

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta Stavební

Czech Technical University in Prague
Faculty of Civil Engineering



Doc. Ing. Dr. Tomáš Dostál

Využití dešťových simulátorů pro výzkum
srážko-odtokových a erozních procesů

The application of rainfall simulators for rainfall-
runoff and soil erosion processes research

Summary

The professor's lecture deals with the possibility of application of various types of rainfall simulators for the research in the field of rainfall-runoff and soil erosion processes. Rainfall simulator is a technical device, developed to simulate artificial rainfall under well controlled conditions in all situations, which are necessary for research purposes.

The key requirement is, that rainfall simulator is able to mimic natural rainfall as closely as possible. Main considered features are rainfall intensity, spatial homogeneity of rainfall distribution and kinetic energy of raindrops, which is given by their size and falling velocity.

There exist number of technical solutions and designs of rainfall simulators, which differ mainly according to their purpose, size of rained plot, processes control and rain drops generation.

Within the lecture, basic approaches to rainfall simulators construction, their application, and control of the processes will be presented. Following section will be focused on application of rainfall simulators at three significant international and national projects, where these devices were used to help with splash erosion research, with estimation of effect of vegetation to control soil erosion and surface runoff and to determine basic characteristics of surface runoff and infiltration.

Souhrn

Profesorská přednáška se zabývá problematikou a možnostmi využití dešťových simulátorů pro výzkum srážko-odtokových a erozních procesů. Dešťový simulátor je technické zařízení, jehož smyslem je simulovat definovaný déšť požadovaných parametrů za účelem sledování hydrologických, erozních transportních nebo jiných procesů.

Klíčovým požadavkem je, aby byl simulátor schopen v maximální míře napodobit déšť přírodní, co se týče jeho základních charakteristik, kterými jsou zejména intenzita, velikost kapek, jejich pádová rychlost a kinetická energie deště. Velmi důležitá je i prostorová rovnoměrnost pokrytí zadešťované plochy.

Po technické stránce existuje celá řada typů dešťových simulátorů jak co do velikosti zadešťované plochy, jejich určení, umístění až po způsob generování dešťových kapek a ovládání zařízení.

V rámci přednášky bude prezentován přístup k vývoji, kalibraci a využití dešťových simulátorů jako takových. Následně pak i aplikace těchto zařízení ve třech národních a mezinárodních výzkumných projektech, zaměřených na výzkum „splash eroze“, výzkum vlivu vegetace na povrchový odtok a erozní procesy, a obecné sledování vzniku povrchového a podpovrchového odtoku.

Klíčová slova

přívalová srážka, simulátor deště, povrchový odtok, infiltrace, eroze, transport sedimentu

Keywords

Rainfall event, rainfall simulator, surface runoff, soil erosion, sediment transport.

Obsah

1	Úvod	6
2	Typy a využití dešťových simulátorů	7
2.1	Poslání dešťových simulátorů	7
2.2	Základní členění podle funkce a určení	8
2.2.1	Mobilní dešťové simulátory	9
2.2.2	Laboratorní dešťové simulátory	10
2.2.3	Stabilní dešťové simulátory	11
3	Nastavení a kalibrace zařízení	12
3.1	Nastavení charakteristik srážky	14
4	Příklady využití dešťového simulátoru	17
4.1	Výzkum splash erosion	17
4.2	Stanovení ochranného účinku vegetace	22
4.3	Sledování vzniku a charakteristik povrchového a podpovrchového odtoku	28
5	Shrnutí a závěr	31
6	Reference	32
7	Autor	39
7.1	Vzdělání	39
7.2	Praxe	39
7.3	Pedagogická činnost	39
7.3.1	Vyučované předměty	39
7.3.2	Bakalářské a diplomové práce	39
7.3.3	Výchova doktorandů	39
7.4	Hlavní oblasti výzkumu	40
7.5	Hlavní aktuálně řešené projekty	40
7.6	3 vybrané publikace	40

1 Úvod

Výzkum srážko-odtokových vztahů, erozních a transportních procesů a dalších závislostí mezi srážkami a povodím obecně je podobně jako řada dalších terénních výzkumů klíčově závislý na měření srážkových epizod a odezvy prostředí na ně. Takový výzkum je nicméně mimořádně náročný zejména z důvodu časové i pracovní náročnosti. V případě, že se ve sledovaném období nevyskytne srážková událost očekávaných charakteristik, nebo se tato vyskytne v jiných než optimálních počátečních podmínkách prostředí, nebo v jiném období roku, celý výzkum může přijít vniveč. I v případě úspěšného měření lze tímto způsobem získat většinou jen jednotky měřených událostí ročně.

Možnou cestou k zajištění dostatku dat pro výzkum, popis jevu a procesů nebo odvození matematického modelu může být extenzifikace celého experimentu, jak bylo provedeno například v USA na přelomu 60.tých a 70.tých let 20. století, kdy pro odvození Univerzální rovnice ztráty půdy (USLE) (Wischmeyer a Smith, 1978) bylo po celém území USA založeno několik stovek experimentálních lokalit a během několika let bylo zachyceno více než 10.000 srážko-odtokových událostí. Tím byl získán dostatečný datový soubor pro robustní statistické analýzy. Každá z experimentálních lokalit nicméně zaznamenala každý rok žádnou až nejvýše 5 relevantních srážkových událostí. Proto byla následná revize Univerzální rovnice ztráty půdy (RUSLE) (Renard et al., 1997) v 90.tých letech 20. století již prováděna na datových souborech pořízených s využitím dešťových simulátorů.

Možností efektivnějšího a intenzivnějšího výzkumu je aplikace simulátoru deště – zařízení, vyvinutého k tomu, aby co nejvěrněji simulovalo přirozený déšť požadovaných vlastností.

Aplikace takového zařízení ve zvoleném čase, lokalitě a počátečních i okrajových podmínkách umožní získání velkého množství experimentálních dat relativně efektivně, v krátkém časovém úseku a za definovaných podmínek.

Dešťové simulátory se liší podle svého poslání, podle funkce, velikosti zadešťované plochy, způsobu tvorby dešťových kapek, umístění v laboratoři nebo přímo v terénu a podle mnoha dalších kritérií. V následujících kapitolách budou představeny hlavní typy dešťových simulátorů a následně pak bude prezentováno i několik

příkladů využití dešťových simulátorů k výzkumu srážko-odtokových a erozních procesů.

2 Typy a využití dešťových simulátorů

2.1 Poslání dešťových simulátorů

Dešťový simulátor se uplatní s velkou výhodou všude tam, kde je třeba sledovat působení srážkové události daných charakteristik na jinou složku prostředí. Tam, kde je třeba vyvolat srážkou událost daných charakteristik v danou chvíli na dané lokalitě. Podle cíle experimentu a sledovaných veličin (a pochopitelně i podle možností pracoviště) je nicméně nutné volit vhodný typ zařízení a způsob jeho nasazení.

První dešťové simulátory byly navrženy v USA v souvislosti s výzkumem vodní eroze půdy a měření infiltračních charakteristik různých půd již ve 30-tých letech 20. století (Nichols and Sexton, 1932). Od let 50-tých byly již dešťové simulátory standardním výzkumným vybavením jak pro terénní tak i laboratorní experimenty v celém světě. Po celém světě se objevuje celá řada různých typů simulátorů navržených a sestavených různými týmy, různých velikostí a principů a specifických k různým typům vědeckých experimentů. Vývoj dešťových simulátorů od té doby reflektuje nové poznatky, metody i přístupy a je směřován novými požadavky zejména v oblasti meteorologie, klimatologie, hydrologie i interdisciplinárních přístupů. Původní rozprašovače byly nahrazeny specifickými kalibrovanými tryskami, schopnými poskytovat přesné parametry dešťových kapek při respektování charakteru přírodních dešťů co se týče velikosti kapek, jejich pádové rychlosti, kinetické energie deště i celkové intenzity a homogenity plošného pokrytí (Gunn and Kinzer, 1949). Navíc se do prostých simulací inkorporuje výzkum vlivu větru (Fister et al., 2012), nebo kyselých dešťů (Kavain et al., 2019) a zadešťovaná plocha narostla z původního méně než 1 m² v některých případech až na stovky m² (NIED, 2015). Rychlý vývoj monitoringu charakteristik přírodních dešťů – především laserové a video-disdrometry – vedl k širšímu a podrobnějšímu monitoringu přírodních dešťů a následně u dešťových simulátorů k jejich dalšímu ladění tak, aby se původním přirozeným dešťům co nejvíce blížily zejména, co se týče velikostního spektra dešťových kapek a jejich kinetické energie (e.g. Gires et al., 2020, Zumr et al., 2020). Nyní složité sestavy dešťových simulátorů umožňují sledovat i tak komplikované procesy jako je vliv

opakovaného promrznání půdního profilu na erozi a vznik povrchového odtoku (Edwards and Burney, 1987) nebo efekt vegetačního krytu na srážko-odtokové a erozní procesy (Davidová et al., 2015).

V současnosti se vývoj dešťových simulátorů zaměřuje na plně automatizované systémy a zařízení, plně kontrolující a zaznamenávající veškeré důležité veličiny. Detailní počítačová kontrola umožňuje generovat skutečně kvazi-přírodní srážky včetně simulace událostí s proměnnou intenzitou a kinetickou energií, napodobující skutečné (dokumentované) srážkové události (Vaezi et al., 2020). Současně tento pokrok umožňuje i vyšší efektivitu práce díky nezbytnosti menšího počtu výzkumných pracovníků během experimentu. Moderní technologie se tak dostávají do popředí i v tomto vědním odvětví a zdá se, že podmiňují rychlý rozvoj poznání v tomto směru. Neměli bychom ale zapomínat na výrok Meyera, který již v roce 1988 prohlásil „Vědci by se měli vyvarovat přehnaného zapojení do vývoje a zdokonalování nových typů dešťových simulátorů, díky kterému by jim pak nezbyl čas na vlastní experimenty. Cílem výzkumu s dešťovými simulátory by mělo být zajištění co možná přesných, korektních a užitečných dat a nikoliv sestavení dokonalého simulátoru“.

