



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Institut für Wasserbau und
Wasserwirtschaft

FG Ingenieurhydrologie und
Wasserbewirtschaftung

Bodenerosion durch Oberflächenabfluss

-

Analysen zur Veränderlichkeit der Erodibilität kohäsiver Böden

vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades Dr.-Ing.

von

Angela Janina Rebscher, M.Sc.

Erstgutachterin: Prof. Dr. habil. Britta Schmalz
Zweitgutachter: Prof. Dr. habil. Matthias Hinderer

Darmstadt: 2024

Rebscher, Angela Janina: *„Bodenerosion durch Oberflächenabfluss – Analysen zur Veränderlichkeit der Erodibilität kohäsiver Böden“*

Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung (ihwb)

Dissertationsort: Darmstadt, Technische Universität Darmstadt
Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2024
Tag der mündlichen Prüfung: 16.01.2024
URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-287828

Veröffentlichung unter CC BY 4.0 International
<https://creativecommons.org/licenses>

Zusammenfassung

Bodenerosion meint im Kontext eines Umweltproblems die kulturbedingte Bodenerosion, welche sowohl On-Site durch Bodenverlust als auch Off-Site durch Material- und Schadstoffeintrag zu gravierenden Schäden führt. Somit ist es von Bedeutung, Erosionsprozesse von Ackerflächen durch geeignete modelltechnische Ansätze nachzubilden und einschätzen zu können. Eine solche Modellierung basiert dabei auf der Gegenüberstellung der erosiven Wirkung von Niederschlag und Oberflächenabfluss (Erosivität) und einem definierten Erosionswiderstand des Oberbodens (Erodibilität). Obwohl die Veränderlichkeit der Erodibilität eines Oberbodens in der Vergangenheit bereits theoretisch und messtechnisch herausgearbeitet wurde, entspricht es der Praxis in der Erosionsmodellierung, diese als konstante oder nahezu konstante Bodeneigenschaft über Pedotransferfunktionen zu parametrisieren. Die vorliegende Arbeit stellt im Kontext der Bodenerosion durch Oberflächenabfluss die Frage, welche Bedeutung die Veränderlichkeit der Erodibilität des Oberbodens für den Erosionsprozess und die Modellierung des Erosionsprozesses hat.

An exemplarischen Modellierungen wird gezeigt, dass sich gemessene Sedimentabträge aus einem kleinen Einzugsgebiet unter Ansatz einer konstanten Erodibilität nicht in den getesteten Modellen reproduzieren lassen. Im Gegenteil ist eine Änderung der Erodibilitäts-Parameter über eine Spanne von mehreren Zehnerpotenzen erforderlich, um das Ausmaß individueller, gemessener Erosionsereignisse in einer Modellierung nachzubilden. Die Veränderlichkeit der Erodibilität kann in der Modellierung von Einzelereignissen oder kurzen Zeiträumen daher nicht vernachlässigt werden. In einer theoretischen Modellanalyse wird jedoch gezeigt, dass in Erosionsmodellen sowohl in der Berechnung der angreifenden Kraft als auch in der Beschreibung der Widerstandskraft des Bodens gleichermaßen Erkenntnis- als auch Umsetzungsdefizite vorliegen. Aspekte der Erodibilität lassen sich daher in Untersuchungen auf der Skala von Hängen oder Einzugsgebieten nicht ausreichend abgrenzen, um Erkenntnisse zu Ausmaß und Einflüssen auf die Veränderung der Erodibilität zu gewinnen.

Als sinnvoller alternativer Ansatz wird das Konzept der kleinskaligen Messapparaturen identifiziert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein eigener JET Erosion Test nach dem Aufbau von G.J. Hanson entwickelt und mit diesem insgesamt 63 JET-Versuche mit 3 unterschiedlichen Böden und 3 unterschiedlichen Aufbereitungstechniken durchgeführt. Nachdem die grundsätzliche Validität der Methode gezeigt worden ist, werden exemplarische Fragestellungen diskutiert, welche bei der Messung und Modellierung von Bodenerosion durch Oberflächenabfluss besondere Relevanz haben. Auch im Rahmen dieser Versuche zeigen sich Unterschiede in der Erodibilität von mehreren Zehnerpotenzen. Unterschiede dieser Größenordnung können sowohl räumlich entlang eines Hangs als auch ortsfest als zeitliche Veränderung festgestellt werden. Als besonders relevante, zeitlich veränderliche Einflussgröße für die Erodibilität kann der Wassergehalt eines Bodens identifiziert werden. Diese Beziehung zeigt sich teilweise enger als die etablierten Beziehungen zur Bodenart.

Da der JET es erlaubt, auch ungestörte Bodenproben zu testen, konnte gezeigt werden, dass sich die Erodibilität auch abhängig vom Bodengefüge deutlich unterscheidet. Hier zeigt sich das große Potential von JET-Versuchen, neben besseren Ansätzen für die Abbildung der Erodibilität in der Modellierung auch direkte Empfehlungen zur Bodenbearbeitung abzuleiten. In Ergänzung bereits vorhandener Bodenschutzmaßnahmen zeigt sich hier ein Ansatz, kulturbedingte Bodenerosion zu verringern.

Abstract

In the perspective of an environmental problem, soil erosion refers to cultivation-related soil erosion, which leads to serious damage both on-site through soil loss and off-site through material and pollutant input. Thus, it is important to be able to model and estimate erosion processes on arable land by suitable modeling approaches. Such modeling is based on the comparison of the erosive effect of precipitation and surface runoff (erosivity) against a defined erosion resistance of the topsoil (erodibility). Although the variability of erodibility of a topsoil has been outlined theoretically and through measurement in the past, it is common practice in erosion modeling to parameterize it as a constant or nearly constant soil property via pedotransfer-functions. In the context of soil erosion by surface runoff, the present work poses the question of the significance of the variability of topsoil erodibility for the erosion process and in modeling of the erosion process.

Several exemplary model set-ups and simulations show that measured sediment yields from a small catchment cannot be reproduced in the tested erosion models under the assumption of a constant erodibility. On the contrary, a change in erodibility parameters over a range of several orders of magnitude is required to replicate the extent of individual measured erosion events in an erosion model. Therefore, the variability of erodibility cannot be neglected in modeling of individual events or short time periods. In a theoretical model analysis, however, it is shown that there are insight and implementation deficits in erosion models, both in the simulation of the erosive force and in the description of the resisting force of the soil. Erodibility-related questions therefore cannot be adequately isolated in plot or catchment scale studies in order to provide insight into the magnitude and influences on changing erodibility.

The concept of small-scale measurement apparatuses is identified as a reasonable alternative approach. Within the scope of this work, a proprietary JET erosion test was developed according to the design of G.J. Hanson. A total of 63 JET tests were carried out using 3 different soils and 3 different soil preparation techniques. After the general validity of the method has been shown, exemplary questions are discussed, which have a particular relevance for the measurement and modeling of soil erosion by surface runoff. Differences in erodibility of several orders of magnitude are again demonstrated in the context of these experiments. Differences of this magnitude can be detected both spatially along a slope and stationarily as a temporal change. The water content of a soil can be identified as a particularly relevant, time-varying influencing factor for erodibility. This relationship is shown to be partly more closely than the established relationships to soil texture.

Since the JET offers the possibility to test even undisturbed soil samples, it could be shown that the erodibility also differs significantly depending on the soil structure. This demonstrates the great potential of JET tests to derive direct recommendations for soil cultivation in addition to improving the understanding of erodibility and approaches for representation of erodibility in models. In addition to already existing soil protection measures, this shows the potential to reduce cultivation-related soil erosion.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------|
| Inhaltsverzeichnis | I |
| Abbildungsverzeichnis | IV |
| Tabellenverzeichnis | VIII |
| Abkürzungsverzeichnis | X |
| Übersetzungsverzeichnis | XI |
| Verzeichnis der Formelzeichen | XII |
| 1. Einleitung | 1 |
| 1.1. Problemstellung | 1 |
| 1.2. Forschungsfragen | 4 |
| 1.3. Aufbau der Arbeit | 6 |
| 2. Grundlagen zu Phänomenologie und Modellierung von Erosionsprozessen | 8 |
| 2.1. Prozess der Bodenerosion von Ackerflächen | 8 |
| 2.2. Bedeutung des Oberbodens für den Erosionsprozess | 13 |
| 2.2.1. Charakteristika und Klassifizierung des Oberbodens | 13 |
| 2.2.2. Eigenschaften von Tonmineralen | 15 |
| 2.3. Modellierung von Oberflächenströmungen und Sedimenttransport | 18 |
| 2.3.1. Grundlagen zur Hydromechanik und Hydraulik von Oberflächenströmungen | 18 |
| 2.3.2. Grundlagen zum Sedimenttransport | 21 |
| 2.3.3. Besonderheiten von Filmabfluss über kohäsiven Böden | 25 |
| 2.4. Überblick über Ansätze zur Modellierung von Erosionsprozessen | 28 |
| 2.4.1. Entwicklung der Erosionsmodellierung | 28 |
| 2.4.2. Grundsätzlicher Aufbau von Erosionsmodellen | 30 |
| 2.4.3. Abbildung der Erodibilität in Erosionsmodellen | 35 |
| 2.5. Theoretische Modellanalyse ausgewählter Ansätze | 38 |
| 2.5.1. (WEPP) Water Erosion Prediction Project | 38 |
| 2.5.2. (KINEROS2) Kinematic Runoff and Erosion Model | 41 |
| 2.6. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse | 44 |
| 3. Modellierungsbeispiele | 48 |
| 3.1. Studiengebiet | 48 |
| 3.2. Datengrundlage und Modellaufbau | 51 |
| 3.2.1. Datengrundlage und Datenaufbereitung | 51 |
| 3.2.2. Qualitative Beschreibung des Erosionsgeschehens im TEZG 03 | 53 |
| 3.2.3. Auswahl der Ereignisse für die Modellierung | 61 |
| 3.2.4. Modellaufbau | 63 |
| 3.3. Modellierungsergebnisse | 68 |
| 3.3.1. Kontinuierliche Modellierung mit WEPP | 68 |
| 3.3.2. Eventbezogene Modellierung mit KINEROS2 | 72 |
| 3.3.3. Eventbezogene Modellierung mit WEPP | 75 |
| 3.4. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse | 79 |

| | |
|--|-----|
| 4.....Versuche mit dem JET Erosion Test | 83 |
| 4.1. Bestimmung des Erosionswiderstands | 83 |
| 4.1.1. Grundlagen zum Pedotransfer | 84 |
| 4.1.2. Bestimmung des K-Faktor durch Feldversuche | 85 |
| 4.1.3. Bestimmung der kritische Schubspannung durch Rinnenversuche | 87 |
| 4.1.4. Direkte Messmethoden | 89 |
| 4.2. Grundlagen zum JET | 92 |
| 4.2.1. Messprinzip | 93 |
| 4.2.2. Grundsätzlicher Aufbau | 94 |
| 4.2.3. Auswertungsmethodik | 96 |
| 4.2.4. Gleichungssystem | 98 |
| 4.3. Konstruktion JET am ihwb | 100 |
| 4.3.1. Planungsgrundlagen | 100 |
| 4.3.2. Konstruktive Ausbildung des JETs | 100 |
| 4.3.3. Kalibrierung des JETs | 103 |
| 4.3.4. Routinen zur Auswertung der JET-Versuche | 107 |
| 4.3.5. Probeläufe mit einem Standardboden | 112 |
| 4.4. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse | 117 |
| 5.....Exemplarische Untersuchungen mit dem JET Erosion Test | 121 |
| 5.1. Auswahl von Testhängen | 121 |
| 5.1.1. Studiengebiet Fischbach-Einzugsgebiet | 121 |
| 5.1.2. Standortkriterien und Standortsuche | 125 |
| 5.1.3. Feldkampagnen | 129 |
| 5.1.4. Ausgewählte Hänge | 130 |
| 5.2. Messungen und Messreihen | 133 |
| 5.2.1. Überblick | 133 |
| 5.2.2. Feldmethoden | 135 |
| 5.2.3. Methoden in der Wasserbauhalle | 139 |
| 5.2.4. Methoden im Bodенlabor | 141 |
| 5.2.5. Methoden zur Ergebnisauswertung | 144 |
| 5.3. Ergebnisse | 147 |
| 5.3.1. Ergebnisse der Feldarbeiten | 148 |
| 5.3.2. Charakteristika der gewonnenen Bodenproben | 151 |
| 5.3.3. Ergebnisse der JET-Versuche | 153 |
| 5.3.4. Allgemeine Korrelationen | 157 |
| 5.3.5. Spezielle Aspekte | 161 |
| 5.4. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse | 172 |
| 6.....Fazit und Ausblick | 176 |
| Literaturverzeichnis | 184 |
| Verzeichnis der Anhänge | 199 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 2-1: Komponenten des Erosionsprozesses (Amelung et al. 2018) | 9 |
| Abbildung 2-2: Korngrößen nach DIN EN ISO 14688 mit charakteristischen Summenlinien der Korngrößenverteilung | 13 |
| Abbildung 2-3: Mineralische Zusammensetzung von Lockersedimenten bei verschiedenen Korngrößen (Amelung et al. 2018)..... | 14 |
| Abbildung 2-4: Schema zur Bilanzierung von Sedimentabtrag und -transport nach Meyer & Wischmeier (1969), entnommen aus Morgan (2006) | 29 |
| Abbildung 3-1: Detailansicht Versuchsgut Scheyern mit TEZG 03 (W 03) (Fiener et al. 2019) | 50 |
| Abbildung 3-2: Ganglinien TEZG 03: Tagesniederschlag, Bedeckungsgrad, Fruchtfolge mit Bearbeitungsoperation (gelb: Einsaat, grün: Bearbeitung, rot: Ernte), Abfluss, Sediment (jeweils blau: Tageswerte, orange: Summenlinie) | 54 |
| Abbildung 3-3: Jahresmittelwerte für Niederschlag, Abfluss und Sedimentabtrag in Verbindung mit dem mittleren Bedeckungsgrad während jeden Jahres | 56 |
| Abbildung 3-4: Regression zwischen Abflusshöhe (links) und Niederschlagshöhe (rechts) und dem Sedimentabtrag für die 42 abgegrenzten Abtragevents..... | 57 |
| Abbildung 3-5: Regression zwischen 5-Tage-Vorregen (links), Tagen seit letzter Bodenbearbeitung (mitte) und Bedeckungsgrad (rechts) und dem Sedimentabtrag für die 42 abgegrenzten Abtragevents | 58 |
| Abbildung 3-6: Geometrie und Systemplan: Abgegrenzte Teilflächen im GIS (links), Systemplan (rechts, Kaiser 2018)..... | 64 |
| Abbildung 3-7: Bedeckungsgrad für das TEZG 03, bestehend aus Bewuchs + Rückständen entsprechend der Aufzeichnung (blau) und die kalibrierte Ganglinie aus dem Pflanzenwachstumsmodell in WEPP (grau) | 65 |
| Abbildung 3-8: Summenlinien der Abflüsse gemessen (blau) und modelliert mit zeitlicher Auflösung der Klimadaten von 15 min, vor der Kalibrierung (hellgrau) und nach der Kalibrierung (dunkelgrau), (Rebscher & Schmalz 2018), verändert..... | 69 |
| Abbildung 3-9: Summenlinien des Sedimentaustrags gemessen (blau) und modelliert mit zeitlicher Auflösung der Klimadaten von 15 min, vor der Kalibrierung (hellgrau) und nach der Kalibrierung (dunkelgrau), (Rebscher & Schmalz 2018), verändert..... | 71 |
| Abbildung 3-10: Gemessene (blau) und modellierte (unkalibriert (hellgrau), kalibriert (dunkelgrau)) Summenlinien des Abflussvolumens für 4 Beispielergebnisse: 175 – links oben, 228 – rechts oben, 229 – links unten, 331 – rechts unten, (Kaiser 2018), verändert | 73 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 3-11: Gemessene (blau) und modellierte (dunkelgrau) Summenlinien des Sedimentabtrags für 4 Beispiereignisse: 175 – links oben, 228 – rechts oben, 229 – links unten; 331 – rechts unten, (Kaiser 2018), verändert..... | 75 |
| Abbildung 3-12: Vergleich von Niederschlag- und Abflussganglinie in den Modellen KINEROS2 und WEPP für das Ereignis 228 | 76 |
| Abbildung 4-1:Erodibilität in Abhängigkeit der Massenanteile Ton, Schluff und Organik sowie der klassifizierten Bodenstruktur und Permeabilität (Wischmeier et al. 1971) | 86 |
| Abbildung 4-2: Bewegungsbeginn kohäsionsloser Sedimente in Fließgewässern (Shields-Diagramm), schraffiert: Bereich des Bewegungsbeginns entsprechend Messungen (Shields 1936) | 88 |
| Abbildung 4-3: Systemskizze JET Erosion Test (verändert nach Hanson & Cook 2004)..... | 93 |
| Abbildung 4-4: Beispielabbildungen für JET-Bauformen, Mini-JET (links; Al-Madhhachi et al. 2013, In-Situ-JET (rechts, Hanson & Cook 2004) | 95 |
| Abbildung 4-5: Beispiel für gemessenes Zeit-Abtrags-Diagramm aus JET-Versuch..... | 96 |
| Abbildung 4-6: Prinzipskizze zur Ableitung der Gleichgewichtstiefe im JET-Versuch nach Blaisdell et al. (1981) | 98 |
| Abbildung 4-7: Schnitt durch den am ihwb konstruierten JET | 103 |
| Abbildung 4-8: Ermittlung der Betriebszustände für verschiedene Standhöhen, Betriebszustände rot markiert..... | 106 |
| Abbildung 4-9. Kennlinien für die Geschwindigkeit an der Düse, die Schubspannung an der Düse und die Schubspannung an der initialen Bodenoberfläche in Abhängigkeit der Standhöhe für den konstruierten JET | 107 |
| Abbildung 4-10: Grafische Darstellung des zweiten Auswertungsschritts zur Bestimmung von kd in der implementierten Auswertungsroutine..... | 110 |
| Abbildung 4-11: Theoretische Abtragskurve für optimierte Parameter τ_c und kd (blau) und Messwerte (orange) | 111 |
| Abbildung 4-12: Erosionsrate und wirksame Schubspannung an den Messpunkten (blau) und Regressionsgerade (orange) | 111 |
| Abbildung 4-13: Getrockneter Standardboden (links) und aufbereiteter Standardboden mit Wassergehalt = 15% (rechts)..... | 112 |
| Abbildung 4-14: Auswertung der JET-Versuche über Anpassung der Messpunkte (orange) an eine theoretische Abtragskurve (blau); Auswertung über den Ansatz nach Blaisdell (links), Fitting (mitte) und Erosionsraten (rechts) für die Versuche V5 (oben) und S4 (unten) | 115 |
| Abbildung 5-1: Lage des Gersprenz-Einzugsgebiets in Hessen..... | 122 |
| Abbildung 5-2: Klimadiagramm für die Station Modautal-Neunkirchen (DWD CDC (2022)): Niederschlag durchschnittliche Monatssumme, Temperatur monatliche Durchschnittstemperatur | 122 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 5-3: Einzugsgebiet Fischbach innerhalb Gersprenz-Einzugsgebiet, Topographie (DGM1) und Gewässerpegel (links) sowie Geologie (rechts) (GÜK 200) | 123 |
| Abbildung 5-4: Einzugsgebiet Fischbach, Topographie (links oben) (DGM1), Flächennutzung (rechts oben) (ATKIS), Böden (links unten) (BFD 50) und Geologie (rechts unten) (GÜK 200) | 124 |
| Abbildung 5-5: Beispielhafte Auswertung des Kriteriums Geländegefälle; Mittelwert (oben, mitte), Standardabweichung (unten), Übersicht (links), Detail (rechts) | 126 |
| Abbildung 5-6: Ackerschläge im EZG Fischbachtal mit Bewertung der Eignung als Testhang sowie exemplarische Hänge als Vorauswahl zur Ortsbegehung..... | 128 |
| Abbildung 5-7: Lageplan zum ausgewählten Testhang (links) und Fließwege auf dem Testhang (DGM1) (rechts) | 131 |
| Abbildung 5-8: Lageplan zum ausgewählten Vergleichshang | 132 |
| Abbildung 5-9: Ansatzpunkte der Bohrstockkartierungen und Lage der Leitprofile auf dem Testhang (links) und auf dem Vergleichshang (rechts) (Ngassam 2018) | 135 |
| Abbildung 5-10: Beispielaufnahme Bohrstockkartierung (links) und Leitprofil (rechts) | 136 |
| Abbildung 5-11: Probenahmepunkte für Oberflächenproben auf dem Testhang..... | 137 |
| Abbildung 5-12: Entnahme einer Oberflächenprobe auf dem Testhang..... | 138 |
| Abbildung 5-13: Vorbereitung von Mischproben zur Bestimmung der Lagerungsdichte | 139 |
| Abbildung 5-14: Beispiel für gemessene Abtragskurven im JET-Versuch | 145 |
| Abbildung 5-15: Aufnahmen der Leitprofile mit eingetragenen Horizonten (Borm (2017), Löss-Hang links, Grus-Hang rechts)..... | 149 |
| Abbildung 5-16: Einordnung der verwendeten Proben in ein Feinbodenartendiagramm (Sponagel 2005, verändert) | 152 |
| Abbildung 5-17: Übersicht über alle durchgeführten JET-Versuche – Boxplots: Variable Eigenschaften der Bodenprobe – Wassergehalt und Probendichte; Versuchsaufbau und Durchführung – Anfangsschubspannung, Anzahl Messungen und Versuchsdauer sowie T_{max} | 155 |
| Abbildung 5-18: Aus den JET-Versuchen abgeleitete Erosionsparameter, Darstellung angelehnt an Hanson & Simon (2001); mit Regressionsgerade $R^2 = 0,38$ | 156 |
| Abbildung 5-19: Erosionsparameter entsprechend Abbildung 5-18 in der Darstellung und Einordnung nach Hanson & Simon (2001) | 156 |
| Abbildung 5-20: Erosionsparameter τ_c und k_d in Abhängigkeit der konstanten Bodeneigenschaften | 158 |
| Abbildung 5-21: Erosionsparameter τ_c und k_d in Abhängigkeit der variablen Bodeneigenschaften | 159 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 5-22: Erosionsparameter τ_c und k_d in Abhängigkeit der Versuchsrandbedingungen | 159 |
| Abbildung 5-23: Ergebnisse der JET-Versuche für den Standard (orange), Vergleichsproben mit dem Standardboden (blau) und alle Versuche (grau) | 161 |
| Abbildung 5-24: Ergebnisse der JET-Versuche für 3 Proben aus dem B-Horizont mit gleichem Wassergehalt (orange), alle Proben aus dem B-Horizont (blau) und alle Versuche (grau) | 162 |
| Abbildung 5-25: Ergebnisse der JET-Versuche für Oberflächenproben der ersten Feldkampagne (orange), Oberflächenproben der zweiten Feldkampagne (blau) (jeweils nur Wiederholungsproben) und alle Versuche (grau) | 163 |
| Abbildung 5-26: Ergebnisse der JET-Versuche für Oberflächenproben der ersten Feldkampagne (orange), Oberflächenproben der zweiten Feldkampagne (blau) und alle Versuche (grau) | 163 |
| Abbildung 5-27: Ergebnisse der JET-Versuche für Oberflächenproben: gestörte Mischproben (orange), ungestörte Stechzylinderproben (blau); Alle Versuche (grau) | 166 |
| Abbildung 5-28: Ergebnisse der JET-Versuche für Oberflächenproben der ersten Feldkampagne: gestörte Mischproben (orange), ungestörte Stechzylinderproben (blau); Alle Versuche (grau) | 166 |
| Abbildung 5-29: Ergebnisse der JET-Versuche für Oberflächenproben der zweiten Feldkampagne: gestörte Mischproben (orange), ungestörte Stechzylinderproben (blau); Alle Versuche (grau)..... | 167 |
| Abbildung 5-30: Statistik der Lagerungsdichten unterschieden nach Probenart | 167 |
| Abbildung 5-31: Ergebnisse der JET-Versuche für Oberflächenproben der zweiten Feldkampagne zur kleinräumigen Variabilität: Basispunkte (blau), Vergleichspunkte (orange); Alle Versuche (grau)..... | 168 |
| Abbildung 5-32: Zusammenhang zwischen der Fließgrenze und der Erodibilität für Oberflächenproben der zweiten Feldkampagne: τ_c (blau) (Pa), k_d (orange) (cm^3/Ns) . | 169 |
| Abbildung 5-33: Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt relativ zur Fließgrenze und der Erodibilität für Misch- und Laborproben der zweiten Feldkampagne: τ_c (blau) (Pa), k_d (orange) (cm^3/Ns) | 169 |
| Abbildung 5-34: Erodibilitätskennwerte τ_c (links) und k_d (rechts) für alle untersuchten Proben (orange), für Proben der Aggregatstabilitätsklassen 3, 4, 5 und 6 (dunkelblau, grau, gelb und hellblau), | 170 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tabelle 3-1: Übersicht über Starkniederschläge während des Messzeitraums 1994-2001 | 59 |
| Tabelle 3-2: Geometrie und Systemlogik der 5 gewählten Teilflächen | 64 |
| Tabelle 3-3: Landnutzungs- und Oberflächeneigenschaften für die ereignisbasierte Modellierung..... | 66 |
| Tabelle 3-4: Kennwerte des Niederschlags in WEPP für die 4 Beispielergebnisse | 67 |
| Tabelle 3-5: Im Rahmen der kontinuierlichen Modellierung kalibrierte Bodenparameter (Rebscher & Schmalz (2018)) | 68 |
| Tabelle 3-6: Kennwerte zu modellierten und gemessenen Abflüssen im Zeitraum 1994-2001, erste Zahl – gesamter Messzeitraum, zweite Zahl – Messzeitraum vor dem singulären Ereignis (29.10.1998) und dritte Zahl – Messzeitraum nach dem singulären Ereignis.... | 70 |
| Tabelle 3-7: Kennwerte zu modellierten und gemessenen Abträgen im Zeitraum 1994-2001, erste Zahl – gesamter Messzeitraum, zweite Zahl – Messzeitraum vor dem singulären Ereignis (29.10.1998) und dritte Zahl – Messzeitraum nach dem singulären Ereignis.... | 71 |
| Tabelle 3-8: Vergleich der 4 Beispielergebnisse innerhalb der Kontinuumssimulation mit den Messungen | 72 |
| Tabelle 3-9: Überblick über die gewählten Kalibrierparameter, (Kaiser 2018), verändert..... | 74 |
| Tabelle 3-10: Gemessene und in WEPP eventbasiert modellierte Summen für Abfluss und Abtrag für die 4 Beispielergebnisse..... | 76 |
| Tabelle 4-1: Übersicht über die Versuchsreihen mit dem Standardboden..... | 113 |
| Tabelle 4-2: Auswertung der JET-Versuche – Ergebnisse für drei getestete Ansätze zur Auswertung..... | 114 |
| Tabelle 5-1: Übersicht über die Feldtermine | 129 |
| Tabelle 5-2: Horizonte im Leitprofil Lösshang | 148 |
| Tabelle 5-3: Horizonte im Leitprofil Grushang..... | 149 |
| Tabelle 5-4: Überblick über die Bodenproben: Bodenart (Anteil Kies (%G), Anteil Sand (%S), Anteil Schluff (%U), Anteil Ton (%T), Anteil Feinsand (%VFS)) (Gewichts%), Aggregatstabilität (AS) (-), Fließgrenze (FG), Ausrollgrenze (AG) (Gewichts%-Wasser), Lagerungsdichte (ρ_b) (g/cm ³), Porosität (n) (%), Anteil Organik (%OM) (Gewichts%) | 151 |
| Tabelle 5-5: Überblick über die durchgeführten JET-Versuche: Bodenart (Löss (L), Grus (G), Standard (S), Art der Probe (Ungestört (U), Gestört (G), Labor (L)), Wassergehalt (%W) (Gewichts%), Dichte (g/cm ³), Anfangsschubspannung τ_0 (Pa), Anzahl Messpunkte (-), Versuchsdauer (s), Abtragstiefe bei Versuchsende T_{max} (cm), durchführende Person, ermittelte Parameter τ_c (Pa) und k_d (cm ³ /Ns)..... | 153 |
| Tabelle 5-6: Korrelationskoeffizienten R^2 für alle untersuchten Beziehungen jeweils zu τ_c und k_d ; für den gesamten Datensatz (links) und für den reduzierten Datensatz (rechts) | 160 |

