

Zeitschrift: Regio Basiliensis : Basler Zeitschrift für Geographie
Herausgeber: Geographisch-Ethnologische Gesellschaft Basel ; Geographisches Institut der Universität Basel
Band: 54 (2013)
Heft: 1

Artikel: Eine Präzisionsanlage zur experimentellen Untersuchung von Bodenerosionsprozessen
Autor: Fister, Wolfgang / Rüegg, Hans-Rudolf / Tresch, Simon / Greenwood, Philip
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1088183>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Eine Präzisionsanlage zur experimentellen Untersuchung von Bodenerosionsprozessen

Wolfgang Fister, Hans-Rudolf Rüegg, Simon Tresch und Philip Greenwood

Zusammenfassung

Ein grosses Problem vieler experimenteller Anlagen zur Bodenerosionsmessung ist die mangelnde Einstellungs- und Kontrollmöglichkeit wichtiger Einflussfaktoren, wie beispielsweise die Wassertiefe und die Fliessgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses oder die Niederschlagsintensität. Selbst unter optimalen Versuchsbedingungen ist es deshalb oft nicht möglich, exakte Aussagen über ablaufende Prozesse während eines Experiments zu gewinnen. Die vorgestellte Präzisionsanlage ermöglicht diese genaue Kontrolle der simulierten Niederschläge und der Eigenschaften des Oberflächenabflusses. Die gewonnenen Ergebnisse können künftig zur Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit von physikalisch begründeten Erosionsmodellen genutzt werden. Der Aufbau, die Vorbereitung und Durchführung von Versuchen mit der Anlage werden hier vorgestellt.

1 Einleitung

Die Verwendung von Niederschlagssimulatoren und Bodenwannen zur Untersuchung von Erosionsprozessen unter Laborbedingungen gehört zu den wichtigsten Methoden zur Erweiterung des Verständnisses von Bodenerosionsmechanismen. Insbesondere die Ablösung und der Transport von Bodenpartikeln durch Regentropfen, die auf einen dünnen Wasserfilm auf der Bodenoberfläche auftreffen, sind sehr komplex und werden von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst. Unter anderem handelt es sich hierbei um die Grösse und Geschwindigkeit der fallenden Tropfen, die Bodeneigenschaften (z. B. Bodenart, -struktur, -rauigkeit usw.) und insbesondere die Geschwindigkeit und Wassertiefe des Oberflächenabflusses (Kinnell 1991).

Adresse der Autoren: Dr. Wolfgang Fister, Hans-Rudolf Rüegg, BSc. Simon Tresch, Dr. Philip Greenwood, Universität Basel, Departement Umweltwissenschaften, Physische Geographie und Umweltwandel, Klingelbergstrasse 27, CH-4056 Basel; Korrespondenzadresse per E-Mail: wolfgang.fister@unibas.ch.

Bisherige Untersuchungen zur Analyse der Bodenerosionsprozesse unter dem Einfluss unterschiedlich starker Oberflächenabflüsse waren durch einen Mangel an geeigneten Techniken zur genauen Kontrolle der Haupteinflussfaktoren gekennzeichnet. Aus diesem Grund sind die Kenntnisse über das Verhältnis zwischen der Partikelgrösse, der Wassertiefe, der Fliessgeschwindigkeit sowie der Tropfengrösse und dem tatsächlichen Bodenabtrag eher qualitativ als quantitativ. Genaue Rückschlüsse und das Ableiten von exakten Formeln für die Modellierung dieser Mechanismen sind deshalb zurzeit noch nicht möglich.

Zur Überwindung dieser Kontrollproblematik wurde von der Forschungsgruppe Physiogeographie und Umweltwandel an der Universität Basel eine experimentelle Anlage, bestehend aus einem Tropfensimulator mit einer Bodenerosionswanne, entwickelt. Für den Aufbau dieser Anlage und die Durchführung der Versuche musste aufgrund der für die Versuche notwendigen Fallhöhe der Tropfen von den Räumlichkeiten in Basel auf ein Gewächshaus im Technologiezentrum Witterswil ausgewichen werden. Der Messaufbau erlaubt die genaue Einstellung und Kontrolle der oben genannten Haupteinflussfaktoren und ermöglicht somit die Untersuchung des jeweils spezifischen Einflusses auf die Bodenerosionsmechanismen. Es wird erwartet, dass die hohe Datenqualität zu einer Verbesserung des Verständnisses der gegenseitigen Beeinflussung der Hauptfaktoren führt, wodurch grundsätzlich eine Verbesserung der absoluten Genauigkeit und der Vorhersagefähigkeit von physikalisch basierten Modellen möglich wäre. In dieser Arbeit werden die Hauptkomponenten des Messaufbaus sowie deren Verwendung bzw. Einstellung während eines Versuchsablaufs dargestellt und an exemplarischen Ergebnissen verdeutlicht.