2.2 Základní členění podle funkce a určení

Návrh jednotlivých dešťových simulátorů se liší v závislosti na velikosti a tvaru zadešťované plochy, na způsobu generování dešťových kapek, podle jejich mobility a v podstatě i podle účelu za kterými bylo dané zařízení primárně vyvinuto. Technický koncept rovněž zohledňuje i různé způsoby řízení a ovládání simulátoru od triviálních, mechanicky a plně manuálně ovládaných a kontrolovaných až po plně automatické systémy řízené počítačem.

Rozhodnutí o volbě ideálního zařízení není nikterak lehké, protože obě extrémní alternativy mají svá pro i proti. Klíčovým pro rozhodování pak bývá, jaké procesy a veličiny je během experimentů třeba sledovat, s jakou přesností a v jakém časovém i prostorovém měřítku a rovněž dostupné finanční i lidské zdroje. Hlavní kritéria, která je třeba při pořízení dešťového simulátoru brát v úvahu zpravidla jsou:

- Velikost a tvar zadešťované plochy
- Potenciální mobilita zařízení
- Metoda generování deště

2.2.1 Mobilní dešťové simulátory

Mobilní dešťové simulátory se používají zejména v případě experimentů, které je nezbytné provádět přímo na zkoumané lokalitě, v přírodních podmínkách, na rostlém půdním profilu nebo s přirozenou vegetací. Tato zařízení jsou na lokalitu transportována technicky v nejrůznějších podobách. Zařízení jsou velmi různá, co se týče velikosti i způsobu tvorby dešťových kapek, stejně jako ovládání. Nejběžnější jsou z tohoto pohledu simulátory tryskové (Cerdà, 1998, Bogunovic et al., 2020). Malé přenosné simulátory o zadešťované ploše do 1 m² (Iserloh et al. 2013) se používají nejčastěji pro sledování infiltrace srážky do půdy, počátku vzniku povrchového odtoku nebo na monitoring „splash eroze“ – rozbití půdních agregátů dešťovými kapkami. Díky své lehké konstrukci mohou rovněž být využity na strmých svazích a v těžko přístupných místech, kam mohou být doneseny (Rodrigo-Comino et al. 2016).

Naopak větší mobilní dešťové simulátory jsou používány nejčastěji v lokalitách s mírnějšími sklony (typické pro běžné zemědělské pozemky) a sledují se s jejich pomocí procesy vzniku a průběhu povrchového odtoku, ztráty a transport půdních částic erozí, rozvoj rýhové eroze, rychlost povrchového odtoku a další jevy (Strauss et al. 2000).

Z hlediska technické konstrukce jsou malé dešťové simulátory převáženy většinou v plně rozloženém stavu, zatímco zařízení větší existují ve velkém množství různých modifikací a stupňů rozložení pro transport.

Pokud je plánována komplexnější terénní experimentální kampaň s větším počtem experimentů, zásadní je dobré plánování a zajištění všech nutných zdrojů. Klíčové je zajištění energie (pokud není k dispozici připojení k síti, je nezbytné zajištění baterií nebo vlastního generátoru), a dostatečného množství vody v kvalitě odpovídající plánovanému experimentu (běžná voda, podzemní voda nebo deionizovaná voda) – pro malý simulátor postačí cca 100 – 200 l, pro celodenní provoz většího dešťového simulátoru může být zapotřebí i více než 12 m³ vody. Z technického pohledu je třeba zajistit i takové podmínky jako je ochrana zadešťované plochy před přirozeným deštěm v případě nestálého počasí nebo ochrana před větrem, který

by ovlivnil prostorovou rovnoměrnost zadeštění experimentální plochy. Jen těžko lze ovlivnit počáteční vlhkost půdního profilu nebo vývoj vegetace na lokalitě.

2.2.2 Laboratorní dešťové simulátory

Laboratorní simulátory jsou vynikajícím předstupněm pro terénní zařízení často s cílem předem otestovat návrh experimentu nebo sledovat jevy a procesy, které nejsou přímo závislé na přírodních podmínkách a prostředí.

Největším jejich omezením je provádění experimentů na uměle připraveném půdním vzorku obvykle malé hloubky, který navíc nerespektuje postavení původních půdních horizontů a navíc postrádá biologickou aktivitu. Na druhou stranu, provoz těchto zařízení není nijak ovlivněn počasím a klimatickými parametry a nastavení počátečních podmínek půdního vzorku je mnohem jednodušší. Průběh experimentů je tak možno mnohem lépe kontrolovat. V laboratorních podmínkách je rovněž možné snadno experimenty opakovat ve větších počtech replikací při dodržení konstantních podmínek, což poskytuje mnohem cennější výsledky z hlediska možnosti jejich statistického vyhodnocení a spolehlivosti.

Laboratorní simulátory jsou velmi vhodné pro testování různých scénářů, sledování a replikace experimentů na různých sklonech svahů, při různých intenzitách deště nebo aplikaci různých ochranných opatření (Luk, 1977; Riezebos and Seyhan, 1977). Běžně se využívají jak tryskové, tak gravitační kapkové simulátory. Příkladem velmi malého demonstračního dešťového simulátoru na principu gravitační tvorby dešťových kapek obvykle pro účely sledování infiltrace vody do půdy může být Obrázek 1



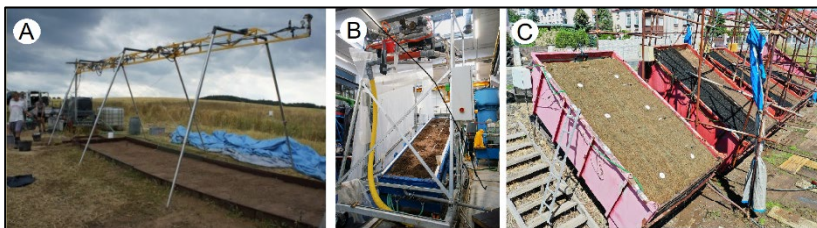
Obrázek 1 - Malý dešťový simulátor KAMPHORST firmy Eijkelkamp

2.2.3 Stabilní dešťové simulátory

Stabilní simulátory reprezentují velmi specifický typ zařízení vzniklý kombinací terénních a laboratorních přístrojů. Obvykle se odlišují tím, že experimentální plochy jsou zpravidla umístěny v exteriéru z důvodu velikosti nebo nutnosti zajištění působení přírodních činitelů, na druhou stranu ale simulátor není třeba přesouvat na jiná místa. Déšť je proto na plochy aplikován opakovaně po delší časové období podle předem připraveného plánu.

Výhodou těchto zařízení může být přirozené oživení půdy, působení přírodních činitelů nebo normální vývoj vegetace v běžných podmínkách, stejně jako nutnost menšího počtu obsluhujících pracovníků. Všechny experimenty probíhají v identickém módu, protože mezi nimi nedochází k žádným přesunům nebo manipulacím s tryskami, regulací apod.

Příklady všech tří základních typů dešťových simulátorů, používaných na pracovišti katedry Hydromeliorací a krajinného inženýrství FSv CVUT v Praze jsou zachyceny na Obrázek 2.



Obrázek 2 – Příklady různých typů dešťových simulátorů: a) polní (mobilní) b) laboratorní c) stabilní experimentální plochy (foto a) M. Neumann, b) c) T. Laburda)

3 Nastavení a kalibrace zařízení

Cílem dešťových simulátorů je reprodukovat co nejdříve přirozenou srážku v o největším počtu jejích parametrů. Nicméně, dokonalé napodobení přírodních procesů není technicky možné (například protože pádová rychlost kapky vychází z délky jejího volného pádu. Ta je v případě simulátorů vždy limitována a rychlost udělená kapkám tlakem na trysce ovlivňuje nepřírodně jejich velikostní spektrum), je zásadní požadovanou vlastností simulátorů znalost počátečních a okrajových podmínek experimentu a jejich opakovatelnost s vyrovnanými výsledky (Iserloh et al., 2012). Proto je nezbytné monitorovat velikostní spektrum generovaných kapek, jejich maximální pádovou rychlost a kinetickou energii a jako klíčovou veličinu – celkovou intenzitu deště. Rozpětí i vyrovnanost uvedených parametrů, při automaticky předpokládané prostorové homogenitě zadeštění experimentální plochy, je závislé na typu simulátoru, typu trysek a nastavení (regulaci) celého systému. Z tohoto pohledu existují dva základní přístupy k tvorbě kapek: systémy, kde je kapka tvořena s využitím uměle vytvořeného tlaku na trysce (tryskové systémy) a systémy gravitační, kde kapka vzniká bez působení vyvolaného tlaku. Různé typy simulátorů podle způsobu tvorby dešťové kapky jsou patrné na Obrázku 3.

