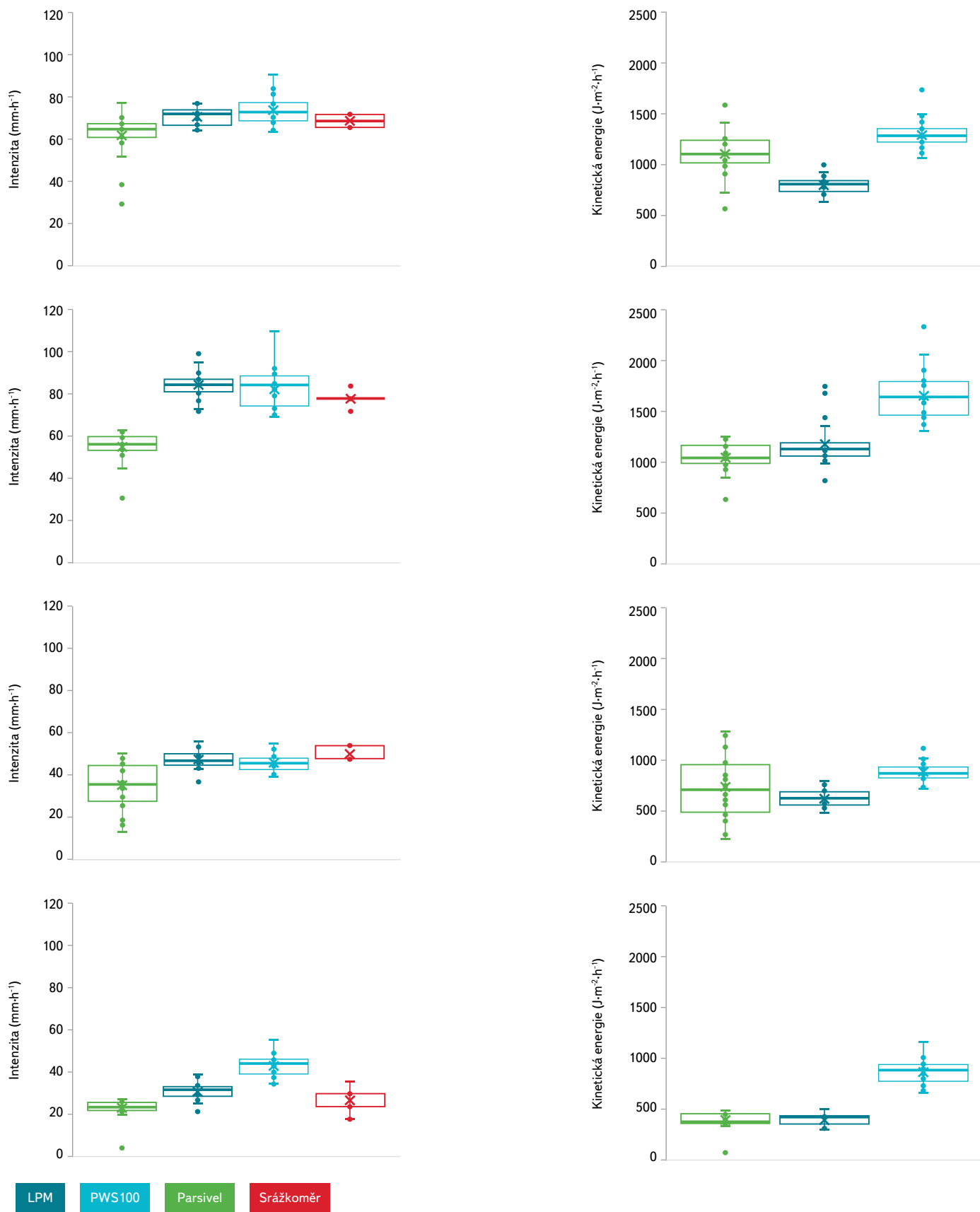


Obr. 3. Distribuce velikosti kapek při intenzitě $62 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ zaznamenané jednotlivými disdrometry