2 Regentropfen-beeinflusster Fliesstransport: eine kurze Einführung

Infolge von Starkregenereignissen kann es an der Bodenoberfläche, entweder aufgrund einer zu geringen Infiltrationskapazität oder einer Übersättigung des Bodens, zur Bildung von Oberflächenabfluss kommen. Im Zwischenrillenbereich erfolgt dies in Form eines dünnen Wasserfilms mit Schichtmächtigkeiten von wenigen Millimetern. Die kinetische Energie auftreffender Regentropfen wird über den Wasserfilm auf die Bodenoberfläche übertragen und löst dadurch Partikel vom Boden ab. Aufgrund der relativ geringen Schubspannung und Transportkapazität des Dünnschichtabflusses ist es häufig allein der Tropfenaufprall an der Wasseroberfläche, der es ermöglicht, grössere und schwerere Partikel vom Boden abzulösen. Dieser flächenhaft wirkende Prozess der Ablösung durch Regentropfen und Abtransport durch den Oberflächenabfluss wurde von *Kinnell* (1988) als "Regentropfen-beeinflusster Fliesstransport" (RBFT) bezeichnet. Er kann in zwei Subprozesse, "Regentropfen-beeinflusste Saltation (RBS) und Rollen (RBR)", unterschieden werden.

Die tatsächliche Menge der Bodenablösung, bzw. die Steigerung der Bodenablösung durch diesen Prozess hängt von verschiedenen Faktoren ab. Unter anderem sind dies die Tropfengrösse, die Fallrichtung und Geschwindigkeit der Regentropfen, die physikalischen Eigenschaften des erodierenden Materials und vor allem die Mächtigkeit und Geschwindigkeit des Dünnschichtabflusses. Untersuchungen haben gezeigt, dass der Sedimentaustrag durch RBFT in linearem Zusammenhang mit der Regenintensität steht (*Kinnell & Wood* 1992). Prinzipiell ist ebenso bekannt, dass die Wassertiefe je nach Mächtigkeit einen dämpfenden oder steigernden Einfluss auf die Bodenablösung hat. Jedoch ist eine genaue quantitative Angabe über die Einflussnahme, vor allem wenn unterschiedliche Korngrössen oder Substratgemische berücksichtigt werden, noch nicht möglich.

3 Beschreibung der experimentellen Simulationsanlage

3.1 Bodenerosionswanne

Die Bodenerosionswanne ist 1.1 m lang (Basis Aluminiumplatte 1.2 m), 0.5 m breit und 0.12 m tief (Abb. 1) und basiert im grundsätzlichen Aufbau auf der bereits von *Moss & Green* (1983) verwendeten Anlage. Zur Erzeugung des dünnen Oberflächenabflusses mit Schichtdicken zwischen 2–20 mm wird Regenwasser aus einem Sammeltank verwendet. Das Wasser wird über zwei Schlauchleitungen mit Nadelventilen und Schwebekörper-Durchflussmessgeräten der Firma Vögtlin Instruments (beide Genauigkeitsklasse 1 nach VDI Richtlinie 3513, Bl. 2) in das Wasserreservoir am Kopfende der Bodenwanne eingeleitet. Durch die Verwendung zweier unterschiedlich dimensionierter Durchflussmesser (Messbereich Typ V-100 140 mit 16–150 l/h und Typ V-400 mit 63–630 l/h) kann der Wasserzufluss zwischen 16–780 l/h in Schritten von 2–10 l/h mit grosser Genauigkeit angepasst werden. Das Wasserreservoir wird durch fünf 2 mm dicke Kunststoffplatten in 10 cm grosse Abschnitte unterteilt. Durch sie wird der Fliessweg des Wassers verlängert, um die Turbulenzen im Wasser zu verringern.