Mezi nejjednodušší a současně nejstarší typy dešťových simulátorů z pohledu způsobu tvorby kapky patří gravitační simulátory, které tvoří kapku výhradně působením atmosférického (případně hydrostatického) tlaku nad výtokovým otvorem (kapilárou, trubičkou). Kapky jsou tvořeny na konci výtokových trubiček/ otvorů, což zajišťuje velmi vyrovnanou a stálou velikost produkovaných

kapek. Jejich velikost je funkcí velikosti a tvaru výtokových otvorů/trubiček. Díky jejich designu a uspořádání, nejsou tyto simulátory vhodné pro větší zadešťované plochy. Jejich výhodou na jedné straně je, že dokáží vytvořit velké kapky, nevýhodou z toho vyplývající ale je rovnoměrnost kapek s minimální velikostní variabilitou. Kapky navíc dopadají stále na stejná místa. Jelikož kapky padají pouze gravitačně, jejich pádová rychlost odpovídá výšce celého zařízení. Výsledné pádové rychlosti jsou proto téměř vždy nižší než u přirozeného deště – s výjimkou velmi vysokých laboratorních (halových) zařízení. Pro dosažení pádových rychlostí blízkých přírodním, je nezbytné dosahovat výšky zařízení kolem 10 m, což je pro většinu institucí značně limitující. Na druhou stranu, výhodou tohoto typu zařízení je velká vyrovnanost velikosti kapek, pokud je toto možno při experimentu využít – jedná se například o studium vlivu dopadajících kapek na destrukci půdních agregátů nebo kompakci půdního povrchu.

V případě použití zařízení s využitím generování kapek za použití tlaku (tryskové simulátory), kapky jsou tvořeny pomocí nejrůznějších typů trysek. Trysky se liší jejich konstrukcí, strukturou a tvarem. Výhodou tohoto typu zařízení je, že základním parametrem je tlak vody na trysce, který je možno poměrně jednoduše měřit a upravovat a tím ovlivňovat jak průtok, tak velikost kapek, jejich spektrum i pádovou rychlost. Pevně umístěné trysky mohou aplikovat srážku buď konstantně, nebo přerušovaně. Přerušovaný režim je možné dosáhnout buď přerušováním průtoku vody pomocí solenoidových ventilů, nebo zakrýváním výtoků trysek například pomocí rotujících disků s předem naprogramovanou rychlostí otáčení vzhledem k velikosti otevřené výseče. Zadešťovaná plocha může být zvětšena umístěním trysek na rotující rameno, pracující na podobném principu jako závlahový postřikovač.

Některé simulátory využívají principu kombinace pevného a přerušovaného provozu pomocí oscilujících trysek. Výhodou tohoto systému, kdy trysky jsou připevněny na potrubí, které se střídavým pohybem pootáčí podél své podélné osy a prochází nad výřezem ve sběrném kontejneru umístěném pod nimi je to, že nedochází ke kolísání tlaku, což zajišťuje stabilní provoz, intenzitu a hlavně konstantní spektrum dešťových kapek. Zpravidla je rovněž dosahování větších kapek a vyšších hodnot kinetické energie dopadajících kapek díky jejich větší rychlosti, kterou jim uděluje kmitající tryska. Intenzita deště je pak dána frekvencí oscilace a tedy frekvencí kmitů trysky nad otvorem ve sběrné nádobě. Tento typ

zařízení obsahuje pohyblivé části a programovatelné (počítačem řízené) spojky a převodovky, trubky s tryskami se pohybují v ložiscích a mezi motory a tryskou musí existovat převodová skříň. Proto je zařízení náchylnější k poruchám a náročnější na údržbu.

Obecnou výhodou tryskových simulátorů je mimo jiné skutečnost, že rychlost kapky je jí udělena tlakem na ústí trysky a odpadá tak nutnost mimořádně vysokého zařízení jako u gravitačních simulátorů. Jelikož je ale velikost kapek funkcí tlaku na trysce je vyladění simulátorů na požadované hodnoty blízké charakteru přírodního deště velmi složitou a komplexní úlohou (Hudson, 1993).



Obrázek 3 – příklady různých typů simulátorů podle způsobu tvorby kapek a) gravitační kapkový b) tryskový c) rotační diskový (foto T. Iserloh)

3.1 Nastavení charakteristik srážky

Simulátory deště by měly co nejlépe napodobovat přirozený déšť. Aby bylo možno prohlásit generovanou srážkou za shodnou nebo alespoň co nejvíce podobnou přirozené, je nezbytné monitorovat a nastavit především následující parametry:

- Prostorová homogenita srážky v rámci zadešťované plochy
- Požadovaná intenzita deště
- Kinetická energie deště (jako funkce velikosti kapek a jejich pádové rychlosti)

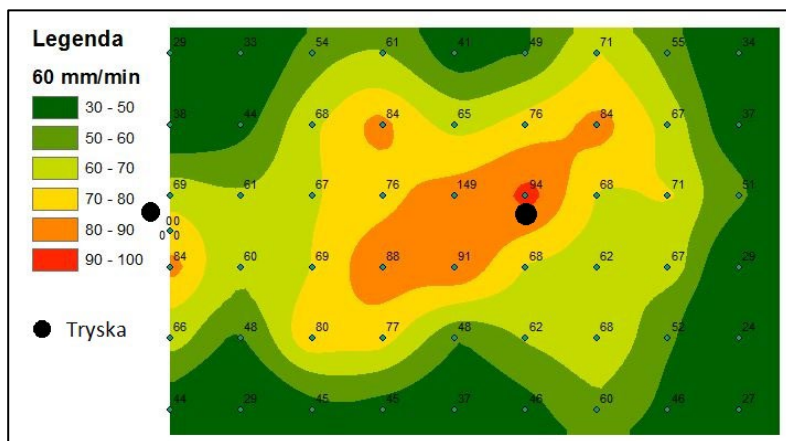
V případě simulátorů deště jsou uvedené parametry zpravidla závislé na kombinaci typu trysek, průtoku, tlaku v systému a na tryskách a pádové výšce kapek (= výšce konstrukce simulátoru).

Prostorová rovnoměrnost zadeštění je klíčovým výchozím parametrem, který podmiňuje provádění jakýchkoliv bilancí. Prostorovou rovnoměrnost je třeba testovat u každého zařízení a při každé změně tlaku v systému, změně výšky konstrukce nebo přestavení trysek. Nejspolehlivějším a přitom nejjednodušším

způsobem je zachycování vody během umělé srážky do pravidelné sítě měrných nádob na postříkované ploše. Doba experimentu musí odpovídat intenzitě deště tak, aby v nádobách bylo zachyceno reprezentativní množství vody (Obrázek 6) Rovnoměrnost prostorového rozložení srážky se nejčastěji vyjadřuje pomocí Christiansenova koeficientu uniformity (Christiansen, 1942) ve tvaru:

$$C_u = 100 \left[1 - \frac{\sum |X_i - X|}{n X_{prum}} \right]$$

Kde C_u je Christiansenův koeficient uniformity; n je počet měření; X je průměrná zaznamenaná hloubka (objem vody); X je množství vody zachycené v každé z měřených nádob.



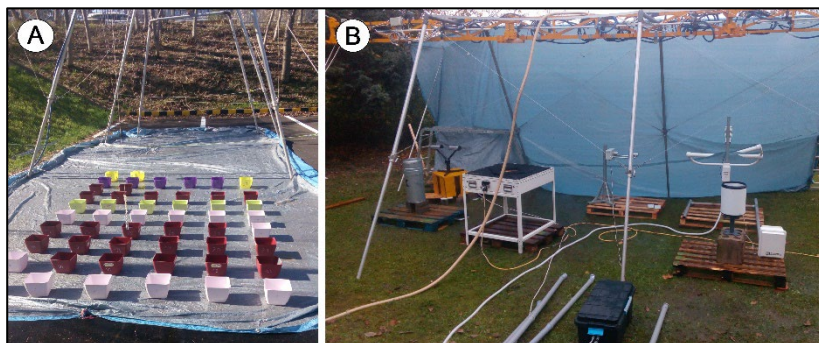
Obrázek 4 – příklad nerovnoměrného pokrytí experimentální plochy srážkou díky příliš nízkému tlaku

Příliš nízký tlak na trysce může vytvořit velké kapky, s vysokou kinetickou energií, odpovídající přivalové srážce, ale při nízkém osazení konstrukce nad terénem může způsobit nedostatečné vykrytí okrajových částí experimentální plochy (viz Obrázek 4)

Pro sledování erozní účinnosti deště (klíčový parametr pro sledování erozních procesů) je velmi vhodné kromě rozložení prostorové rovnoměrnosti sledovat i kinetickou energii deště. Toho lze nejnáze a současně nejpřesněji dosáhnout pomocí moderních

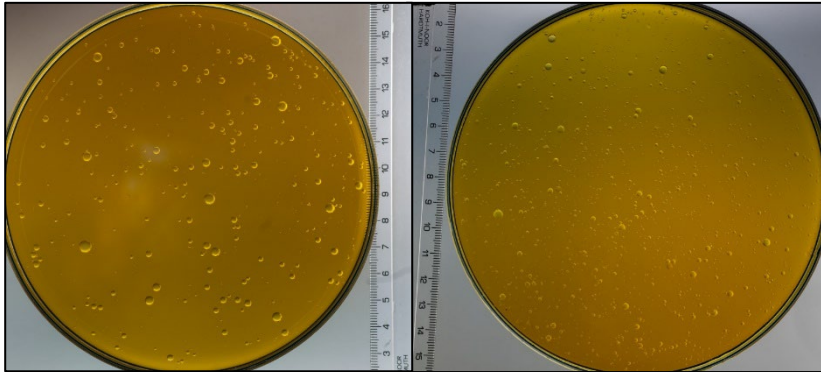
laserových disdrometrů (Johannsen et al. 2020) (viz Obrázek 6), nebo zachycením kapek do oleje nebo mouky (Kahiravel et al. 2016), jak ukazuje Obrázek 6.