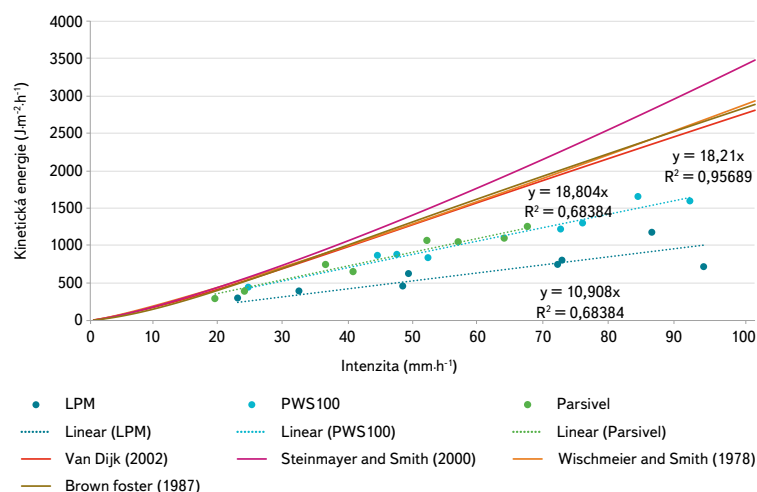
Fig. 3. Drop size distribution at the rainfall intensity of $62 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ as recorded by different disdrometers

Jak bylo uvedeno, kinetická energie je dopočítávána z informací o množství a velikosti dešťových kapek. Z obr. 3 je patrné, že disdrometry detekují různé počty kapek, a to především těch malých. Thies LPM zaznamenává pro malé kategorie mnohem více kapek, než oba ostatní disdrometry. Pro kapky s efektivním průměrem pod $0,5 \text{ mm}$ dokonce minutová množství přesahují $5\,000$ mikrokapek. Pro hodnoty nad 1 mm jsou již počty kapek pro všechny disdrometry obdobné. Mírné rozdíly lze očekávat, protože každý disdrometr má jinou průletovou plochu a jinak uspořádané velikostní třídy. Avšak v relativním měřítku by distribuční funkce měly vypadat podobně.

Disdrometry se v praxi využívají zejména na monitorování intenzity deště. Z porovnání měření disdrometrů a srážkoměru na pozicích s různou intenzitou deště plyne, že testované přístroje udávají srovnatelné výsledky. Přístroje naměřily 106% (LPM), 78% (Parsivel) a 116% (PWS100), hodnoty naměřené pomocí překlopného srážkoměru. V případě měření kinetické energie nebyla nastavena žádná referenční hodnota, ale přístroje byly porovnávány mezi sebou.



Obr. 4. Měřené hodnoty intenzity (vlevo) a kinetické energie deště (vpravo) na vybraných testovaných pozicích pod dešťovým simulátorem
 Fig. 4. Recorded rainfall intensity (left) and rainfall kinetic energy (right) on selected positions



Obr. 5. Závislost měřených hodnot kinetické energie a intenzity srážky; porovnání se čtyřmi publikovanými vztahy mezi intenzitou srážky a kinetickou energií

Fig. 5. Comparison of the observed and empirical relationships between rainfall kinetic energy and intensity