| | |
|--|-----|
| Tabelle 5-7: Konstante und variable Bodenparameter an den 5 Wiederholungspunkten für Oberflächenproben auf dem Lösshang für die erste Feldkampagne (links) und die zweite Feldkampagne (rechts)..... | 164 |
| Tabelle 5-8: Vergleich der Korrelationskoeffizienten für die variablen Bodeneigenschaften unterschieden nach Bodenart | 170 |
| Tabelle 5-9: Vergleich der Korrelationskoeffizienten für die variablen Bodeneigenschaften unterschieden nach Probenart | 171 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------|---|
| ABAG | Allgemeine Bodenabtragungsgleichung |
| BFD50 | Bodenkarte, Maßstab 1:50.000 |
| BGR | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe |
| CPIDS | Crop Parameter Intelligent Database System |
| EZG | Einzugsgebiet |
| FAM | Forschungsverbund Agrarökosysteme München |
| GIS | Geografisches Informations System |
| GK25 | Geologische Karte, Maßstab 1:25.000 |
| GÜK200 | Geologische Übersichtskarte, Maßstab 1:200.000 |
| HET | Hole Erosion Test |
| HCl | Salzsäure |
| IASI | Infrared Atmospheric Sound |
| ihwb | Fachgebiet für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung an der TU Darmstadt |
| JET | Jet Erosion Test |
| MUSLE | Modified Universal Soil Loss Equation |
| OFE | Over Flow Element |
| PTF | Pedotransferfunktion |
| RUSLE | Revised Universal Soil Loss Equation |
| TEZG | Teileinzugsgebiet |
| USLE | Universal Soil Loss Equation |

Übersetzungsverzeichnis

Begrifflichkeit deutsch

Ablenkplatte
Auftreffen
bewachsene Talwege
Bewegungsbeginn
Bewuchsreste
Bodenstruktur
Druckhöhe
eingetaucht
Erosion infolge Tropfeneinschlag
(Planscherosion)
Feinsand
Filmabfluss
Flachwassergleichung
Geschiebe
Geschiebetransport
homogener Teilabschnitt eines Hangs
Kartoffelreihen (Beispiel f. Bodenbearbeitung)
konventioneller integrierter Landbau
lineare Gleichung für den
Schubspannungsüberschuss
Mulchen
Potentialkern
radial symmetrisch auftreffender Strahl
Reihenkultur
JET-Röhre
Rückhalteflächen
Schubspannungsüberschuss
Strahl
Suspension
Tauchbecken
Tiefenmesser
Wasseroberfläche
Wirbelviskosität
zertifizierter ökologischer Landbau
Zwischenfrüchte

Begrifflichkeit englisch

deflection plate
impinging
grassed waterways
incipient motion
plant residues
soil texture
head
submerged
splash erosion

very fine sand
sheet flow
shallow water equation
bed load
bed load transport
over Flow Element
potato ridges
conventional integrated farming
linear excess shear stress equation

mulch tillage
potential core
submerged impinging circular jet
row crops
JET-tube
retention ponds
shear stress excess
jet
suspension load
submergence tank
depth gauge
water surface
eddy viscosity
certified organic farming
undercrops

Verzeichnis der Formelzeichen

| Formelzeichen | Bedeutung | Einheit |
|-----------------|--|--------------------------------|
| A | Fließquerschnitt; Achsen Schnittpunkt (JET) | m ² - |
| b | Breite; Breitenanteil Interrillen (WEPP) | m - |
| c | Kohäsion | Pa |
| c _g | Köhäsions-Koeffizient der hydraulischen Erosion (KINEROS2) | 1/s |
| C | Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Flächenbewirtschaftung (USLE); Düsenverlustbeiwert (JET) | - - |
| C _d | Diffusionskonstante (JET) | - |
| C _f | Koeffizient Planscherosion (KINEROS2); Reibungskoeffizient (JET) | - - |
| C _m | Transportkapazität (KINEROS2) | m ³ /m ³ |
| C _s | Sedimentkonzentration (KINEROS2) | m ³ /m ³ |
| d | Durchmesser (allg.); Korndurchmesser des Sohlmaterials; Düsendurchmesser (JET) | m m m |
| d _m | maßgebender Korndurchmesser | m |
| d ₁₀ | Korndurchmesser bei 10% Siebdurchgang | m |
| D _c | Erosionskapazität (WEPP) | kg/sm ² |
| D _f | Erosions- / Depositionsrate Rillenerosion (WEPP) | kg/sm ² |
| D _i | Erosionsrate Interrillenerosion (WEPP) | kg/sm ² |
| e _h | Erosionsrate hydraulische Erosion (KINEROS2) | m ² /s |
| e _s | Erosionsrate Planscherosion (KINEROS2) | m ² /s |
| E | mittlerer jährlicher spezifischer Sedimentabtrag (USLE); Erosionsrate (KINEROS2) | t/aha m ² /s |
| f | Dekadischer Logarithmus des Quotienten aus Abtragstiefe J und Düsendurchmesser d abzgl. Dekadischer Logarithmus der dimensionslosen Messzeit (JET) | - |
| f _o | Dekadischer Logarithmus des Quotienten aus Gleichgewichtstiefe und Düsendurchmesser (JET) | - |
| f _s | Kornrauheitsfaktor (WEPP) | - |
| f _t | Gesamtrauheitsfaktor (WEPP) | - |
| Fr | Froude-Zahl | - |
| \vec{g} | Vektor der Gravitationskraft mit den Komponenten 0,0,g | m/s ² |
| G | Sedimentfracht (WEPP) | kg/sm |
| h | Höhe (allg.); Wassertiefe; Druckhöhe (JET) | m m m |
| l _e | Effektive Niederschlagsintensität (WEPP) | m/s |
| l _E | Energieliniengefälle | - |
| l _s | Sohlengefälle | - |

| Formelzeichen | Bedeutung | Einheit |
|-------------------|--|--|
| J | Abtragstiefe (JET) | m |
| J _b | Abstand der initialen Bodenoberfläche von der Düse (JET) | m |
| J _e | Gleichgewichtstiefe (JET) | m |
| J _i | Abstand Punkt i von der Düse (JET) | m |
| J _p | Länge des Potentialkerns (JET) | m |
| J _b * | Dimensionsloser Abstand der initialen Bodenoberfläche von der Düse (JET) | - |
| J _i * | Dimensionsloser Abstand Punkt i von der Düse (JET) | - |
| J _p * | Dimensionslose Länge des Potentialkerns (JET) | - |
| k _d | Erodibilität | cm ³ /Ns |
| k _{St} | Strickler-Beiwert | m ^{1/3} /s |
| k _T | Transportkoeffizient (WEPP) | m ^{1/2} s ² /kg ^{1/2} |
| K | Erodibilität (USLE) | th/haNa |
| K _i | Interrillenerodibilität (WEPP) | kg/sm ⁴ |
| K _r | Rillenerodibilität (WEPP) | s/m |
| L | Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Topographie (USLE) | - |
| m _s | pro Zeit- und Breitereinheit transportierte Sedimentmasse | kg/ms |
| M _s | pro Zeiteinheit transportierte Sedimentmasse | kg/s |
| p | Druck | Pa |
| p _s | Proportionalitätsfaktor | s |
| P | Korrekturfaktor zur Berücksichtigung von Erosionsschutzmaßnahmen (USLE) | - |
| q _s | Sedimentaustrag aus Modellgebiet (KINEROS2) | m ² /s |
| Q | Durchfluss | m ³ /s |
| r | Radialer Abstand vom Zentrum der Bodenprobe (JET) | m |
| R | Hydraulischer Radius; Erosivität (USLE) | m N/h |
| Re | Reynoldszahl | - |
| S | Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Topographie (USLE) | - |
| SDR _{RR} | Oberflächenabhängige Sedimentlieferate (WEPP) | - |
| t | Zeit (allg.); Messzeit (JET) | s s |
| t _b | Zeit bis zum Erreichen der Tiefe der initialen Bodenoberfläche (JET) | s |
| t _p | Zeit bis zum Erreichen der Unterkante des Potentialkerns (JET) | s |
| t _r | Referenzzeit bis zum näherungsweisen Erreichen der Gleichgewichtstiefe (JET) | s |
| T _c | Transportkapazität (WEPP) | kg/sm |
| T _{max} | Abtragstiefe bei Versuchsende | m |

| Formelzeichen | Bedeutung | Einheit |
|----------------|---|----------|
| T_b^* | Dimensionslose Zeit bis zum Erreichen der Tiefe des initialen Bodenoberfläche (JET) | - |
| T_i^* | Dimensionslose Zeit bis zum Erreichen des Punktes i (JET) | - |
| T_p^* | Dimensionslose Zeit bis zum Erreichen der Unterkante des Potentialkerns (JET) | - |
| u, v, w | Geschwindigkeitskomponenten in die drei Raumrichtungen x, y, z | m/s |
| \bar{u} | Querschnittsmittel der Geschwindigkeitskomponente in Fließrichtung | m/s |
| \vec{u} | Geschwindigkeitsvektor mit den Komponenten u, v, w | m/s |
| \vec{u} | Vektor der zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten mit den Komponenten u, v, w | m/s |
| U_o | Fließgeschwindigkeit im Strahl (JET) | m/s |
| x | Dekadischer Logarithmus der dimensionslosen Messzeit (JET) | - |
| x, y, z | Raumkoordinaten in einem kartesischen Bezugssystem | m |
| y | Abstand Düse – Probenoberfläche (JET) | m |
| z_s | z -Koordinate der Sohle | m NHN |
| z_w | z -Koordinate der Wasseroberfläche | m NHN |
| Θ | Strömungsintensität | - |
| Θ_c | Strömungsintensität bei transportkritischen Verhältnissen | - |
| λ | Widerstandsbeiwert | - |
| ν | kinematische Viskosität von Wasser | m^2/s |
| ν_t | turbulente Viskosität | m^2/s |
| ρ, ρ_w | Massendichte von Wasser | kg/m^3 |
| ρ_s | Massendichte des Sohlmaterials | kg/m^3 |
| σ_{ir} | Abflussrate Interrillen (WEPP) | m/s |
| τ | Schubspannung | Pa |
| τ_c | Kritische Schubspannung des Sohlmaterials | Pa |
| τ_f | Wirksame Sohlenschubspannung (WEPP) | Pa |
| τ_i | Schubspannung im Abstand J_i von der Düse (JET) | Pa |
| τ_o | Anfangsschubspannung; Schubspannung im Potentialkern (JET) | Pa Pa |
| τ_s | Sohlenschubspannung | Pa |
| ϕ | Winkel der inneren Reibung | - |
| Φ | Transportintensität | - |
| Ψ | Bewegungsintensität | - |



1. Einleitung

1.1. Problemstellung

Die ausfurchende und einschneidende Wirkung des fließenden Wassers auf die Erdoberfläche wird als allgemeine Definition für das Phänomen der Erosion durch Wasser verwendet. Gemeint ist jedoch gewöhnlich Bodenerosion, die in einem Maß stattfindet, das in seiner Größenordnung nicht von der natürlichen Bodenbildungsrate ausgeglichen werden kann. Während Abtrag und Neubildung von Böden natürliche Prozesse im Gesteinskreislauf sind, wird Bodenerosion in anthropogen überprägten und so für erosive Prozesse anfälligeren Naturräumen als Bodendegradation verstanden, da die Abtragsraten die Bodenbildungsrate um Größenordnungen übersteigen und somit als irreversibler Bodenverlust anzusehen sind. Je nach Klima, Topographie und anstehenden Gesteinen wird die Bodenbildungsrate in einer Größenordnung von 0,01 – 1 t/(ha*a) (Amelung et al. 2018) geschätzt. Unter ungestörten Bedingungen, d.h. intakten Boden- und Pflanzengesellschaften, wird davon ausgegangen, dass diese Größenordnung im Mittel auch der Erosionsrate entspricht. Auf anthropogen überprägten, insbesondere landwirtschaftlich genutzten Flächen, weichen die Bedingungen jedoch erheblich ab. Der Bodenkörper wird durch Befahrung mit landwirtschaftlichem Gerät konstant verdichtet und die Abflussbildung auf der Bodenoberfläche erhöht sich. Monokulturen, saisonale Brache, Reinkulturen, etc. führen durch fehlende Bodenbedeckung ebenfalls zur erhöhten Abflussbildung, zu schnelleren Abflüssen und zur Destabilisierung der Bodenoberfläche. Durch intensive Beweidung kann es zudem zu einer Schädigung der schützenden Grasnarbe kommen. Diese primär durch die Landwirtschaft ausgelöste Bodenerosion wird daher auch „kulturbedingt“ genannt (Richter 1998).

Die durch Bodenerosion erzeugten Schäden lassen sich in On-Site-Schäden und in Off-Site-Schäden unterteilen. Bei On-Site-Schäden handelt es sich um Schäden, die direkt am Ort der Erosion entstehen. Dazu gehört vor allem der direkte Bodenverlust am Hang. Außer dem absoluten Verlust kommt es am Hang jedoch auch zu Umlagerungsprozessen speziell dem Abtrag von Feinmaterial von den Hangflanken und der Sedimentation dieses Materials am Hangfuß. Aus dieser Umlagerung können sich Ernteeinbußen ergeben, da insbesondere Feinmaterial die Wasserspeicherkapazität des Bodens und seine Fähigkeit, Nährstoffe zu binden, erzeugt. Damit verbunden ist oft eine Verringerung der Erntemengen im Hangbereich.

Off-Site-Schäden treten in nachgeordneten Ökosystemen auf. So kann die erwähnte Sedimentation am Hangfuß mächtige Kolluvialprofile mit feinkörnigen Böden hoher Sortierung bilden, welche ähnlich ertragsschwach wie erodierte Hangböden sein können. Werden die erodierten Bodenpartikel in ein Gewässersystem eingetragen, führt dies zu einer allmählichen Aufhöhung von Talauen und Wasserstraßen, aber auch zur Kolmation der Gewässersohle und zur Verlandung von Rückhalteräumen. Nicht zu vernachlässigen ist auch die eutrophierende Wirkung von in der Landwirtschaft eingesetzten Düngemitteln, die mit den erodierten Bodenpartikeln ins Gewässer eingetragen werden. Durch Sturzfluten kann erodiertes Sediment auch in Siedlungsbereiche eingetragen werden. Nach Richter (1998) entstehen die Hauptschäden bei Hochwässern nicht durch das Wasser selbst, sondern durch die Ablagerungen der weiter oben im Einzugsgebiet erodierten Bodenpartikel.