Průměrná intenzita srážky na experimentální ploše může pak být vypočtena na základě testu uniformity. Přesnější metoda spočívá v zachycení srážky na celé experimentální ploše pomocí nepropustné folie, jak ukazuje například Obrázek 5. Důležitým požadavkem je udržení pokud možno konstantního tlaku v systému, aby byla udržena prostorová uniformita a současně velikost kapek. Intenzita je pak řízena dobou přerušení výtoku tryskou respektive četností kyvů u pohyblivého systému.



Obrázek 5 - a) měření prostorové rovnoměrnosti deště b) měření kinetické energie deště pomocí různých typů disdrometrů (foto M. Neumann)

Po kalibraci zařízení (optimalizace tlaku, výšky, průtoku) z hlediska dosažení správné kinetické energie deště v závislosti na velikosti kapek a nezbytné rovnoměrnosti postřiku, je třeba i během terénních experimentů opakovaně měřit a zaznamenávat tlak v systému a i během jedné kampaně kontrolně měřit průtok vody jednotlivými tryskami (například jednoduchou objemovou/váhovou) metodou zachycení průtoku tryskou do nádoby po zvolený časový interval).



Obrázek 6 – Zachycení kapek vody do vrstvy oleje

4 Příklady využití dešťového simulátoru

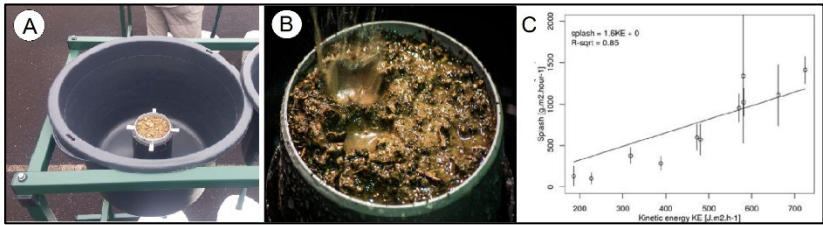
4.1 Výzkum splash erosion

Splash eroze vyjadřuje iniciální stadium eroze, spočívající v rozbití půdních agregátů dopadající vodní kapkou. Eroze obecně je závislá jednak na charakteristikách srážky a jednak na vlastnostech půdy. Přívalová srážka, charakterizovaná mimo jiné velkou intenzitou, dopadem velkých kapek s vysokou kinetickou energií způsobí rozpad půdních agregátů na menší částičky, které jsou následně odneseny vyvolaným povrchovým odtokem. V případě, že buď nedojde ke vzniku povrchového odtoku, nebo nejsou rozbity půdní agregáty, vznik eroze je značně omezen. Proto jsme v letech 2018 – 2020 prováděli v rámci společného Česko – Rakouského projektu GAČR – FWF výzkum splash eroze, jehož cílem bylo jednak sledovat chování různých typů půd a jejich schopnost uchovat si strukturu i během intenzivní srážky a jednak porovnat různé typy disdrometrů pro měření kinetické energie srážek.

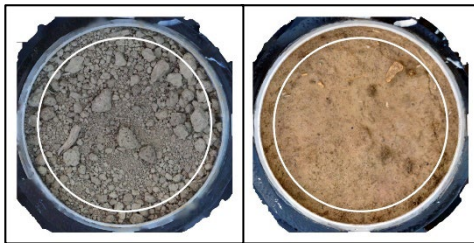
Bez optických nebo laserových disdrometrů v současnosti v podstatě nelze spolehlivě stanovit kinetickou energii deště. I když těchto přístrojů přibývá, dostupných dat stále není dostatek (Johannsen et al., 2020).

Experimenty zabývající se sledováním splash eroze zpravidla využívají kalibrované splas-cups, naplněné testovanou zemínou, které jsou následně vystaveny srážce, a sleduje se, kolik půdních částic je kapkami z nádoby vyhozeno ven. Velmi efektivně se k tomu účelu využívají právě dešťové simulátory, kde je možno v relativně krátké době vytvořit velké množství opakování při stejných podmínkách a vzniklé datové soubory jsou pak velmi robustní, vyrovnané a tedy i cenné (Fernández-Raga et al., 2019). Současně s tím se sledují změny povrchu půdy, které naznačují jednak sedání a jednak změnu drsnosti povrchu a to většinou pomocí přesné fotogrammetrie (Vinci et al., 2015; Beczek et al., 2020). Z obou těchto parametrů lze usuzovat na vlastnosti testovaných půd, případně na míru jejich degradace.

Pro testování byl zvolena půda sprašová. Experimentální setup sestával ze sady splash-cupů umístěných ve sběrných nádobách, které byly umístěny pod laboratorní dešťový simulátor, kde byly vystaveny standardizované, dobře definované přívalové srážce (Zumr et al., 2020). Před, během i po experimentu byly kromě toho pořizovány snímky povrchu vzorku půdy jednak normální a jednak rychloběžnou kamerou, aby byla dokumentována jak splash eroze, tak kompakce povrchu půdy (Obrázek 9). Změna drsnosti povrchu půdy před srážkou a po ní je velmi dobře patrná na Obrázek 10. Experimenty byly prováděny se srážkou o intenzitě $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. Odpovídající množství vystřelených (splash) částic se pohyboval mezi 10 a $1500 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Mezi množstvím vyhozených půdních částic a kinetickou energií deště byl pozorován lineární vztah. Zjištěna nicméně byla velká variabilita splash eroze mezi jednotlivými vzorky, která byla následně vysvětlována variabilitou mikrotopografie půdního povrchu, která může zejména v iniciálních fázích ovlivnit směr vyhození půdních částic.



Obrázek 8 - a) splash cup sběrná nádoba; b) detail dopadu dešťové kapky na povrch půdy (foto T. Laburda), c) závislost splash eroze na kinetické energii deště



Obrázek 7 – změna drsnosti povrchu půdy před a po srážce

V průběhu experimentů bylo nicméně zjištěno, že ne všechny disdrometry poskytují zcela identická data. Proto byl proveden společný experiment za účasti ÚFA AV ČR, ČVUT v Praze, BOKU Wien a BAW Petzenkirchen, kdy bylo soustředěno celkem 5 různých typů laserových disdrometrů (značky Ott, Parcival, Thies, Campbell) resp. videodisdrometr. Tato zařízení pak byla umístěna pod dešťový simulátor. Jejich pozice byly periodicky střídány tak aby každé ze zařízení měřilo na všech 5 místech – viz Obrázek 9.



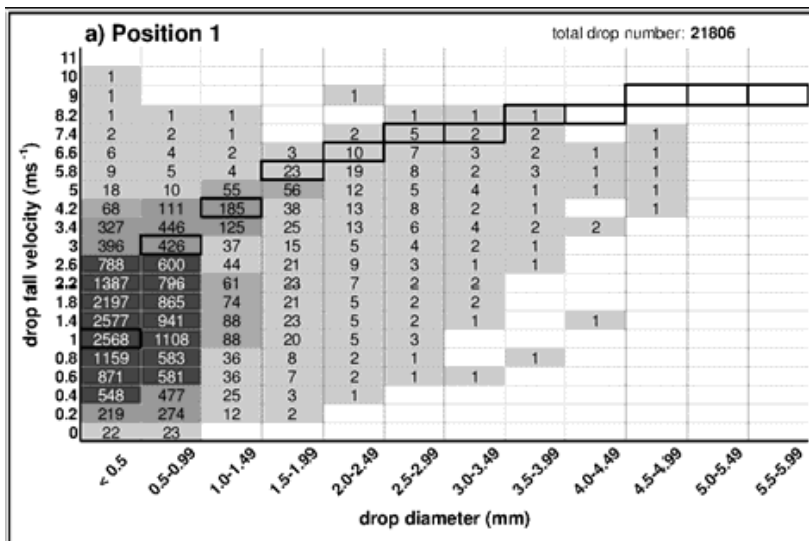
Obrázek 9 – umístění disdrometrů pod dešťový simulátor při jejich porovnání

Experiment prokázal, že jednotlivá zařízení bohužel nejsou zcela srovnatelná a vykazují mezi sebou určité rozdíly v počtech zachycených kapek, v jejich velikostech a dokonce i v celkovém změněném úhrnu srážky, který byl kontrolně měřen i kumulativní metodou.

Obrázek 10 a Obrázek 11 ukazují jednak detail laserového disdrometru Thies a záznam z měření který ukazuje počty kapek v jednotlivých velikostních kategoriích a kategoriích pádové rychlosti. Silně orámované buňky označují pole, kde by přírodní srážka měla mít nejvyšší hodnoty. Naměřený průběh tak ukazuje ne zcela správné nastavení dešťového simulátoru, který produkuje velké množství malých kapek s nízkou kinetickou energií a naopak nedostatečný počet kapek velkých. To by bylo možno změnit například snížením tlaku na tryskách, čímž by ale jednak došlo ke ztrátě prostorové homogenity postřiku a jednak by poklesla pádová rychlost kapek.