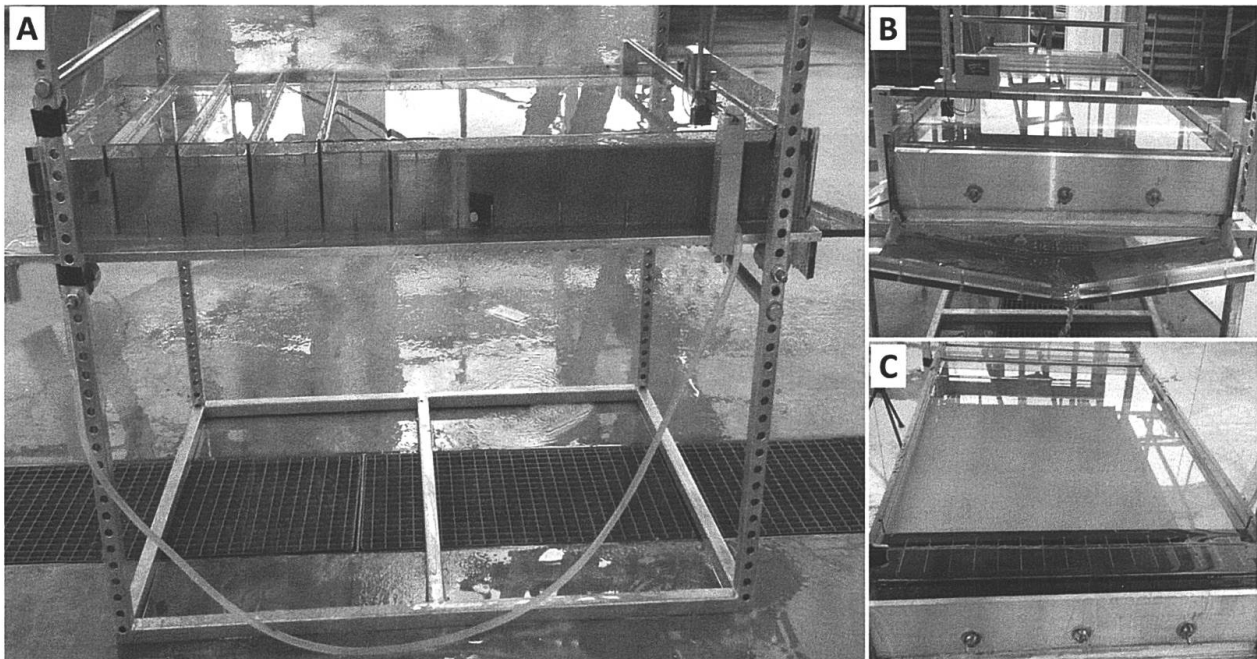


Abb. 1 Aufbau der Bodenerosionswanne.

A) Gesamtüberblick von der Seite

B) Detailansicht Wehr, Auslass und Profiltiefenmesser

C) Detailansicht Sedimentauffangbereich mit Wellenschutz ("ripple guard")

Direkt anschliessend an das Wasserbecken befindet sich die Erosionsfläche, deren Länge je nach Verwendung der Kunststoffplatten im Reservoir von 0.1–1 m variabel festgelegt werden kann. Die Wanne der Erosionsfläche ist mit 0.1 m Tiefe um 2 cm niedriger als die Seitenwände, wodurch ein maximaler Oberflächenabfluss von ca. 2 cm erreicht werden kann. Die Tiefe des Oberflächenabflusses kann stufenlos, mit Hilfe eines am unteren Ende der Bodenwanne gelegenen Wehrs, eingestellt werden. Das Wehr ist in seiner Höhe verschiebbar von ca. 8 cm bis zur Höhe der Wanne (12 cm).

Zwischen dem Wehr und der Erosionsfläche liegt ein 0.1 m langer Bereich, der zum Auffangen des abgetragenen Sediments dient. Feinere Partikel, die in Suspension über das Wehr transportiert werden, können am Auslass der Bodenwanne aufgefangen werden. Zur Erfassung der räumlichen Variabilität des Sedimenttransports auf der Fläche gibt es zusätzlich die Möglichkeit, eine in 17 gleich grosse Kammern unterteilte Kunststoffbox (L = 6 cm, B = 50 cm, T = 9.5 cm) im Sedimentauffangbereich zu befestigen.

Durch den Aufprall der Regentropfen auf der Wasseroberfläche entstehen Wellen, die die genaue Einstellung der Wasserspiegelhöhe durch das Wehr verhindern. Um die Oberflächenwellen vom Wehr abzuhalten wird eine Kunststoffplatte, die ca. 1 cm unter die Wasseroberfläche reicht und an den Seitenwänden der Bodenwanne befestigt ist, im Bereich vor dem Wehr eingesetzt.

Die Bodenwanne als Ganzes liegt auf einem etwa 1 m hohen, verzinkten Stahlgestell auf. Die Position der Wanne kann von 5 cm über dem Boden bis zu 1 m über dem Boden mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern aufgestellt werden. Die maximale Hangneigung, die für die Bodenwanne eingestellt werden kann, beträgt ca. 45°.

3.2 Tropfensimulator

Der Tropfensimulator besteht aus einem transparenten, quadratischen Kunststoffbehälter (Innenmasse: Breite 0.7 m x Länge 0.7 m x Höhe 0.05 m), in dessen Bodenplatte (Breite 0.8 m x Länge 0.8 m x Stärke 0.01 m) 784 gekappte Spritzen in einem Abstand von 2.5 cm eingelassen sind. Die Spritzen sind mit Nadeln des Typs 23G x 1 ½“ der Firma Biola Bioject bestückt und produzieren Tropfen mit einer Grösse von 2.6 mm Durchmesser. Um grössere Tropfen zu erzeugen, können die Verschlusskappen der Nadeln abgeschnitten und auf die Nadeln gesteckt werden. Dadurch bilden sich die Tropfen nicht mehr an der Nadel selbst, sondern an der umgebenden Röhre (maximale Tropfengrösse 5.0 mm). Alternativ können auch beliebige andere Nadelgrössen verwendet werden, wobei sich hierdurch v.a. die Niederschlagsintensität und weniger die Tropfengrösse verändert (Abb. 2). Je nach Wasserdruck und Nadelauswahl können im Tropfensimulator unterschiedliche Niederschlagsintensitäten erzeugt werden. Bei den bisherigen Versuchen wurde zumeist ein Wasserdurchfluss von 50 l/h gewählt, der bei angegebener Nadelkonfiguration eine Niederschlagsintensität von ca. 100 mm/h (± 2 mm) auf der Erosionsfläche erzeugt. Die Fallhöhe der Tropfen hängt von der Höhe der Bodenerosionswanne ab und liegt zwischen 2.5 m und 3.5 m.

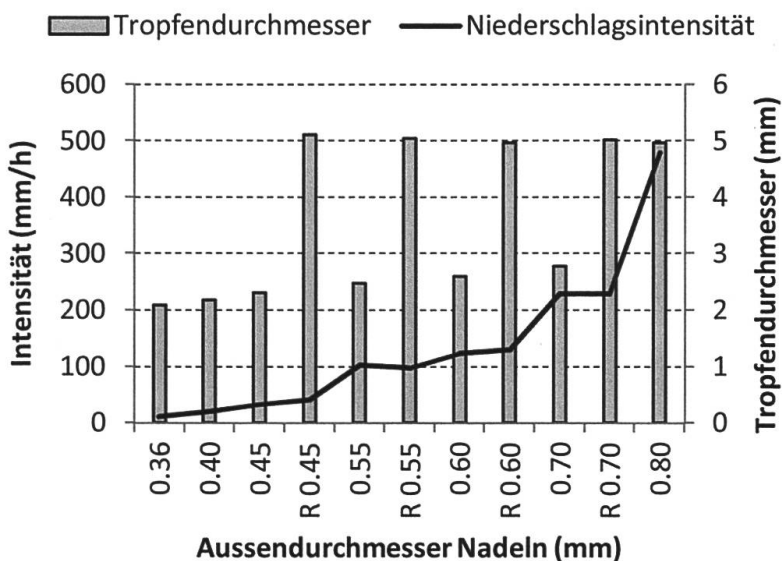


Abb. 2 Verhältnis zwischen Nadel-, Tropfendurchmesser und erreichter Intensität. Ermittelt durch Testversuche mit einzelnen Nadeln bei einem Druck von 0.01 bar. Ersichtlich sind eine moderate Zunahme der Tropfengrössen und ein deutlicher Anstieg der Intensität mit zunehmenden Nadeldurchmessern. R = Bildung der Tropfen an umgebenden Röhren.