Die Europäische Kommission zählt Bodenerosion als irreversiblen Bodenverlust zu einer der acht Hauptgefahren für intakte Bodenkörper in Europa. Die Wassererosion betrifft dabei ca.

26 Mio. ha Bodenfläche (KOM 2002). Laut Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe sind etwa ein Drittel der Ackerfläche in Deutschland von einer mittleren (10-15 t/(ha*a)) bis hohen (30 - 55 t/(ha*a)) potentiellen Erosionsgefährdung durch Wasser betroffen (BGR 2014). Die Prozessketten, die Bodendegradation durch Wasser bedingen, sind jedoch hochgradig komplex, räumlich und zeitlich variabel und an Umwelt- und Bearbeitungsbedingungen gekoppelt. Morgan (2006) gibt bei einem Messzeitraum von 6 Jahren an, dass 80 % des gemessenen Bodenabtrags während 13 Niederschlagsereignissen verzeichnet sind. Hudson (1981) gibt für seine Messreihen sogar an, dass 75 % der innerhalb eines Jahres verzeichneten Erosion in einer Zeitspanne von 10 Minuten aufgetreten sind.

Um das Ausmaß erosiver Prozesse abschätzen und die Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen beurteilen zu können, wird versucht, Bodenabtrag über Modelle abbilden und vorhersagen zu können. Eine Modellierung der Erosionsprozesse zur Identifizierung vulnerabler Gebiete und potentieller Maßnahmen basiert dabei auf der Gegenüberstellung der erosiven Wirkung von Niederschlag und Oberflächenabfluss (Erosivität) und einem definierten Erosionswiderstand des Oberbodens (Erodibilität). Traditionell kommen dabei vor allem empirische grey-box Modelle zum Einsatz. Besonders bewährt und im Kontext zahlreicher Modelle implementiert ist die auf umfangreichen Feldversuchen aufgebaute empirische Universal Soil Loss Equation (USLE) des U.S. Department of Agriculture (Wischmeier et al. 1978). Das Modell wurde zur Bestimmung des langjährigen, mittleren Bodenabtrags einzelner Ackerschläge konzipiert und bewährt sich in diesem Kontext bereits seit mehreren Jahrzehnten.

Sollen dagegen Fragestellungen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung untersucht werden, sind hierfür physikalisch basierte Modellansätze erforderlich. Hier müssen sowohl Einzelereignisse simulierbar sein als auch eine hohe räumliche Auflösung ermöglicht werden, um die räumliche Verteilung von Erosion, Transport und Deposition bzw. Gewässeranbindung ermitteln zu können. Diese Modelle sind damit als Alternative zur USLE zu verstehen, um Bewirtschaftungsalternativen für einzelne Ackerschläge und kleine Einzugsgebiete bzgl. des Erosionsrisikos zu untersuchen. Eine gängige Methode in der physikalisch basierten Modellierung sind Abtragsansätze vom Typ „*linear excess shear stress equation*“. Bestehende physikalische Modellansätze zeigen sich jedoch noch als zu kleinskalig, schwierig zu parametrisieren und nicht immer aussagekräftig. Herausforderungen in der Modellierung umfassen unter anderem dominante Erosionsstrukturen und eine entsprechend geeignete modelltechnische Abbildung. Diese Herausforderungen werden dadurch verschärft, dass jeder Naturraum mit spezifischen Böden, Klima und Landnutzung andere Erscheinungen der Bodendegradation und dominierende Erosionseffekte zeigt.

Bei der Betrachtung von Einzelereignissen oder kurzen Zeiträumen werden diese Einflüsse zudem durch den statistischen Charakter des Erosionsprozesses überlagert. Während die statistische Natur der die Bodendegradation auslösenden Niederschläge umfassend untersucht ist und daher gut beschrieben werden kann, ist dies bei den Teilprozessen der Infiltration und des Oberflächenabflusses nur eingeschränkt möglich. Praktisch nicht erfassbar ist die statistische Natur der Bodeneigenschaften, der Bewirtschaftungsform und des Entwicklungsstadiums des Bewuchses.

Obwohl die statistische Natur der Erodibilität eines Oberbodens bereits in zahlreichen Veröffentlichungen theoretisch und/oder messtechnisch herausgearbeitet wurde (siehe z.B. Krier 1987; Bryan 2000; Auerswald et al. 2014), entspricht es der üblichen Praxis in den verwendeten Erosionsmodellen, diesen Erosionswiderstand als konstante oder nahezu

konstante Bodeneigenschaft in Abhängigkeit invarianter Bodeneigenschaften (insbesondere der Korngrößenverteilung) über Pedotransferfunktionen abzuleiten. Das Problem hierbei ist, dass Erosion durch Oberflächenabfluss auf landwirtschaftlichen Flächen typischerweise nur sogenannte kohäsive Böden betrifft. Bei diesen entsteht der Erosionswiderstand nicht durch das Eigengewicht des Einzelkorns, sondern durch Oberflächenkräfte bzw. Kohäsionskräfte zwischen den einzelnen Partikeln. Diese hängen außer von der Korngröße jedoch auch von einer Vielzahl räumlich und zeitlich veränderlicher Einflüsse ab.

Wischmeier & Smith (1965) haben bei der Aufstellung der USLE der statistischen Natur des Erosionsprozesses und insbesondere der statistischen Natur der Erodibilität kohäsiver Böden Rechnung getragen, indem sie eine Gleichung zur Ermittlung langjähriger Mittelwerte aufgestellt haben. Innerhalb dieser Definition zeigt die USLE bis heute die stabilsten Vorhersagen für Bodenerosion und ist das am häufigsten verwendete Modell. Bereits mit Einführung der USLE wurde diese jedoch auch außerhalb der definierten Gültigkeit verwendet, z.B. zur eventweisen Betrachtung von Erosionsereignissen. Hierbei entsteht eine Diskrepanz zwischen dem statistischen Charakter der Erodibilität und den als konstant angenommenen Erosionsparametern, welche bereits in Wischmeier (1976) klar dargelegt wurde. Auch ein eventbasiertes physikalisches Modell wird auf eine Vorhersage von der Qualität der USLE reduziert, wenn zeitlich invariante Bodeneigenschaften für die Bestimmung der Erodibilität genutzt werden. Eine solche Modellierung ermittelt somit nicht den Abtrag für das spezifische Event, sondern den Mittelwert für viele Wiederholungen desselben Events. Zur Bestimmung einer eventspezifischen Erodibilität muss dagegen quantifizierbar sein, welche Eigenschaften des Bodens die Erodibilität bedingen und in welchem Umfang diese variieren. Dasselbe gilt, wenn dennoch der ermittelte Mittelwert zur Beurteilung von Einzelevents verwendet werden soll, da hier bewertet werden muss, wie groß der damit verbundene Fehler werden kann und unter welchen Voraussetzungen diese Diskrepanz akzeptiert werden kann.

Die vorliegende Arbeit setzt sich mit dieser kurz angerissenen Problematik systematisch auseinander. Im Fokus steht dabei, wie stark die Erodibilität eines Bodens räumlich und zeitlich variiert, welche Bedeutung dies im Erosionsgeschehen einnimmt und was dies für die Parametrisierung in Erosionsmodellen bedeutet. Gesucht werden sollen Ansätze, die eine Annäherung an die offenen Fragen ermöglichen und Grundlage für weitergehende Forschungsarbeiten bilden können. Hierfür soll insbesondere untersucht werden, inwieweit sich die Erodibilität eines Bodens aus direkten Messungen ableiten lässt. Im Themenfeld Erosion kohäsiver Böden durch Oberflächenabfluss scheint besonders das Konzept des JET Erosion Test (JET) nach *G.J. Hanson* (Hanson 1990) geeignet. Dieses Messgerät arbeitet nach dem Prinzip des Prallstrahls und wurde ursprünglich für die In-Situ Bestimmung von Damm- und Böschungsstabilität entwickelt. Abweichende Bauformen ermöglichen jedoch die Nutzung des Geräts im Labor. Hierdurch soll eine Messung mit wenigen Stunden Laufzeit von ungestörten und gestörten Feld- oder Laborproben mit kleinem Probenvolumen realisierbar sein, so dass dieses Messprinzip zumindest potentiell eine Möglichkeit zur Generierung einer soliden Datenbasis mit vertretbarem Aufwand und gleichzeitig einer qualitativen Beschreibung der Erosionsprozesse darstellt. Die Arbeiten sind eingebettet in einen Forschungsschwerpunkt des Fachgebiets für Ingenieurhydrologe und Wasserbewirtschaftung der TU Darmstadt. In diesem wird in einer Kombination aus Feldaufnahmen und Hallenversuchen untersucht, welche Erscheinungen der Bodendegradation in dem ausgewählten Naturraum identifiziert werden können und welche strukturellen Veränderungen die ursächlichen Prozesse beeinflussen.

1.2. Forschungsfragen

Die unter 1.1 skizzierte Problemstellung soll mit zwei thematischen Schwerpunkten bearbeitet werden, welchen jeweils eine Forschungsfrage zugeordnet ist.

Forschungsfrage 1:

Eignet sich die modelltechnische Abbildung der Prozesse des Bodenabtrags durch Oberflächenabfluss in gängigen Erosionsmodellen, um die real ablaufenden Erosionsprozesse nachzubilden und realistische Abtragungsschätzungen zu ermöglichen?

Dieser thematische Schwerpunkt soll sich mit der Modellierung von Bodenerosionsprozessen in physikalisch-basierten Erosionsmodellen beschäftigen. Die theoretischen Grundlagen zur Abbildung des Erosionsprozesses werden diskutiert, wobei ein Schwerpunkt auf den Prozessteil der Partikel- und / oder Aggregatablösung durch Oberflächenabfluss gelegt wird. Anhand eines Modellierungsbeispiels soll geprüft werden, wie gut die Modelle geeignet sind, gemessene Erosionsereignisse zu reproduzieren, wobei auch hier ein Schwerpunkt auf den Abtragsprozess und die Modellparameter zur Erodibilität gelegt wird. Es wird geprüft, welche Erkenntnisse sich über die Variabilität der Bodeneigenschaften aus dem Vergleich von Messung und Modellierung ableiten lassen. Im Detail sollen die folgenden Forschungsfragen diskutiert werden:

- Welche Eigenschaften des Oberflächenabflusses definieren den erosiven Angriff auf den Oberboden?
- Welche Methoden existieren, die Erosivität des Oberflächenabflusses zu berechnen oder zu modellieren?
- Welche Eigenschaften des Oberbodens resultieren in einem Widerstand gegen angreifende Kräfte?
- Welche Eigenschaften des Oberbodens eignen sich zur Vorhersage der Erodibilität, und existieren Ansätze diese zu berechnen?
- Wie wird die Erodibilität des Oberbodens in Modellansätzen berücksichtigt?
- Sehen die Modelle Konzepte zur räumlichen und zeitlichen Variabilität dieser Parameter vor?
- Können die Modelle einen aufgelösten gemessenen Erosionsprozess von einem Testeinzugsgebiet qualitativ und quantitativ korrekt nachbilden?
- Welchen Anteil an Fehler in der qualitativen und quantitativen Nachbildung lässt sich den Erosionsparametern zuschreiben?

Forschungsfrage 2:

Ist der JET Erosion Test ein geeignetes Messgerät, um räumliche und zeitliche Veränderungen der Erodibilität zu messen, zu analysieren und hieraus Empfehlungen zur Parametrisierung des Erosionswiderstands in Erosionsmodellen abzuleiten?

In diesem zweiten thematischen Schwerpunkt soll die Erodibilität messtechnisch erfasst werden. Hierzu wird zunächst ein Messgerät vom Typ JET spezifisch für die formulierten Fragestellungen konstruiert und getestet und es werden sinnvolle Anwendungsbereiche für das Messgerät definiert. Aufbauend hierauf werden exemplarische Fragen zur räumlichen und zeitlichen Variabilität der Erodibilität formuliert und geeignete Messkampagnen durchgeführt. Es soll geprüft werden, ob und in welcher Form der JET geeignet ist, offene Fragen aus dem Themenfeld der Modellierung zu erarbeiten und die Parametrisierung der Erodibilität in Erosionsmodellen zu verbessern. Im Detail sollen die folgenden Forschungsfragen diskutiert werden:

- Wie lässt sich der Erosionswiderstand des Oberbodens messen? Welche Verfahren existieren und welche sind im Kontext des vorliegenden Themas sinnvoll?
- Ist das Messprinzip des JET grundsätzlich geeignet, den Erosionsprozess durch Oberflächenabfluss nachzubilden?
- Eignen sich die vorhandenen Methoden zur Auswertung der JET-Versuche für die vorliegenden Fragestellungen?
- Lassen sich mit dem JET belastbare bzw. reproduzierbare Parameter zur Erodibilität ermitteln?
- Lassen sich mit dem JET Messungen an ungestörten Stechzylinderproben durchführen?
- Eignen sich gestörte Bodenproben, um Aussagen über die Erodibilität des ungestörten Bodenkörpers abzuleiten?
- Welche Wertebereiche können Erosionsparameter annehmen?
- Legen die Messergebnisse nahe, dass eine räumliche und zeitliche Variabilität dieser Parameter vorhanden ist und welche Wertebereiche hier angenommen werden?
- Zu welchen Eigenschaften des Oberbodens lassen sich Korrelationen finden und decken sich diese mit den theoretisch formulierten Erwartungen und Literaturwerten?
- Zeigen die Werte eine räumliche und zeitliche Variabilität, die vermuten lässt, dass eine Berücksichtigung in der Modellierung notwendig ist?

Die vorliegende Arbeit versteht sich als Grundlagenarbeit zum Thema der Berücksichtigung von Veränderlichkeit der Erodibilität des Oberbodens in der Erosionsmodellierung. Im Ausblick werden Vorschläge für eine Anwendung und Vertiefung der hier erbrachten Forschungstätigkeit gemacht. An einigen Stellen wird der Breite der Analyse Vorrang gegeben vor einer möglichen weiteren Vertiefung. Dies erscheint aufgrund der notwendigen Vollständigkeit sinnvoll.

1.3. Aufbau der Arbeit

In **Kapitel 2** wird zunächst ein Überblick über das Themenfeld und die theoretischen Grundlagen zu Bodenerosion und Bodenerosionsmodellierung gegeben. Es wird gezeigt, wie die heute verfügbaren Ansätze zur Erosionsmodellierung entwickelt wurden und wo die entwicklungstechnischen Grundlagen liegen. Im Zentrum der Betrachtung steht die modelltechnische Abbildung der Erosionsmechanik und die hierfür vorhandenen Ansätze für kohäsive Böden. Dies umfasst theoretische Modellanalysen und eine Ableitung von Anwendungsgrenzen und ebenso die Fragen, welche Prozesse mit den zugrunde liegenden Modellkonzepten sinnvoll abgebildet werden und welche Prozesse alternativer Modellkonzepte bedürfen. Um diese Bewertung vorzunehmen, werden die theoretischen Grundlagen der Modellkonzepte beleuchtet. Dies bezieht sich auf die Modellkonzepte zu Hydraulik und Sedimenttransport auf der einen Seite (angreifende Kraft) und zur Abbildung von Erosionswiderstand des Bodens auf der anderen Seite (rückstellende Kraft).

Aufbauend hierauf wird in **Kapitel 3** ein Modellierungsbeispiel vorgestellt, um die theoretisch herausgearbeiteten Aspekte an diesem Beispiel abzugleichen, zu verifizieren und zu ergänzen. Die Basis hierfür bilden Messungen im Rahmen einer FAM-Versuchsstation zu Bodenerosion auf dem Klostergut Scheyern (Fiener et al. 2019). Diese Messkampagne wurde zwischen 1992 und 2004 durchgeführt und umfasst insgesamt 8 Jahre detaillierter Aufzeichnungen zu mehreren landwirtschaftlich genutzten Testeinzugsgebieten. Aus der theoretischen Modellanalyse werden mehrere unterschiedliche Modellansätze ausgewählt, mit welchen der umfangreiche Datensatz im Modell nachgebildet wird. Es wird geprüft, wie gut die exemplarisch ausgewählten Modellansätze den aufgezeichneten Erosionsprozess auf dem Versuchsgut Scheyern nachbilden können. Hierbei soll auch die Frage untersucht werden, ob sich Defizite in der Abbildung des Erosionsprozesses eindeutig auf die Abbildung der Erodibilität in den Modellansätzen zurückführen lassen.

In **Kapitel 4** werden der JET Erosion Test und Details zu dessen Funktionsweise vorgestellt. Zu dem im Rahmen dieser Arbeit konstruierten JET finden sich Konstruktionsgrundlagen, Hinweise zur Bedienung und gewonnene Erkenntnisse, die für künftige Bauformen berücksichtigt werden sollten. Weiter werden der Testbetrieb und die daraus resultierende Qualitätsbeurteilung von Messungen mit dem JET vorgestellt. Dies umfasst die Berechnung der Verlustbeiwerte des Geräts sowie einen Betrieb mit standardisierten Proben, aus dem die Genauigkeit der Messergebnisse und der Auswertungsalgorithmen abgeleitet werden kann. Es enthält damit verbunden Hinweise zur passenden Aufbereitung von Bodenproben für Versuche.

Kapitel 5 beschreibt die mit dem konstruierten JET durchgeführten Versuchsreihen. Hierzu wird die Auswahl von geeigneten Testhängen bzw. Testböden innerhalb des hydrologischen Feldlabors „Fischbach-Einzugsgebiet“ vorgestellt. Auf den Testhängen wurden verschiedene Feldkampagnen über einen Zeitraum von 2,5 Jahren durchgeführt, die der Beantwortung exemplarischer Fragestellungen zu der Durchführung von JET-Messungen und der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Erosionsparameter dienen. Es wurden insgesamt 63 JET-Versuche durchgeführt und ausgewertet. Diese werden unter verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet und mit anderen ermittelten Eigenschaften der untersuchten Bodenproben in Beziehung gebracht. Hieraus werden Thesen zur Veränderlichkeit von Einflussgrößen auf die Erosionsparameter abgeleitet.

In **Kapitel 6** werden die über die thematisch abgegrenzten vier Kapitel erarbeiteten Erkenntnisse zusammengeführt und mit den formulierten Forschungsfragen abgeglichen. Abschließend wird ein Ausblick auf mögliche sinnvoll aufbauende Messkampagnen im Rahmen größerer Forschungsprojekte gegeben.

2. Grundlagen zu Phänomenologie und Modellierung von Erosionsprozessen

Zunächst sollen im Folgenden die theoretischen Grundlagen zum Prozess der Bodenerosion erläutert werden. Hierfür wird in Kapitel 2.1 zunächst ein qualitativer Überblick über das Phänomen der Bodenerosion durch Wasser auf landwirtschaftlich genutzten Flächen gegeben. Der Fokus der Ausführungen liegt auf den unterschiedlichen Prozessen, die zu Abtrag und Transport des Bodenmaterials führen. Die gleichermaßen relevanten Prozesse zur Deposition von Bodenmaterial werden (hier und in den Folgekapiteln) nur angerissen. Auch liegt der Schwerpunkt auf den Prozessen, welche im Kontext der Fallbeispiele in Kapitel 3 und 5 im Vordergrund stehen werden.

Kapitel 2.2 stellt einige wichtige Aspekte zu dem Medium Boden vor. Hierbei liegt ein Schwerpunkt auf den Bodencharakteristika, welche in der Modellierung von Erosions- und Transportprozessen genutzt werden und auf der Abgrenzung von Bodeneinheiten, welche für die Parametrisierung dieser Modelle relevant ist. Außerdem wird die Bedeutung der Kohäsion und damit die Bedeutung von Tonmineralen als Basis für die später definierten Erosionsparameter des Bodens erläutert.

In Kapitel 2.3 werden die Basisgleichungen zu Hydraulik und Sedimentabtrag hergeleitet, welche typischerweise in Computermodellen zur Simulation von Bodenerosionsprozessen verwendet werden. Aus den Herleitungen lässt sich herausarbeiten, für welche Anwendungsfälle diese Gleichungen theoretisch oder empirisch entwickelt wurden und inwiefern diese konzeptionell zur Abbildung der beschriebenen Erosionsprozesse geeignet sind.

Hierauf aufbauend gibt Kapitel 2.4 einen Überblick über die Erosionsmodellierung und die Grundkonzepte gängiger Erosionsmodelle. Auch hier wird ein Schwerpunkt gelegt auf die Ansätze, die sich in den folgenden Fallbeispielen als relevant zeigen. Zwei dieser Modelle werden für das Modellierungsbeispiel in Kapitel 3 ausgewählt. Diese Modelle werden in Kapitel 2.5 detaillierter vorgestellt und insbesondere die zugrunde liegenden Gleichungen für Bodenabtrag und Sedimenttransport erörtert.

In Kapitel 2.6 werden die für die Bewertung der Fallbeispiele wichtigen Erkenntnisse extrahiert und mit anderen Studien mit vergleichbaren Fragestellungen verglichen.

2.1. Prozess der Bodenerosion von Ackerflächen

Bodenerosion meint den Abtrag von fruchtbarem Oberboden über die Bodenneubildungsrate hinaus. Diese häufig verwendete, sehr breite Definition deutet bereits zu Beginn auf eine der großen Herausforderungen in dem Feld der Erosionsmodellierung hin, nämlich die große Vielzahl der involvierten Prozesse sowie die große Vielzahl an unterschiedlichen Fragestellungen.

