

Physikalische Modellierung von Niederschlägen zur Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Landnutzungen auf pluviale Überflutungen

Miriam Monschein, Gerald Krebs, Josef Schneider und Gerald Zenz

Zusammenfassung

In Österreich wurde in den letzten drei Jahrzehnten eine Zunahme der jährlichen Evapotranspiration und des Niederschlags um 80 mm beobachtet. Regenfälle werden voraussichtlich auf täglicher und stündlicher Skala in Zukunft häufiger. Änderungen in den Niederschlagsverhältnissen beeinflussen auch das Risiko und Schadenspotenzial pluvialer Überflutungen, die aufgrund von Niederschlagsereignissen, teils fern von Gewässern, auftreten. Pluviale Überflutungen können an Gebäuden und Infrastruktur Schäden verursachen, beeinträchtigen beispielsweise aber durch das Auslösen von Erosionsprozessen auch wesentlich die Qualität und Fruchtbarkeit von landwirtschaftlichen Flächen. Um die Auswirkungen zukünftiger Starkregenereignisse möglichst gering zu halten, können Oberflächenbefestigungen und landwirtschaftliche Bearbeitungspraktiken gewählt werden, welche die Infiltrationsleistung der Oberfläche und damit den flächigen Rückhalt von Niederschlagswasser möglichst erhöhen. Die Stärkung des natürlichen Wasserrückhalts in der Fläche kann einen integralen Baustein der Klimaanpassungsstrategie darstellen. Die Quantifizierung der Leistungsfähigkeit solcher Maßnahmen zum verbesserten flächigen Rückhalt unter einheitlichen Randbedingungen ist jedoch aktuell eine Herausforderung.

Die Auswirkungen von Niederschlagsereignissen auf die Geländeoberfläche und den Boden hängen nicht nur von der gefallenen Niederschlagsmenge und der Niederschlagsdauer ab, sondern auch von der kinetischen Energie, mit der die einzelnen Niederschlagspartikel auf die Geländeoberfläche treffen. Die kinetische Energie eines Regentropfens wird durch die Masse (und damit die Größe des Tropfens) sowie die Fallgeschwindigkeit des Tropfens bestimmt. Bei der physikalischen Modellierung von Niederschlägen zur Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Landnutzungen auf pluviale Überflutungen ist es daher nicht nur erforderlich die Niederschlagsmenge, sondern auch die Tropfengröße exakt modellieren zu können. Herkömmliche Regensimulatoren können bestimmte geforderte Eigenschaften abdecken, jedoch nicht alle Anforderungen erfüllen.

In diesem Beitrag wird ein neuartiges Konzept der physikalischen Regensimulation vorgestellt. Durch die Kombination von zwei Phasen (Wasser und Luft) kann die Niederschlagsintensität nahezu unabhängig von der Tropfengrößenverteilung variiert werden und damit eine Vielzahl an unterschiedlichen Niederschlagsszenarien modelliert werden. Dies eröffnet neue Möglichkeiten zur Untersuchung der Auswirkungen der klimawandelbedingten Änderungen von Niederschlagsereignissen auf unterschiedliche Geländeoberflächen und das Ausmaß pluvialer Überflutungen. Diese Untersuchungen können zukünftig einen wesentlichen Beitrag zur Parameterwertauswahl bei der numerischen Modellierung von Oberflächenabflüssen leisten.

1 Einleitung

In den letzten drei Jahrzehnten wurde in Österreich eine durchschnittliche Zunahme der jährlichen Evapotranspiration und des Niederschlags um 80 mm festgestellt (Blöschl et al. 2018). Schwere Regenfälle werden voraussichtlich auf täglicher und stündlicher Skala in Zukunft häufiger und um bis zu 6-7 % pro Grad Erwärmung der Lufttemperatur intensiver werden (Ban et al. 2015). Veränderungen in der Intensität oder Häufigkeit von Niederschlagsereignissen aufgrund des Klimawandels beeinflussen auch das Risiko von Überflutungen. Überflutungen werden als fluvial (Überflutungen aus den Gewässern) und pluvial (durch starke Regenfälle ausgelöst, manchmal weit von Gewässern entfernt) kategorisiert. Die Entstehung von Überflutungen ist ein räumlicher Prozess, der auftritt, wenn die aufgetretene Niederschlagsmenge die Infiltrationskapazität der Oberfläche und/oder der oberen Bodenschicht signifikant übersteigt. Daher trägt die Landnutzung, in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgröße, teils wesentlich zum Ausmaß und Schadenspotential von Überflutungen bei (Viglione et al. 2016). Der Klimawandel kann über Änderungen der Niederschlagsereignisse weitere Randbedingungen beeinflussen, die zum Ausmaß von Überflutungen wesentlich beitragen: eine langfristig erhöhte Wasseraufnahme des Bodens beeinflusst die hydraulischen Bodeneigenschaften und kann zu einer signifikanten Verringerung der Bodeninfiltrationsrate führen (Caplan et al. 2019).