Neben der Intensität ist für die Qualität der Simulation die räumliche Variabilität des Niederschlags von besonderer Bedeutung. Nur wenn die Bedingungen über die Fläche hinweg homogen sind, können eindeutige Beziehungen zwischen den Prozessen und den Abtragswerten aufgezeigt werden. Trotz standardisierter Produktionsverfahren können kleinste Variationen im Nadeldurchmesser zu Inhomogenität bei der Tropfenbildung (Tropfengrösse, Tropfenfrequenz oder Fallrichtung) führen. Zur Verringerung dieser potenziellen Fehlerquelle wurden drei 12V Elektromotoren angebracht, die den Tropfensimulator 10 cm in Abflussrichtung und 2.5 cm quer zur Abflussrichtung mit 1–3 mm/s bewegen (Abb. 3). Neben der gewünschten Homogenisierung der Tropfenverteilung verhindert diese Bewegung in zwei Richtungen auch, dass die Tropfen immer auf dieselben Stellen fallen und so konzentrierte Erosion verursachen.

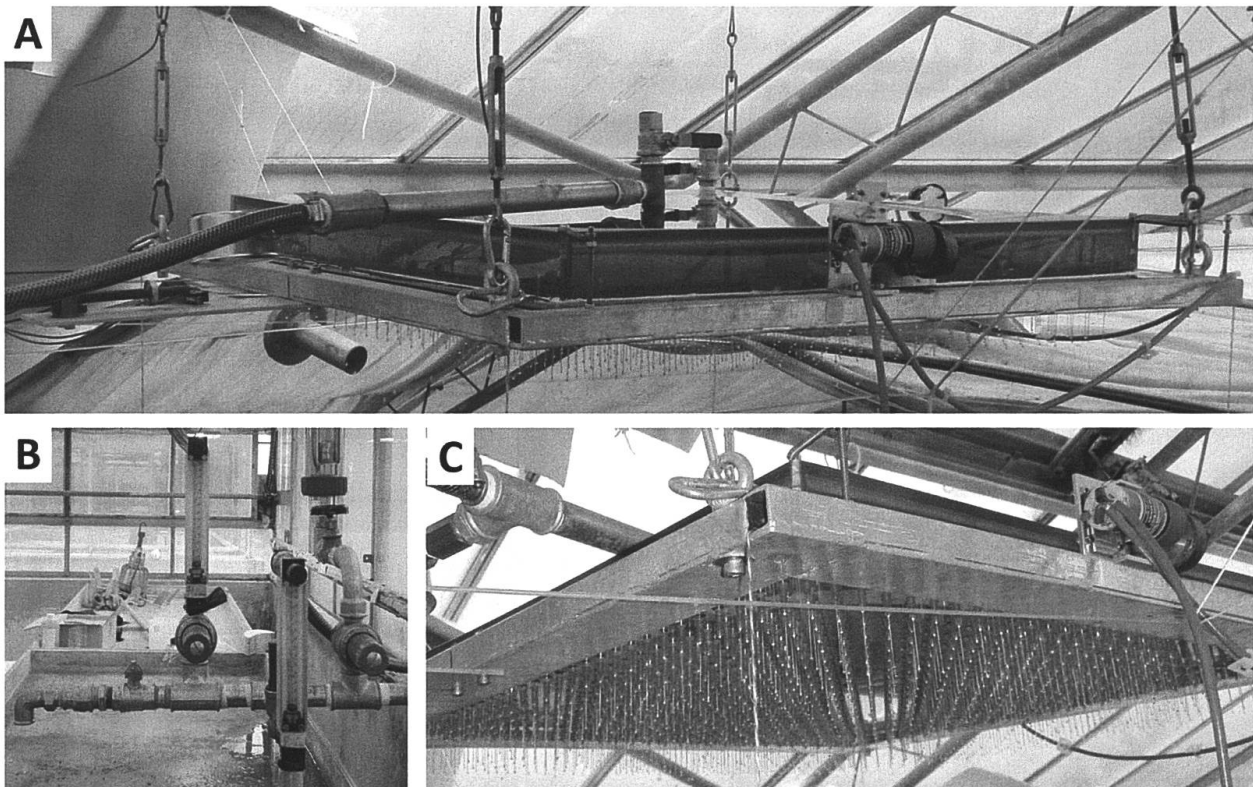


Abb. 3 Aufbau des Tropfensimulators.
 A) Gesamtüberblick von der Seite
 B) Detailansicht Wasseranschluss mit Durchflussmessern
 C) Detailansicht Simulator von schräg unten

4 Beschreibung des Versuchsablaufs

4.1 Versuchsvorbereitung und Bestimmung der Ausgangsbedingungen

Grundsätzlich kann die Wanne der Erosionsfläche mit jedem beliebigen Substrat gefüllt werden. Bei den bisherigen Versuchen wurden zumeist unterschiedliche Sand- oder Sand-Biokohle-Gemische verwendet (Anmerkung: Biokohle ist bei definierten Temperaturen pyrolysierte organische Substanz, welche vermehrt zur Verbesserung der Bodeneigenschaften verwendet wird). Für die hier dargestellten Pilotversuche wurde ein Sand mit einem Korngrößenbereich von

100–500 µm verwendet, um die Anzahl der unbekannt Parameter (z. B. Wirkung von Adhäsion bzw. Verkrustung in Böden) zu verringern. Der Sand wurde in die Wanne der Erosionsfläche eingebracht und grob glatt gestrichen. Anschliessend wurde er mit Wasser gesättigt, damit Hohlräume und eingeschlossene Luftblasen entweichen konnten und um ein Nachsacken des Sands zu vermeiden. Nachdem der Boden gesättigt war, wurde er mit einem 0.5 m langen Aluminium-Vierkantprofil (25 mm x 25 mm) sorgfältig glatt gestrichen. Die Oberfläche sollte so bündig wie möglich mit den begrenzenden Kunststoffplatten sein, bevor die Erosionsfläche zur Messung der Höhe des Sandbetts wieder drainiert wird. Die Höhe des Sandbetts vor dem Versuch wird jeweils mit Hilfe eines Profiltiefenmessers, bestehend aus einem Messing U-Profil, einer digitalen Schieblehre und einem Voltmeter (siehe Abb. 1B), für die “aktive Zone” (nach *Kinnell* 1991, die letzten 10 cm vor der Sedimentfalle) bestimmt. Das U-Profil, an dem die Einheit aus Schieblehre und Voltmeter befestigt sind, ist an zwei etwa 15 cm langen Stützen über der Bodenerosionswanne angebracht. Sobald die beiden Elektroden, die am Ende der Schieblehre angebracht sind, den Sand berühren, wird der Kontakt am Voltmeter angezeigt, und der Abstand zum U-Profil kann abgelesen werden. Durch laterales Verschieben kann der mittlere Abstand zum Sandbett mit mehreren präzisen Einzelmessungen (Genauigkeit auf die zweite Dezimalstelle) effizient über die ganze Breite des Sandbetts bestimmt werden. Nachdem das Wehr auf die gewünschte Höhe eingestellt worden ist, kann das Wasser auf die entsprechende Durchflussmenge reguliert werden. Nach ca. 5 Minuten befinden sich der Zu- und Abfluss in einem Gleichgewichtszustand. Die gleiche Vorgehensweise wie bei der Bestimmung des Abstands zum Sandbett wird auch für die Bestimmung des Abstands zur Wasseroberfläche verwendet. Durch Subtraktion des Abstands zum Wasser vom Abstand des Sandbetts kann die mittlere Wassertiefe berechnet werden.

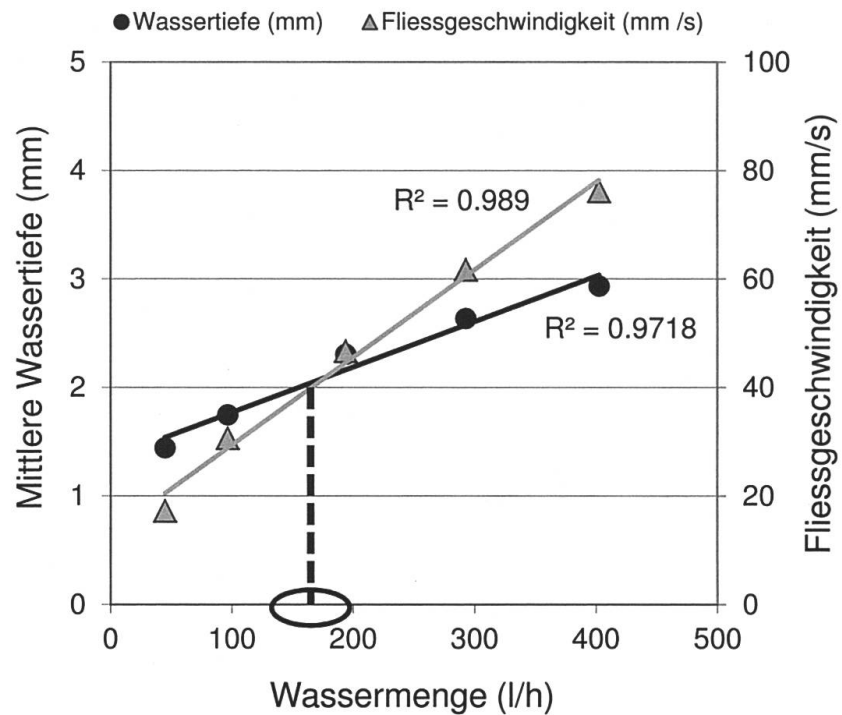
4.2 Bestimmung der geeigneten Abflussmenge, Fliessgeschwindigkeit und Wassertiefe

Zur Einstellung einer geeigneten Fliessgeschwindigkeit und Wassertiefe in Abhängigkeit von der Höhe des Wehrs muss eine Serie von Versuchen mit unterschiedlichen Wassermengen durchgeführt werden. Dabei wird bei mindestens drei unterschiedlichen Durchflussmengen (Einstellung am Durchflussmesser), dem oben verwendeten Ablaufschema folgend, mit dem Profiltiefenmesser die mittlere Wassertiefe bestimmt. Zur Absicherung gegenüber Fehlern im Leitungssystem wird die reale Durchflussmenge am Auslauf der Bodenwanne zusätzlich gemessen. Mit folgenden Gleichungen (1+2) kann über die Einbeziehung des Fliessquerschnittes (A in mm^2), der Wassertiefe (T in mm), der Breite der Bodenwanne (B in mm), und der aufgebrachten Wassermenge (M in l/s) die Fliessgeschwindigkeit (V in mm/s) berechnet werden. Ein Beispiel für einen solchen Vorversuch zur Bestimmung der notwendigen Wassermenge ist in Abbildung 4 geben.

$$V = M \cdot 10^6 / A ; \text{ wobei} \quad (1)$$

$$A = T \cdot B \quad (2)$$

Abb. 4 Beispiel eines Kalibrierungsversuchs zur Bestimmung der optimalen Wassermenge, um eine Fließgeschwindigkeit von 40 mm/s bei einer Wehrhöhe von 99 mm einzustellen. Es ist ersichtlich, dass die gemessene Wassertiefe und die berechneten Fließgeschwindigkeiten linear mit der Wassermenge korrelieren.



4.3 Anpassung der Wassermenge des Abflusses an die Menge des aufgebrachtten Niederschlags

Da durch die fallenden Regentropfen eine zusätzliche Wassermenge aufgebracht wird, muss beim Start jeder Beregnung die Durchflussmenge in der Bodenwanne um die entsprechende Tropfenwassermenge reduziert werden. Nur hierdurch kann gewährleistet werden, dass die Abtrags- und Transportbedingungen auf der Testfläche sich “nur” durch den Aufprall der Tropfen unterscheiden und nicht in Bezug auf die aufgebrauchte Wassermenge (Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit). Ob die Abflussmenge über den Versuch hinweg konstant bleibt, kann über zwei Methoden unabhängig voneinander verifiziert werden. Die erste besteht aus der erneuten Messung des Abflusses am Auslass, und die zweite beinhaltet einen zusätzlichen Wasserstandsanzeiger und beruht auf dem Prinzip der kommunizierenden Röhren. Der Anzeiger besteht aus einem Stück Schlauch (Durchmesser ca. 10 mm), welcher in der aktiven Zone am Ende der Erosionsfläche eingegraben ist. Der Schlauch ist mit kleinen Löchern perforiert, die den Wasseraustausch ermöglichen. Um eine Verstopfung zu vermeiden, ist der Schlauch von einer feinen Gaze umgeben. Verbunden ist der Schlauch mit einer 20 ml fassenden Glaspipette, die am Stahlgestell angebracht ist. Mit einer weiteren Schieblehre können Schwankungen der Wasserspiegelhöhe während der Niederschlagsimulationen abgelesen werden.

4.4 Pilotversuche zu Regentropfen-beeinflusstem Fliesstransport

Wie in Kapitel 2 beschrieben wurde, ist ein wichtiger Einflussfaktor auf die Abtragsraten die Wassertiefe des Dünnschichtabflusses. Bei den Pilotversuchen mit der Anlage wurde versucht, bei annähernd gleichbleibender Fließgeschwindigkeit (40 mm/s), konstanten Niederschlagsintensitäten (100 mm/h) und gleichbleibendem Tropfendurchmesser (2.6 mm) dieses Verhältnis näher zu bestimmen. Grundsätzliches hierzu ist zwar bekannt, jedoch nicht in der notwendigen Genauigkeit, um die Anforderungen von physikalisch begründeten Modellen zu erfüllen. Bevor in der An-

lage zukünftig komplexe Bodensubstrate untersucht werden, ist in den Pilotversuchen zur Verringerung der Komplexität der Prozesse ein reines Sandgemisch der Korngrösse 0.1–0.5 mm verwendet worden. Die Ergebnisse der Versuche sind exemplarisch in Abbildung 5 aufgeführt.

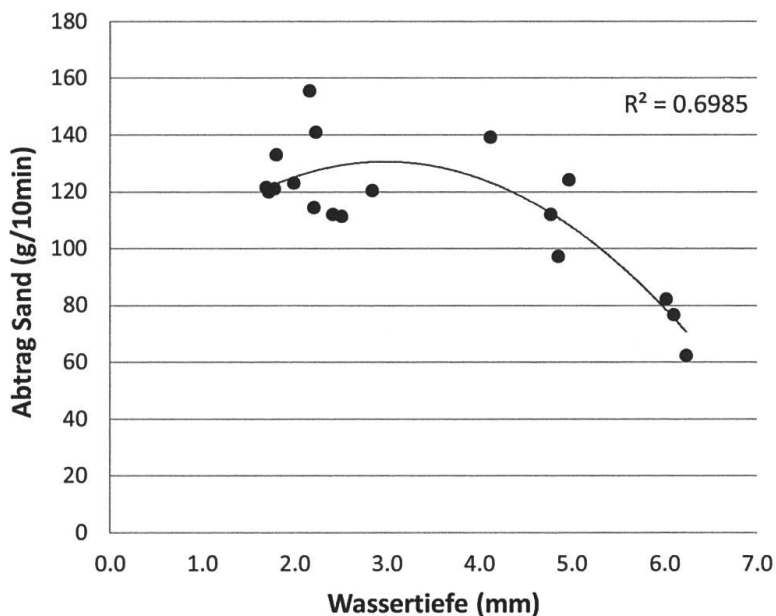


Abb. 5 Ergebnisse der Pilotversuche zum Verhältnis zwischen dem Sandabtrag und der Wassertiefe. Eine Verringerung der Abtragswerte kann sowohl für geringe Wassertiefen als auch für grössere Wassertiefen festgestellt werden. Besonders auffällig ist, dass zwischen 5–6 mm Wassertiefe (entspricht ca. dem Doppelten des Tropfendurchmessers von 2.6 mm) ein kritischer Schwellenwert liegt, ab dem der Wasserfilm den Sand vor den aufprallenden Tropfen schützt.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die neue Anlage zur experimentellen Untersuchung von Bodenerosionsprozessen im Labor erlaubt es, eine grosse Bandbreite von Niederschlagsbedingungen und Oberflächenabflüssen präzise zu simulieren. Aufgrund der guten Kontrolle einzelner Parameter und der direkten Sichtbarkeit der Prozesse wird die Anlage das Verständnis der Bodenerosionsprozesse und der Interaktionen zwischen den einzelnen Versuchsparametern verbessern. Wie bei allen anderen experimentellen Geräten ist jedoch eine genaue Kenntnis der simulierten Bedingungen für die Auswertung der Versuche notwendig. In diesem Zusammenhang werden in naher Zukunft noch einige Versuche mit der Anlage durchgeführt werden, damit sie sowohl in der Forschung als auch in der Lehre erfolgreich zum Einsatz kommen kann.

Literatur

- Kinnell P.I.A. & Wood J.T. 1992. Isolating erosivity and erodibility components in erosion by rain-impacted flow. *American Society of Agricultural Engineers* 35: 201–205.
- Kinnell P.I.A. 1991. The effect of flow depth on sediment transport induced by raindrops impacting shallow flows. *American Society of Agricultural Engineers* 34: 161–168.
- Kinnell P.I.A. 1988. The influence of flow discharge on sediment concentrations in raindrop induced flow transport. *Australian Journal of Soil Research* 26: 575–582.
- Moss A.J. & Green P. 1983. Movement of solids in air and water by raindrop impact. Effects of drop-size and water-depth variations. *Australian Journal of Soil Research* 21: 257–269.