Der Ursprung des Erosionsprozesses liegt in der kinetischen Energie von Niederschlag (Partikelablösung) und Oberflächenabfluss (Partikelablösung und Transport). Die Erosion selbst ist ein 3-phasiger Prozess, der neben Partikelablösung und Transport auch die Deposition umfasst. Abbildung 2-1 zeigt schematisch den Bodenerosionsprozess nach Amelung et al. (2018). Partikelablösung kann danach durch Tropfeneinschlag oder durch Oberflächenabfluss erfolgen. Oberflächenabfluss kann flächenhaft als Filmabfluss oder als Abfluss in Rillen, Rinnen oder Gullys erfolgen. Die drei letztgenannten Prozesse sind hydraulisch ähnlich und

unterschieden sich vor allem in der Größenskala. Der durch den Oberflächenabfluss ausgelöste Bodenabtrag wird auch als hydraulische Erosion bezeichnet.

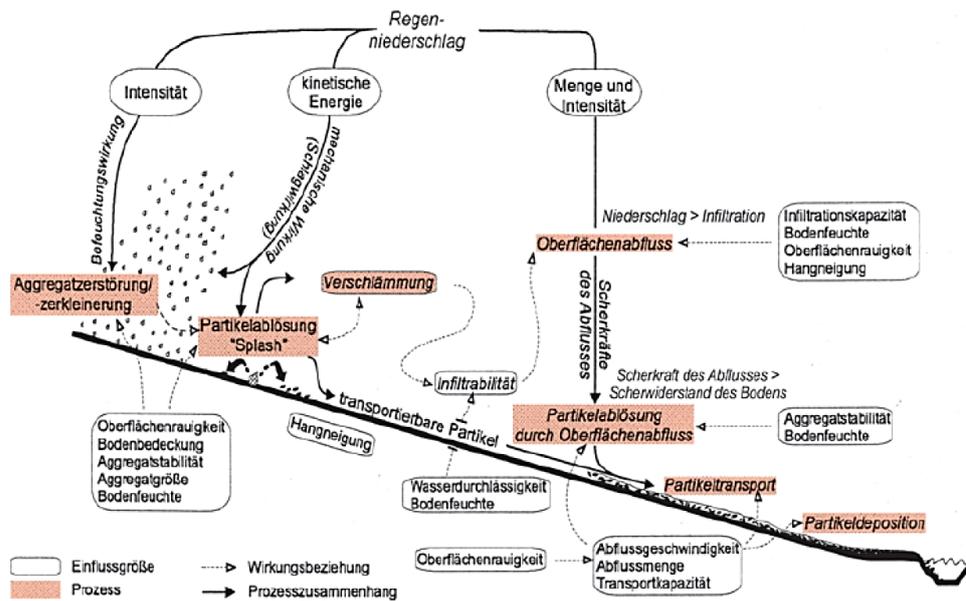


Abbildung 2-1: Komponenten des Erosionsprozesses (Amelung et al. 2018)

Eine Partikelablösung, induziert durch die kinetische Energie des auf dem Boden auftreffenden Niederschlags, wird als Splash-Erosion oder Planscherosion bezeichnet. Die kinetische Energie des einzelnen Regentropfens oder des Niederschlags ist dabei für verschiedene Ereignisse hoch variabel. Je größer ein Regentropfen ist, desto größer sind seine Masse und auch seine Fallgeschwindigkeit und damit seine kinetische Energie. Niederschlag hat abhängig von der Art des Ereignisses Tropfendurchmesser von ca. 1 mm bis 3 mm bei Fallgeschwindigkeiten von 4 m/s bis 9 m/s. Die kinetische Energie des Niederschlagsereignisses wird dann über die Intensität bestimmt und kann für Intensitäten zwischen 1 mm/h und 100 mm/h ein Spektrum von 1 kJ/(m²*h) bis 10.000 kJ/(m²*h) umfassen (Auerswald 1998).

Die Fallgeschwindigkeit eines Niederschlagstropfens beim Auftreffen auf die Bodenoberfläche übersteigt die Infiltrationsleistung des Bodens um ein Vielfaches, wodurch der Tropfen auf der Bodenoberfläche umgelenkt wird. Durch die beim Tropfenaufschlag wirkenden Kräfte können Bodenpartikel aus ihrem Aggregatverband gelöst werden. Dieser Effekt kann ein Vielfaches ausgeprägter sein, wenn Niederschlag hoher Intensität auf ausgetrockneten Boden trifft. Zudem wird durch die Wirkung des Tropfenaufschlags der Luftanteil im Porenraum stark verdichtet und es entstehen hohe Partialdrücke. Gleichzeitig quellen verschiedene Bodenaggregate ungleichmäßig auf und führen zu Scherkräften innerhalb des Bodenkörpers. Die Kombination dieser Drücke und Scherkräfte führt dazu, dass sich in den Aggregaten Mikrorisse bilden und sie dadurch in transportierbare Mikroaggregate zerteilt werden. Diese Zerteilung von Aggregaten wird durch natürliche Verwitterung genauso wie durch Bodenbearbeitungsprozesse weiter verstärkt.

Durch Planscherosion werden somit einzelne Partikel und kleine Aggregate aus der Bodenoberfläche herausgelöst. Hiervon besonders betroffen sind Grobschluff und Feinsand, da bei diesen Kornfraktionen bereits ein Minimum an kinetischer Energie zur Mobilisierung ausreicht (Morgan 2006). Durch die vertikale Geschwindigkeitskomponente kann es außerdem lokal zur Verfestigung des Bodens kommen.

In geringem Maße kann auch ein Transport durch die Planscherosion stattfinden, wenn das herausgelöste Bodenaggregat durch die erfahrene Beschleunigung in Verbindung mit der Schubkraft hangabwärts transportiert wird. Überwiegend erfolgt der Transport der durch Planscherosion abgelösten Partikel jedoch über den entstehenden flächenhaften Oberflächenabfluss sowie in Rillen, wenn die Planscherosion in später ausgeformten Rillen oder Rinnen stattfindet.

Ist der effektive Niederschlag während eines Regenereignisses ausreichend hoch, kommt es, je nach Gefälle, zu Film- oder auch Dünnschichtabfluss auf der Geländeoberfläche. In der frühen Phase der Abflussbildung reicht die Transportkapazität des Abflusses nicht aus, um das durch Planscherosion gelöste Feinmaterial abzutransportieren. Es kommt zur Verschlammung auf der Oberfläche in Form einer dünnen Ablagerungsschicht aus Feinmaterial und / oder zur Infiltration des gelösten Feinmaterials. Beide Vorgänge haben genauso wie die bereits angesprochene Bodenverdichtung durch Tropfeneinschlag zur Folge, dass die Infiltrationsfähigkeit (kurzzeitig oder dauerhaft) sinkt und ein höherer Anteil des Niederschlags abflusswirksam wird. Filmabfluss hat nur geringe Ablösekapazitäten, welche jedoch durch die Wirkung des Tropfeneinschlags vergrößert werden. Diese Wirkung besteht neben der Anregung von Turbulenz in der Filmströmung auch in den Schubkräften, die der radial ausweichende Wasserfilm auf die Bodenoberfläche ausübt.

Der entstehende Filmabfluss verhält sich durch die geringen Fließtiefen in Verbindung mit der hohen Rauigkeit zunächst laminar, schlägt jedoch mit zunehmenden Fließtiefen, ausreichendem Gefälle und der Wirkung des Tropfeneinschlags zunehmend in turbulenten Abfluss um. Dabei bilden sich verflochtene Wasserströme ohne ausgeprägte Gerinne (Morgan 2006). Diese können mit zunehmender Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit immer mehr des durch Planscherosion abgelösten Materials transportieren, bis nicht mehr genug Material zum Transport zur Verfügung steht. Ab diesem Zeitpunkt wird Bodenmaterial durch den Filmabfluss selbst abgelöst. Der Abfluss löst Partikel oder Aggregate durch die wirkende Schubspannung aus der Bodenoberfläche (siehe Kapitel 2.3.2) und transportiert diese in Fließrichtung.

Bei der Transportkapazität handelt es sich um ein dynamisches Gleichgewicht aus Erosion und Deposition für einen gegebenen Fließzustand. Sie steht damit in engem Zusammenhang mit dem Hanggefälle. Ändert sich letzteres, verändert sich auch die Transportkapazität. Reduziert sich die Transportkapazität z.B. durch Abnahme des Gefälles, kommt es lokal zu Deposition. Bei zunehmendem Gefälle vergrößert sich die Transportkapazität und es kommt zu lokaler Erosion. Zu betonen ist hierbei der Aspekt des dynamischen Gleichgewichts für Abfluss bei Transportkapazität, d.h. es findet dennoch lokal Erosion statt, welche jedoch im gleichen Ausmaß wie die lokale Deposition auftritt. Dies bedeutet, dass, auch wenn lokal kein Bodenverlust stattfindet, dennoch eine starke Veränderung der Bodenstruktur und -zusammensetzung festgestellt werden kann.

Kommt es aufgrund der Struktur der Oberfläche zu einer ausreichenden Konvergenz des Filmabflusses, kann es zur Initiierung von Rillen kommen. Hierbei handelt es sich um Fließwege geringer Ausdehnung (typischerweise bis zu 10 cm tief (Auerswald 1998)), welche sich dennoch in ihrem Fließverhalten deutlich von dem reinen Filmabfluss unterscheiden. Typischerweise sind in der Rille Fließtiefe und Fließgeschwindigkeit größer, bei gegenüber dem Filmabfluss deutlich reduzierter Breite und glatteren Fließverhältnissen. Die Prozesse aus Bodenabtrag, Bodentransport und Deposition entsprechen denen bei Filmabfluss, wobei sich die Abflussverhältnisse entsprechend den oben genannten Aspekten deutlich verändern.

Reynolds- und Froude-Zahl nehmen bis in einen für Bodenerosion kritischen Bereich zu und an Unebenheiten an der Gerinnesohle kommt es aufgrund lokaler Turbulenzen zu Erosion. Als qualitatives Kriterium für das Einsetzen von Rillenabfluss kann das Umschlagen von einem strömenden auf einen schießenden Abflussvorgang herangezogen werden (Ploey et al. 1976). Die Froude-Zahl nimmt dabei kontinuierlich im Bereich von 0,8 bis 1,2 zu, so dass keine genaue kritische Froude-Zahl angegeben werden kann, ab der die Rillenbildung einsetzt (Merritt 1984), wobei das Umschlagen des Fließzustands konzeptionell als das Einsetzen des Rillenabflusses verstanden wird (Ploey et al. 1976). Laut Govers (1985) kann der Beginn der Rillenbildung sicherer über das Konzept einer kritischen Schubspannungsgeschwindigkeit von 3 – 3,5 cm/s definiert werden. Auch kleinräumige Fließhindernisse auf der Oberfläche, z.B. Steine, können durch Umströmung und Kolkbildung zur Rillenbildung beitragen. Dies führt bei gleichem Abfluss zu einer Zunahme von Erosion und insbesondere Transport gegenüber dem Filmabfluss, wobei die Erosion lokal begrenzt (in den Rillen) auftritt. Haben sich Rillen gebildet, verlängern sich diese durch rückschreitende Erosion hangaufwärts.

Zum besseren Verständnis des Prozesses der Rillenerosion wurden zahlreiche Studien durchgeführt (siehe z.B. Gilley et al. (1990), Nearing et al. (1997), Yao et al. (2008)). Beispielsweise haben Nearing et al. (1997) die hydraulischen Bedingungen in Rillen unter verschiedenen Ausgangsvoraussetzungen untersucht. Es wurden Hangneigungen, Abflussraten, Bodenrauigkeiten, sowie Froude- und Reynoldszahlen variiert. Die Untersuchung zeigt, dass sich Erosionsrate und Rillenhydraulik kontinuierlich gegenseitig beeinflussen. Der Wechsel zwischen den Erosionsformen ist dabei auch mit der Scherfestigkeit des Bodens verbunden (Frielinghaus 1996).

Systematisch wird durch die Veränderung der Abflussverhältnisse am Übergang zwischen Filmabfluss und Rillenabfluss häufig auch zwischen den Interrillen- und Rillenprozessen unterschieden, d.h. die Prozesse der Planscherosion und der hydraulischen Erosion durch Filmabfluss werden zusammengefasst und von der hydraulischen Erosion durch Rillenabfluss unterschieden. Govers et al. (1990) geben für lehmige Böden in Belgien auf relativ steilen Hängen an, dass ca. 22 - 46 % des Gesamtabtrags durch Interrillenprozesse verursacht werden. Allerdings wurden nach Morgan (2006) in anderen Experimenten auch deutlich abweichende Anteile bestimmt. Einstürze der Rillenwände erhöhen die Erosionsrate nach Rillenbildung weiter. Van Asch (1983) gibt für lose, nicht-kohäsive Böden auf relativ steilen Hängen in Italien an, dass 80 – 95 % des erodierten Materials durch Oberflächenabfluss abgetragen wurden, wobei nicht zwischen Rillen- und Interrillenerosion unterschieden wird. Nach Govers et al. (1990) kann das Versagen der Rillenwände mehr als die Hälfte des in den Rillen erodierten Materials ausmachen. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass Bodenverlust durch Rillenbildung oder großskaligere Prozesse deutlich besser erkannt werden kann, als Interrillenerosion, welche mit bloßem Auge kaum zu erkennen ist. Die Auslastung der Transportkapazität in Rillen wird auch vom Sedimenteintrag aus Interrillenprozessen beeinflusst. Wird mehr Sediment aus den Interrillengebieten eingetragen, kann weniger Sediment in den Rillen selbst abgetragen werden. Daher hängen die in einer Rille erodierenden Sedimentmengen auch vom Sedimenteintrag aus Interrillenprozessen ab.

Wirkt das fließende Wasser über einen längeren Zeitraum ein, so können sich aus den Rillen größere Rinnen und letztendlich auch Furchen bilden. Wird der Boden tiefer als bis zur Untergrenze der Bodenbearbeitung (ca. 30 cm) ausgeräumt, lassen sich die Erosionsspuren durch eine Bearbeitung nicht mehr beseitigen und man spricht nach Auerswald (1998) von Gullyerosion. Diese Erosionsform kann mehrere Meter breit und tief werden und ist aufgrund

der größeren Fließtiefe und der Turbulenz des Wassers unabhängig von der Wirkung der Regentropfen. Gullys entwickeln sich nicht als vergrößerte Rillen, sondern nach Morgan (2006) besonders durch Lücken in der den Boden schützenden Vegetationsschicht (z.B. durch zu intensive Beweidung). Hier bildet sich eine Mulde aus, welche sich durch die lokal deutlich höhere Abtragsrate (als in der umgebenden bewachsenen Fläche) schnell eintieft. An dem entstehenden Absturz zeigen sich lokal hohe Turbulenzen und es tritt schießender Abfluss ($Fr > 1$) auf. Dessen erosive Kraft greift vor allem am Fuß des Absturzes an, wodurch die fast vertikale Wand unterspült wird. Dabei kommt es auch vermehrt zur Erosion an der Sohle des Gullys, durch welche sich dieser hangaufwärts ausbreiten kann, bis die unterspülte Wandseite schließlich kollabiert. Diese Erosionsform wird weltweit für 10 bis 94 % der gesamten Bodenerosion verantwortlich gemacht. Im Mittel betragen diese Werte 30 bis 75 % der Bodenerosion auf einer Fläche (Poesen et al. 2003). Die große Spannweite dieses Wertes liegt an der großen Diskrepanz zwischen der Erosionsrate im Gully und ihrem relativ geringen Auftreten in der Fläche (Zachar 1982). Vergleichbar zur Rillenerosion finden sich auch zur Gullyerosion verschiedene Studien, die versuchen, kritische Werte für die Bildung von Gullys festzulegen. Poesen et al. (2003) legen dies beispielsweise anhand einer kritischen Schubspannung fest, welche jedoch abhängig von anderen Randbedingungen über große Spannweiten variiert. Für einen bewirtschafteten Lehmhang in Belgien werden beispielsweise kritische Schubspannungen von 3,3 – 32,2 Pa angegeben, für steinigen Sandboden in Portugal von 16,8 – 74,4 Pa.

Neben den hier kurz skizzierten Prozessen von Erosion auf der Oberfläche gibt es auch Erosionsprozesse in tieferliegenden Bodenschichten oder Tunnel Piping, die jedoch im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt werden.

2.2. Bedeutung des Oberbodens für den Erosionsprozess

2.2.1. Charakteristika und Klassifizierung des Oberbodens

„Böden sind der belebte Teil der obersten Erdkruste“ schreiben (Amelung et al. (2018), Seite 2) als kompakte und dennoch umfassende und präzise Definition des Begriffs Boden. In verschiedenen Fachdisziplinen werden unter dem Begriff Boden dennoch sehr unterschiedliche Dinge angesprochen. Für die folgende Arbeit soll so weit nicht anders vermerkt mit Boden durchgehend ein Lockersediment verstanden werden, das durch Umwandlungsprozesse zu einem potentiellen Untergrund für Pflanzenwachstum geworden ist oder geworden war, so dass die Definition auch degenerierte aber ehemals funktionsfähige Böden umfasst, aber z.B. keine „jungen“ Lockersedimente. Boden entsteht dabei durch physikalische und chemische Zersetzungsprozesse aus Festgestein oder Lockermaterial (Regolith) durch chemisch-biologische und physikalisch-biologische Umwandlungsprozesse der mineralischen und organischen Komponenten (Bahlburg & Breitzkreuz 2008). Die verschiedenen Verwitterungsprozesse führen abhängig insbesondere von Klima und anstehendem Ausgangsgestein zur Bildung unterschiedlicher Böden.

Entsprechend dem Grad dieser Zersetzung werden Böden nach ihrer Korngröße bzw. Zusammensetzung der Korngröße klassifiziert in Kies, Sand, Schluff und Ton. Diese Klassifizierung wurde mit DIN 4022-1:1987-09 eingeführt und ist mittlerweile in DIN EN ISO 14688-2:2018-05 fortgeschrieben. Diese Blickweise stammt (entsprechend der referenzierten Norm) aus der Geotechnik und ist u.a. besonders für Stabilitätsfragen relevant. Es handelt sich hierbei also um technische Perspektiven, die von der oben vorgestellten Definition mit Blick auf die Bodenfunktion abweichen. Ergänzend werden Böden hier anhand spezifischer Eigenschaften beschrieben, die mehr oder weniger eng mit dieser Einteilung korrelieren. Dies ist insbesondere die Korngrößenverteilung, die die Beschreibung der Korngrößen weiter verfeinert, indem der prozentuale Anteil über alle Korngrößen als laufende Summe benannt wird (siehe Abbildung 2-2). DIN EN ISO 14688-2:2018-05 sieht z.B. eine Beschreibung der Korngrößenverteilung des organischen Anteils und der plastischen Eigenschaften (siehe Kapitel 2.2.2) zur Ansprache eines Bodens vor.

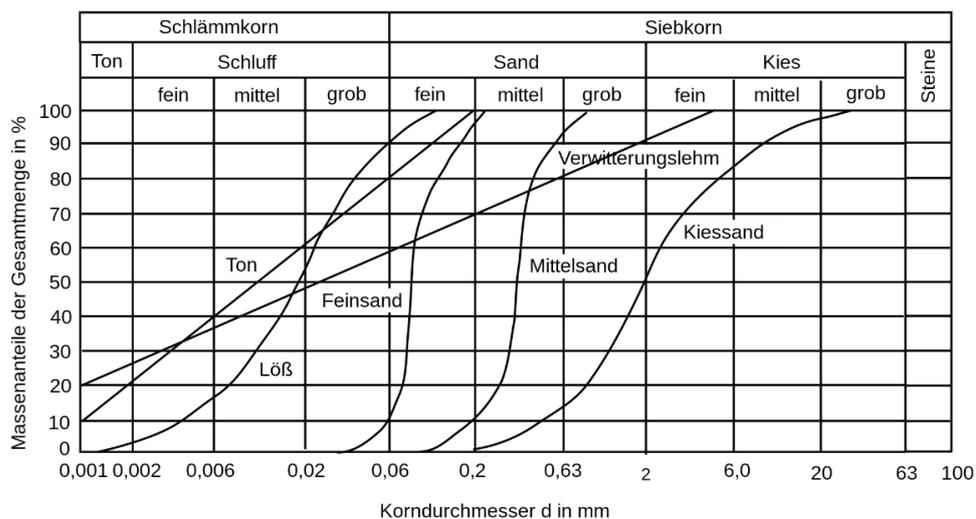


Abbildung 2-2: Korngrößen nach DIN EN ISO 14688 mit charakteristischen Summenlinien der Korngrößenverteilung

Die bodenkundliche Kartieranleitung (Sponagel 2005) sieht eine Bewertung der Korngrößenverteilung unterschiedlicher Bodenarten (*soil texture*) in einem Bodenartendreieck (siehe Kapitel 5.3.2, Abbildung 5-16 für ein Beispiel) vor. Mit der Ausnahme von Lehm, der durch eine Mischung verschiedener Korngrößen charakterisiert ist, entsprechen die Hauptbodenarten den Korngrößenklassen wie sie in DIN EN ISO 14688-2:2018-05 definiert sind. Ergänzend zu diesen Einteilungen der Böden kann z.B. die Korngrößenverteilung weiter bewertet werden. Hierbei ist vor allem relevant, ob die Kurve der Korngrößenverteilung steil oder flach ist, was z.B. über eine Ungleichförmigkeitszahl ausgedrückt werden kann.