Neben dem Klimawandel wird das Katastrophenpotential von Starkregenereignissen auch maßgebend durch menschliche Einflüsse erhöht (Raju et al. 2022, Pearce 2022). Hier ist vor allem eine nicht risikobasierte Landnutzungsplanung als Faktor zu nennen (Pearce 2022). Oberflächlicher Abfluss aufgrund von Starkregenereignissen kann zu Überflutungen führen, aber auch zur Mobilisierung von Bodenmaterial und damit zu Bodenerosion. Dies führt beispielsweise auf landwirtschaftlichen Flächen zum Verlust von wertvollem humushaltigen Oberboden und damit zum Verlust von Nährstoffen, die für die Pflanzenproduktion benötigt werden (LfL 2019). Weiters führen Ablagerung des Bodenmaterials im öffentlichen Raum wie zum Beispiel auf Infrastrukturflächen zu Schäden und Kosten für die Allgemeinheit (LABO 2017).

Historisch gesehen werden technische Maßnahmen (z.B. Hochwasserrückhaltebecken, Dämme, Objektschutzmaßnahmen) eingesetzt, um Gebäude und Infrastruktur vor Hochwasserschäden zu schützen. Diese statischen Maßnahmen bieten jedoch nur lokalen Schutz, können negative Auswirkungen auf benachbarte Gebiete haben, natürliche Abflussmuster beeinträchtigen und sind oft kostenintensiv. Passive Schutzmaßnahmen (z.B. die Erhöhung der flächigen Retention von Niederschlagswasser durch Steigerung der Infiltrationsleistung des Bodens und des Muldenrückhalts) können eingesetzt werden, um Schäden durch pluviale Überflutungen zu verringern, auch in Kombination mit technischen Maßnahmen. Durch die Kombination von technischen Maßnahmen mit flächigen Maßnahmen können das erforderliche Retentionsvolumen und damit auch die Errichtungskosten reduziert werden. Neben dem Hochwasserschutz verbessern Maßnahmen zur Flächenwasserretention die Grundwasseranreicherung, die Abflusswasserqualität und den Wasserhaushalt für Nutzpflanzen. Letzteres sollte ein explizites Ziel des Wasserressourcenmanagements sein, um den durch den Klimawandel verursachten Trockenstress der Pflanzen zu mildern (BMK 2021). Flächenretentionsmaßnahmen können vielfältig sein: im urbanen Bereich kann dies beispielsweise eine Änderung der Oberflächenbefestigung sein, im ländlichen Bereich die Umsetzung von landwirtschaftlichen Maßnahmen, die das Infiltrationsvermögen der Oberfläche erhöhen.

Zur Quantifizierung der potenziellen Verbesserung des Rückhaltevermögens ist eine Untersuchung der Flächen unter einheitlichen Randbedingungen erforderlich. Die potenziellen Auswirkungen und die Leistungsfähigkeit der möglichen Verbesserungsmaßnahmen werden in der Regel entweder durch Feld- oder Labortests bewertet. Die spezifische Gestaltung, Platzierung und Beurteilung der Leistung der Maßnahmen sind das Ergebnis numerischer Modellierungen, die auf mittels Labor- und Feldversuche ermittelten Parameterwerten basieren. In Labortests wird die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens mit Hilfe von Bodenprobenzylindern ermittelt. Die derzeit empfohlenen Laboranalysen konzentrieren sich auf Punktmessungen (z. B. Bodenprobenzylinder mit 7 cm Durchmesser und 5 cm Höhe) (ÖNORM L 1065 2006). Diese Tests zeigen zunehmende Streuungen der ermittelten Parameterwerte in Abhängigkeit von der Anzahl der Proben aus denselben Gebieten, können die Heterogenität des Bodens damit nicht angemessen abbilden und berücksichtigen den Einfluss der obersten, bewachsenen Bodenschicht nicht (Monschein et al. 2022). Darüber hinaus können fehlender Oberflächenkontakt, Lufteinschlüsse, Störungen der Bodenprobe an den Wänden der Stechzylinder und Risse in der Bodenprobe zu Messfehlern führen (Schlüter et al. 2020). Im Feld kann durch Infiltrationsversuche die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens bestimmt werden. Bei diesen Versuchen wird der Einfluss der Oberbodenschicht berücksichtigt, die Wasserzufuhr unterscheidet sich jedoch von einem Niederschlagsereignis. Alternativ können kleinflächige Bewässerungstests mit Regensimulatoren zur Bestimmung des Oberflächenabflusskoeffizienten durchgeführt werden (Mayerhofer et al. 2017). Diese Versuche ermöglichen die Bewertung von Oberflächenabfluss und Erosion mit hoher zeitlicher Auflösung für eine begrenzte Flächenausdehnung, Schlussfolgerungen auf einzelne Bodenparameter werden durch unterschiedliche Randbedingungen (z. B. Hangneigung, Vorbefeuchtung, Bewässerungsmethode, Abflussmessung), Interaktion der Parameter oder Dominanz bestimmter Parameter jedoch erschwert (Winter 2013).

Daraus folgt, dass eine genaue Bewertung geplanter Maßnahmen zur flächigen Retention von Niederschlagswasser hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und Leistungsfähigkeit unter Berücksichtigung aller relevanten Einflüsse (z.B. Niederschlagsintensität, Vegetationsschicht, Ober- und Unterboden, Hangneigung) derzeit problematisch ist. Diese Informationen sind jedoch von entscheidender Bedeutung für die Planung und Auswahl von Flächenrückhaltmaßnahmen.

Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften von Oberflächen beziehungsweise Bodenmaterial ist die Untersuchung von ungestörten Proben mittels eines Regensimulators im Labor. Um die Heterogenität des Bodens nicht außer Acht zu lassen und belastbare Ergebnisse zu erhalten, ist jedoch eine wesentlich größere Bodenprobe (z.B. 1 x 1 m) als die üblichen Stechzylinderproben erforderlich. Die Randbedingungen der Untersuchung (Neigung der Oberfläche, Vorbefeuchtung, Bewässerungsmethode, Abflussmessung, Messung der Infiltration) können dabei im Unterschied zu Felduntersuchungen einheitlich sein.

Um Auswirkungen unterschiedlicher Landnutzungen auf das Ausmaß pluvialer Überflutungen und die Leistungsfähigkeit möglicher flächiger Retentionsmaßnahmen unter klar definierbaren, einheitlichen Randbedingungen quantifizieren zu können, wird ein neuartiges Konzept zur physikalischen Modellierung von Niederschlag im Labor entwickelt. Dieses Konzept ermöglicht, eine große Bandbreite an Niederschlagsintensitäten und Tropfengrößenverteilungen, auch unter Berücksichtigung zukünftiger, durch den Klimawandel induzierter Veränderungen, unter Erreichen der Endgeschwindigkeit der Tropfen zu modellieren. Wesentlich ist dabei, dass die einzelnen Szenarien exakt reproduzierbar sind, um die Vergleichbarkeit der Untersuchungen sicherzustellen. Die entscheidende Verbesserung gegenüber den herkömmlichen Typen an Regensimulatoren besteht darin, dass die Niederschlagsintensität und die Tropfengrößenverteilung unabhängig

voneinander gesteuert werden können. Im vorliegenden Beitrag werden die Anforderung an die physikalische Modellierung von Niederschlägen sowie die Entwicklung einer neuartigen Methode zur Regensimulation im Labor beschrieben und Ergebnisse aus der Niederschlagsmodellierung mit einem Prototyp dargestellt. Die durchgeführten Arbeiten wurden aus Mitteln der "TU Graz Anschubfinanzierung" finanziert.

2 Anforderungen an die physikalische Modellierung von Niederschlägen

Während die Niederschlagsintensität und -dauer die Hauptvariablen in Bezug auf die Infiltrationskapazität und den Abfluss sind, beeinflusst die Regentropfengröße die für die Partikelmobilisierung und den Verschlammungsprozess verfügbare kinetische Energie, mit der die einzelnen Niederschlagspartikel auf die Geländeoberfläche treffen (Serio et al. 2019). Die kinetische Energie eines Regentropfens wird durch die Masse (und damit die Größe des Tropfens) sowie die Fallgeschwindigkeit des Tropfens bestimmt. Die Fallgeschwindigkeit nimmt mit der gefallen Höhe bis zu einem gewissen Schwellenwert zu, danach wird die Fallgeschwindigkeit konstant und als Endgeschwindigkeit bezeichnet. Erreicht wird die Endgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Gleichgewichts zwischen der Gravitationskraft und dem aerodynamischen Widerstand des Regentropfens (Serio et al. 2019). Zur Untersuchung der Auswirkungen von Niederschlagsereignissen auf unterschiedliche Geländeoberflächen mittels eines physikalischen Modellversuchs ist es daher nicht nur erforderlich die Niederschlagsmenge, sondern auch die Tropfengrößenverteilung exakt modellieren zu können.

Darüber hinaus sind auch die Eigenschaften des verwendeten Wassers zu berücksichtigen. Studien zeigen, dass die Ergebnisse bezüglich der erosiven Wirkung des Niederschlags bei der physikalischen Modellierung von Niederschlagsereignissen wesentlich von der Qualität beziehungsweise den Eigenschaften des Wassers abhängig sind (Flanagan et al. 1997). Regenwasser hat aufgrund des natürlichen Destillationsprozesses üblicherweise einen sehr niedrigen Elektrolytgehalt. Norton und Savabi (2010) empfehlen bei der physikalischen Regensimulation Wasser, das der Qualität von natürlichem Regenwasser möglichst ähnlich ist und verwendeten für ihre Untersuchungen de-ionisiertes Wasser.

Derzeit gibt es grundsätzlich drei Typen von Regensimulatoren: Schwerkraftsimulatoren, Drucksimulatoren und Hybridkonzepte (Gemlack und Ngasoh et al. 2021 und Yakubu und Yusop 2017). Um die Variabilität des Niederschlags physikalisch realistisch modellieren zu können, ist es erforderlich, die Intensität, die gleichmäßige räumliche und zeitliche Verteilung, die Tropfengrößenverteilung, die Endgeschwindigkeit der Tropfen und damit die kinetische Energie, mit der die Tropfen auf die zu untersuchende Oberfläche treffen, zu berücksichtigen. Die derzeit verwendeten Typen von Regensimulatoren können jeweils bestimmte geforderte Eigenschaften abdecken, jedoch nicht die Vorteile der unterschiedlichen Konzepte kombinieren (Naves et al. 2020, Živanović et al. 2022, Mhaske et al. 2019). Dadurch bestehen aktuell Einschränkungen: z. B. ist eine Änderung der Düsengröße erforderlich, um die Tropfengrößenverteilung anzupassen, die Endgeschwindigkeit ist nicht erreichbar, die Intensität ist nicht variabel und in der Regel sehr hoch.

3 Methodik

Das neuartige Konzept der physikalischen Regensimulation wurde als Zweiphasensystem am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Graz entwickelt und mit einem kleinmaßstäblichen Prototyp (20 x 20 cm) getestet (siehe Abb. 1). Besonderes Augenmerk wurde bei der

Entwicklung auf die Skalierbarkeit des prototypischen Konzepts gelegt, um eine geeignete Anwendung für den geplanten Regensimulator in Originalgröße (1,2 x 1,2 m) zu ermöglichen.

Der Regensimulator besteht aus zwei Kammern, wobei eine der Kammern mit Wasser, die andere mit Luft gefüllt ist. Der Druck in den jeweiligen Kammern kann unabhängig voneinander variiert werden. An die mit Wasser gefüllte Kammer sind Messinghülsen mit einem Außendurchmesser von 6 mm angeschlossen an denen Messingdüsen befestigt sind. Diese Düsen werden üblicherweise für den 3D Druck verwendet (MK 8 mit einem Auslassdurchmesser von 1 mm). Die mit Wasser gefüllten Messinghülsen werden von jeweils einer weiteren Hülse umschlossen, die einen Innendurchmesser von 10 mm aufweist. Die äußere Hülse ist an die mit Luftdruck befüllbare Kammer angeschlossen. Die Tropfen bilden sich an der Spitze der Messingdüse und lösen sich durch die wirkende Schwerkraft ab einer vom Außendurchmesser der Düse abhängigen Größe ab. Die Frequenz der Tropfen ist abhängig vom aufgebrachtten Wasserdruck. Wird nun angestrebt, kleiner Tropfengrößen zu erzeugen, als die aufgrund der Schwerkraft sich automatisch in Abhängigkeit des Außendurchmessers einstellenden Tropfengröße, können die Tropfen durch den von außen in vertikaler Richtung entlang der Messingdüse wirkenden Luftflusses von der Düsen Spitze frühzeitig abgelöst werden.

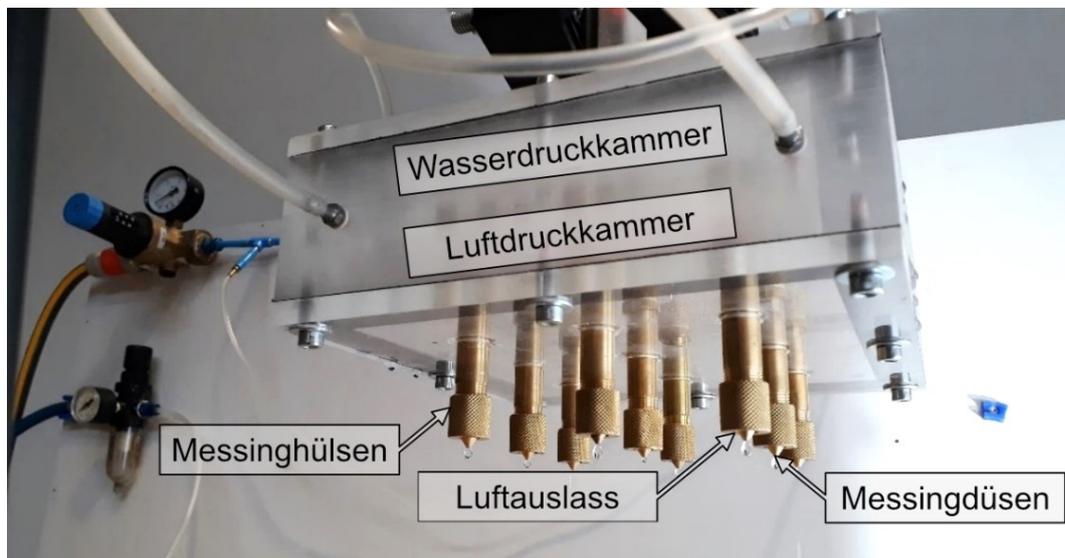


Abb. 1 Kleinmaßstäblicher Prototyp des Regensimulators mit der Wasser- und Luftdruckkammer, den Messinghülsen sowie den Messingdüsen (MK 8 mit einem Auslassdurchmesser von 1 mm) und den Luftauslässen.

Die gewünschten Tropfengrößenverteilungen und Niederschlagsintensitäten können mit dem entwickelten Regensimulator über Wasser- und Luftdruck präzise eingestellt werden. Um die dem natürlichen Regen entsprechende Endgeschwindigkeit und damit kinetische Energie zu erreichen, ist es erforderlich, eine Distanz zwischen dem Regensimulator und der zu untersuchenden Oberfläche von mindestens 8 m sicherzustellen.

Zur Kalibrierung des Systems wurden Videos der erzeugten Tropfen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (FASTCAM SA1.1 von Photron, Bildfrequenz: 500 fps, Belichtungszeit 1/9100 sec, Auflösung: 1024x1024) aufgenommen und ausgewertet. Die Auswertung der Videos erfolgte hinsichtlich der erzeugten Tropfengrößenverteilungen, der Niederschlagsintensität und der Fallgeschwindigkeit der Tropfen mittels eines auf Basis der Programmibliothek OpenCV entwickelten Bildverarbeitungsprogramms über optisches Tracking der einzelnen Tropfen.

4 Ergebnisse

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden mit der in Abschnitt 4 beschriebenen Methode des optischen Trackings aus mittels Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommenen Videos ermittelt (siehe Abb. 2). Dabei ist zu berücksichtigen, dass für die Messung der Tropfengröße die Festlegung des Verhältnisses zwischen Pixel im Video und Zentimeter in der Natur erforderlich ist. Diese Festlegung erfolgte mit Hilfe eines Maßstabs, der in der Mitte der Grundrissfläche des Prototyps angebracht ist. Da die Tropfen aus den neun Düsen des Regensimulators jedoch in drei Ebenen zur Kamera fallen, muss davon ausgegangen werden, dass durch die Verzerrung der Aufnahme die Tropfen laut optischer Detektion größer beziehungsweise kleiner als in der Natur definiert werden. Dieser systematische Fehler wird in Bezug auf die Detektion der Tropfengrößenverteilung vernachlässigbar sein, nicht jedoch bei der Messung der Fallgeschwindigkeit der Tropfen im Verhältnis zu deren Größe.

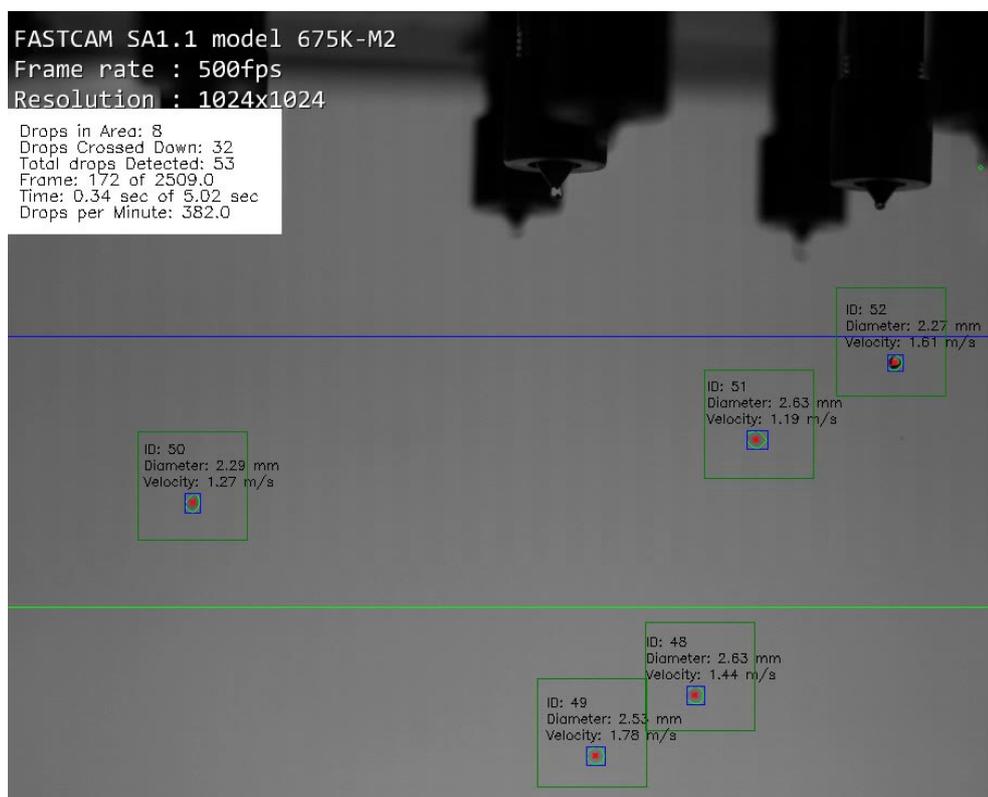


Abb. 2 Standbild eines mittels Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommenen Videos der mit dem Prototyp des Regensimulators erzeugten Tropfen. Darstellung des optischen Trackings der Tropfen.

Die folgenden Abbildungen 3 und 4 zeigen beispielhaft die Tropfengrößenverteilungen in Abhängigkeit des Wasser- und Luftdrucks in den Kammern des neu entwickelten Regensimulator Prototyps. Durch die unterschiedlichen Druckeinstellungen kann die durchschnittliche Tropfengröße ohne Austausch der Düsengröße mehr als verdoppelt werden. Die mit den bisherigen Versuchen erreichte minimale durchschnittliche Tropfengröße liegt bei 1,8 mm, die maximale bei 4,5 mm. Durch geplante Weiterentwicklungen in der Regelung des Wasser- und Luftdrucks soll es möglich werden, durchschnittliche Tropfengrößen beliebig zwischen 1,0 und 6,0 mm zu erreichen.

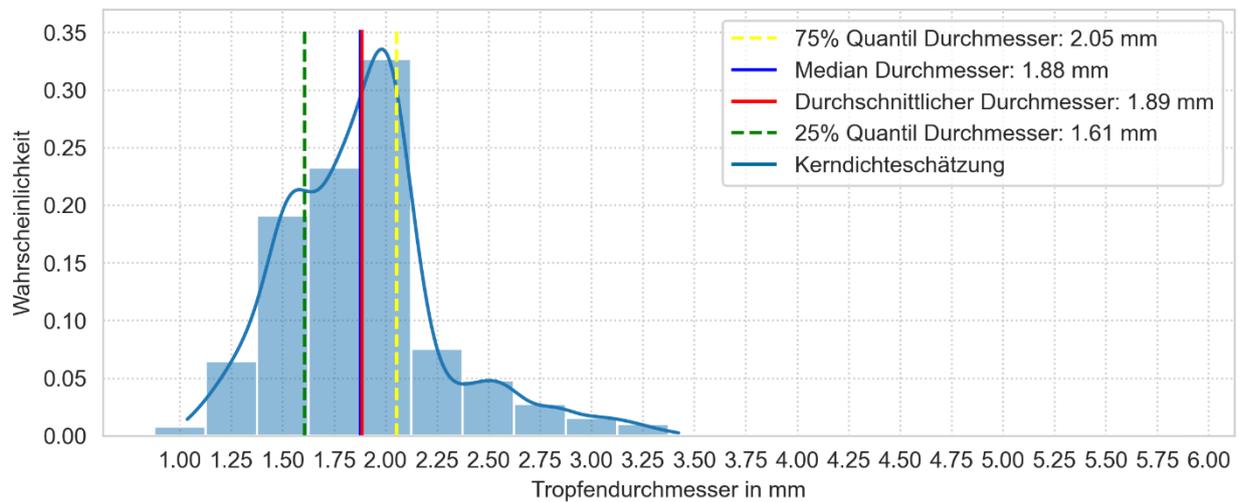


Abb. 3 Säulendiagramm der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Tropfengröße als Durchmesser der Tropfen in mm mit dem durchschnittlichen Tropfendurchmesser in Rot, dem Median in Blau, das 25 % Quantil in Grün-gestrichelt (links) und das 75 % Quantil in Gelb-gestrichelt (rechts) des Tropfendurchmessers, sowie die Kerndichteschätzung in Hellblau; bei 0.8 bar Wasserdruck und 1 bar Luftdruck mit dem kleinmaßstäblichen Prototyp.

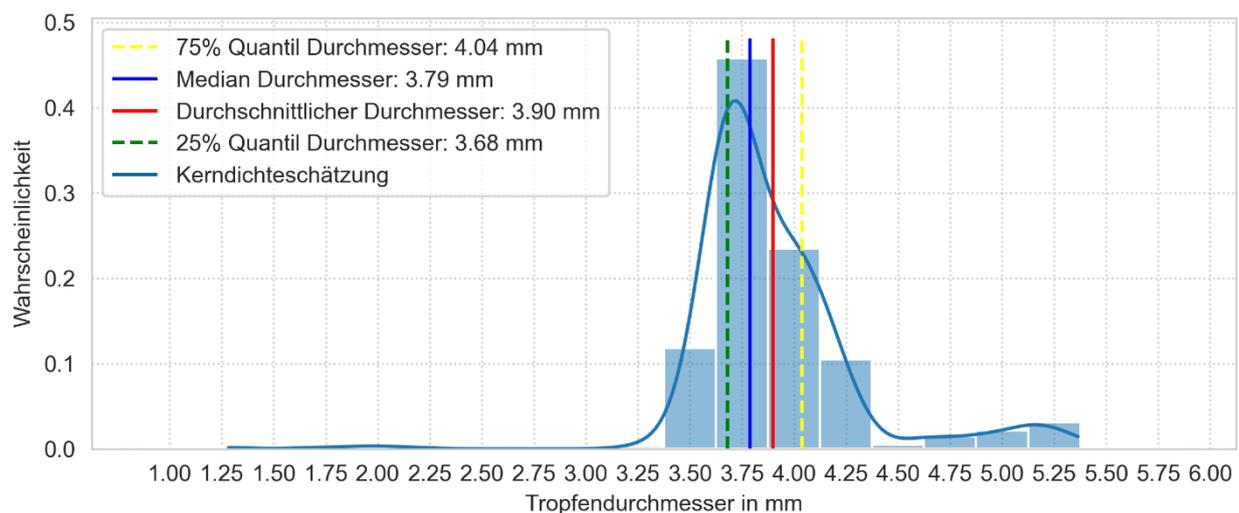


Abb. 4 Säulendiagramm der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Tropfengröße als Durchmesser der Tropfen in mm mit dem durchschnittlichen Tropfendurchmesser in Rot, dem Median in Blau, das 25 % Quantil in Grün-gestrichelt (links) und das 75 % Quantil in Gelb-gestrichelt (rechts) des Tropfendurchmessers, sowie die Kerndichteschätzung in Hellblau; bei 0.5 bar Wasserdruck und 0 bar Luftdruck mit dem kleinmaßstäblichen Prototyp.

Abb. 5 zeigt die bei einer Fallhöhe von 8 m detektierten Fallgeschwindigkeiten der Tropfen in Abhängigkeit von deren Tropfendurchmesser. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass durch die eingangs des Kapitels erwähnte Problematik der Kalibrierung des optischen Trackings die berechneten Fallgeschwindigkeiten der Tropfen systematisch verfälscht werden. Bei der weiteren Entwicklung des Regensimulators werden Verbesserungen in der Bestimmung der Fallgeschwindigkeit große Bedeutung zugemessen. Die berechneten Fallgeschwindigkeiten befinden sich jedoch in einem vergleichbaren Bereich zu den Endgeschwindigkeiten der Regentropfen laut Literatur (Serio et al. 2019).

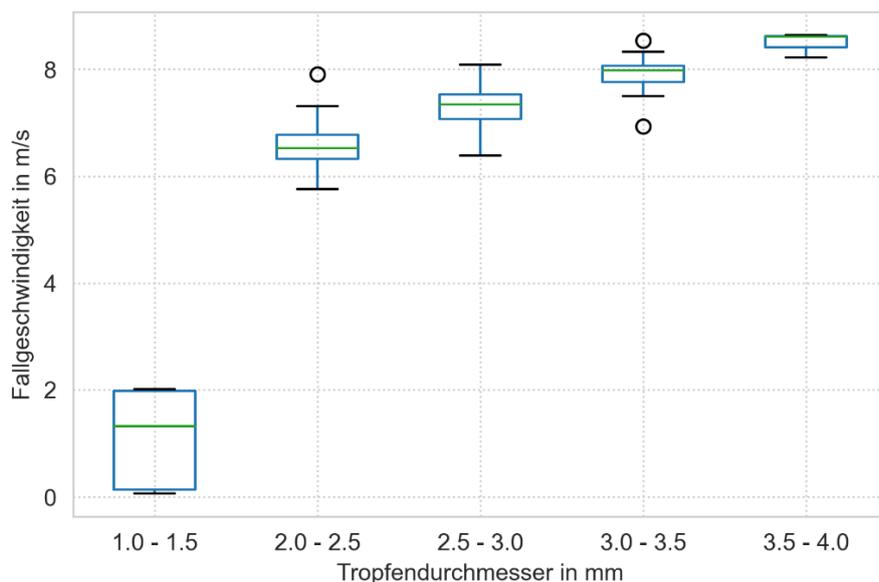


Abb. 5 Boxplot der Fallgeschwindigkeiten der Tropfen in m/s bei einer Fallhöhe von 8 m in Abhängigkeit vom detektierten Tropfendurchmesser in mm

5 Diskussion und Ausblick

Die ermittelten Tropfengrößenverteilungen und Niederschlagsintensitäten unterschiedlicher mit dem kleinmaßstäblichen Prototyp des Regensimulators erzeugten Niederschlagsereignisse zeigen, dass mit dem neu entwickelten Zweiphasensystem die Niederschlagsintensität nahezu unabhängig von der Tropfengrößenverteilung verändert werden kann. Ermöglicht wird dies durch die unabhängige Steuerung von Wasser- und Luftdruck. Durch die geplanten weiteren Entwicklungen des Regensimulators wird die Basis geschaffen, um zukünftige Untersuchungen der Auswirkungen von unterschiedlichen Landnutzungen auf das Ausmaß von pluvialen Überflutungen unter einheitlichen Randbedingungen und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Niederschlagsszenarien durchführen zu können. Damit können zukünftige Änderungen in den Niederschlagsszenarien und die damit verbundenen Auswirkungen auf unterschiedlichen Oberflächen (beispielsweise Oberflächenbefestigungen im urbanen Bereich, Sicherungen von Dammböschungen, oder auch landwirtschaftliche Flächen) quantifiziert werden und die Leistungsfähigkeit von Verbesserungsmaßnahmen zum flächigen Rückhalt von Niederschlagswasser beurteilt werden.

Literatur

- Ban, N.; Schmidli, J.; Schär, C. (2015). Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster? *Geophys. Res. Lett.* 42:1165–1172. doi:10.1002/2014GL062588
- Blöschl, G.; Blaschke, A.P.; Haslinger, K.; Hofstätter, M.; Parajka, J.; Salinas, J.; Schöner, W. (2018). Auswirkungen der Klimaänderung auf Österreichs Wasserwirtschaft – ein aktualisierter Statusbericht. *Österr Wasser- und Abfallw* 70:462–473. doi:10.1007/s00506-018-0498-0
- BMK Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (Hrsg) (2021). Zweiter Fortschrittsbericht - Österr. Strategie zur Anpassung an den Klimawandel, Wien

- Caplan, J.S.; Giménez, D.; Hirmas, D.R.; Brunsell, N.A.; Blair, J.M.; Knapp, A.K. (2019). Decadal-scale shifts in soil hydraulic properties as induced by altered precipitation. *Science advances* 5:eaau6635. doi:10.1126/sciadv.aau6635
- Flanagan, D.C.; Norton, L.D.; Shainberg, I. (1997). Effect of water chemistry and soil amendments on a silt loam soil Part 2: soil erosion. *Transactions of the ASAE* 40:1555–1561. doi:10.13031/2013.21419
- Gemlack Ngasoh, F.; Crown Mbajjorgu, C.; Boniface Kamai, M.; Onyekachi Okoro, G. (2021). A Revisit of Rainfall Simulator as a Potential Tool for Hydrological Research. In: Swaroop Meena R (Hrsg) *Agrometeorology*. IntechOpen
- LABO Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (2017). *Vorsorge gegen Bodenerosion durch Wasser vor dem Hintergrund des Klimawandels. Betroffenheit und Handlungsempfehlungen des Bodenschutzes*.
- LfL Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. (2019). *Bodenerosion - Die Allgemeine Bodenabtragsgleichung - ABAG - Hilfsmittel und Handlungsempfehlung*, Freising-Weihenstephan
- Mayerhofer, C.; Meißl, G.; Klebinder, K.; Kohl, B.; Markart, G. (2017). Comparison of the results of a small-plot and a large-plot rainfall simulator – Effects of land use and land cover on surface runoff in Alpine catchments. *CATENA* 156:184–196. doi:10.1016/j.catena.2017.04.009
- Mhaske, S.N.; Pathak, K.; Basak, A. (2019). A comprehensive design of rainfall simulator for the assessment of soil erosion in the laboratory. *CATENA* 172:408–420. doi:10.1016/j.catena.2018.08.039
- Monschein, M.; Schmaltz, E.; Krebs, G.; Zenz, G.; Harrer, C.; Gamerith, V. (2022). Reduktion der pluvialen Überflutungsgefahr durch standortangepasste landwirtschaftliche Nutzung. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 74(9-10), 357–365. <https://doi.org/10.1007/s00506-022-00878-1>
- Naves, J.; Anta, J.; Suárez, J.; Puertas, J. (2020). Development and Calibration of a New Dripper-Based Rainfall Simulator for Large-Scale Sediment Wash-Off Studies. *Water* 12:152. doi:10.3390/w12010152
- Norton, L.D.; Savabi, R. (2010). Evolution of a Linear Variable Intensity Rainfall Simulator for Surface Hydrology and Erosion Studies. *Applied Engineering in Agriculture* 26:239–245. doi:10.13031/2013.29548
- ÖNORM L 1065 (2006). *Physikalische Bodenuntersuchungen*
- Pearce, F. (2022). It's Not Just Climate: Are We Ignoring Other Causes of Disasters? *Yale Environment* 360
- Raju, E.; Boyd, E.; Otto, F. (2022). Stop blaming the climate for disasters. *Commun Earth Environ* 3. doi:10.1038/s43247-021-00332-2
- Schlüter, S.; Albrecht, L.; Schwärzel, K.; Kreiselmeyer, J. (2020). Long-term effects of conventional tillage and no-tillage on saturated and near-saturated hydraulic conductivity – Can their prediction be improved by pore metrics obtained with X-ray CT? *Geoderma* 361:114082. doi:10.1016/j.geoderma.2019.114082

- Serio, M.A.; Carollo, F.G.; Ferro, V. (2019). Raindrop size distribution and terminal velocity for rainfall erosivity studies. A review. *Journal of Hydrology* 576:210–228. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.06.040
- Viglione, A.; Merz, B.; Viet Dung, N.; Parajka, J.; Nester, T.; Blöschl, G. (2016). Attribution of regional flood changes based on scaling fingerprints. *Water resources research* 52:5322–5340. doi:10.1002/2016WR019036
- Winter, F. (2013). Prozessorientierte Modellierung der Abflussbildung und -konzentration auf verschlammungsgefährdeten landwirtschaftlichen Nutzflächen. Dissertation
- Yakubu, M.L.; Yusop, Z. (2017). Adaptability of rainfall simulators as a research tool on urban sealed surfaces – a review. *Hydrological Sciences Journal* 62:996–1012. doi:10.1080/02626667.2016.1267355
- Živanović, N.; Rončević, V.; Spasić, M.; Ćorluka, S.; Polovina, S. (2022). Construction and calibration of a portable rain simulator designed for the in situ research of soil resistance to erosion. *Soil & Water Res.* 17:158–169. doi:10.17221/148/2021-SWR

Anschrift der VerfasserInnen

Dipl.-Ing Dipl.-Ing. Miriam Monschein
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft,
Technische Universität Graz,
Stremayrgasse 10/II, A-8010 Graz
miriam.monschein@tugraz.at

Dipl.-Ing. Dr. Gerald Krebs
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft,
Technische Universität Graz,
Stremayrgasse 10/II, A-8010 Graz
gerald.krebs@tugraz.at

Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Josef Schneider
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft,
Technische Universität Graz,
Stremayrgasse 10/II, A-8010 Graz
schneider@tugraz.at

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerald Zenz
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft,
Technische Universität Graz,
Stremayrgasse 10/II, A-8010 Graz
gerald.zenz@tugraz.at