Obrázek 10 – detail disdrometru Thies



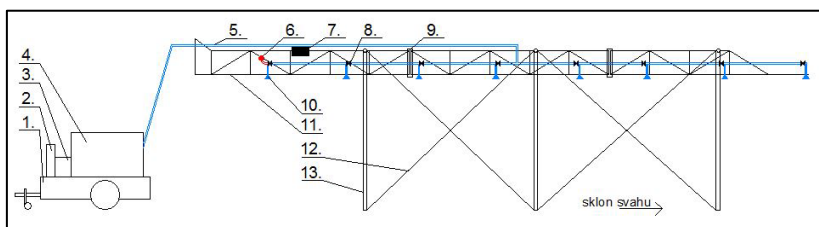
Obrázek 11 – příklad záznamu z disdrometru Thies – počty kapek dané velikosti a pádové rychlosti

4.2 Stanovení ochranného účinku vegetace

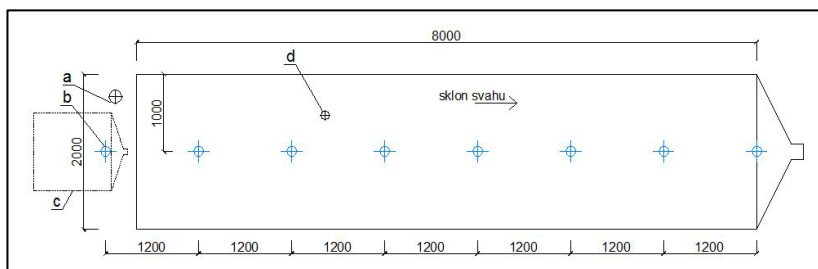
Vliv vegetace obecně a zejména polních plodin na vznik povrchového odtoku a erozních procesů je tématem velmi často diskutovaným i studovaným. Pro skutečně relevantní výzkum je nicméně zapotřebí získat experimentální data – což je v tomto oboru mimořádně náročné. V rámci univerzální rovnice ztráty půdy USLE (Wischmeier and Smith, 1978) je zahrnut faktor ochranného vlivu vegetace C, který definuje poměr mezi ztrátou půdy na experimentální ploše s posuzovanou plodinou ke stejné ploše, udržované jako kypřený úhor. Hodnota faktoru popisuje, do jaké míry vegetace v jejím momentálním vývojovém stavu hrání půdu před dopadem dešťových kapek, splash efektem a následným povrchovým odtokem. Pro praktické úlohy v inženýrské, hydrologické nebo zemědělské praxi jsou hodnoty C faktoru obvykle přebírány z manuálů a katalogů, platných pro jednotlivé země. Původní hodnoty byly nicméně odvozeny na experimentech prováděných na experimentálních plochách v USA v době odvození USLE (1965) a neodrážejí proto jednak půdní a klimatické podmínky střední Evropa a jednak současné plodiny ani používané technologie a agrotechniky. Proto jsme se v letech 2014 – 2017 účastnili národního projektu NAZV, zaměřeného na aktualizaci hodnot faktoru ochranného vlivu vegetace pro současné podmínky. Projekt byl postaven na aplikaci terénního dešťového simulátoru a realizaci velkého počtu terénních experimentů na různých plodinách a jejich vývojových fázích.

Využit byl terénní dešťový simulátor se zadešťovanou plochou 8 x 2 m, 8 tryskami FullJet WSG40 (viz Obrázek 12 a Obrázek 13). Pro experimenty byla na základě analýzy přívalových srážek v ČR a současně z důvodů metodických zvolena srážka intenzity $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, pro niž byla pomocí disdrometru naměřena kinetická energie $KE = 0.14 \text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$. Experimentální plochy byly založeny ve stejném sklonu 9 % jako Wischmeyerem v roce 1965, aby výsledky byly vzájemně kompatibilní a to na pozemku s půdou Kambizem, jakožto nejrozšířenějším typem půdy v ČR. Každá ze zvolených plodin byla zadeštěna 3 x během své vegetační sezony v reprezentativních fázích jejího vývoje. Každý experiment předpokládal dešť trvání 30 minut od detekovaného počátku povrchového odtoku („suchá simulace“), následně byla 15 minut přestávka na ustálení podmínek a opakovala se srážka 30 minut („mokrý simulace“), která zpravidla probíhala v již ustálených podmínkách. Snahou bylo simulace na ploše provádět v době nejméně 3 dny bez přírodních srážek, aby půda byla přirozeně

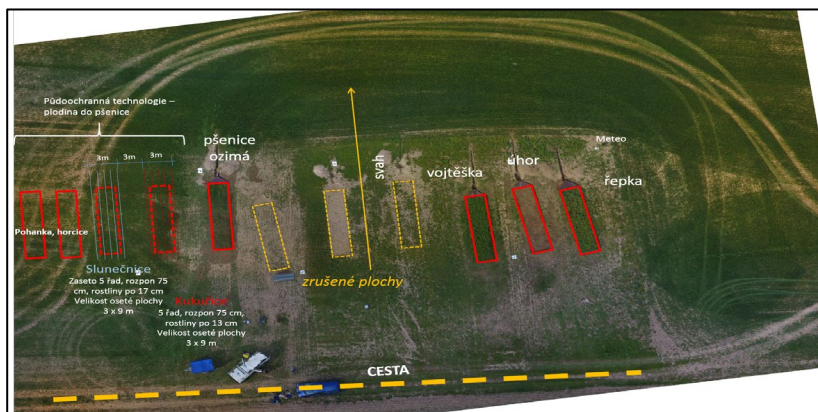
odvodněná. Během obou experimentů byly odebírány vzorky odtoku se sedimentem v intervalu 2 – 5 minut (podle intenzity odtoku). Současně se simulací na dané plodině (stejný den, stejné podmínky) byla provedena i simulace na kypřeném úhoru. Uspořádání experimentálních ploch v lokalitě Řisuty (okres Kladno) je patrný na Obrázek 14.



Obrázek 12 - Schéma aktuálního mobilního simulátoru. 1 - přípojný vozík, 2 - ovládací jednotka, 3 - vodní pumpa, 4 - nádrž na vodu, 5 - přívodní hadice vody, 6 - manometr, 7 - rozvodná ovládací skříň na ramenu simulátoru, 8 - upevnění trysky, 9 - kloub na ramenu, - je tryska, 11 - příhradové rameno, 12 - zavětrování a 13 - podpěrná noha



Obrázek 13 - Půdorys zadešťované plochy: a - je srážkoměr, b - tryska, c - malá plocha 1*1 m, d - Théta čidlo na sledování vlhkost



Obrázek 14 – umístění experimentálních ploch v lokalitě Řisutý (okres Kladno)

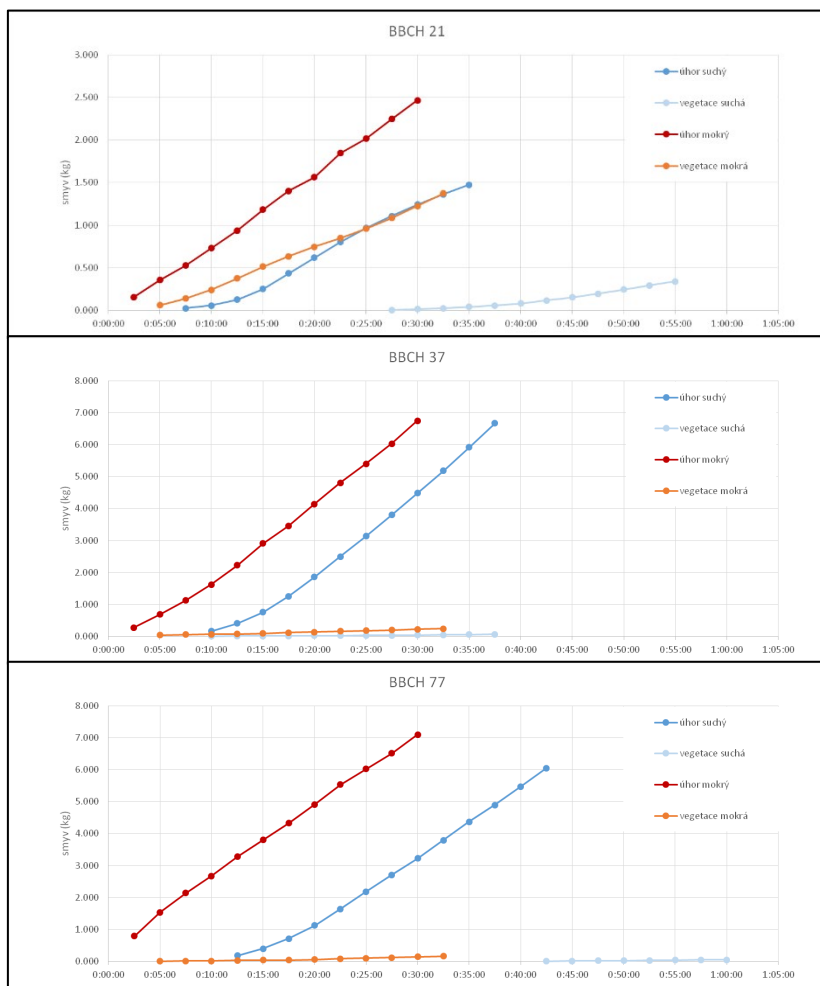
Pro každou plodinu byly pro experimenty zvoleny tři různé vývojové fáze, charakterizované stupněm BBCH a ve vazbě na Index plochy listové LAI. Ilustrativně je stav zachycen na Obrázek 15.



Obrázek 15 – Experimenty s terénním simulátorem na různých vývojových stádiích plodiny a úhoru: a) řepka ve stadiu plné zralosti před sklizní b) řepka ve stadiu růstu c) kypřený úhor během simulace (foto M. Neumann)

Obrázek 16 znázorňuje kumulativní průběhy smyvu půdy pro experimenty ve třech vývojových stádiích na ječmenu jarním. Na každém grafu je vždy srovnání mezi suchou a mokrou simulací na plodině a paralelně na úhoru. Z hodnot je následně odvozován poměr odnosu SLR a z toho finální hodnota ochranného účinku vegetace jednak v průběhu roku a jednak jako celková průměrná hodnota v roce, zahrnující vážení přes rychlost vývoje vegetace ve vztahu

k pravděpodobnosti výskytu je pak patrný jednak z Tabulky 1 a jednak pro jinou plodinu z Obrázek 17.