Neben der Partikelgröße unterscheiden sich die verschiedenen Bodenarten aber auch nach den sie bildenden Mineralien. So bestehen Kiese und Sande primär aus Quarzen, während Tone primär aus Tonmineralen (siehe Kapitel 2.2.2) gebildet werden und Schluffe eine gemischte Zusammensetzung zeigen (siehe Abbildung 2-3). Diese unterschiedliche Mineralzusammensetzung resultiert zum einen aus Umwandlungsprozessen aber auch aus unterschiedlicher Genese, d.h. unterschiedlichen Ausgangsgesteinen und Bodenbildungsprozessen, welche z.B. in unterschiedlichen Klimazonen vorherrschen. Die konkrete Mineralzusammensetzung ist vor allem bei der Tonfraktion relevant.

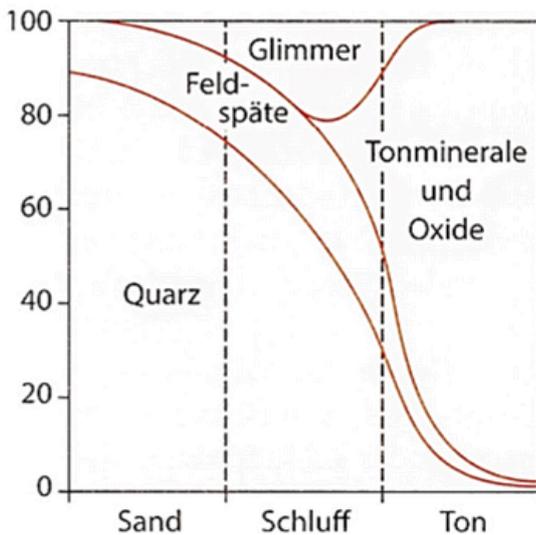


Abbildung 2-3: Mineralische Zusammensetzung von Lockersedimenten bei verschiedenen Korngrößen (Amelung et al. 2018)

Die Pedogenese ist daher ebenfalls eine gängige und sinnvolle Grundlage, um sogenannte Bodentypen zu klassifizieren und bietet den Vorteil, dass bei bekannten Bedingungen der Pedogenese die möglichen Bodentypen bereits bekannt sind. Entsprechend orientieren sich Klassifizierungen an Entwicklungsreihen der fortschreitenden Pedogenese. Hier existieren verschiedene Klassifizierungssysteme, z.B. die US-amerikanische USDA Soil Taxonomy (USDA 2022) oder die World Reference Base for Soil Resources (IUSS Working Group WRB 2022). Beide teilen nach einer Kombination von bodenbildenden Faktoren ein, wobei dem Klima und dem Chemismus eine besondere Bedeutung zugemessen wird. Die Bodensystematik der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (Sponagel 2005) (Bodentypensystematik) definiert Bodentypen hierarchisch nach Abteilung, Klasse, Typ, Subtyp und Varietät, wobei besonders auf das Wasserregime, die Horizontrierung und die bodenbildenden Prozesse geachtet wird. In deutscher Fachliteratur werden teilweise WRB-Einordnungen parallel zur Deutschen Bodentypensystematik genutzt.

Bei diesen Klassifizierungssystemen fällt auf, dass nicht ausschließlich das Ausgangsgestein und die mineralische Zusammensetzung zugrunde liegen, sondern auch der Chemismus und insbesondere die damit verbundene Horizontrierung. Bodenbildende Prozesse führen zu einer Gliederung des Bodens in meist oberflächenparallel verlaufende Zonen mit mehr oder weniger einheitlichen Charakteristika, die als Horizonte angesprochen werden, wobei Vorhandensein, Mächtigkeit und Ausprägung der Horizonte charakteristisch für einen Bodentyp sind. Als Haupthorizonte eines Bodens werden A-, B- und C-Horizonte abgegrenzt. Der A-Horizont ist ein Auswaschungs (Eluvial)-Horizont, also ein Horizont, der durch Auswaschung, insbesondere durch Niederschlag, an bestimmten Mineralien verarmt und gleichzeitig durch Oxidation und Auslaugung geprägt ist. Der B-Horizont ist der korrespondierende Einwaschungs (Illuvial)-Horizont, in welchen die ausgewaschenen Mineralien eingeschwemmt (Tonanreicherung) und ggf. umgelagert werden. Als C-Horizont wird das anstehende Ausgangsgestein angesprochen, wobei das bereits verwitterte, aber noch nicht zu Boden umgebildete Ausgangsgestein, den Cv-Horizont bildet. Junge, wenig entwickelte Böden zeigen häufig nur eine A/C-Horizontfolge, während entwickelte Böden verschiedene Subhorizonte aufweisen.

In verschiedenen Fachdisziplinen, neben der Geotechnik ist dies im besonderen Maße auch die Hydrologie, wird die Kategorisierung von Böden nach den hier genannten Bodenarten oder Bodentypen genutzt, um auf andere, messtechnisch aufwendig oder schwierig zu bestimmende Bodeneigenschaften schließen zu können (Pedotransfer). Van Looy et al. (2017) nennen als Basisparameter für den Pedotransfer Textur, Porosität, Mineralzusammensetzung, organischer Anteil und Lagerungsdichte. Eines der häufigsten Anwendungsfelder in der Hydrologie betrifft Angaben zum Bodenwasserhaushalt (siehe z.B. Cosby et al. (1984) oder Flanagan (2004)). Die Messung bodenhydraulischer Kennwerte wie z.B. Wasserretention und Wasserleitfähigkeit ist mit sehr hohem Aufwand verbunden. Für flächenhafte Modellierung z.B. des Bodenwasserhaushalts werden daher Pedotransferfunktionen mit leichter zu bestimmenden Proxy-Variablen eingesetzt. Amelung et al. (2018) nennen die Korngröße, die Farbe und das Gefüge als die primären Eigenschaften eines Bodens, wobei alle weiteren Eigenschaften wie z.B. Festigkeit, Porenraum, Speicherfähigkeit, Stoffbewegungen und Wachstumsbedingungen mit diesen Primären wenigstens teilweise korreliert sind.

Obwohl hinreichend bekannt ist, dass die Eigenschaften eines Bodens, z.B. in Bezug auf hydrologisch-hydraulische Charakteristika, in hohem Maße von Eigenschaften wie der Mineralzusammensetzung, Horizontrierung und Schichtbildung, aber auch der Vorfeuchte, der Grundwasserinteraktion, der Verdichtung und dem Bewuchs abhängen (siehe z.B. Bryan 2000), wird die Wahl von Bodenparametern in hydrologisch-hydraulischen Modellen primär von der Korngrößenverteilung respektive der Feinbodenart (siehe z.B. Renger et al. 2008) abhängig gemacht anstelle z.B. der Pedogenese.

2.2.2. Eigenschaften von Tonmineralen

Wie bereits im Überblick zu sehen ist, stellen Tonminerale bei der Betrachtung von Böden und ihren Eigenschaften in mehreren Punkten eine Besonderheit dar. Quarz kann nicht beliebig zerkleinert werden, so dass sich die Tonfraktion mineralisch von gröberem Lockersedimenten unterscheidet (siehe Abbildung 2-3). Die, die Tonfraktion im Wesentlichen bildenden, Tonminerale gehören zu den Schichtsilikaten (Phyllosilikate), zu welchen beispielsweise auch die Glimmer gehören. Während Glimmer jedoch auch in Form deutlich sichtbarer Kristalle vorkommt, bleiben Tonminerale klein (Tonfraktion < 0,0002 mm). Schichtsilikate kommen

auch in den größeren Kornfraktionen, insbesondere aber auch dem Feinschluff, vor (Bahlburg & Breitzkreuz 2008).

Unter bodenmechanischen Gesichtspunkten wird zwischen bindigen und rolligen Böden / Lockersedimenten unterschieden, wobei Tonminerale zum großen Teil für die Eigenschaft der Bindigkeit verantwortlich sind. Von bindigem Boden wird typischerweise ab einem Feinkornanteil von 15 % gesprochen, wobei dies die Bodenarten Tone, Schluffe und Lehme (Ausnahme Sandschluffe) umfasst (Sponagel 2005). Böden zeigen auch bei Tongehalten < 20 % noch ein stark vom Ton geprägtes Verhalten im Sinne bodenmechanischer Eigenschaften. Bereits ab einem Tongehalt von 5 bis 10 % wird ein Boden daher mit dem Suffix tonig angesprochen.

Tonig wird umgangssprachlich häufig synonym mit bindig oder kohäsiv verwendet, wobei „tonig“ einen definierten Mindestanteil der Tonfraktion an der Korngrößenverteilung eines Bodens meint, während „kohäsiv“ allgemein die Eigenschaft von Bodenpartikeln meint, eine Gefügestabilität über Kohäsionskräfte herzustellen. Bindigkeit bezeichnet dagegen eine makroskopisch definierte Eigenschaft zur Plastizität, welche sowohl durch Kohäsions- als auch durch Adhäsionskräfte verursacht wird. Plastizität bezeichnet allgemein die Fähigkeit eines Materials auf Stressbeanspruchung mit Verformung zu reagieren, wobei ein Boden mit ausreichend hohem Tongehalt sich abhängig von seinem Wassergehalt flüssig, fest oder plastisch verhält. Eine Suspension von Tonmineralen verhält sich thixotrop (nicht-newtonisches Fließverhalten).

Die Tonminerale spielen bei der Bodenbildung eine zentrale Rolle, was direkt an Eigenschaften wie Tonverarmung, Tonanreicherung und Tonumbildung in den Definitionen von A- und B-Horizonten zu erkennen ist. Beispielsweise wirkt ein tonangereicherter B-Horizont als stauende Schicht, welche den Bodenwasserhaushalt des Bodenkörpers wesentlich prägt. Typische Eigenschaften von tonigen Böden sind neben der Bindigkeit, die Plastizität, die Quellfähigkeit und das Vermögen, Ionen und Moleküle zu sorbieren.

Tonminerale weisen eine besondere Mineralstruktur auf. Während etwa Quarze räumliche 3-dimensionale Formen besitzen, bilden Tonminerale (ebenso wie Glimmer) flache Plattenstrukturen. Unterschieden werden 2-Schicht Tonminerale (bestehend aus einer SiO₄-Tetraederschicht und einer Hydroxidlage) sowie 3-Schicht Tonminerale (eine zusätzliche SiO₄-Tetraederschicht). Die Gitter (2- oder 3-Schicht) sind intern relativ fest, zwischen den Paketen ist jedoch eine Einlagerung von Ionen oder auch H₂O-Molekülen möglich. Die blättchenförmige Gestalt und der Schichtaufbau der Tonminerale führen zu einer sehr hohen spezifischen Oberfläche. Je dünner die Blättchen der Tonminerale sind, desto mehr treten die Eigenschaften der Masse gegenüber der Oberfläche zurück. Typische spezifische Oberflächen bei Tonmineralen liegen bei 5 – 400 m²/g (Hillebrand 2008), zum Vergleich liegen die spezifischen Oberflächen der Schlufffraktion bereits bei nur noch 0,1 – 1 m²/g.

Mit der großen Oberfläche ist eine hohe Kationenaustauschkapazität verbunden. Diese ist bei 3-Schicht Tonmineralen deutlich größer, da hier Ionen zwischen den Schichtstrukturen angelagert werden können. 3-Schicht Tonminerale tragen so entscheidend zur Bodenfruchtbarkeit bei. In Sponagel (2005) wird deutlich betont, dass die Eigenschaften eines Bodenkörpers nicht nur durch den Anteil der Tonfraktion bestimmt sind, sondern auch durch die Eigenschaften der vorliegenden Tonminerale. Hier wird auf die Kationenaustauschkapazität als besonders aussagestarke Eigenschaft der unterschiedlichen Tonminerale verwiesen.

Vergleichbar unterscheidet sich auch die Wassereinlagerung (Quellfähigkeit) zwischen den verschiedenen Tonmineralen. Es werden allgemein quellfähige und nicht quellfähige Tonminerale unterschieden. Insbesondere smectitreiche Sedimente, wie Vertisole, quellen und schrumpfen bei wechselndem Wassergehalt stark.

Der Begriff der Kohäsion in Böden ist definiert über die Mohr-Coulomb'sche Gleichung zur makroskopischen Stabilität des Bodengefüges. Hierbei wird die Bruchstabilität des Bodengefüges gegen einen Scherwiderstand τ definiert als:

$$\tau = \tan(\varphi) + c$$

wobei φ der innere Reibungswinkel und c die Kohäsion ist. Der innere Reibungswinkel entspricht dabei für rollige Böden dem Winkel gegen die Horizontale, in dem ein Bodenkörper stabil bleibt (nicht abrutscht). Für einen kohäsionslosen Boden, z.B. reinen Sand, reduziert sich die Gleichung auf den inneren Reibungswinkel, während sie sich beispielsweise für reines Wasser auf die Kohäsion reduziert, welche in diesem Fall der Oberflächenspannung (Kohäsion zwischen Wassermolekülen) entspricht. Bei teilgesättigten Verhältnissen kann die Saugspannung wie eine Scheinkohäsion wirken und den Boden makroskopisch stabilisieren (Sandburg-Effekt).

Mikroskopisch entsteht Kohäsion zwischen ungeladenen Schichtpaketen über Wasserstoffbrückenbindung, Dipolwechselwirkung und Van-der-Waals-Kräfte. Diese nicht-kovalenten (schwachen) Bindungen können aufgrund der sehr hohen spezifischen Oberfläche (siehe oben) eine starke Verbindung zwischen den Schichtpaketen erzeugen. Hierbei werden eine pH-Wert abhängige (variable) Ladung und eine permanente Ladung unterschieden. Die variable Ladung entsteht an funktionalen Gruppen (z.B. OH-Gruppen) der Kristallkanten. Protonen dieser funktionalen Gruppen dissoziieren und hinterlassen eine Ladung. Diese Deprotonierung ist vom pH-Wert des Bodenwassers abhängig. Auch können gelöste Stoffe, z.B. Salze, an die Partikelkanten gebunden werden und eine Ladung erzeugen. Diese variable Ladung tritt nicht nur bei Tonmineralen auf, sondern auch bei vielen anderen Mineralen.

Die permanente Ladung tritt dagegen praktisch nur bei Schichtsilikaten auf. Sie entsteht durch isomorphen Ersatz in der Kristallstruktur. Hierbei werden Kationen im Kristallgitter durch Kationen niedriger Wertigkeit ersetzt (z.B. Fe^{2+} statt Al^{3+}). Diese Ladung ist immer negativ und wird als permanente Ladung bezeichnet, weil sie in der Kristallstruktur verankert ist und von äußeren Bedingungen (pH-Wert, Ionengehalt des Bodenwassers, etc.) unabhängig ist (Hillebrand 2008).

Feinkörnige Böden bilden Kohärentgefüge (im Unterschied zu Einzelkorngefügen), bei welchen Primärteilchen durch Kohäsionskräfte zusammengehalten werden. Die Partikel bilden eine ungegliederte Masse, die auch durch Austrocknung nicht verändert wird. Diese Gefüge kommen in Schluff-, Lehm- und Tonböden vor, und zwar vor allem in frisch abgelagerten. Eine wesentliche Ursache der Kohärenz sind Wassermenisken. Das Ausmaß der Kohärenz wird daher von den Wassermeniskenkräften bestimmt. Kohärenz, die auf Wassermenisken beruht, ist schnell reversibel. Zu unterscheiden von dem Kohärentgefüge ist das Aggregatgefüge. Hierbei sind Teile der Bodenmatrix von ihrer Umgebung deutlich abgesetzt und bilden separate Körper. Die Aggregation kann so stark ausgeprägt sein, dass feinkörnige Böden die Eigenschaften grobkörniger Böden annehmen.

2.3. Modellierung von Oberflächenströmungen und Sedimenttransport

2.3.1. Grundlagen zur Hydromechanik und Hydraulik von Oberflächenströmungen

Die Strömung eines inkompressiblen, newtonischen Fluids lässt sich mit einem System von partiellen Differentialgleichungen beschreiben, die sich aus der Erhaltung von Masse und Impuls an einem infinitesimalen Fluidteilchen herleiten lassen (z.B. Press & Schröder (1966)).

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + g\end{aligned}\tag{2-1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{u} + \vec{g}\tag{2-2}$$

$$\nabla \vec{u} = 0$$

\vec{u} Geschwindigkeitsvektor mit Komponenten u, v, w (m/s)

p Druckfeld skalar (Pa)

\vec{g} Vektor der Gravitationskraft mit Komponenten $0, 0, g$ (N/kg)

ν kinematische Viskosität (m²/s)

Gleichungssatz 2-1 zeigt zunächst die **Navier-Stokes-Gleichung** zur Impulsbilanz in Komponentenschreibweise. Hierbei steht die linke Seite für die auf ein Fluidteilchen wirkende Beschleunigung (Impulsänderung) mit einem lokalen und einem advektiven Beschleunigungsterm. Die rechte Seite bilanziert die angreifenden Kräfte aus Druckkräften, Gewichtskraft und dem Tensor der viskosen Spannungen. Weitere äußere Kräfte, insbesondere die Corioliskraft, sind in der oben gezeigten Darstellung vernachlässigt. Es folgt die Gleichung der Massenerhaltung. Sie bilanziert die Flüsse in x,y,z-Richtungen, die unter der Annahme von Quellen- und Senkenfreiheit eine Massenerhaltung darstellt. Beide Gleichungen stellen durch die Annahme eines inkompressiblen, newtonischen Fluids bereits Vereinfachungen der jeweils allgemeinen Gleichung dar. Gleichungssatz 2-2 gibt das identische Gleichungssystem in der kompakteren Vektorschreibweise an. Im Folgenden werden beide Schreibweisen verwendet.

Mit diesem Gleichungssatz kann theoretisch jede Strömung eines inkompressiblen, newtonischen Fluids inkl. aller Turbulenzen vollständig beschrieben werden. Hierfür müssen die numerischen Berechnungen jedoch räumlich und zeitlich extrem hoch aufgelöst und alle Anfangs- und Randbedingungen vollständig beschrieben werden. Da dies praktisch nicht realisierbar ist, werden Vereinfachungen des Gleichungssystems unter sinnvollen Annahmen vorgenommen. Gängige Annahmen umfassen z.B. die Vernachlässigung der viskosen Spannungen (Euler Gleichung, Potentialströmung), stationäre ($d/dt = 0$) und gleichförmige ($d/dx = 0$) Fließzustände und insbesondere auch die Reduzierung auf weniger als 3 Raumrichtungen, so dass auch integrierbare Sonderfälle, wie bspw. die Differentialgleichung der Spiegelinie, herauskommen.

Die **Reynoldsgleichungen** (Gleichungssatz 2-3) stellen eine zeitliche Mittelung des Gleichungssatzes 2-2 dar und separieren turbulente Geschwindigkeitsschwankungen, so dass nur die für hydraulische Fragestellungen typischerweise relevanten mittleren Geschwindigkeiten verwendet werden. Um die turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen der Impulsdiffusion zu lösen, kann über das Prinzip der Wirbelviskosität (*eddy viscosity*) eine Scheinzähigkeit eingeführt werden. Diese wird zusammen mit der viskosen Zähigkeit ν als turbulente Zähigkeit ν_t bezeichnet, die die vollständige Impulsdiffusion beschreibt, ohne dass turbulente Geschwindigkeiten explizit erscheinen. Hierdurch ist das Gleichungssystem formell mit den Navier-Stokes-Gleichungen identisch. Für die numerische Berechnung kann die Auflösung jedoch um mindestens eine Größenordnung geringer ausfallen. Die turbulente Viskosität stellt eine zusätzliche Unbekannte dar, die für eine konkrete Fließsituation theoretisch (z.B. Grenzschichttheorie) oder experimentell zu bestimmen ist (Schließungshypothese).

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla \bar{p} + \nu_t \Delta \bar{u} + \bar{g} \quad (2-3)$$

$$\nabla \bar{u} = 0$$

\bar{u} zeitlich gemittelte Geschwindigkeit (m/s)

ν_t turbulente Viskosität (m²/s)

Zur großräumigen Modellierung von Oberflächenströmungen eignen sich jedoch auch die Reynoldsgleichungen aufgrund ihrer Komplexität nicht oder nur eingeschränkt. Die übliche Vereinfachung des Gleichungssystems für diese Strömungssituation ist die **Flachwassergleichungen** (*shallow water equation*). Die grundlegende Annahme ist, dass in flachen Strömungen wie z.B. Flüssen oder Oberflächenabfluss die Geschwindigkeiten in z-Richtung klein sind gegenüber denen in x- und y-Richtung. Hierdurch vereinfacht sich das Gleichungssystem erheblich. Es bedeutet, dass die Impulsbilanz in z-Richtung gegenüber der in x- und y-Richtung vernachlässigt werden kann. Unter der zusätzlichen Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung kann eine Integration über die Fließtiefe vorgenommen werden. In der Folge wird über die z-Achse kein Geschwindigkeitsprofil gelöst, sondern eine mittlere Geschwindigkeit angenommen. Da keine Lösung der Impulsdiffusion in z-Richtung erforderlich ist, kann die Sohlenschubspannung aus dem Tensor der inneren Spannungen herausgelöst werden und erscheint damit explizit in dem Gleichungssystem. So ist es möglich, die Sohlenschubspannung unter Nutzung makroskopischer Beziehungen über ein Fließgesetz mit der Fließgeschwindigkeit in Beziehung zu bringen.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial z_w}{\partial x} + \nu_t \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu_t \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{1}{h} \frac{\tau_{sx}}{\rho}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial z_w}{\partial y} + \nu_t \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \nu_t \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - \frac{1}{h} \frac{\tau_{sy}}{\rho} \quad (2-4)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0$$

u, v Reynoldsgemittelte/ tiefengemittelte Geschwindigkeitskomponente in x-/y-Richtung (m/s)

z_w z-Koordinate der Wasseroberfläche (z.B. m ü. NHN)

h Wassertiefe (m)

τ_s Sohlenschubspannung in x bzw. y Richtung (Pa)

Wird zusätzlich auch die Annahme einer in y-Richtung gegenüber der x-Richtung vernachlässigbaren Geschwindigkeit getroffen, lassen sich aus den Flachwassergleichungen durch Integration über die (tiefenabhängige) Fließbreite bei gleichzeitiger Einführung querschnittsbezogener hydraulischer Größen die 1D-St. Venant-Gleichungen gewinnen.