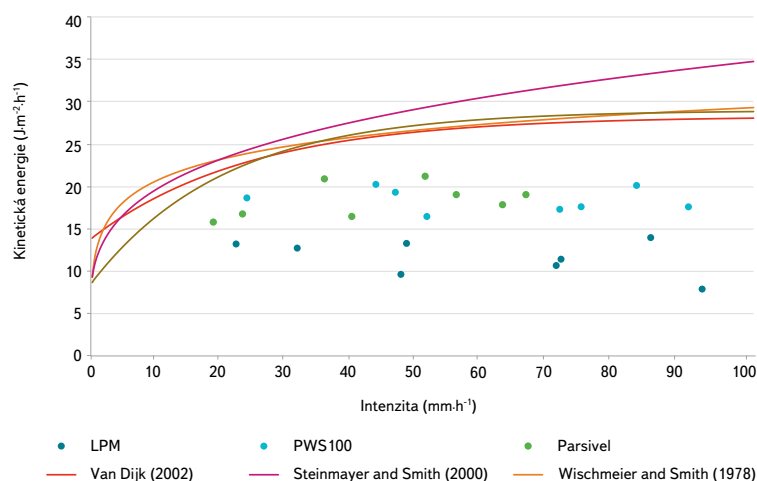
LPM oproti ostatním dvěma přístrojům měří výrazně nižší kinetickou energii, jím naměřené hodnoty odpovídají v průměru 83 % hodnot naměřených Parsivelem, resp. 59 % hodnot naměřených PWS100. Nejvyšší hodnoty měřil PWS100. Parsivel měřil průměrně 74 % hodnot naměřených pomocí PWS100 (obr. 4).

Na obr. 5 je vynesena závislost mezi intenzitou simulované srážky a měřenou kinetickou energií. Body na grafu vyjadřují průměrné měřené hodnoty zachycené třemi disdrometry. Data vykazují lineární závislost. Disdrometry Parsivel a PWS100 mají velice podobný trend se směrnici 18,804 a 18,21 a koeficienty determinace 0,955 a 0,957. LPM vykazuje také lineární závislost s koeficientem determinace 0,683, ale v porovnání s ostatními přístroji nižší směrnici 10,908. Oproti zbývajícím disdrometrům měří LPM výrazně nižší kinetickou energii, a to zejména při vysokých intenzitách.

Na grafu jsou vyneseny i teoretické závislosti mezi intenzitou přirozeného deště a kinetickou energií. Tyto empirické závislosti byly přejaty z literatury [21–24] a jsou běžně využívány pro odhad kinetické energie přirozeného deště i v podmínkách kontinentální Evropy (např. [25, 26]). Z porovnání plyne, že kinetická energie simulovaného deště je nižší než kinetická energie přirozených srážek. Stejná skutečnost je ještě zřetelnější při vnesení kinetické energie na milimetrový úhrn srážky (obr. 6). Zatímco kinetická energie přirozeného deště s intenzitou roste (kapky se zvětšují), v případě simulovaného deště je kinetická energie konstantní. Tedy s proměnlivou intenzitou simulovaného deště se nemění distribuce velikostí kapek ani jejich pádové rychlosti – což je dáno způsobem regulace intenzity deště pro kyvný dešťový simulátor pomocí frekvence kyvů trysek.

DISKUSE

Cílem práce je srovnání rozdílných disdrometrů a jejich schopnost monitorovat uměle generovanou srážku. Není překvapením, že ačkoliv testování probíhalo za pečlivě kontrolovaných podmínek, výsledky měření jednotlivých přístrojů se liší. V literatuře lze dohledat studie, které dokonce ukazují variabilitu měření i při použití stejných typů disdrometrů. Tapiador a kol. [27] monitorovali přírodní srážky pomocí 14 disdrometrů Parsivel umístěných na jedné lokalitě. Variabilita v měřených intenzitách jednotlivých disdrometrů dosahovala až 70 %, což, jak uvádí autoři, mohlo být dáno i prostorovou variabilitou deště, ale také systematickou odchylkou v měření jednotlivými přístroji. Testované



Obr. 6. Závislost kinetické energie přepočtené na milimetr srážky na intenzitě srážky; porovnání se čtyřmi publikovanými vztahy mezi intenzitou srážky a kinetickou energií

Fig. 6. Comparison of the observed and empirical relationships between rainfall kinetic energy per mm of rainfall and rainfall intensity

disdrometry vykazují velmi dobré výsledky při monitorování intenzity umělého deště. Odchyly oproti referenčnímu srážkoměru jsou srovnatelné s měřeními v terénu, kde jsou běžné rozdíly okolo 20 % [11].

Větší odchyly mezi přístroji, a tím i vyšší míra nejistoty jsou pozorovány při vyhodnocení kinetické energie deště. Zejména Thies LMP měří výrazně nižší kinetickou energii oproti ostatním přístrojům. Důvodem je pravděpodobně podhodnocená měřená pádová rychlost kapek, protože množství středních a velkých kapek je srovnatelné s ostatními disdrometry. Množství velmi malých kapek je dokonce násobně vyšší, nicméně nejmenší kapky mají na celkovou kinetickou energii minimální vliv. Měřené velké množství velmi malých kapek bylo pozorováno i v terénních aplikacích, jedno z nabízených vysvětlení spočívá v samotné konstrukci přístroje. Kapky se mohou od částí přístroje rozbít a odrážet před senzorem, který tak nezaznamenává pouze srážku, ale také uměle vznikající mikrokapičky [12].

Parsivel zaznamenává rychlosti kapek velmi blízké jejich terminálním pádovým rychlostem [28], měří nízký počet kapek s menším průměrem než 0,76 mm a naopak velký počet kapek větších než 2,4 mm. Stejně závěry, které mohou vést k nadhodnocení kinetické energie, přináší Angulo-Martínez a Tokay a kol. [29, 30].

Z testování v terénu vyplývá, že PWS100 měří mírně vyšší srážkový úhrn a dobře měří pádové rychlosti kapek [31]. Obdobný trend byl pozorován během našeho experimentu. I během uměle generované srážky PWS100 měřil vyšší intenzitu deště. Měřené pádové rychlosti byly nižší než terminální, ale to je dáno charakteristikou simulovaného deště, při kterém maximálních rychlostí není dosaženo.

Simulovaný dešť má znatelně nižší kinetickou energii než přírodní srážky o shodných intenzitách, k významné odchylce dochází od prahové intenzity přibližně 20 mm·h⁻¹ (obr. 6). Je nutné podotknout, že tento závěr platí jen pro dešťové simulátory s podobnou konstrukcí, jaká byla použita v této studii. Nicméně generování deště pomocí trysek situovaných poměrně blízko k půdnímu povrchu je v erozním výzkumu často používané [32, 33]. Proto je velmi důležité, aby výsledky erozních experimentů prováděných s využitím dešťových simulátorů byly dobře interpretovány. Nelze tvrdit, že simulovaná srážka vyvolá stejný erozní účinek jako přírodní srážka o stejné intenzitě, neboť kinetická energie simulovaného deště je významně nižší. Ke stejným závěrům dospěli také Petřů a Kalibová [34], kteří zdůrazňují nutnost kalibrace vztahu mezi intenzitou a kinetickou energií pro každý simulátor (typ trysky).

ZÁVĚR

Príspevek shrnuje výsledky experimentu s umle generovaným dešťem o niekoľika intenzitách, pri ktorých boli testované a porovnávané tri najčastejšie používané disdrometry. Testované disdrometry boli pomerné spoľahlivé pri monitorovaní intenzity deště. Stanovená kinetická energia deště pomoci jednotlivých disdrometru se však lišila. Zejména v erozních studiích najčastejšie používaný disdrometr Thies LPM meral výrazne nižšiu kinetickú energiu, jej naměřené hodnoty odpovídajú v průměru 78 % hodnot naměřených Parsivelem, resp. 56 % hodnot naměřených PWS100.

Dešť generovaný pomoci tryskového simulátoru má významně nižšiu kinetickú energiu než prirodzený dešť o stejné intenzitě. Rozdíl v kinetické energii je významný pro srážku o intenzitě vyšší než 20 mm.h⁻¹, s rostoucí intenzitou rozdíl dále roste. Toto může znamenat, že experimentálně zjištěné parametry erozních procesů nelze, bez korekce, aplikovat v simulačních modelech erozních procesů v krajině.

Tyto závěry plynou z testování konkrétních disdrometru na jednom tryskovém dešťovém simulátoru, nelze je proto zcela zobecňovat. Nicméně, konstrukce dešťového simulátoru, použité trysky i disdrometry jsou v erozních laboratořích běžně používány, závěry jsou tak relevantní pro významnou část odborné komunity.

Poděkování

Príspevek vznikl za podpory projektu GA17-33751L, FWF I 3049-N29 a SGS 161-1611791A143.

Literatura

- [1] KATHIRAVELU, G., LUCKE, T., and NICHOLS, P. Rain Drop Measurement Techniques: A Review. *Water* [online], 2016, vol. 8, No. 1, p. 29 [vid. 13. září 2018]. ISSN 2073-4441. Dostupné z: doi:10.3390/w8010029
- [2] GILMORE, W.T. *Comparison of rainfall energy and soil erosion parameters from a rainfall simulator and natural rain* [online]. B.m., 2007 [vid. 4. prosinec 2018]. University of Missouri – Columbia. Dostupné z: doi:10.32469/10355/5101
- [3] WANG, L., SHI, Z.H., WANG, J. et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology* [online], 2014, vol. 512, p. 168–176 [vid. 16. červenec 2019]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2014.02.006
- [4] MOUSSOUNI, A., MOUZAI, L., and BOUHADEF, M. *The Effect of Raindrop Kinetic Energy on Soil Erodibility* [online], 2015 [vid. 16. červenec 2019]. Dostupné z: doi:10.5281/ZENODO.1337717
- [5] MAZON, J. and VIÑAS, M. A low-cost experiment for determining raindrop size distribution. *Weather* [online], 2013, vol. 68, No. 2, p. 49–52 [vid. 13. září 2018]. ISSN 00431656. Dostupné z: doi:10.1002/wea.2064
- [6] DE LIMA, J.L.M.P., SILVA, V.P., DE LIMA, M.I.P. et al. Revisiting simple methods to estimate drop size distributions: a novel approach based on infrared thermography. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* [online], 2015, vol. 63, No. 3, p. 220–227 [vid. 13. září 2018]. ISSN 0042-790X. Dostupné z: doi:10.1515/johh-2015-0025
- [7] LIU, X.C., GAO, T.C., and LIUM, L. A comparison of rainfall measurements from multiple instruments. *Atmospheric Measurement Techniques* [online], 2013, vol. 6, No. 7, p. 1585–1595 [vid. 4. prosinec 2018]. ISSN 1867-8548. Dostupné z: doi:10.5194/amt-6-1585-2013
- [8] FIŠER, O., SCHÖNHUBER, M., and PEŠICE, P. First Results of DSD Measurement by Videodistrometer in the Czech Republic in 1998-1999. *Studia Geophysica et Geodaetica* [online], 2002, vol. 46, No. 3, p. 485–505. ISSN 1573-1626. Dostupné z: doi:10.1023/A:1019591002211
- [9] SARKAR, T., DAS, S., and MAITRA, A. Assessment of different raindrop size measuring techniques: Inter-comparison of Doppler radar, impact and optical disdrometer. *Atmospheric Research* [online], 2015, vol. 160, p. 15–27 [vid. 13. září 2018]. ISSN 0169-8095. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosres.2015.03.001
- [10] NAKAYA, K. and TOYODA, Y. Comparison of the compact Doppler radar rain gauge and optical disdrometer. *Journal of Agricultural Meteorology* [online], 2011, p. 673.12 [vid. 13. září 2018]. ISSN 0021-8588. Dostupné z: doi:10.2480/agrmet.673.12
- [11] LANZINGER, E., THEEL, M., and WINDOLPH, H. Rainfall Amount and Intensity Measured by the Thies Laser Precipitation Monitor. In: *TECO-2006, Geneva, Switzerland, 2006*, p. 4–6.
- [12] ANGULO-MARTÍNEZ, M., BEGUERÍA, S., LATORRE, B. et al. Comparison of precipitation measurements by OTT Parsivel2 and Thies LPM optical disdrometers. *Hydrology and Earth System Sciences* [online], 2018, vol. 22, No. 5, p. 2811–2837 [vid. 13. září 2018]. ISSN 1607-7938. Dostupné z: doi:10.5194/hess-22-2811-2018

- [13] BLOEMINK, H.I. and LANZINGER, E. Precipitation type from the Thies disdrometer. In: *Proceedings of the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation, 2005*, p. 4–7.
- [14] ANGULO-MARTÍNEZ, M., BEGUERÍA, S., and KYSELÝ, J. Use of disdrometer data to evaluate the relationship of rainfall kinetic energy and intensity (KE-I). *Science of the Total Environment* [online], 2016, vol. 568, p. 83–94. ISSN 18791026. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2016.05.223
- [15] FRASSON, R.P. de M., DA CUNHA, L.K., and KRAJEWSKI, W.F. Assessment of the Thies optical disdrometer performance. *Atmospheric Research* [online], 2011, vol. 101, No. 1–2, p. 237–255 [vid. 13. září 2018]. ISSN 0169-8095. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosres.2011.02.014
- [16] JOHANNSEN, L., ZAMBON, N., STRAUSS, P. et al. Comparison of three types of laser optical disdrometers under natural rainfall conditions. *Hydrological Sciences Journal (podáno)*, 2019.
- [17] ISERLOH, T., FISTER, W., SEEGER, M. et al. A small portable rainfall simulator for reproducible experiments on soil erosion. *Soil and Tillage Research* [online], 2012, vol. 124, p. 131–137. ISSN 01671987. Dostupné z: doi:10.1016/j.still.2012.05.016
- [18] KAVKA, P. Developing of the laboratory rainfall simulator for testing the technical soil surface protection measures and droplets impact. In: *Proceedings of the XVII ECSMGE-2019*, 2019.
- [19] LABURDA, T. a kol. Využití laboratorního dešťového simulátoru ČVUT v dlouholetém výzkumu eroze půdy. In: *Sborník příspěvků ze semináře Adolfa Patery 2014 na téma „Extrémní hydrologické jevy v povodích“* [online], 2014, s. 97–104. Dostupné z: doi:978-80-02-02574-0
- [20] BRINGI, V.N., CHANDRASEKAR, V., HUBBERT, J. et al. Raindrop Size Distribution in Different Climatic Regimes from Disdrometer and Dual-Polarized Radar Analysis. *Journal of the Atmospheric Sciences* [online], 2003, vol. 60, No. 2, p. 354–365. ISSN 0022-4928. Dostupné z: doi:10.1175/1520-0469(2003)060<0354:RSDIDC>2.0.CO;2
- [21] STEINER, M. and SMITH, J.A. Reflectivity, Rain Rate, and Kinetic Energy Flux Relationships Based on Raindrop Spectra. *Journal of Applied Meteorology* [online], 2000, vol. 39, No. 11, p. 1923–1940 [vid. 10. červenec 2019]. ISSN 0894-8763. Dostupné z: doi:10.1175/1520-0450(2000)039<1923:RRRAKE>2.0.CO;2
- [22] VAN DIJK, A.I.J., BRUIJNZEEL, L., and ROSEWELL, C. Rainfall intensity–kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. *Journal of Hydrology* [online], 2002, vol. 261, No. 1–4, p. 1–23 [vid. 10. červenec 2019]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:10.1016/S0022-1694(02)00020-3
- [23] BROWN, L.C. and FOSTER, G.R. Storm erosivity using idealized intensity distributions. *Transactions of the ASAE, American Society of Agricultural Engineers* [online], 1987, vol. 30, No. 2, p. 379–386 [vid. 10. červenec 2019]. Dostupné z: https://eurekamag.com/research/001/690/001690998.php
- [24] WISCHMEIER, W.H. and SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning [USA]. *United States. Dept. of Agriculture. Agriculture handbook (USA)* [online], 1978 [vid. 14. listopad 2018]. Dostupné z: http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US7904839
- [25] ZUMR, D., JEŘÁBEK, J., KLÍPA, V. et al. Estimates of Tillage and Rainfall Effects on Unsaturated Hydraulic Conductivity in a Small Central European Agricultural Catchment. *Water* [online], 2019, vol. 11, No. 4, p. 740. ISSN 2073-4441. Dostupné z: doi:10.3390/w11040740
- [26] VERSTRAETEN, G., POESEN, J., DEMARÉE, G. et al. Long-term (105 years) variability in rain erosivity as derived from 10-min rainfall depth data for Ukkel (Brussels, Belgium): Implications for assessing soil erosion rates. *Journal of Geophysical Research* [online], 2006, vol. 111, No. D22, p. D22109. ISSN 0148-0227. Dostupné z: doi:10.1029/2006JD007169
- [27] TAPIADOR, F.J., CHECA, R., and DE CASTRO, M. An experiment to measure the spatial variability of rain drop size distribution using sixteen laser disdrometers. *Geophysical Research Letters* [online], 2010, vol. 37, No. 16 [vid. 13. září 2018]. ISSN 00948276. Dostupné z: doi:10.1029/2010GL044120
- [28] FOOTE, G.B., DU TOIT, P.S., FOOTE, G.B. et al. Terminal Velocity of Raindrops Aloft. *Journal of Applied Meteorology* [online], 1969, vol. 8, No. 2, p. 249–253 [vid. 10. červen 2019]. ISSN 0021-8952. Dostupné z: doi:10.1175/1520-0450(1969)008<0249:TVORA>2.0.CO;2
- [29] ANGULO-MARTÍNEZ, M. and BARROS, A. Measurement uncertainty in rainfall kinetic energy and intensity relationships for soil erosion studies: An evaluation using PARSIVEL disdrometers in the Southern Appalachian Mountains. *Geomorphology* [online], 2015, vol. 228, p. 28–40. Dostupné z: doi:10.1016/j.geomorph.2014.07.036
- [30] TOKAY, A., PETERSEN, W.A., GATLIN, P. et al. Comparison of Raindrop Size Distribution Measurements by Collocated Disdrometers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* [online], 2013, vol. 30, No. 8, p. 1672–1690 [vid. 4. prosinec 2018]. ISSN 0739-0572. Dostupné z: doi:10.1175/JTECH-D-12-00163.1
- [31] MONTERO-MARTÍNEZ, G., TORRES-PÉREZ, E.F., and GARCÍA-GARCÍA, F. A comparison of two optical precipitation sensors with different operating principles: The PWS100 and the OAP-2DP. *Atmospheric Research* [online], 2016, vol. 178–179, p. 550–558 [vid. 12. září 2018]. ISSN 0169-8095. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosres.2016.05.007
- [32] DOSTÁL, T., STRAUSS, P., SCHINDEWOLF, M. et al. Comparison of different types of medium scale field rainfall simulators. In: *EGU General Assembly 2015, held 12-17 April, 2015 in Vienna, Austria*, 2015.
- [33] POLYAKOV, V., STONE, J., HOLIFIELD COLLINS, C. et al. Rainfall simulation experiments in the southwestern USA using the Walnut Gulch Rainfall Simulator. *Earth System Science Data* [online], 2018, vol. 10, No. 1, p. 19–26. Dostupné z: doi:10.5194/essd-10-19-2018
- [34] PETRŮ, J. and KALIBOVÁ, J. Measurement and computation of kinetic energy of simulated rainfall in comparison with natural rainfall. *Soil and Water Research* [online], 2018, vol. 13, No. 4, p. 226–233. Dostupné z: doi:10.17221/218/2016-SWR

Autoři

Ing. Martin Neumann¹

✉ martin.neumann@fsv.cvut.cz

Ing. David Zumr, Ph.D.¹

✉ david.zumr@fsv.cvut.cz

Ing. Petr Kavka, Ph.D.¹

✉ petr.kavka@fsv.cvut.cz

Ing. Tomáš Laburda¹

✉ tomas.laburda@fsv.cvut.cz

MSc. Lisbeth Lolk Johannsen²

✉ lisbeth.johannsen@boku.ac.at

Mag. Nives Zambon²

✉ nives.balenovic@boku.ac.at

doc. Dr. Ing. Tomáš Dostál¹

✉ dostal@fsv.cvut.cz

Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Peter Strauss³

✉ peter.strauss@baw.at

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Andreas Klik²

✉ andreas.klik@boku.ac.at

¹České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební

²University of Natural Resources and Life Sciences,
Institute for Soil Physics and Rural Water Management, Rakousko

³Federal Agency for Water Management,
Institute for Land & Water Management Research, Rakousko

Příspěvek prošel lektorským řízením.

CHARACTERIZATION OF AN ARTIFICIALLY GENERATED RAINFALL USED FOR A SOIL EROSION RESEARCH

**NEUMANN, M.¹; ZUMR, D.¹; KAVKA, P.¹;
LABURDA, T.¹; JOHANNSEN, L.L.²; ZAMBON, N.²;
DOSTAL, T.¹; STRAUSS, P.³; KLIK, A.²**

¹Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering

²University of Natural Resources and Life Sciences,
Institute for Soil Physics and Rural Water Management, Austria

³Federal Agency for Water Management,
Institute for Land & Water Management Research, Austria

Keywords: disdrometer – rainfall kinetic energy –
rainfall intensity – rainfall simulator – soil erosion

A rainfall simulator is a common laboratory tool for soil erosion research. Typical objective of the rainfall experiments is the evaluation of various factors on soil erosion processes, such as the effect of rainfall intensity, rainfall duration, soil characteristics, soil management, crop residues on the soil surface, plot's slope and length. The results of the experiments are then upscaled to estimate the erosion processes in the landscape or they serve as the calibration data for the simulation models. Due to the fact that the soil erosion is initiated by the rainfall, it is crucial to keep the simulated rainfall characteristics as close as possible to the natural rainfall. Rainfall intensity is usually easy to control, but the rainfall kinetic energy is the driving force of the initial stage of the erosion. The aim of this study is to evaluate the simulated rainfall characteristics, incl. its drop size distribution and kinetic energy, and compare the simulated rainfall to the natural rainfall. Within a study we also compared three common disdrometers and we show limitation of the disdrometers to monitor the artificially generated rainfall.

The experiments were done with a use of nozzle type rainfall simulator. The rainfall characteristics were monitored by disdrometers LPM (Thies Clima), Parsivel (OTT) and PWS100 (Campbell Sci.), standard raingauge was used as a reference measurement for the intensity monitoring. The intensity, recorded with the disdrometers, was very similar to the rain gauge. In the average it measured 106% (LPM), 79% (Parsivel) and 116% (PWS100) of rain gauge value. There was a large difference between the disdrometers in the measured kinetic energy values. LPM significantly underestimated the kinetic energy compared to the other disdrometers it measured 83% of Parsivel value and 59% of PWS100 value. The highest values were measured with the PWS100. The key conclusion is, that a simulated rainfall with the intensity above 20 mm.h⁻¹, has significantly lower kinetic energy, compared to a natural rainfall with same intensity.