Obrázek 16 - Kumulativní průběhy smývu pro tři experimenty na ječmenu jarním

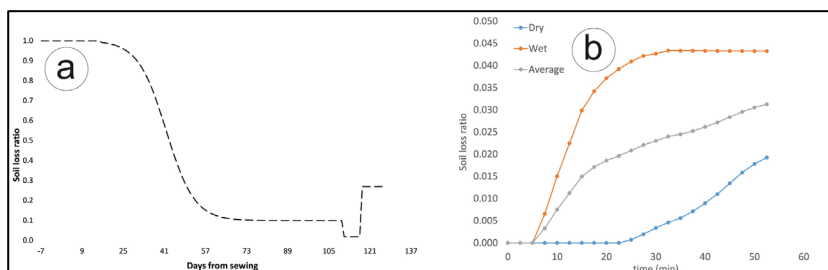
Tabulka 1 – Výpočet hodnot faktoru ochranného vlivu vegetace C na základě provedených experimentů na ječmenu jarním

vegetační fáze testované plodiny (ječmen jarní)	BBCH 21	BBCH 37	BBCH 77
datum provedení experimentu	19.5.2016	21.6.2016	20.7.2016
počátek reprezentované periody	1.4.	10.6.	20.7.
konec reprezentované periody	9.6.	19.7.	31.10.
procento celkové hodnoty R-faktoru pro reprezentovanou vegetační fázi	19,5	42	38,5
doba zadeštění [min]	28	28	28
hodnota SLR pro suchý pozemek	0,010	0,099	0,000
hodnota SLR pro plně nasycený pozemek	0,490	0,033	0,019
výsledná průměrná hodnota SLR v dané fázi	0,250	0,066	0,010
výsledná hodnota C-faktoru	0,080		

Kinetická energie návrhové srážky byla stanovena pomocí disdrometru Thiess a faktor erozivity deště R z USLE byl pak dopočten podle metodiky (Wischmeier and Smith, 1978). Časový průběh hodnot ochranného vlivu vegetace (nahrazen pro jednotlivé vývojové fáze hodnotou poměrem ztráty půdy SLR) během celé vegetační sezony byl pak odvozen pro každou zkoumanou plodinu.

Obrázek 16 ukazuje příklad odvození hodnot ochranného vlivu vegetace z experimentálních dat, získaných během terénního měření s dešťovým simulátorem. Graf A ukazuje typický průběh

hodnot poměru ztráty půdy (ochranný účinek vegetace rozpočtený na jednotlivé dny vegetační sezony) pro pohanku. Den 0 odpovídá zasetí plodiny. V tuto chvíli je ochranný vliv vegetace 1,0 = plodina neposkytuje žádnou ochranu. Následně ochranný efekt stoupá tak, jak plodina na pozemku roste – hodnota SLR pak klesá až k plnému rozvoji plodiny, kterého je u pohanky dosaženo kolem 110 dne po zasetí. V této době poskytuje plodina maximální ochranu. Poté je plodina sklizena a posklizňové zbytky se strništěm poskytují po dobu jednoho týdne ještě větší ochranu. Poté je plocha nakypřena (bezorebná technologie) a oseta další plodinou. Graf B ukazuje typický průběh měřených hodnot ztráty půdy během suché a mokré simulace. Šedá čára reprezentuje průměrné hodnoty, které jsou následně využity pro další vyhodnocení.



Obrázek 17 – příklad odvození hodnot ochranného vlivu vegetace během roku z naměřených hodnot Poměru ztráty půdy SLR

Sestavený katalog hlavních plodin, používaných v rámci ČR vycházející z více než 400 dešťových simulací je unikátním podkladem, využívaným dnes i v zahraničí a v ČR akceptovaným například pro „protierozní kalkulačku“ (VÚMOP v.v.i.) <https://kalkulacka.vumop.cz/> která je závazným dokumentem pro posuzování plnění požadavků DZES v rámci zemědělské dotační politiky ČR.

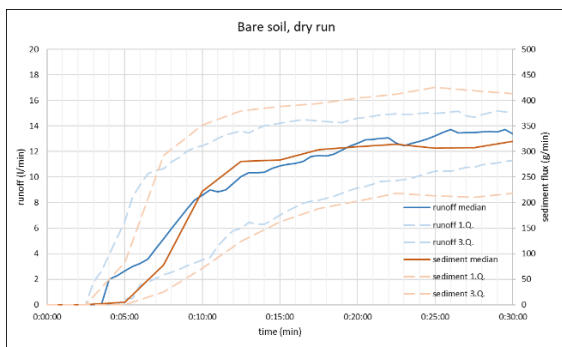
4.3 Sledování vzniku a charakteristik povrchového a podpovrchového odtoku

Porozumění a znalost příčin, iniciace a průběhu povrchového odtoku je základním kamenem všech snah o podporu retence krajiny, studium povodní, protipovodňovou ochranu, ale vlastně i studium otázek sucha.

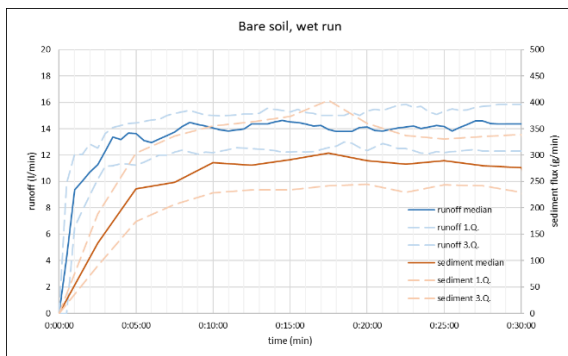
Pomocí dešťového simulátoru lze poměrně snadno získávat data, která umožní odpovídat na otázky související prve se vznikem a průběhem povrchového odtoku a jeho vztahu a podmíněnosti vůči vegetačnímu krytu, povrchové drsnosti, vlastnostem půdy.

V rámci několika projektů na našem pracovišti byl zkoumán především vztah mezi povrchovým odtokem a počáteční vlhkostí půdy, vegetačním krytem a povrchovou drsností.

Experimentální plochy byly opět zatěžovány srážkou o intenzitě 60 mm.h⁻¹ po dobu 30 minut. Metodika suché a mokré simulace byla převzata z předchozího projektu zaměřeného na protierozní ochranu. Nicméně Obrázek 18 a Obrázek 19 velmi dobře dokumentují vznik ustálených podmínek jak z hlediska povrchového odtoku tak i erodovaného materiálu při mokré simulaci.



Obrázek 18 – Záznam povrchového odtoku a erodovaného materiálu na ploše s úhorem při suché simulaci



Obrázek 19 - Záznam povrchového odtoku a erodovaného materiálu na ploše s úhorem při mokré simulaci

Cílem probíhajícího projektu je především sledovat vznik a parametry povrchového odtoku.

Snažíme se i o vizualizaci – na obrázcích Obrázek 20 a Obrázek 21 je zachyceno měření povrchové rychlosti pomocí dodaných barevných stopovačů. Experiment velmi dobře ukazuje, že hypotéza ohledně plošného povrchového odtoku, který předchází odtoku soustředěnému, není vždy reálná. Ve skutečnosti odtok od počátku probíhá pouze v soustředěné formě.

Vycházíme-li ale při výpočtech rychlosti proudění ať již za účelem stanovení rychlosti šíření znečištění nebo za účelem určení transportní kapacity povrchového toku z hypotézy, že měřený odtok probíhá ve formě plošného odtoku na celé šířce sledované plochy, dostáváme rychlosti řádově nižší, než jaké jsou ve skutečnosti. Z toho pak vyplývá, že rychlosti šíření znečištění jsou mnohem vyšší, než je očekáváno a současně, že erozní působení povrchového odtoku, který je považován za plošný je rovněž mnohem větší, než se očekává.



Obrázek 20 – dávkování barevného stopovače pro měření rychlosti povrchového odtoku



Obrázek 21 – měření rychlosti povrchového odtoku pomocí barevného stopovače. Sledování charakteru povrchového odtoku

5 Shrnutí a závěr

Využití dešťových simulátorů ve výzkumu hydrologických procesů není nijak nové a první simulátory se objevily již ve 30-tých letech 20. století. Nicméně dodnes se jedná o zařízení, jehož význam nijak neklesá. Naopak pokračuje jeho technický rozvoj směrem k zajištění co nejuvěrnějšího popisu a simulace skutečných přírodních dešťů. V posledních letech se jednoznačně oddělily základní vývojové větve dešťových simulátorů a to laboratorní a terénní. Stále větší důraz je kladen na co nejpřesnější monitorování hlavních parametrů, které pak určují charakteristiky srážky – zejména tlak vody v systému a na tryskách, samotný typ a charakter použitých trysek, výšku konstrukce nad terénem a z toho vyplývající rovnoměrnost pokrytí zadešťované plochy a kinetickou energii kapek. Jejich hlavní výhodou proti měření přímo v terénu na experimentálních plochách s přirozeným deštěm je možnost plánování experimentů včetně jejich počátečních a okrajových podmínek, sběr velkého množství dat spolehlivých a homogenních, včetně možnosti replikace.

Dešťové simulátory jsou na pracovišti autory efektivně využívány k popisu srážko-odtokových vztahů, podmínek iniciace povrchového odtoku a infiltrace vody do půdního profilu, sledování časového vývoje drsnosti povrchu půdy, retenční schopnost různých typů povrchů terénu, stability půdních agregátů, eroze půdy a transportu erodovaných částic, transportu živin a dalších chemických látek spolu s povrchovým odtokem a erozí nebo například stability strmých svahů inženýrských staveb.

6 Reference

- Abudi, I., G. Carmi, and P. Berliner. 2012. "Rainfall Simulator for Field Runoff Studies." *Journal of Hydrology* 454–455 (August): 76–81. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.056>.
- ASTM D6459-19, Standard Test Method for Determination of Rolled Erosion Control Product (RECP) Performance in Protecting Hillslopes from Rainfall-Induced Erosion, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org
- Beczek, M, M Ryzak, A Sochan, R Mazur, C Polakowski, D Hess, and A Bieganski. 2020. "Methodological Aspects of Using High-Speed Cameras to Quantify Soil Splash Phenomenon." *Geoderma* 378: 114592. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114592>.
- Bogner, C, B Wolf, M Schlather, and B Huwe. 2008. "Analysing Flow Patterns from Dye Tracer Experiments in a Forest Soil Using Extreme Value Statistics." *European Journal of Soil Science* 59: 103–13. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00974.x>.
- Cândido, Bernardo M, John N Quinton, Mike R James, Marx L N Silva, Teotônio S de Carvalho, Wellington de Lima, Adnane Beniaich, and Anette Eltner. 2020. "High-Resolution Monitoring of Diffuse (Sheet or Interrill) Erosion Using Structure-from-Motion." *Geoderma* 375: 114477. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114477>.
- Cerdà, A. 1998. "The Influence of Geomorphological Position and Vegetation Cover on the Erosional and Hydrological Processes on a Mediterranean Hillslope." *Hydrological Processes* 12 (4): 661–671. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0032030389&partnerID=40&md5=a64d5fb8187a4de6e31fc8f569d89407>.
- Cerdà, A. 1999. "Simuladores de Lluvia y Su Aplicación a La Geomorfología: Estado de La Cuestión." *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 25: 45–84. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=81510>.
- Cerdà, Artemi, and Martin F Jurgensen. 2011. "Ant Mounds as a Source of Sediment on Citrus Orchard Plantations in Eastern {Spain}. {A} Three-Scale Rainfall Simulation Approach." *Catena* 85 (3): 231–36. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.008>.

- Cornish, P. S., R. Hallissey, and E. Hollinger. 2002. "Is a Rainfall Simulator Useful for Estimating Phosphorus Runoff from Pastures — a Question of Scale-Dependency?" *Australian Journal of Experimental Agriculture* 42 (7): 953. <https://doi.org/10.1071/EA01143>.
- Davidová T., Dostál T., David V., Strauss P. 2015. "Determining the protective effect of agricultural crops on the soil erosion process using a field rainfall simulator." *Plant Soil Environ.*, 61, 109-115.
- De Ploey, J. (Ed.), 1983. "Rainfall Simulation Runoff and Soil Erosion", Catena, Suppl. Cremlingen.
- Dunkerley, D. 2001. "Estimating the Mean Speed of Laminar Overland Flow Using Dye Injection-Uncertainty on Rough Surfaces." *Earth Surface Processes and Landforms* 26 (4): 363–74. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0035311557&partnerID=40&md5=6f65825df4f3b0265ea633a9b5d4b38d>.
- Edwards, L.M., J.R. Burney 1987. "Soil Erosion Losses under Freeze/Thaw and Winter Ground Cover using a Laboratory Rainfall Simulator." *Canadian Agricultural Engineering* 29(2), 109-116.
- Christiansen, J. E. 1942. 1942. "Irrigation by Sprinkling." *California Agricultural Experiment Station Bulletin* 670.
- Fernández-Raga, María, Julián Campo, Jesús Rodrigo-Comino, and Saskia D. Keesstra. 2019. "Comparative Analysis of Splash Erosion Devices for Rainfall Simulation Experiments: A Laboratory Study." *Water* 11 (6): 1228. <https://doi.org/10.3390/w11061228>.
- Fister, W, T Iserloh, J B Ries, and R.-G. Schmidt. 2012. "A Portable Wind and Rainfall Simulator for in Situ Soil Erosion Measurements." *CATENA* 91: 72–84. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.03.002>.
- Fernández-Raga, María, Julián Campo, Jesús Rodrigo-Comino, and Saskia D Keesstra. 2019. "Comparative Analysis of Splash Erosion Devices for Rainfall Simulation Experiments: A Laboratory Study." *Water* 11 (6): 1228. <https://doi.org/10.3390/w11061228>.
- Gires, A, P Bruley, A Ruas, D Schertzer, and I Tchiguirinskaia. 2020. "Disdrometer Measurements under Sense-City Rainfall Simulator." *Earth System Science Data* 12 (2): 835–45. <https://doi.org/10.5194/essd-12-835-2020>.

- Gunn, R., Kinzer, G. D. 1949. "The terminal velocity of fall for waterdroplets in stagnant air", *J. Meteorol.*, 6, 243–248, 1949.
- Hall, M. J. 1970. "A Critique of Methods of Simulating Rainfall." *Water Resources Research* 6 (4): 1104–14.
<https://doi.org/10.1029/WR006i004p01104>.
- Hänsel, Phoebe, Marcus Schindewolf, Anette Eltner, Andreas Kaiser, and Jürgen Schmidt. 2016. "Feasibility of High-Resolution Soil Erosion Measurements by Means of Rainfall Simulations and SfM Photogrammetry." *Hydrology* 3 (4).
<https://doi.org/10.3390/hydrology3040038>.
- Hudson, N. W., & Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1993). *Field measurement of soil erosion and runoff*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Iserloh, T., W. Fister, M. Seeger, H. Willger, and J. B. Ries. 2012. "A Small Portable Rainfall Simulator for Reproducible Experiments on Soil Erosion." *Soil and Tillage Research* 124: 131–37.
<https://doi.org/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., Regúes, 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.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.05.013>
- Jester, Werner, and Andreas Klik. 2005. "Soil Surface Roughness Measurement—Methods, Applicability, and Surface Representation." *CATENA* 64 (2): 174–92.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.005>.
- Jomaa, S, D A Barry, A Brovelli, B C P Heng, G C Sander, J -Y. Parlange, and C W Rose. 2012. "Rain Splash Soil Erosion Estimation in the Presence of Rock Fragments." *Catena* 92: 38–48.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.11.008>.
- Johannsen, Lisbeth Lolk, Nives Zambon, Peter Strauss, Tomas Dostal, Martin Neumann, David Zumr, Thomas A. Cochrane, Günter Blöschl, and Andreas Klik. 2020. "Comparison of Three Types of Laser Optical Disdrometers under Natural Rainfall Conditions." *Hydrological Sciences*

- Kathiravelu, Gopinath, Terry Lucke, and Peter Nichols. 2016. "Rain Drop Measurement Techniques: A Review." *Water* 8 (1): 29.
<https://doi.org/10.3390/w8010029>.
- Kavian, Ataollah, Aazam Alipour, Karim Soleimani, Leila Gholami, Pete Smith, and Jesús Rodrigo-Comino. 2019. "The Increase of Rainfall Erosivity and Initial Soil Erosion Processes Due to Rainfall Acidification." *Hydrological Processes* 33 (2): 261–70.
<https://doi.org/10.1002/hyp.13323>.
- Keesstra, S.D., Rodrigo-Comino, J., Novara, A., Giménez-Morera, A., Pulido, M., Di Prima, S., Cerdà, A., 2019. Straw mulch as a sustainable solution to decrease runoff and erosion in glyphosate-treated clementine plantations in Eastern Spain. An assessment using rainfall simulation experiments. *CATENA* 174, 95–103.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.007>
- Kirchhoff, M., Rodrigo-Comino, J., Seeger, M., Ries, J., 2017. Soil erosion in sloping vineyards under conventional and organic land use managements (Saar-Mosel Valley, Germany). *Cuad. Investig. Geogr.* 43. <https://doi.org/10.18172/cig.3161>
- Kosmas, C., Danalatos, N., Cammeraat, L.H., Chabart, M., Diamantopoulos, J., Farand, R., Gutierrez, L., Jacob, A., Marques, H., Martinez-Fernandez, J., Mizara, A., Moustakas, N., Nicolau, J.M., Oliveros, C., Pinna, G., Puddu, R., Puigdefabregas, J., Roxo, M., Simao, A., Stamou, G., Tomasi, N., Usai, D., Vacca, A., 1997. The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena* 29, 45–59. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(96\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(96)00062-8)
- Lima, Rui L.P. De, João R.C.B. Abrantes, João L.M.P. De Lima, and M. Isabel P. De Lima. 2015. "Using Thermal Tracers to Estimate Flow Velocities of Shallow Flows: Laboratory and Field Experiments." *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 63 (3): 255–62.
<https://doi.org/10.1515/johh-2015-0028>.
- Kavian, Ataollah, Aazam Alipour, Karim Soleimani, Leila Gholami, Pete Smith, and Jesús Rodrigo-Comino. 2019. "The Increase of Rainfall Erosivity and Initial Soil Erosion Processes Due to Rainfall Acidification." *Hydrological Processes* 33 (2): 261–70.
<https://doi.org/10.1002/hyp.13323>.

- Meyer L.D. 1988. "Rainfall simulators for soil conservation research. Chapter 4." In: *Soil Erosion Research Methods*. R. Lal (ed.). Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.
- Milenković, Milutin, Norbert Pfeifer, and Philipp Glira. 2015. "Applying Terrestrial Laser Scanning for Soil Surface Roughness Assessment." *Remote Sensing* 7 (2): 2007–45. <https://doi.org/10.3390/rs70202007>.
- Nichols, M.L., Sexton, H.D. 1932. "A method of studying soil erosion." *Agricultural Engineering*, 13, 101-103.
- NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention), JAPAN. 2015. *Large-scale rainfall simulator—the globe's No. 1 scale and capability*. [2020-09-01]. <http://www.bosai.go.jp/e/facilities/rainfall.html>.
- Prosdocimi, M., Jordán, A., Tarolli, P., Keesstra, S., Novara, A., Cerdà, A., 2016. The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards. *Sci. Total Environ.* 547, 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.076>
- Prosdocimi, Massimo, Maria Burguet, Simone Di Prima, Giulia Sofia, Enric Terol, Jesús Rodrigo Comino, Artemi Cerdà, and Paolo Tarolli. 2016. "Rainfall Simulation and {Structure}-from-{Motion} Photogrammetry for the Analysis of Soil Water Erosion in {Mediterranean} Vineyards." *The Science of the Total Environment* 574: 204–15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.036>.
- Vaezi, Ali, Nasrin Sadeghian, and Artemi Cerdà. 2020. "Particle Size Distribution of Sediment Detached from Rills under Raindrop Impact in Semi-Arid Soils." *Journal of Hydrology* 590: 125317. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125317>.
- Ries, J.B., Iserloh, T., Seeger, M., Gabriels, D., 2013. Rainfall simulations – constraints, needs and challenges for a future use in soil erosion research. *Z. Für Geomorphol. Suppl. Issues* 57, 1–10. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2013/S-00130>
- Riezebos, H.Th., and E Seyhan. 1977. "Essential Conditions of Rainfall Simulation for Laboratory Water Erosion Experiments." *Earth Surf Process* 2 (2–3): 185–90. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0017478102&partnerID=40&md5=a12bf5aa3dd8681971c99c16c3f139e2>.

- Rodrigo Comino, J., Iserloh, T., Lassu, T., Cerdà, A., Keestra, S.D., Prosdocimi, M., Brings, C., Marzen, M., Ramos, M.C., Senciales, J.M., Ruiz Sinoga, J.D., Seeger, M., Ries, J.B., 2016a. Quantitative comparison of initial soil erosion processes and runoff generation in Spanish and German vineyards. *Sci. Total Environ.* 565, 1165–1174. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.163>
- Rodrigo Comino, Jesús, Iserloh, T., Morvan, X., Malam Issa, O., Naisse, C., Keestra, S.D., Cerdà, A., Prosdocimi, M., Arnáez, J., Lasanta, T., Ramos, M.C., Marqués, M.J., Ruiz Colmenero, M., Bienes, R., Ruiz Sinoga, J.D., Seeger, M., Ries, J.B., 2016b. Soil Erosion Processes in European Vineyards: A Qualitative Comparison of Rainfall Simulation Measurements in Germany, Spain and France. *Hydrology* 3, 6. <https://doi.org/10.3390/hydrology3010006>
- Rodrigo-Comino, J, A García-Díaz, E C Brevik, S D Keestra, P Pereira, A Novara, A Jordán, and A Cerdà. 2017. "Role of Rock Fragment Cover on Runoff Generation and Sediment Yield in Tilled Vineyards." *European Journal of Soil Science*, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1111/ejss.12483>.
- Rodrigo Comino, J., 2018. Five decades of soil erosion research in "terroir". The State-of-the-Art. *Earth-Sci. Rev.* 179, 436–447. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.02.014>
- Rodrigo Comino, J., Martínez-hernández, C., Iserloh, T., Cerdà, A., 2018. Contrasted Impact of Land Abandonment on Soil Erosion in Mediterranean Agriculture Fields. *Pedosphere* 28, 617–631. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60441-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60441-7)
- Rodrigo-Comino, J., Seeger, M., Iserloh, T., Senciales González, J.M., Ruiz-Sinoga, J.D., Ries, J.B., 2019. Rainfall-simulated quantification of initial soil erosion processes in sloping and poorly maintained terraced vineyards - Key issues for sustainable management systems. *Sci. Total Environ.* 660, 1047–1057. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.451>
- Saleh, Ali. 1993. "Soil Roughness Measurement: {Chain} Method." *Journal of Soil and Water Conservation* 48 (6): 527–29. <http://www.jswnonline.org/content/48/6/527>.
- Seeger, M., Rodrigo-Comino, J., Iserloh, T., Brings, C., Ries, J.B., 2019. Dynamics of Runoff and Soil Erosion on Abandoned Steep Vineyards in the Mosel Area, Germany. *Water* 11, 2596. <https://doi.org/10.3390/w11122596>

- Stewart, Alexander M., Keith L. Edmisten, Randy Wells, and Guy D. Collins. 2007. "Measuring Canopy Coverage with Digital Imaging." *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38 (7–8): 895–902. <https://doi.org/10.1080/00103620701277718>.
- Singh, S. P., F. M.G. Tack, D. Gabriels, and M. G. Verloo. 2000. "Heavy Metal Transport from Dredged Sediment Derived Surface Soils in a Laboratory Rainfall Simulation Experiment." *Water, Air, and Soil Pollution* 118 (1–2): 73–86. <https://doi.org/10.1023/a:1005140726372>.
- Strauss, Peter, J Pitty, Michael Pfeffer, and Axel Mentler. 2000. "Rainfall Simulation for Outdoor Experiments."
- Vinci, A, R Brigante, F Todisco, F Mannocchi, and F Radicioni. 2015. "Measuring Rill Erosion by Laser Scanning." *CATENA* 124: 97–108. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.003>.
- Wischmeier, W.H., and D.D. Smith. 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses—a Guide to Conservation Planning*. Agriculture. U.S. Department of Agriculture.
- Zambon, Nives, Lisbeth Lolk Johannsen, Peter Strauss, Tomas Dostal, David Zumr, Martin Neumann, Thomas A Cochrane, and Andreas Klik. 2020. "Rainfall Parameters Affecting Splash Erosion under Natural Conditions." *Appl. Sci.* 10, 4103.
- Zambon, Nives, Lisbeth Lolk Johannsen, Peter Strauss, Tomas Dostal, David Zumr, Thomas A Cochrane, and Andreas Klik. 2021. "Splash Erosion Affected by Initial Soil Moisture and Surface Conditions under Simulated Rainfall." *CATENA* 196: 104827. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104827>.
- Zumr, David, Jakub Jeřábek, Vladimír Klípa, Michal Dohnal, Michal Sněhota. 2019. "Estimates of Tillage and Rainfall Effects on Unsaturated Hydraulic Conductivity in a Small Central European Agricultural Catchment." *Water* 11 (4): 740. <https://doi.org/10.3390/w11040740>.

7 Autor

Jméno a příjmení: Tomáš Dostál
Tituly: doc.Ing.Dr.
Datum narození: 14.3.1966
Kontakt: dostal@fsv.cvut.cz

7.1 Vzdělání

- 2008 – docent – vodní stavby a vodní hospodářství, FSV ČVUT v Praze
- 1998 – Dr. – Vodní stavby a vodní hospodářství, FSV ČVUT v Praze
- 1989 – Ing. – Vodní stavby a vodní hospodářství, FSV ČVUT v Praze

7.2 Praxe

- 2007– nyní docent, vedoucí katedry hydromeliorací a krajinného inženýrství FSV ČVUT v Praze
- 1991 – 2007 odborný asistent, katedra hydromeliorací, FSV ČVUT v Praze
- 1989 – 1991 Povodí Vltavy s.p. – samostatný referent

7.3 Pedagogická činnost

7.3.1 Vyučované předměty

- Ochrana a organizace povodí
- Protierozní ochrana
- Inženýrství životního prostředí
- Aplikovaná ekologie

7.3.2 Bakalářské a diplomové práce

Za dobu působení na FSV vedl úspěšně více než 85 diplomantů

7.3.3 Výchova doktorandů

Za dobu působení na FSV úspěšně ukončeno 6 doktorandů, v současnosti vede další 4, z toho 2 po SDZ; 2 zahraniční doktorandi

v rámci mezinárodních projektů H2020; spoluškolicel dvou doktorandů na zahraničních univerzitách

7.4 Hlavní oblasti výzkumu

- Protierozní ochrana
- Ochrana a organizace povodí
- Srážko-odtokové vztahy
- GIS aplikace v modelování erozních a transportních procesů

7.5 Hlavní aktuálně řešené projekty

- Projekt H2020 „SHUi - Soil Hydrology research platform underpinning innovation to manage water scarcity in European and Chinese cropping systems“ – No. 773903-1; 2019 – 2022
- Projekt H2020 „TUDi - Transforming Unsustainable management of soils in key agricultural systems in EU and China. Developing an integrated platform of alternatives to reverse soil degradation“ – No. 210673601; 2021 – 2024
- Projekt H2020 – ITN – „SOPLAS - Macro and Microplastic in Agricultural Soil Systems“, No. 955334; 2021 – 2023

7.6 3 vybrané publikace

Hindex dle WoS: 9

Počet citací: 579

- Gomez, J. A.; Ben-Gal, A.; Alarcon, J.; De Lannoy, G.; De Roos, S.; Dostál, T.; Fereres, E.; Intrigliolo, D. S. et al.; SHui, an EU-Chinese cooperative project to optimize soil and water management in agricultural areas in the XXI century; International Soil and Water Conservation Research. 2020, 8(1), 1-14. ISSN 2095-6339.
- Fiener, P.; Dostál, T.; Krása, J.; Schmaltz, E.; Strauss, P.; Wilken, F.; Operational USLE-Based Modelling of Soil Erosion in Czech Republic, Austria, and Bavaria-Differences in Model Adaptation, Parametrization, and Data Availability; Applied Sciences. 2020, 10(10), ISSN 2076-3417.
- Zambon, N.; Johannsen, L.; Strauss, P.; Dostál, T.; Zumr, D.; Cochrane, T.; Klik, A.; Splash erosion affected by initial soil moisture and surface conditions under simulated rainfall; CATENA. 2021, 196 ISSN 0341-8162.