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u} Q}{\partial x} &= -gA \frac{\partial z_w}{\partial x} - gAI_E \\ \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= 0\end{aligned}\tag{2-5}$$

Q Durchfluss (m^3/s)

A Fließquerschnitt (m^2)

\bar{u} Querschnittsmittel der Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung (m/s)

I_E Energieliniengefälle (-)

In der Impulsbilanzgleichung entsprechen die beiden Terme auf der linken Seite der lokalen bzw. konvektiven Beschleunigung, die beiden Terme auf der rechten Seite der Gewichtskraft und der Sohlenschubspannung. Die Impulsdiffusion der 2D-Flachwassergleichungen ist als innere Größe bei der Integration entfallen. Für einen prismatischen Rechteckquerschnitt lauten die St. Venant-Gleichungen unter Ansatz von $A = b * h$ und $z_w = h + z_s$:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} &= -g \frac{\partial h}{\partial x} + g(I_S - I_E) \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} &= 0\end{aligned}\tag{2-6}$$

wobei das Sohlengefälle als $I_S = - \frac{dz_s}{dx}$ definiert ist.

Die Flachwassergleichung (2D) oder die St. Venant Gleichung (1D) werden für verschiedene Zwecke der Modellierung von Oberflächenströmungen weiter vereinfacht, indem erneut Terme der Impulsbilanz als klein im Vergleich zu anderen Termen angenommen werden. Im Kontext der Modellierung von Oberflächenabfluss ist insbesondere von 3 Gleichungstypen die Rede: dynamische Welle, Diffusionswelle und kinematische Welle. Die dynamische Welle entspricht der vollen St. Venant Gleichung. Bei der Diffusionswelle werden die Beschleunigungsterme in der Impulsbilanz vernachlässigt (unter Beibehaltung der vollen Kontinuitätsgleichung), so dass lediglich die Impulsdiffusion erhalten bleibt. Bei der kinematischen Welle wird darüber hinaus angenommen, dass die Veränderung der Wassertiefe in Fließrichtung klein ist gegenüber dem Sohlengefälle und daher vernachlässigt werden kann. Die Impulsbilanz vereinfacht sich damit zu $I_E = I_S$. Die Begrifflichkeit wurde erstmals von Lighthill & Whitham (1955) eingeführt und bezieht sich darauf, dass die ursprüngliche aus einer Impulsbilanz abgeleitete Flachwassergleichung auf eine reine Bewegungsgleichung reduziert wird.

In den vorgestellten Vereinfachungen in 1D-Form wird die Sohlenschubspannung in Form des Energieliniengefälles dargestellt. Die inneren Spannungen sind aufgrund der Eindimensionalität aufgelöst. Unter der Annahme von Normalabflussverhältnissen lautet der aus dem Stützkraftsatz herzuleitende Zusammenhang zwischen Sohlenschubspannung und Energieliniengefälle für eine ebene Strömung ($b \gg h$):

$$\tau_s = \rho * g * h * I_E \quad (2-7)$$

Das verbleibende Energieliniengefälle entspricht einem lokalen Gleichgewicht aus Fließgeschwindigkeit, Wasserstand und Sohlreibung. Um die vorgestellten Gleichungssysteme zu lösen, ist daher durchweg eine weitere Gleichung erforderlich, welche diese Beziehung etabliert.

Hierfür werden in der Regel sog. Fließformeln verwendet, die unter der Annahme stationär gleichförmiger Verhältnisse Energieliniengefälle und Querschnittsmittel der Geschwindigkeit unter Einbeziehung von Querschnittsgrößen und Rauheitsparametern miteinander verknüpfen. Die bekanntesten Fließformeln sind die theoretisch herzuleitende allgemeine Fließformel sowie die auf experimentellem Weg hergeleitete Manning-Strickler-Gleichung.

Allg. Fließformel:
$$\bar{u} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{8gRI_E} \quad (2-8)$$

Manning-Strickler-Gleichung:
$$\bar{u} = k_{st} R^{\frac{2}{3}} I_E^{\frac{1}{2}} \quad (2-9)$$

λ Widerstandsbeiwert (-)

R hydraulischer Radius (m)

k_{st} Strickler-Beiwert ($m^{1/3}/s$)

Die allgemeine Fließformel gilt für laminare und turbulente Strömungen, wobei der Widerstandsbeiwert über unterschiedliche Ansätze in Abhängigkeit des Verhältnisses von Zähigkeits- und Trägheitskräften, ausgedrückt als Reynoldszahl Re , ermittelt wird (Schröder 1990). Die empirisch hergeleitete Manning-Strickler-Gleichung gilt aufgrund der Bedingungen bei den ihr zugrunde liegenden Versuchen bzw. Messungen nur für turbulente Strömungen bei vollkommen rauem Wandverhalten.

Die äquivalente Sandrauheit als eine Eingangsgröße zur Berechnung des Widerstandsbeiwerts λ beschreibt die Rauheitswirkung der Oberfläche auf die Strömung. Überwiegt sie im Vergleich zur Wirkung der in der Reynoldszahl enthaltenen Viskosität, wird dies als vollkommen raues Wandverhalten bezeichnet. Im umgekehrten Fall spricht man von hydraulisch glattem Wandverhalten.

Zu den für verschiedene Materialien bzw. Flächennutzungen zu wählenden äquivalenten Sandrauheiten und Strickler-Beiwerten gibt es in der Literatur umfangreiche Zusammenstellungen (z.B. Schröder (1990)). Für die Berechnung von dünnen Oberflächenströmungen sind diese für Gerinneabflüsse geltenden Werte in Richtung einer größeren Rauheitswirkung der betreffenden Oberfläche zu verschieben.

2.3.2. Grundlagen zum Sedimenttransport

Entsprechend dem dritten newtonschen Axiom wirkt die unter Kapitel 2.3.1 eingeführte Sohlenschubspannung, welche verzögernd auf die Strömung wirkt und über die Bilanz mit dem Sohlgefälle die Strömungsgrößen insb. Fließgeschwindigkeit bestimmt, in gleicher „Stärke“ aber entgegengesetzter Richtung auf die Gewässersohle. Da diese Kraftwirkung in Fließrichtung einen Mitnahmeeffekt von Sohlmaterial mit der Strömungsrichtung erzeugt, wird die Sohlenschubspannung in ihrer Wirkung auf die Sohle auch als Schleppspannung bezeichnet. Entsprechend den genannten Herleitungen kann die Schubspannung an der Sohle in einen turbulenten und einen viskosen Anteil zerlegt werden. Zanke (1982) nennt weiter eine

Schubspannungskomponente infolge suspendierter Feststoffe und schreibt, nach eigener Feststellung ist es näherungsweise richtig, die Gesamtschubspannung zur Transportberechnung heranzuziehen.

Grundlage für die Bestimmung der Sedimentbewegung ist die Bilanz der am Einzelkorn angreifenden und der rückhaltenden Kräfte. Die angreifenden (Strömungs-)Kräfte werden in der Regel über die Sohlenschubspannung τ_s , in einigen Ansätzen auch über die mittlere Geschwindigkeit, parametrisiert. Letztere ist aber im Vergleich zur Sohlenschubspannung ein im Hinblick auf den Strömungsangriff nicht eindeutiger Parameter. Rückhaltende Kraft ist das Netto-Gewicht (Gewicht abzüglich Auftrieb) des Kornes. Es hängt ab von der Materialdichte ρ_s , der Korngröße (meist beschrieben über einen idealisierten Korndurchmesser d), der Kornform und letztendlich auch von der Exponierung des Kornes im Sohlverbund. Angegeben wird die rückhaltende Kraft meist nicht als Gewicht, sondern in Form einer kritischen Zustandsgröße, insbesondere als kritische Schubspannung τ_c . Der kritische Zustand ist ein zentrales Problem für Fragen der Sedimentbewegung. Theoretische Überlegungen zur Kräftebilanz am Einzelkorn haben zwar einen gewissen informativen Wert, sind jedoch praktisch unbrauchbar. Daher resultieren Gleichungen zum Sedimenttransport vor allem aus empirischen Untersuchungen (Zanke 1982).

Bei der Modellierung des Transports von Sedimenten in Strömungen geht es zunächst um die Festlegung des Bewegungsbeginns (*incipient motion*) als einer kritischen Zustandsgröße. Die transportkritische Größe kann als Momentengleichgewicht um den Kippunkt eines Partikels verstanden werden. Die angreifenden Kräfte werden unter Verwendung der unter Kapitel 2.3.1 beschriebenen Gleichungen bzw. Gleichungssysteme berechnet. Die rückhaltende Kraft, auch als Erosionswiderstand bezeichnet, wird als Materialeigenschaft aus experimentellen Untersuchungen abgeleitet. Die transportkritische Größe messtechnisch zu bestimmen, ist nicht trivial, weil eine Grenze für den visuellen Bewegungsbeginn definiert werden muss. Borchardt (2016) gibt hier einen guten Überblick über die Definition des Bewegungsbeginns in der Entwicklung der Sedimenttransportberechnung.

Die grundlegende Arbeit zum Thema Bewegungsbeginn stammt von Shields (1936). Er hat für korngleiches Geschiebe unter Verwendung dimensionsloser Größen auf experimentellem Wege eine Abhängigkeit zwischen der kritischen Schubspannung τ_c und dem Korndurchmesser d hergeleitet und grafisch aufgetragen (sog. Shields-Diagramm, Abbildung 4-2). Eine funktionale Beschreibung dieses Zusammenhangs wurde von ihm nicht aufgestellt. Auch zeigt das Diagramm keine eindeutige Abhängigkeit, sondern eine gewisse Bandbreite. Die Experimente von Shields wurden in nachfolgenden Untersuchungen ergänzt (siehe z.B. Schröder & Zanke (2003)). Dabei wurde im Feinkornbereich eine abweichende Abhängigkeit der kritischen Schubspannung vom Korndurchmesser festgestellt. Eine geschlossene (und dadurch komplexe) funktionale Approximation dieser (modifizierten) Shields-Kurve stammt von Zanke (2003). Für praktische Belange gibt er eine einfache Approximation der Kurve durch einen Polygonzug an.

Bewegungsbeginn setzt danach ein, wenn $\tau_s = \tau_c$, für $\tau_s > \tau_c$ findet Sedimenttransport statt. Dieses Schwellenwertkonzept stellt allerdings eine Vereinfachung der tatsächlichen Verhältnisse im Zusammenhang mit dem Bewegungsbeginn dar (siehe z.B. Schuster 1995). Auf der einen Seite unterliegt der Strömungsangriff auf die Sohle bei turbulenten Strömungen zeitlichen und räumlichen Schwankungen. Auch wenn die zeitlich gemittelte Schubspannung τ_s geringer als τ_c ist, können lokal Schubspannungsspitzen auftreten, die über dem kritischen Wert liegen und damit zu einer Kornbewegung führen. Auf der anderen Seite variieren auch

die Korneigenschaften und die Exposition der Körner, so dass auch die kritische Sohlenschubspannung ein gewisses Spektrum aufweist. Das Schwellenwertkonzept kann somit lediglich zur Beschreibung des allgemeinen Bewegungsbeginns einer Lockersedimentsohle herangezogen werden.

Wenn die an der Sohle angreifenden Kräfte die rückhaltenden Kräfte übersteigen, erfolgt der Transport zunächst in Sohlnähe unter wiederkehrendem Kontakt des Materials mit der Gewässersohle in Form von Rollen und Springen. Bezeichnet wird diese Art des Materialtransports als Geschiebetransport (*bed load*). Mit zunehmendem Schubspannungsüberschuss ($\tau_s - \tau_c$) nimmt der Sohlkontakt des Materials ab, bis es schließlich gänzlich als Schwebstoff transportiert wird.

Bei Erreichen der Transportkapazität besteht ein dynamisches Gleichgewicht aus Erosion und Deposition für einen gegebenen Fließzustand. Dabei kann es bei sandigen Gewässersohlen lokal zur Umlagerung der Sohle und zur Ausbildung sogenannter Transportkörper (Riffel, Dünen) kommen, im Mittel bleibt die Sohle jedoch unverändert. Die Differenz zwischen der Transportkapazität und dem Sedimentzufluss bestimmt, ob Erosion oder Deposition stattfindet.

Zur Berechnung des Sedimenttransports wurden zahlreiche Transportgleichungen entwickelt. Allen Gleichungen liegt dabei die Annahme zugrunde, dass Transportgleichgewicht herrscht. In hydraulischer Sicht setzt dies Normalabflussverhältnisse (stationär gleichförmiger Abfluss) voraus. Unterschieden wird hierbei zwischen Geschiebe-, Suspensions- und Gesamttransport. Es handelt sich dabei um einfache algebraische Gleichungen, die die pro Zeiteinheit transportierte Masse M_s (kg/s) bzw. die auf die Breitereinheit bezogene Transportrate m_s (kg/s*m) in Abhängigkeit von Material- und Strömungsgrößen berechnen. Formuliert sind die Gleichungen meist über eine dimensionslose Transportintensität Φ und eine dimensionslose Strömungsintensität Θ .

$$\Phi = \frac{m_s}{\rho_s} \frac{1}{\sqrt{g' d_m^3}} \quad (2-10)$$

$$\Theta = \frac{\tau_s}{\rho g' d_m} \quad \Theta_c = \Theta(\tau_s = \tau_c) \quad (2-11)$$

$$g' = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g$$

$$\Psi = \frac{1}{\Theta} \quad (2-12)$$

ρ_s Massendichte des Sediments (kg/m³)

d_m maßgebender Korndurchmesser (m)

Ψ Bewegungsintensität (-)

Einer der ersten Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransports stammt von Du Boys (1879). Er ging bei der Herleitung seiner Transportgleichung von der heute widerlegten Modellvorstellung aus, dass der Geschiebetransport in einer mehrere Korndurchmesser starken Schicht stattfindet und dass Schubspannung und Geschwindigkeit der Kornbewegung über die Dicke dieser Schicht auf null an der Schichtunterkante abnehmen. In der ursprünglichen Schreibweise lautet die Transportgleichung von Du Boys (1879):

$$m_s = p_s \tau_s (\tau_s - \tau_c) \quad (2-13)$$

wobei p_s (-) einen von der Korngröße des Geschiebes abhängigen Proportionalitätsfaktor darstellt.

Die Transportgleichung von Meyer-Peter & Müller (1948) beruht auf der Verknüpfung theoretischer Überlegungen zur Abhängigkeit zwischen Transport und Schubspannungsüberschuss und den Erkenntnissen aus umfangreichen und sorgfältigen experimentellen Untersuchungen zum Geschiebetransport über ein großes Spektrum an hydraulischen Kenngrößen und Sedimentkenngrößen.

$$\Phi = 8(\Theta - \Theta_c)^{3/2} \quad (2-14)$$

In dieser Fassung gibt es zwar einen dimensionslosen kritischen Mobilitätsparameter Θ_c (-), dieser wird jedoch konstant zu 0,047 gesetzt. Die Formel gilt dann vor allem für gröberes Geschiebe und großes Gefälle, so dass bei Extrapolation auf andere Sedimente die kritische Schubspannung direkt eine Funktion von maßgebendem Durchmesser und Korndichte ist. Wird Θ_c variabel nach Shields angesetzt, liefert sie auch für feineres Material brauchbare Ergebnisse. Nicht eingesetzt werden sollte sie dagegen für sehr feines Material.

Der Ansatz von Einstein (1950) fasst den Geschiebetransport als ein Wahrscheinlichkeitsproblem auf und kommt daher ohne eine kritische Bezugsgröße aus. Einstein (1950) geht davon aus, dass es weniger die mittlere Strömung als vielmehr die turbulenten Geschwindigkeitsfluktuationen sind, die Teilchen mobilisieren. In einer nach der Transportintensität aufgelösten Form lautet der Ansatz:

$$\Phi = \frac{1}{A} \left(\frac{2}{\operatorname{erf}(B\Psi+C) + \operatorname{erf}(B\Psi-C)} - 1 \right) \quad (2-15)$$

Die Werte der Konstanten A, B, C sowie die Funktionswerte der Fehlerintegralfunktion $\operatorname{erf}(z)$ können Einstein (1950) entnommen werden.

Yalin (1963) geht bei der Herleitung seiner Transportformel davon aus, dass das von Einstein identifizierte Wahrscheinlichkeitsmoment weniger aus turbulenten Fluktuationen der Strömung stammt, sondern aus der zufälligen Lage und damit Exposition der Körner. Da sich für das individuelle Korn durchaus ein kritischer Zustand definieren lässt, führt Yalin (1963) wieder einen Schwellenwert ein. Die resultierende Gleichung lautet unter Verwendung der oben definierten dimensionslosen Größen:

$$\Phi = 0,635\sqrt{\Theta}\vartheta \left(1 - \frac{1}{a\vartheta} \ln(1 + a\vartheta) \right) \quad (2-16)$$

$$\vartheta = \frac{\Theta - \Theta_c}{\Theta_c}$$

$$a = 2,45 \frac{\sqrt{\Theta_c}}{\frac{\rho_s}{\rho}^{0,4}}$$

Die Gleichung ist beschränkt auf die Beschreibung von Geschiebetransport auf ebener Sohle.

Die Betrachtung von Engelund & Hansen (1967) basiert auf einer Energiebilanz für die Gesamtfracht. Es findet also keine konzeptionelle Unterscheidung zwischen Geschiebe- und Suspensionstransport statt. Weiter führt die Bilanzierung der Energie dazu, dass konzeptionell kein Schwellenwert entsteht.

$$\Phi = \frac{2}{5} \frac{\phi^{5/2}}{\lambda} \quad (2-17)$$

Vorstehende Transportformeln (aber auch die anderen, hier nicht explizit erwähnten Transportformeln in der Literatur) gelten wie bereits erwähnt nur für den Fall eines Transportgleichgewichts und damit für Normalabflussverhältnisse. Letzteres hat zur Folge, dass sowohl Abfluss als auch Fließbreite keine Änderung entlang des Fließwegs erfahren dürfen. Auch beruhen die Formeln auf Experimenten, die in der Regel mit korngleichem Geschiebe durchgeführt wurden. Bei Korngemischen liefern sie nur bei steiler Sieblinie belastbare Ergebnisse; bei flacher Sieblinie ist eine fraktionsweise Berechnung erforderlich. Bei nicht ebener Sohle wird ein Teil des Strömungsangriffs über die Sohlenstrukturen (z.B. Riffel oder Dünen bei Sandsohlen) abgetragen. Dieser Anteil ist vor Durchführung der Transportberechnungen herauszurechnen, so dass nur der transportwirksame Anteil des Strömungsangriffs verbleibt. Geeignete Ansätze hierzu finden sich beispielsweise bei Schröder & Zanke (2003). Ali et al. (2013) betonen, dass keine Sedimenttransportgleichung unter allen Abflussbedingungen gute Ergebnisse produzieren kann.

2.3.3. Besonderheiten von Filmabfluss über kohäsiven Böden

Auch starke Niederschlagsereignisse führen, zumindest in der Fläche, zu kleinen breitenbezogenen Abflüssen. In Verbindung mit den hohen Gefällen der Hänge erfolgt der aus dem Niederschlag resultierende Oberflächenabfluss typischerweise mit sehr geringen Fließtiefen, was sich auch in der Begriffswahl Filmabfluss (*sheet flow*) zeigt. Die bis hierhin vorgestellten Beziehungen zu Strömungsmechanik und Sedimenttransport lassen sich nicht ohne weiteres auf den zu untersuchenden Erosionsprozess übertragen. Hierzu sollen im Folgenden einige Aspekte vorgestellt und mit dem aktuellen Forschungsstand verglichen werden.

Für die 2D-Flachwassergleichung wird die untergeordnete Bedeutung der Impulsbilanz in z-Richtung gegenüber den entsprechenden Bilanzen in x,y-Richtung vorausgesetzt. Dies ist bei typischen Fließgewässern mit Gefällen zwischen 0,01 % und 2 % gegeben. Bewirtschaftete Hänge im Mittelgebirge weisen demgegenüber deutlich höhere Gefälle auf. Hier sind mittlere Gefälle von > 10 % und lokale Gefälle > 20 % nicht ungewöhnlich, so dass die Impulsbilanz in z-Richtung nicht mehr vernachlässigt werden darf. Bei den eindimensionalen Vereinfachungen, insbesondere der kinematischen Welle, relativiert sich diese Problematik, da die verbleibende Koordinate in die Sohle gelegt und damit auch der Impuls sohlenparallel bilanziert wird. Im Gegenteil wird für eine Berechnung mit der kinematischen Welle angenommen, dass der Abfluss nahezu ausschließlich gravitationsgetrieben ist. Das bedeutet, dass diese Vereinfachung nur unter ausreichend großem Gefälle gültig ist. Costabile et al. (2012) zeigen jedoch auf, dass bei Abfluss über unregelmäßiger Topographie auch bei hohem Gefälle die Annahme eines rein gravitationsgetriebenen Abflusses nicht mehr hinreichend genau ist und die Modellierung zu schlechteren Ergebnissen führt als bei Verwendung der dynamischen Welle. So können z.B. kleinskalige topographische Änderungen, wie die häufig zu beobachtenden Höhenunterschiede zwischen einer Ackerfläche und umgebenden Grünstreifen oder Wegen, bereits einen Fließwechsel auslösen, welcher von der 1D-kinematischen Welle nicht abgebildet werden kann. Während die Tiefenintegration der Strömung aus einer 2D-Betrachtung auch für Filmabfluss vertretbar scheint, ist dies für die Breitenintegration beim Übergang auf eine 1D-Betrachtung fraglich. Durch die Mikrotopographie bilden sich auf der Oberfläche bevorzugte Fließwege aus,

welche sich in der Tiefe und damit der Abflusscharakteristik auch kleinräumig stark unterscheiden können.

Zur Berechnung des Energieliniengefälles wird wie erwähnt häufig die Formel von Manning-Strickler verwendet. Dieser liegt jedoch ein gänzlich anderes Verhältnis von Rauheit zu Fließtiefe zugrunde, als es sich bei Hangabflüssen einstellt. Eine übliche Korrektur (siehe z.B. Ruiz-Rodriguez & Guthörl 2021) erfolgt, indem die Strickler-Beiwerte deutlich kleiner (rauer), als für Gerinneströmungen üblich und zudem wassertiefenabhängig gewählt werden. Weiter ist problematisch, dass die empirische Gleichung von Manning-Strickler unter vollrauen Verhältnissen aufgestellt wurde. Filmabfluss zeigt jedoch zunächst primär ein laminares Fließverhalten (geringe Fließtiefe im Verhältnis zu hohem Fließwiderstand). Erst mit zunehmender Fließstrecke und damit zunehmender Wassertiefe tritt ein turbulentes Fließverhalten auf. Ein Ansatz zur Berechnung des Energieliniengefälles in der Modellierung müsste daher beide Fließverhalten erfassen können.

Weiterhin gehen die Gleichungen unter Kapitel 2.3.1 von Wasser als einem newtonischen Fluid aus. Bei größerer Sediment-, insbesondere Schwebstoffkonzentration im Oberflächenabfluss trifft diese Annahme nur noch bedingt zu. Die Strömung weist bei hoher Sedimentkonzentration eine größere Zähigkeit auf, was wiederum die Größe der wirkenden Schubspannungen beeinflusst. Die üblicherweise verwendeten Fließformeln berücksichtigen dieses Phänomen nicht.

Während Fließverhalten und Sedimenttransport bei ebener Sohle durch die Kornrauheit bestimmt werden, nimmt bei unregelmäßiger Sohle der Einfluss der Sohlstrukturen zu. Das Abflussgeschehen wird dann nicht mehr nur durch die Kornrauheit, sondern auch durch eine im Vergleich zur Wassertiefe großskalige, durch Mikrotopographie und Bewuchs erzeugte sog. Formrauheit geprägt (siehe z.B. Bryan 2000). Wird in den Abtragsgleichungen die volle Sohlenschubspannung angesetzt, impliziert dies, dass der Fließwiderstand ein reiner Kornwiderstand ist. Dies kann bei kohäsiven Fließgewässersohlen als näherungsweise richtig angesehen werden, da kohäsives Bodenmaterial keine Formrauheit ausbildet. Für Filmabfluss und eingeschränkt auch für Rillenabfluss trifft dies jedoch nicht zu. Hier wirkt nur ein Teil der Sohlenschubspannung direkt auf die Bodenpartikel. Morgan (2006) gibt hier als Richtwert lediglich 5 % an. Abrahams et al. (1998) schließen hieraus, dass die Transportkapazität der Strömung bei großer Formrauheit deutlich reduziert sein muss. Bei Filmabfluss wirkt die Oberflächenstruktur aufgrund der geringen Wassertiefen nicht mehr nur als Rauheit, sondern auch als Querschnittsveränderung auf die Strömung.

Zu betrachten sind weiter die Haltekräfte gegen die wirkende Schubspannung, welche bei rolligen Böden allein aus dem Gewicht des individuellen Korns resultieren. Unterhalb eines Teilchendurchmessers von ca. 1 mm gewinnen Oberflächenkräfte und elektrochemische Kräfte zunehmend an Bedeutung (Krier 1987). Im bindigen Bereich (unterhalb ca. 0,002 mm) ist der Einfluss der Gravitation auf den Widerstand des Sohlmaterials gegen Erosion vernachlässigbar. Die Widerstandskraft des Bodens gegen die angreifende Kraft stammt hier primär aus anziehenden Kräften zwischen den Bodenkörnern (Kohäsion). Auch richtet sich der Kraftangriff nicht auf ein individuelles Korn, sondern auf Kornverbände, Bodenaggregate oder die geschlossene Bodenoberfläche, wobei gleichzeitig auch individuelle Körner aus dem Verband gelöst werden können. Nach Beobachtungen von Krier (1987) kann sich eine bindige Sohle bei höheren Wassergehalten elastisch verhalten und dadurch der angreifenden Strömung ausweichen, was letztendlich zu einem höheren Erosionswiderstand führt. Die Ablösung

kohäsiver Böden kann daher nur durch integrale Modellvorstellungen geschehen. Ansätze zur Ermittlung der kritischen Schubspannung für bindige Böden finden sich beispielsweise bei Hillebrand (2008). Diese kann durchaus in der gleichen Größenordnung wie die kritischen Schubspannungen für sehr grobkörnige Böden liegen.

Bei bindigen Böden werden beim Überschreiten der kritischen Schubspannung größere Elemente von der Ausdehnung vieler Korndurchmesser aus der Sohle gerissen und nicht primär einzelne Körner in Bewegung versetzt. Der Transport kann wie bei rolligen Böden als Geschiebe (*bed load*) erfolgen, verstärkt aber auch in Suspension (*suspension load*). Insbesondere kann ein Teilchenverband zunächst als Geschiebe transportiert werden und dann die einzelnen Teilchen nach Zerfall des Verbands in Suspension gehen. In der Literatur finden sich nur vereinzelt Ansätze zur Transportberechnung für bindige Böden (z.B. Zanke 1982). Diese wurden jedoch mit Blick auf Fließgewässer und unter der Annahme einer ebenen Sohle entwickelt und sind damit nur bedingt auf die Betrachtung von Filmströmungen übertragbar.

2.4. Überblick über Ansätze zur Modellierung von Erosionsprozessen

Nachdem in Kapitel 2.1 ein Überblick über die Phänomenologie des Erosionsprozess gegeben wurde und die Kapitel 2.2 und 2.3 wichtige theoretische Grundlagen zum Prozess des Bodenabtrags aufgezeigt haben, soll im Folgenden vorgestellt werden, wie die Umsetzung dieser Prozesse in gängigen Erosionsmodellen erfolgt.

2.4.1. Entwicklung der Erosionsmodellierung

Erste systematische und dokumentierte Messungen und Überlegungen zu dem Problemfeld der Bodenerosion von Ackerflächen sind in den USA bereits aus dem 19ten und 20ten Jahrhundert dokumentiert (Laflen & Flanagan 2013). Um Erosionsprozesse und -schäden quantifizieren zu können, wurden verschiedene Prognosemodelle entwickelt. In den USA haben beispielweise große Schäden durch Winderosionsphänomene (Dust-Bowl-Phänomen, 1930-er Jahre) die Entwicklung von Methoden zur Bewertung der Erosion vorangetrieben. Der erste Ansatz zur Quantifizierung von Bodenabtrag auf Ackerflächen in den USA stammt von Zingg (1940), der Hanggefälle und Fließweg als maßgebliche Einflussgrößen identifizierte. Beziehungen zum Niederschlag, zur Bewirtschaftung und zum Boden wurden nachträglich von verschiedenen Autoren ergänzt. Aus diesen Ansätzen entstand die Universal Soil Loss Equation (USLE), die bis heute die meistgenutzte Gleichung zur Bestimmung von Bodenabtrag darstellt (Cerdà et al. 2013). Die Gleichung wurde von Wischmeier & Smith (1965) eingeführt und repräsentiert ein langjähriges Mittel des jährlichen Sedimentabtrags für einen individuellen Hang mit individuellen Charakteristiken. Sie wird berechnet nach:

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2-18)$$

Die sogenannte Erosivität R (N/h) bildet hierin die erosive Energie von Niederschlag und entstehendem Oberflächenabfluss ab (siehe Kapitel 2.1), während die Erodibilität K ($t \cdot h / (ha \cdot N \cdot a)$) den Erosionswiderstand des Bodens abbildet. Die Parameter L (-) und S (-) sind topographische Korrekturen, welche die Erosionsneigung durch die Topographie eines Hangs mit der eines sogenannten Standardhangs in Beziehung setzten. Vergleichbar sind auch die Parameter C (-) und P (-) zu verstehen. Während der Standardhang in Schwarzbrache vorliegt, stellen diese Parameter die erosionsmindernde Wirkung von Bewirtschaftung (C) und Erosionsschutzmaßnahmen (P) dar. Die Gleichung wurde als rein empirische Beziehung über die Auswertung von > 10.000 Parzellenjahren (Wischmeier & Smith 1965) gewonnen, wobei eine Parzelle einem Standardhang entspricht. Wischmeier (1976) betont, dass die Ergebnisse der Gleichung ausschließlich als langjähriges Mittel verstanden werden dürfen, da insbesondere die Parameter R und K statistischer Natur sind. Die Gleichung dient ausschließlich zur Bestimmung von Sedimentabtrag auf einem individuellen Hang und kann auch nicht dafür genutzt werden, Sedimentlieferaten zu bestimmen. Auf Grund ihres rein empirischen Charakters hat sich die Gleichung außerdem nicht ohne weiteres übertragbar auf andere Regionen gezeigt, weswegen regionale Abwandlungen entstanden sind, in Deutschland z.B. in Form der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) (Schwertmann et al. 1987). Die USLE wurde zunächst in den 1970igern insbesondere in den USA viel genutzt und dabei auch häufig außerhalb ihres Anwendungszwecks eingesetzt (Morgan 2006). Dies hängt u.a. damit zusammen, dass für zahlreiche Fragestellungen der Sedimentabtrag für kürzere Zeitintervalle gesucht wurde oder beispielweise andere Flächentypen, wie z.B. Wald, betrachtet werden sollten. Empirische Modelle lassen sich jedoch nicht zuverlässig über ihren gegebenen Datenbereich hinaus extrapolieren. Daher wurde die USLE mehrfach modifiziert und

überarbeitet, u.a. zur Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Renard et al. 1991). In der RUSLE werden zusätzliche Versuchsdaten berücksichtigt sowie differenziertere Berechnungsmethoden eingeführt.

Ein grundsätzlich anderer Ansatz, den Bodenabtrag zu quantifizieren, stammt von Meyer & Wischmeier (1969). Dieser stellt eine Bilanzierung der Sedimentbewegung unterschieden nach Abtrag und Transport sowie nach Niederschlag und Oberflächenabfluss dar. Diese Betrachtung ermöglicht die Verbindung des Abtrags mit einem spezifischen Niederschlagsereignis und einer spezifischen Abflusswelle (siehe Abbildung 2-4). Der Großteil der später entwickelten und bis heute genutzten physikalisch-basierten Erosionsmodelle baut auf diesem Schema auf (Morgan (2006), siehe auch Kapitel 2.4.2 und 2.4.3).

Die ersten Modelle, welche versuchten, dieses Schema in einem Modell zu Bilanzierung von Abtrag, Transport (und Deposition) umzusetzen, nutzten hierfür noch die aus der USLE bekannten Parameter, um die einzelnen Komponenten zu berechnen. Zu diesen sogenannten hybriden Modellen zählen z.B. CREAMS (Knisel 1980) und EPIC (Sharpley & Williams 1990). In diese Kategorie lässt sich auch das viel genutzte Wasserhaushaltsmodell SWAT einordnen, welches ebenfalls mit einer Abwandlung der USLE, der modified USLE (MUSLE) arbeitet (Arnold et al. 1998).

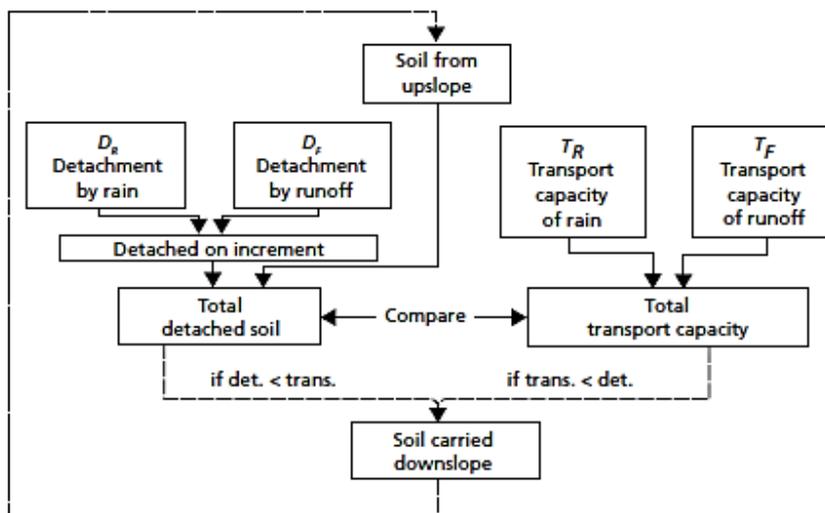


Abbildung 2-4: Schema zur Bilanzierung von Sedimentabtrag und -transport nach Meyer & Wischmeier (1969), entnommen aus Morgan (2006)

In den späten 1970ern und 1980ern zeigt die erfolgreiche Entwicklung des konzeptionellen Modells CREAMS, dass computerbasierte Simulationen zur Quantifizierung von Erosionsprozessen möglich sind. Der größte Teil der heute noch diskutierten Erosionsmodelle stammt aus einer Entwicklungsphase in den 1980er und 1990er.

In den 1980ern wurde zunehmend argumentiert, dass es einer neuen Generation von Erosionsmodellen bedürfe, welche jüngere Erkenntnisse zum Erosionsprozess nutzt und breiter anwendbar ist, dabei aber die Einfachheit der USLE erhält. Die Ergebnisse dieses Gedankens waren die bereits oben erwähnte RUSLE und das vom United States Department of Agriculture (USDA) entwickelte Modell WEPP (Renschler & Harbor 2002).

Als Ergänzung zu den existierenden empirischen Ansätzen ist WEPP als physikalisch basiertes Modell insbesondere dafür konzipiert, Bewirtschaftungsszenarien auch in kurzen Zeitspannen beurteilen zu können. Eine vorläufige Version des WEPP wurde 1989 zur Verfügung gestellt, eine neue, validierte Version des WEPP 1995 veröffentlicht (Flanagan & Nearing 1995).

Vergleichbare Entwicklungen hin zu physikalisch-basierten Erosionsmodellen gab es auch in anderen Teilen der Welt, beispielsweise in Australien mit der Entwicklung von GUEST (Misra & Rose 1996) oder in Europa mit der Entwicklung von EUROSEM (Morgan et al. 1998). EUROSEM stellt auch die Grundlage für die Modelle KINEROS und dessen Weiterentwicklung KINEROS2 (Woolhiser et al. 1989) dar. Zunehmende Leistungsfähigkeit der Computer führte auch zur Entwicklung von Modellen, welche nach ähnlichen Konzepten arbeiten, aber eine höhere räumliche Auflösung ermöglichen z.B. LISEM (Roo et al. 1996), EROSION2D/3D (Schmidt 1996), aber auch das oben bereits erwähnte SWAT.

Da die Grundlage physikalischer Modelle allgemein gültige physikalische Gesetze, wie die Energie- und Massenerhaltung, sind, können sie (theoretisch) universell eingesetzt werden. Allerdings bilden auch physikalische Modelle aufgrund der Komplexität von Erosionsprozessen die Realität nur vereinfacht ab und beinhalten zudem empirisch hergeleitete Beziehungen. Zudem zeigen sich in der Praxis Schwierigkeiten, insbesondere bei der Parameterwahl, da häufig keine ausreichend detaillierten Basisdaten zur Verfügung stehen.

2.4.2. Grundsätzlicher Aufbau von Erosionsmodellen

In den Aufgabenbereich der Erosionsmodellierung im weiteren Sinne fällt eine Mannigfaltigkeit an Fragestellungen verschiedenster Fachdisziplinen und mit entsprechend unterschiedlichen Termini. Entsprechend gibt es eine Vielzahl an Modellansätzen, die sich in der Wahl der modellierten Prozesse, der Auflösung und der Tendenz zu physikalisch basierten oder empirischen Modellansätzen unterscheiden. Dennoch bilden alle Modelle grundsätzlich die gleichen Einflussgrößen und Prozessschritte ab, wobei diese sich in Detailgrad und räumlicher und zeitlicher Auflösung unterscheiden. Teilweise müssen Prozessschritte außerhalb des eigentlichen Simulationsmodells erfolgen und teilweise entfallen Prozesse aufgrund intrinsischer Modellannahmen.

Klima

Modelle, die statistische Mittel generieren, insbesondere USLE und Derivate, benötigen Kennzahlen des Klimas typischerweise in Form des R-Faktors. Eventbasierte Derivate der USLE, insb. MUSLE, nutzen anstelle des R-Faktors die kinetische Energie eines Niederschlagsereignisses oder auch die kinetische Energie des Oberflächenabflusses für ein Event (z.B. SWAT).

Modelle, die Einzelereignisse rechnen, benötigen für dieses Einzelereignis nur eine Niederschlagsganglinie. Weitere klimatische Kenngrößen werden typischerweise nicht verwendet, da für diese Modelle die Annahme besteht, dass Evapotranspiration auf der untersuchten Zeitskala keinen wesentlichen Anteil an der Wasserbilanz hat. Inwiefern dies zutrifft, muss vom Nutzer bewertet werden. Weitere relevante Systemzustände, die das Verhalten des untersuchten Gebiets während des Ereignisses bestimmen, werden in Form von Anfangsbedingungen hinterlegt, insbesondere die Bodenfeuchte zum Eventzeitpunkt. Kenntnisse zur klimatischen Vorgeschichte des Events müssen also ebenfalls vom Nutzer bereitgestellt werden. Dies trifft sowohl auf explizite Erosionsmodelle für die Eventsimulation

(z.B. EUROSEM, LISEM, KINEROS2, EROSION3D) zu, als auch auf hydronumerische Modelle, welche über ergänzende Erosionsansätze verfügen (z.B. HEC-RAS). Diese Modelle arbeiten durchweg mit einer hohen zeitlichen Auflösung, so dass die volle Dynamik eines Niederschlagsereignisses erhalten bleibt.

Kontinuierlich arbeitende Modelle müssen auch klimatische Randbedingungen, z.B. Evapotranspiration, modellieren. Dies geschieht in allen Modellen über mehr oder weniger umfassende Klimaaufzeichnungen. Einzelne Modelle (z.B. WEPP, SWAT) können Wetterlagen aus den statistischen Kennwerten von Klimaaufzeichnungen generieren. Dies ist nützlich, wenn z.B. ein längerer Zeitraum simuliert werden soll, als aus Klimaaufzeichnungen vorliegt. Die beiden genannten Modelle können Simulationen jedoch nur im Tageszeitschritt ausführen (für SWAT betrifft dies nur das Erosionsmodul), so dass die Dynamik des Niederschlags nur über Kennwerte abgebildet wird.

Bewirtschaftung

Vergleichbar lassen sich auch für das Klima verschiedene Modellkonzepte abgrenzen. Modelle, die statistische Mittel generieren, benötigen auch für die Bewirtschaftung die entsprechenden Kennzahlen. Hier sei jedoch darauf verwiesen, dass der C-Faktor in der USLE aus einer komplexen Berechnung durch die Interaktion von saisonal veränderlicher kinetischer Energie des Niederschlags und den entsprechenden Wachstumsphasen der Pflanze ermittelt wird. Vom Nutzer wird der C-Faktor meist aus Tabellenwerken bezogen (Kinnell 2010).

Für die Simulation von Einzelereignissen wird auch der Bewuchszustand als Anfangsbedingung definiert und muss vom Nutzer daher außerhalb der Modellumgebung bestimmt werden. Vergleichbar zu den aus Wetter resultierenden Anfangsbedingungen, können diese Größen nicht als reine Kalibrierparameter verstanden werden, da sie typischerweise eine direkt messbare physikalische Entsprechung haben, welcher Rechnung getragen werden muss.

Kontinuierliche Modelle müssen dagegen die relevanten Parameter aus dem Pflanzenbewuchs (insbesondere Evapotranspiration, Bedeckungsgrad und Oberflächenrauheit, je nach Modell aber auch Anpassungen an Infiltrations- und Stabilitätseigenschaften des Bodens) zeitlich veränderlich abbilden können. Dies kann geschehen, indem die Eigenschaften als zeitlich veränderliche Ganglinie, z.B. Jahresgang, vom Nutzer vorgegeben werden (ein Beispiel ist das hydrologische Modell BlueM (Bach et al. 2009)), so dass die Ermittlung dieser Kennwerte defacto außerhalb des Modells stattfinden muss. Alternativ erfolgt eine Simulation des Pflanzenwachses simultan zu der wasserwirtschaftlichen Langzeitsimulation (z.B. WEPP, SWAT). Letztere Variante ist mit einer erheblichen Erhöhung der zu bestimmenden Parameterzahl verbunden. Trotz der steigenden Komplexität der Modellierung in beiden Varianten können realitätsnahe Interaktionen von Klima und Pflanzenwuchs nur eingeschränkt abgebildet werden. Im Fallbeispiel in Kapitel 5 wurde beispielsweise beobachtet, dass die Ernte von Winterweizen durch einen sehr heißen Sommer um drei Wochen nach vorne verschoben wurde. Derartige Effekte können in den betrachteten Modellen nicht zufriedenstellend modelliert werden. Auch in der Software SWAT, welche durchaus über Ansätze für die Simulation von Bewirtschaftungsoperationen verfügt, wird empfohlen, die Tage dieser Operationen manuell vorzugeben und nicht zu simulieren (Neitsch et al. 2011).

Geometrie

Vergleichbar zu hydrologischen Modellen existieren zur räumlichen Abbildung im Wesentlichen die Konzepte der Teileinzugsgebiete und der Raster- bzw. Gitter-Auflösung, d.h. das zu betrachtende Gebiet wird entweder in Form homogener Teileinzugsgebiete aufgelöst (z.B. WEPP, KINEROS2, EROSION2D) oder das gesamte Gebiet wird durch ein regelmäßiges Gitter abgebildet (z.B. LISEM, GeoWEPP, SWAT, EROSION3D), wobei für jede Gitterzelle alle definierten Parameter bestimmt werden müssen. Diese letztgenannte Art des Modells findet sich insbesondere bei GIS-gekoppelten Modellen unabhängig von dem Modellansatz und der zeitlichen Auflösung. Jetten et al. (1999) stellen hierzu fest, dass sich Modelle unabhängig von der modellierten Skala im räumlichen Aufbau kaum unterscheiden. Dem Skalenunterschied wird stattdessen begegnet, indem mehr räumliche Elemente hinzugefügt werden. Da (im Unterschied zu klassischen hydrologischen Modellen) viele Erosionsmodelle mit einem Abflussrouting versehen sind, muss für TEZG-basierte Verfahren ein Routing-Ansatz gefunden werden. Dies geschieht durchweg, indem ein TEZG über ein repräsentatives Hangprofil mit einer konstanten Breite abgebildet wird. Wie komplex dabei die Topographie des Hangprofils sein kann, unterscheidet sich zwischen den Modellen.

Hydrologie

Alle physikalisch basierten oder konzeptionellen Erosionsmodelle verfügen unabhängig von zeitlicher und räumlicher Auflösung in der einen oder anderen Form über ein hydrologisches Modul, welches die Umwandlung des aufgezeichneten Niederschlags oder Modellregens in einen effektiven Niederschlag erlaubt. Dieser ist abhängig von definierten Anfangsbedingungen (egal ob diese aus der voranstehenden Simulation entstehen oder vom Nutzer festgelegt werden) sowie von Bodenkenngrößen, insbesondere der hydraulischen Leitfähigkeit. Es überrascht daher nicht, dass die hydraulische Leitfähigkeit sowie die Anfangsbodenfeuchte in vielen Erosionsmodellen als die sensitivsten Parameter identifiziert werden (siehe z.B. Jetten et al. 1999, Laflen & Flanagan 2013, Kinnell 2017). Abhängig von dem gewählten Infiltrationsansatz können dies ein- oder mehrparametrische Eingaben sein. Es gibt allerdings weitere Kenngrößen, die zum hydrologischen Modul gehören, insbesondere Interzeption und Anfangsverluste, aber auch Evapotranspiration und Schneeschmelze. Aufgrund der Charakteristik des Erosionsprozesses an der Oberfläche wird typischerweise auf die Abbildung von Prozessen wie Zwischenabfluss, Basisabfluss, etc. verzichtet, was die hydrologische Komponente gegenüber klassischen hydrologischen Modellen deutlich vereinfacht (Ausnahme z.B. SWAT). Die häufigsten angewendeten Infiltrationsmodelle in Erosionsmodellen sind der Ansatz von Green & Ampt (1911) (z.B. WEPP, SWAT, EROSION2D/3D) sowie von Smith & Parlange (1978) (z.B. EUROSEM, KINEROS2). Für Boardman (2006) besteht das größte Defizit der Erosionsmodelle darin, dass bereits der Abfluss (Volumen) nicht korrekt modelliert wird. Er führt hierfür die Annahme vieler Modelle ins Feld, dass Oberflächenabfluss vor allem durch Infiltrationsüberschuss entsteht, wie dies für Starkregenereignisse mit kurzen Dauerstufen und hohen Intensitäten durchaus zutrifft. Viele Erosionsereignisse entstehen dagegen durch Sättigungsüberschuss, also ein länger dauerndes Ereignis niedriger Intensität, welches möglicherweise auf einen vollgesättigten Boden fällt. Ergänzend hierzu ist auch zu berücksichtigen, ob Reinfiltration aus der abfließenden Welle in den Modellen abgebildet wird.

Abflussrouting

Im Unterschied zu klassischen hydrologischen Modellen erfolgt bei Erosionsmodellen das Routing des Oberflächenabflusses nicht durch Ansätze vom Typ Speicherkaskade, sondern durch die numerische Lösung einer Wellengleichung. Diese wird benötigt, um in den folgenden Ansätzen zu Sedimentablösung und Sedimenttransport die benötigten Kenngrößen zu Wasserstand und Fließgeschwindigkeit aufgelöst nach Raum und Zeit zu kennen. Das Abflussrouting erfolgt typischerweise über Gleichungen, welche aus den Flachwassergleichungen abgeleitet sind (siehe Kapitel 2.3.1). Am häufigsten wird die 1D-kinematische Welle verwendet (z.B. WEPP, EUROSEM, KINEROS2, EROSION2D/3D). Zur numerischen Lösung der Wellengleichung wird eine Fließformel benötigt, welche Wasserstand und Abfluss in Beziehung mit dem Fließwiderstand bringt. Hierfür wird in allen untersuchten Modellen entweder die Manning-Strickler-Gleichung oder die allgemeine Fließformel genutzt.

Die Abbildung eines TEZG als repräsentatives Hangprofil mit fester Breite lässt es technisch zu, auch räumlich aufgelöste Gebiete mit einem 1D-Ansatz abzubilden. Anzumerken ist hier, dass dadurch keine Prozesse von Abflussdivergenz und -konvergenz innerhalb eines TEZG abgebildet werden können. Rasterbasierte Ansätze haben häufig einen klassischen D8-Algorithmus zur Abflussakkumulation über das Rastergitter und lösen die 1D-kinematische Welle entlang der Fließpfade. Vereinzelt Software wie z.B. GeoWEPP und OpenLISEM haben komplexere Algorithmen zur Abflussakkumulation implementiert, welche insbesondere auch Abflussdivergenz abbilden können. Die 1D-Berechnung der kinematischen Welle entlang der Fließpfade ändert sich hierdurch jedoch nicht. Bis dato gibt es wenig Software, die zumindest einen rudimentären Erosionsansatz aufweist und gleichzeitig eine echte 2D-Lösung des Abflussroutings generiert. Ein Beispiel stellt das hydrodynamisch-numerische Modell HEC-RAS dar. Dieses enthält seit Erscheinen der Version 6.0 im Juni 2021 einen Versuch, die 2D-Hydraulik mit einem Sedimenttransportmodul zu koppeln (USACE 2023).

Die kontinuierlichen Modelle SWAT und WEPP nutzen das Abflussrouting nicht, um einen aufgelösten Wellenverlauf nach Ort und Zeit zu bestimmen, sondern ermitteln hieraus die Spitzenabflussrate, welche in der folgenden Erosionsberechnung als stationärer Abfluss angesetzt wird.

Erosion und Transport

Für das eigentliche Erosionsmodell muss unterschieden werden zwischen Software, welche Sedimentablösung, Sedimenttransport und Deposition getrennt rechnet und solche, die dies in einem Gleichungssatz integriert. Insgesamt liegen in diesem letzten Schritt, dem Erosionsmodul, die größten Unterschiede zwischen den verschiedenen Erosionsmodellen. Für die Fragestellung der Sedimentablösung ist zunächst zu betrachten, welche Erosionsprozesse unterschieden werden. Aus den hier vorgestellten Modellen lassen sich 3 Kategorien ableiten. Dies sind zum einen Modelle, welche alle Formen des Erosionsprozesses in einem integralen Parameter ausdrücken. Dies betrifft die empirischen Ansätze nach der Form der USLE. Zeitlich aufgelöste Modelle unterscheiden entweder nach Rillen- und Interrillenprozessen (z.B. WEPP, EUROSEM) in der Form, dass die Hangfläche konzeptionell in einen Rillen- und einen Interrillenanteil aufgelöst wird oder sie unterscheiden nach Plansch- und hydraulischer Erosion (z.B. LISEM, KINEROS2, EROSION3D), wobei beide Prozesse räumlich auf der gesamten Hangfläche stattfinden. Keines der hier untersuchten Modelle unterscheidet im Modellansatz zwischen hydraulischer Erosion im Film- und im Rillenabfluss. Ebenso zeigt keines der Modelle

einen Ansatz zu Initiierung von Rillen oder zur Bildung von Gullys. Wesentliche Reviews über Erosionsmodelle, z.B. Aksoy & Kavvas (2005) oder Brazier (2013), nennen ebenfalls kein Modell, das diese Aspekte abbildet. Es ist daher bei der Anwendung jedes Erosionsmodells relevant für den Nutzer im Blick zu haben, welche Erosionsformen in seinem Anwendungsfeld dominieren (siehe Kapitel 2.1).

Modellansätze, welche Ablösung und Transport getrennt betrachten, bilden die Ablösung typischerweise über den Schubspannungsüberschuss nach dem Ansatz von Foster (1982) (siehe auch Kapitel 2.5.1) ab. Dies betrifft insbesondere WEPP aber z.B. auch HEC-RAS. Andere Modelle definieren eine Beziehung zwischen der wirkenden Schubspannung und dem Transport über eine Proportionalitätskonstante, so dass kein Schwellenwert existiert, mit dem der Abtragsprozess einsetzt.

Bei empirischen Ansätzen, welche mit Faktoren arbeiten, muss bekannt sein, wie der jeweilige Faktor definiert ist. So ist in der USLE der Erosivitätsfaktor ein reiner Abtragsfaktor, welcher nicht zur Bestimmung von Sedimentlieferung genutzt werden kann. In den Derivaten RUSLE und MUSLE (SWAT) ist in dem Erosivitätsfaktor Abtrag und Transport abgebildet, wobei beide Prozesse nicht getrennt ausgewertet werden können.

Die Transportmodule, welche teilweise simultan auch das Abtragsmodul darstellen, unterscheiden sich zwischen unterschiedlichen Modellansätzen erheblich. Die Basis der Transportgleichung ist jedoch immer, dass Sedimentpartikel erodiert werden, wenn die aktuelle Sedimentkonzentration im Abfluss niedriger ist als die Transportkapazität. Vielfach wird auf Transportgleichungen aus der Gerinnehydraulik zurückgegriffen (siehe Kapitel 2.3.2), welche mit empirischen Korrekturen (Merritt et al. 2003) versehen werden. Experimente spezifisch zur Transportkapazität von Oberflächenabfluss finden sich z.B. bei Everaert (1991).

Prosser & Rustomji (2000) stellen fest, dass das Spektrum der gewählten Beziehungen zwischen den hydraulischen und bodenphysikalischen Eingangswerten auf der einen Seite und der ermittelten Transportkapazität auf der anderen Seite in Erosionsmodellen so groß ist, dass fraglich ist, welche Vorhersagequalität überhaupt erreicht werden kann. Der Unterschied in den modellierten Sedimentmengen zwischen verschiedenen Transportbeziehungen kann im Ergebnis mehrere Zehnerpotenzen umfassen (Woolhiser et al. 1989). Dies liegt neben der unterschiedlichen Modellvorstellung auch an der Abbildung von fraktionsweisem Transport. Während die empirischen Basisgleichungen der Gerinnehydraulik für Einkorn-Sedimente bzw. steile Sieblinien erstellt wurden, sollen Erosionsmodelle Korngemische abbilden können.

Auch die meisten Transportansätze basieren auf einer Bilanzierung des Schubspannungsüberschusses, z.B. nutzen CREAMS und WEPP modifizierte Varianten der Gleichung von Yalin (1963), oder auf einer Bilanzierung der Abflussenergie, z.B. nutzen EUROSEM und LISEM Varianten der Gleichung von Govers et al. (1990) und KINEROS2 eine modifizierte Variante der Gleichung von Engelund & Hansen (1967). Bemerkenswert ist, dass sowohl die Entwicklung dieser Gleichungen (siehe die oben genannten Literaturangaben) als auch verschiedene Überblicksstudien zur Eignung dieser Ansätze für die Bedingungen bei Oberflächenabfluss (z.B. Ali et al. 2013) kohäsionslose Sedimente typischerweise im Korngrößenbereich von Grobschluff, Sand oder Kies mit eng gestuften Korngrößenverteilungen nutzen. Die hieraus abgeleiteten Erkenntnisse zeigen teilweise wenig Relevanz für Fragestellungen der Erosionsmodellierung. So kommen Ali et al. (2013) zu dem Ergebnis, dass Gleichungen zum Geschiebetransport bessere Ergebnisse liefern als Gleichungen zum

Gesamttransport, da der Transport von Sandpartikeln in flachem Oberflächenabfluss – vergleichbar zum Gerinneabfluss – primär durch Prozesse des Rollens, Rutschens und Springens entsteht. Auf Erosion und Transport von kohäsivem Sediment kann hieraus jedoch nicht geschlossen werden.

2.4.3. Abbildung der Erodibilität in Erosionsmodellen

Die hier untersuchten Modelle zeigen im Wesentlichen drei Ansätze, wie der Erosionswiderstand bzw. die Erodibilität des Bodens abgebildet werden. Alle drei Typen unterscheiden sich in Bezug auf die Abbildung der wirkenden erosiven Kräfte und der Erodibilität des Bodens wesentlich.

Modelle mit langjährigen Mittelwerten (USLE und Derivate) definieren die wirksame erosive Energie und den Erosionswiderstand gegen diese wirksame erosive Energie über jeweils einen integralen Faktor. Diesem rein empirischen Ansatz ist keine hydrologische Modellvorstellung zu Abflussbildung, Abfluss und Sedimenttransport zu Grunde gelegt, sondern lediglich grundsätzliche Zusammenhänge, die auf empirischer Basis quantifiziert werden. Insbesondere stellt der Erosionswiderstand eine statistische Größe dar, die einen mittleren Erosionswiderstand repräsentiert und grundsätzlich keine Aussage über kurze Zeiträume oder gar individuelle Events zulässt. Damit ist auch keine Aussage über Veränderungen eines Bodens, z.B. durch unterschiedliche klimatische Bedingungen im Jahresgang, möglich. Eine erste Veröffentlichung zu Werten für den K-Faktor aus einer Pedotransferfunktion stammt von Wischmeier & Mannering (1969). SWAT empfiehlt die Gleichung nach Wischmeier et al. (1971). Diese nutzt die Korngrößen für Schluff, Feinsand und Ton sowie den Anteil Organik, die Aggregatstruktur und die Bodenpermeabilität. Da insbesondere die beiden letztgenannten Eigenschaften häufig nicht bekannt sind, wird alternativ die Gleichung nach Williams (1995) vorgeschlagen, welche ohne diese Faktoren auskommt.

Der zweite Ansatz ist die Angabe einer Form der Erodibilität für 1-parametrische Gleichungen, wie sie typischerweise in physikalisch-basierten Modellen mit schwellenwertfreien Transportansätzen (siehe z.B. Kapitel 2.5.2) angewendet werden. Hier wird die Erodibilität als Proportionalitätsfaktor zwischen der vollen wirkenden Schubspannung und dem potentiellen bzw. tatsächlichen Sedimenttransport verstanden. Beispiele hierfür sind KINEROS2 und LISEM. In beiden Modellen wird die Proportionalitätskonstante bzw. die Erodibilität als Maß der Kohäsion verstanden und repräsentiert damit (theoretisch) eine direkt messbare Größe. Diese Erodibilität beschreibt die Summe aller Kräfte (Kohäsion, Adhäsion, Reibung, Erdanziehung), die den einzelnen Partikel an den Bodenkörper binden. Empfohlen wird ein Torvane-Test (KINEROS2) oder Shear-Pocket-Meter-Test (LISEM), welche die makroskopische Scherfestigkeit eines Bodens bei Wassersättigung bestimmen. Auch das Morgan-Morgan-Finney-Modell (Morgan 2001) nutzt einen Erodibilitätsbegriff von diesem Typ und empfiehlt die Bestimmung der Kohäsion über den Torvane-Test. Mit der makroskopischen Scherfestigkeit als Indikator für den Erosionswiderstand beschäftigen sich z.B. Krier (1987), Zanke (1982) und Schmidt (1996), wobei keine eindeutigen Ergebnisse erzielt werden können. Da die Scherfestigkeit bei Wassersättigung getestet wird, kann insbesondere wenig zur Übertragbarkeit auf den Erosionswiderstand bei wechselndem Bodenwassergehalt gesagt werden. Schmidt (1996) (EROSION3D) vermutet auf theoretischer Basis eine logarithmisch-lineare Beziehung zwischen dem Erosionswiderstand und der makroskopischen Scherfestigkeit, kann jedoch keine stabile Korrelation finden, was mit einer zu kleinen Datenbasis begründet wird. Da EROSION3D anstrebt, ein „easy-to-use-tool“ vergleichbar mit der USLE zu sein, wird

statt eines Pedotransfers eine Datenbank mit Werten für die Kohäsion (und anderen Bodenparametern) bereitgestellt. Auch in den anderen vorgenannten Beispielen wird neben der Empfehlung, die Kohäsion aus einem Stabilitätstest zu bestimmen, eine Parameterempfehlung als Tabellenwerk nach Bodenart angegeben.

Der letzte Ansatz umfasst alle Modelle, welche den Erosionsprozess direkt entsprechend dem Schema nach Abbildung 2-4 abbilden, d.h. Abtrag und Transport werden hier als zwei getrennte Prozesse modelliert. Hierdurch kann eine Fallunterscheidung zwischen transport- und abtragsbegrenzten Erosionsprozessen erfolgen. Die Basis für die Abtragsrechnung stellt hier ein Schubspannungsüberschuss nach Foster (1982), also der Vergleich zwischen wirkender Schubspannung und kritischer Schubspannung, dar. Für diesen Schubspannungsüberschuss wird eine Erodibilität k_d als Proportionalitätsfaktor zum potentiellen Abtrag verstanden. Die Gleichungen sind also (meistens) 2-parametrig, was sowohl die direkte Messung als auch die Bestimmung aus empirischen Beziehungen erheblich erschwert. Die Wahl dieser Parameter erfolgt für den Nutzer der Modelle daher nahezu ausschließlich über Pedotransfer. Hierbei wird die kritische Schubspannung τ_c entweder aus Ansätzen der Gerinnehydraulik (z.B. Shields 1936) entnommen oder aus modellspezifischen Pedotransferfunktionen. Die Erodibilität k_d wird ausschließlich aus letzteren bestimmt, da diese keine direkt messbare physikalische Entsprechung oder vergleichbare Definition in der Gerinnehydraulik aufweist.

Es ist zu beachten, dass die Erodibilität k_d nicht identisch ist mit der integralen Bodeneigenschaft Erodibilität. Letztere ist auch außerhalb der mehrparametrischen Funktionen definiert. Zur besseren Abgrenzung werden im Kontext der mehrparametrischen Funktionen auch die Begriffe Erosionsparameter oder Erosionswiderstand zur Beschreibung der integralen Erodibilität des Bodens genutzt.

Pedotransferfunktionen für die Erosionsparameter in WEPP stammen aus den Experimenten von Laflen et al. (1991) und nutzen im Wesentlichen die Anteile der Sand- und Tonfraktion, ergänzend werden Anteile von Grobboden und Organik angesetzt. Das Konzept der 2-parametrischen Funktion wird in neueren Modellen häufig übernommen, siehe z.B. die Modellansätze von Scherer et al. (2012) und Basile et al. (2010). Auch hydrodynamisch-numerische Software, wie z.B. HEC-RAS, nutzt einen Schubspannungsüberschuss als Basisgleichung.

Bereits Wischmeier (1976) hat deutlich die statistische Natur hinter einem Konzept der Bodenerodibilität betont, welches mit der oben beschriebenen Praxis eines Pedotransfers aus der Bodenart zu konzeptionellen Schwierigkeiten führt. Es bedeutet insbesondere, dass die so ermittelten Bodenabträge mit einem festen K-Faktor lediglich als Durchschnittswert für viele Wiederholungen eines Events dieser Art verstanden werden dürfen und nicht als Absolutwert. Eine umfassende, phänomenologische Zusammenstellung über die Ausbildung von Kohäsion, