

Experimentelle Untersuchungen von Dünnschichtabfluss auf natürlichem Grasland

Peter Oberle
Tim Jakobs
Mário J. Franca

Stichworte: Starkregen, Feldlabor, Dünnschichtabfluss,
Rauheitsparametrisierung

1 Hintergrund

Aufgrund des Klimawandels ist mit einer Zunahme der Schadensrisiken infolge Starkregen zu rechnen. Starkregengefahrenkarten auf Basis hochaufgelöster 2D-Strömungsmodelle können eine wichtige Grundlage für zielgerichtete Vorsorgemaßnahmen darstellen (LUBW 2020). Die hierzu in der Praxis eingesetzten Simulationsverfahren wurden ursprünglich jedoch für die Fließgewässerhydraulik entwickelt. Ihre Anwendung zur Modellierung des Oberflächenabflusses u.a. auf steilen Hanglagen mit Fließtiefen von teilw. wenigen Zentimetern unterliegt noch großen Unsicherheiten. So gibt es insbesondere zur Festlegung der Widerstandsparameter kaum Erfahrung und es ist davon auszugehen, dass hierbei auch kleinskalige Prozesse und Vegetationseinflüsse in besonderem Maße zu berücksichtigen sind (Oberle et al 2021). Die Bestimmung der Rauheitsparameter für Dünnschichtabfluss basiert bisher hauptsächlich auf Feldversuchen oder Laborexperimenten. In Feldversuchen mit Beregnungsmaschinen (Seibert 2011) wurden jedoch i.d.R. hydrologische Parameter (z.B. Infiltration, Erosion) untersucht und hydraulische Prozesse vernachlässigt. In Laborexperimenten hingegen wurden diese zwar detailliert untersucht, allerdings unter Verwendung zumeist synthetischer Materialien (z.B. Kunstrasen) und abstrahierter Randbedingungen (Rodriguez & Trost, 2017, Yörük 2020).

Der Einfluss kleinskaliger Inhomogenitäten einer realen Oberfläche auf das Fließwiderstandsverhalten (Abflusskonzentration und -rückhalt, morphodynamische Prozesse) wird im Rahmen eines von der LUBW (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg) finanzierten Forschungsvorhabens (WiPaD) untersucht.

2 Aufbau und Messtechnik des mobilen Feldlabors

Vor diesem Hintergrund wurde ein neuartiger Versuchsaufbau (Abbildung 1) für hydraulische Messungen auf natürlichen Oberflächen entwickelt (Jakobs et al. 2023). Das modular konzipierte Feldlabor ermöglicht kontrollierte Randbedingungen und Messungen, deren Genauigkeit mit denen in Wasserbaulaboren vergleichbar sind. Das Feldlabor ist adaptierbar und kann für Naturparzellen mit einer maximalen Breite von 3 Metern und flexibler Länge eingesetzt werden. Um die Versuchsfläche vor ungünstigen Witterungseinflüssen während der Messphasen zu schützen, kann zusätzlich eine Überdachung installiert werden.

Das Versuchsfeld wird mit Hilfe einer Pumpe mit bis zu 33 l s^{-1} beschickt. Das Wasser hierfür wird aus Speichertanks mit einem effektiven Volumen von ca. 6.000 Litern entnommen und im Kreislauf geführt. Der Durchfluss wird mit einer Absperrklappe und einem Schieber gesteuert und mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmesser erfasst. Dieser ist in einem Messmodul aus Edelstahlrohren mit verjüngtem Querschnitt (DN 80) installiert. Die verschiedenen Komponenten sind mit Druckschläuchen (DN 125) untereinander verbunden und enden in einem Einlaufbecken. Dort wird das Wasser über ein gelochtes T-Stück gleichmäßig in einem Tosbecken zugegeben, welches durch eine Tauchwand von einem gelochten Überfallblech getrennt ist. Bei dem anschließenden Überfall wurde großer Wert auf eine möglichst homogene Anströmung der Versuchsfläche gelegt. Nachdem das Wasser über die Versuchsfläche geflossen ist, wird es in einer Sammelrinne wieder aufgefangen. Anschließend passiert es einen Strömungsgleichrichter und wird über ein kalibriertes Messwehr wieder den Speichertanks rückgeführt. Die präzisen Abflussmessungen vor und nach dem Messfeld ermöglichen eine Erfassung der (variablen) Infiltrationsrate. Darüber hinaus sind zur Bestimmung der Volumenänderungen im Einlaufbecken sowie in der Sammelrinne Wasserstandssonden (Magnetostriktive Lineare Positionssensoren) installiert.

Über dem Untersuchungsbereich ist eine Kamera installiert. Damit können relevante Prozesse (Umlegen von Gras, Fließpfade, Step-Pools, ...) dokumentiert werden. Installierte ArUco-Marker, die zuvor mit einem terrestrischen Laserscanner (TLS) eingemessen wurden, können später zur Auswertung des Bildmaterials (Übertragung der geometrischen Randbedingungen sowie dem Abgleich von Bildmaterial verschiedener Perspektiven) genutzt werden. In ausgewählten Experimenten werden fluoreszierende Farbstofftracer verwendet, die mit Hilfe von 2 UV-Lichtern sichtbar gemacht werden. Die Zugabe des naturverträglichen Tracers erfolgt dabei direkt am Einlaufbereich über ein horizontales Rohr mit Bohrungen von 1,7 mm und einem Luftventil zur gleichmäßigen Dosierung. Alternativ kann warmes Wasser mit einer Wärmebildkamera als Tracer verwendet werden.

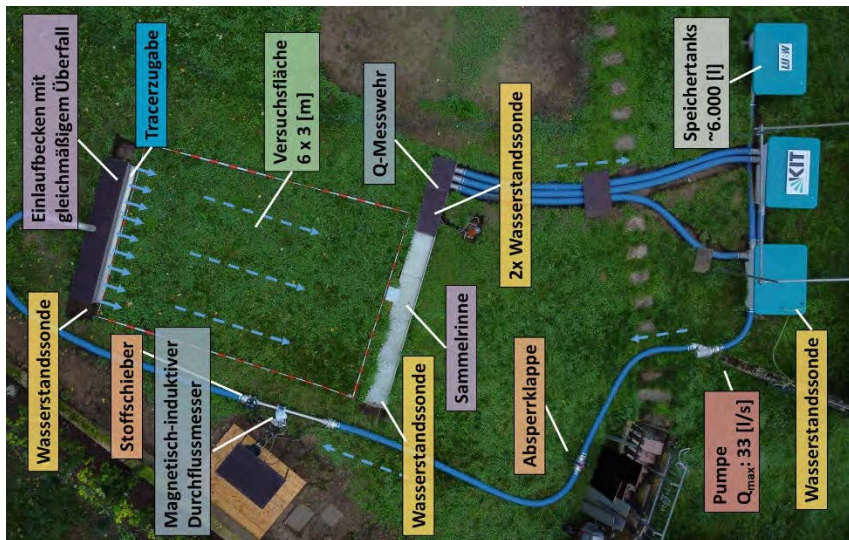


Abbildung 1: Das mobile Feldlabor und die einzelnen Komponenten

3 Messkonzept und bisherige Experimente auf natürlichem Grasland

3.1 Versuchsfläche und Zielgrößen

Im konkreten (ersten) Untersuchungsfall handelt es sich um eine Parzelle mit natürlichem Grünland und überwiegendem Mischbewuchs aus Gräsern und krautigen Pflanzen. Die bisher untersuchte Fläche mit Abmessungen von ca. 3 x 6 m weist eine Neigung von 14 % auf. Auf dieser Testfläche wurden 7 (X1 – X7) verschiedene Vegetationszustände (Abbildung 2) in insgesamt 378 Einzelerperimenten beprobt. Für jeden Vegetationszustand wurde eine Versuchsreihe (insgesamt 2 Vorläufe und 54 Einzelerperimente) an zwei aufeinanderfolgenden Messtagen durchgeführt.

Basierend auf diesen Versuchen können pauschale Widerstandsbeiwerte bzw. Vegetationsparameter für die 2D Strömungsmodellierung berechnet werden. Wesentlich hierfür ist die möglichst exakte Ermittlung des Wasservolumens auf der Versuchsfläche in Abhängigkeit des Abflusses und des Flächenzustandes. Zudem werden weitere relevante Größen bzw. Prozesse wie Fließgeschwindigkeitsverteilung, Fließpfade und dynamische Veränderungen von Vegetation und Oberflächenstrukturen dokumentiert und analysiert.

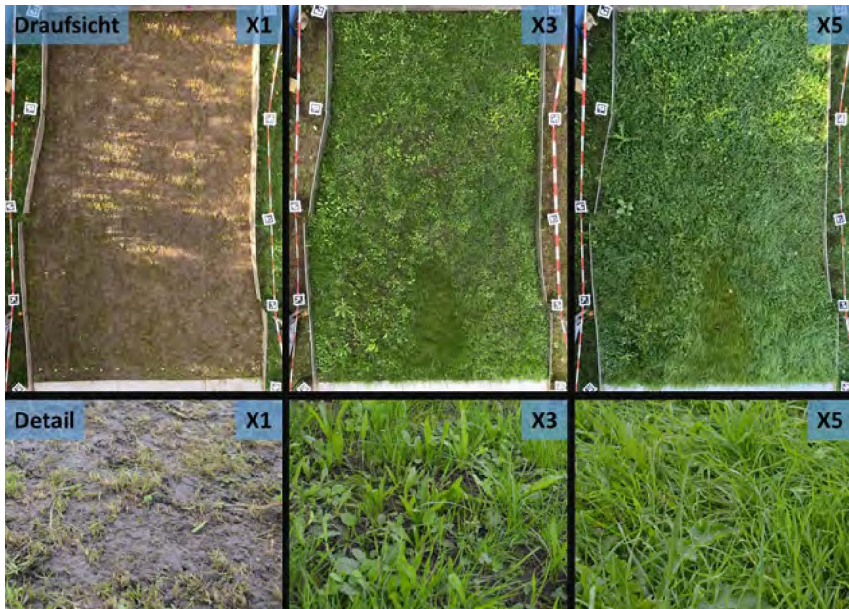


Abbildung 2: Exemplarische Versuchszustände mit unterschiedlichen Bewuchsständen

3.2 Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Experimente folgt jeweils einem strikten Ablaufschema (vgl. Abbildung 3). Zunächst wird die Oberfläche an Tag 1 vor dem ersten Versuch fotografiert und hochauflösend mit einem TLS vermessen. Aus diesen Daten lassen sich für jede Versuchsreihe Dichte und Verteilung der Vegetation ableiten. Im Anschluss wird das Versuchsfeld mit geringem Durchfluss (3 ls^{-1}) für eine Dauer von 25 min beschickt, bis der Boden vollständig gesättigt bzw. die Versickerungsrate konstant ist.

Anschließend beginnt der eigentliche Messvorgang. Für 9 verschiedene Abflüsse im Bereich $Q: 1,2 - 33 \text{ ls}^{-1}$ werden unter konstanten Abflussbedingungen Messungen durchgeführt. Dabei wird jeder Versuch mit einer Kamera (4k, 60 fps), welche über der Versuchsfläche hängt, gefilmt. Zur Minimierung von Messfehlern werden jeweils 3 Messungen mit gleichen Randbedingungen für jeweils 5 Minuten durchgeführt. Nach dem Vorlauf sowie nach jedem redundanten 3-Set wird die Oberfläche erneut mit dem TLS erfasst. Ziel ist

hierbei die Dokumentation möglicher morphologischer Veränderung. Bei jeweils dem 2. Versuch ausgewählter Abflüsse (3, 12, 22, 32 ls^{-1}) wird zusätzlich Tracer während dem Versuchsstart (First Flush) sowie zu einem späteren Zeitpunkt unter stationären Fließbedingungen zugegeben. Mit Hilfe eines eigens entwickelten Algorithmus können aus der Tracer-Bewegung Informationen über die Fließgeschwindigkeitsverteilung abgeleitet werden.

An Tag 1 wird der Durchfluss mit jeder weiteren Messreihe gesteigert. An Tag 2 verlaufen die Messungen analog zu Tag 1, jedoch in umgekehrter Reihenfolge um mögliche Unterschiede des hydraulischen Widerstandsverhaltens zwischen an- und abschwellender Überströmung zu erlangen. Abschließend wird eine Messung zur Rekalibrierung des Messwehrs vorgenommen, um möglichen Auswirkungen von potentiellen Setzungen der Sammelrinne ausschließen zu können.

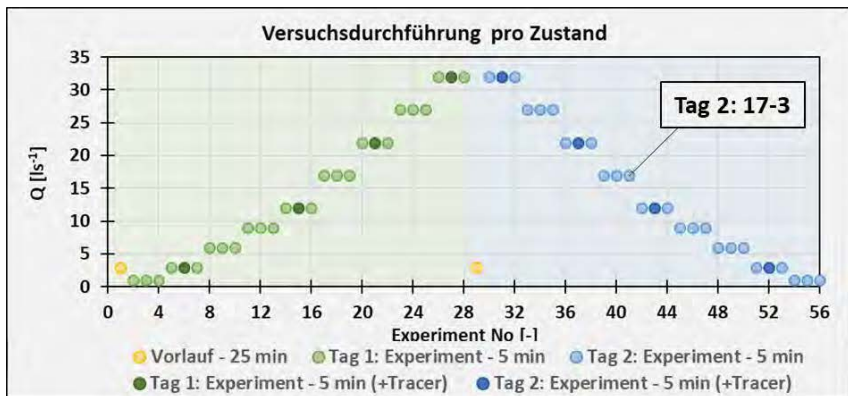


Abbildung 3: Darstellung einer Versuchsreihe, welche für sieben verschiedene Vegetationszustände durchgeführt wurde

3.3 Auswertung

Die Aufzeichnung einer dieser Einzelmessungen ist exemplarisch in Abbildung 4 wiedergegeben. Über die Versuchsdauer sind die Wasserstandsänderungen im Zulaufbecken und der Sammelrinne aufgetragen. Außerdem ist der Zufluss auf die Fläche und der Abfluss am Messwehr dargestellt. Um die maßgeblichen Zielgrößen zu ermitteln, kann das Experiment nun in 3 charakteristische Zeitabschnitte unterteilt werden. Bei Betrachtung von Phase II lässt sich der mittlere Abfluss auf der Versuchsfläche, die Infiltrationsrate der Gesamtfläche (bzw. pro m^2) sowie die Volumenänderung im Zulaufbecken

und der Sammelrinne unter stationären Bedingungen bestimmen. Über Integration der Abflusswerte in Betrachtungszeitraum III und unter Annahme einer abnehmenden Versickerungsrate (bzw. weiterer Adaption auf Basis der gesamten Versuchsreihen) während der Ablaufphase ergibt sich das in Phase II auf der Versuchsfläche stationär vorhandene Wasservolumen:

$$\text{III: } \text{Volumen}_{\text{Versuchsfläche}} = \int Q_{\text{Messwehr}} + \int Q_{\text{Infiltration}} - \int Q_{\text{Zufluss}} - \sum \text{Volumen}_{\text{Becken}} - \sum \text{Volumen}_{\text{Bleche}}$$

Basierend auf diesen Ergebnissen kann anschließend bei der Volumenbilanzierung von Phase I auch noch das Muldenvolumen der Versuchsfläche abgeschätzt werden.

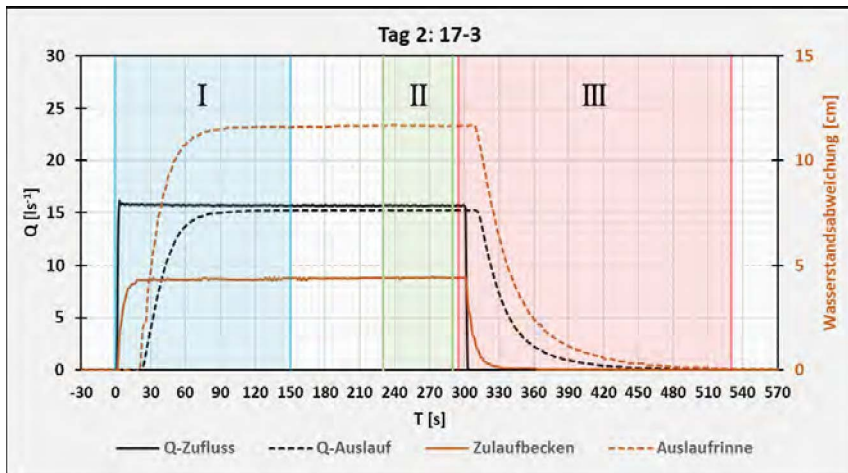


Abbildung 4: Exemplarisches Versuchsergebnis eines Einzelversuchs

Mit den so ermittelten Parametern (mittlerer Abfluss und Volumen auf der Fläche) sowie den geometrisch bekannten Randbedingungen (Flächenmaß und Neigung) können nun hydraulische Parameter berechnet werden, welche pauschal für die Gesamtfläche gelten. Hierbei wird (analog dem 2D Strömungsmodell) die abstrahierende Annahme getroffen, dass das Wasservolumen gleichmäßig auf der Versuchsfläche verteilt ist. So ergeben sich die für die Modellierung maßgeblichen Werte für einheitliche Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit aus welchen wiederum abfluss- und zustandsabhängige Widerstandsparameter abgeleitet werden können.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das vorgestellte Feldlabor ermöglicht eine umfassende Analyse der hydraulisch relevanten Prozesse bei Dünnschichtabfluss auf natürlichen Flächen unter kontrollierten Randbedingungen. Auf dieser Basis lassen sich reproduzierbare Experimente durchführen, welche eine zuverlässige Datenbasis u.a. zur Bestimmung relevanter Widerstandsbeiwerte für die Strömungsmodellierung bieten.

In Abbildung 5 ist deutlich zu erkennen, dass auf natürlichen Flächen je nach topographischer Beschaffenheit und ggf. Bewuchs zumeist sehr ungleichmäßige Fließbedingungen vorherrschen. Eine differenzierte Auflösung der kleinskaligen Varianzen ist in der Praxis der Starkregenmodellierung jedoch weder möglich noch sinnvoll. Zur belastbaren Prognose der dynamischen Abflussentwicklung eines Untersuchungsgebietes muss insbesondere das auf den 2D-Flächenelementen in Abhängigkeit der zeitabhängigen Abflussmenge vorhandene Wasservolumen naturähnlich abgebildet werden. Eine Größe, die im Strömungsmodell wiederum ganz maßgeblich über den Fließwiderstand beeinflusst wird und entsprechend adäquat zu bilanzieren ist.



Abbildung 5: Versuchsaufbau und -durchführung auf einer naturnahen Wiese

Auch wenn zur Ermittlung von Starkregengefahrenkarten die realen kleinskaligen Prozesse auf natürlichen Oberflächen nur näherungsweise bzw. in ihrer flächenpauschalen Wirkung abgebildet werden müssen, so sind ihre

Ausprägungen für weitergehende Fragestellungen durchaus von Belang (z.B.: Erosion, Stofftransport oder Infiltration).

Im weiteren Projektverlauf sollen die aufgenommen Datensätze zur Analyse der Fließgeschwindigkeitsverteilungen genutzt werden. Zusätzlich wird derzeit auf Basis der hochaufgelösten Laserscans ein 3D numerisches Modell aufgebaut. Dieses kann mit den Naturdaten validiert werden und ermöglicht eine flächige Auswertung aller Fließvariablen. In 2024 erfolgt die Beprobung weiterer Wiesenflächen mit unterschiedlichem Gefälle. Abschließend sollen die so gewonnen Erkenntnisse der Weiterentwicklung bisheriger Modellansätze in 2D-Verfahren dienen.

5 Literatur

- Jakobs, T., Oberle, P., Franca J. M. (in Druck): Novel Experimental Setup to Analyze Natural Thin Layer Surface Flow. IAHR Congress 2023.
- Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2020): Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Karlsruhe: LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg.
- Oberle, P., Kron, A., Kerlin, T., Ruiz Rodriguez, E., Nestmann, F. (2021): Diskussionsbeitrag zur Fließwiderstandssparametrisierung zur Simulation von Oberflächenabflüssen infolge Starkregen. 44. Dresdner Wasserbaukolloquium 2021 „Wasserbau zwischen Hochwasser und Wassermangel“.
- Ruiz Rodriguez E., Trost, L. (2017): Umgang mit Starkniederschlägen in Hessen. Auszug aus dem 3. Zwischenbericht. KLIMPRAX Starkregen Arbeitspaket 2. Hochschule RheinMain. Wiesbaden.
- Seibert, S., Auerswald, K., Fiener, P., Disse, M., Martin, W., Haider, J., Michael, A., Gerlinger, K. (2011): Surface runoff from arable land - a homogenized data base of 726 rainfall simulation experiments. CRC/TR32 Database.
- Yörük, A. (2020): Empfehlung zur Modellparametrisierung von Sturzflutsimulationsmodellen. HTW Saar. Professur Wasserbau und Wasserwirtschaft. Saarbrücken.

Autoren:

Dr.-Ing. Peter Oberle

Institut für Wasser und Umwelt
Karlsruher Institut für Technologie
Kaiserstraße 12

M.Sc. Tim Jakobs

Prof. Dr. Mário J. Franca
Institut für Wasser und Umwelt
Karlsruher Institut für Technologie
Kaiserstraße 12

76131 Karlsruhe

Tel.: +49 721 608-4-8094
Fax: +49 721 608-4-2991
E-Mail: p.oberle@kit.edu

76131 Karlsruhe

E-Mail: tim.jakobs@kit.edu
mario.franca@kit.edu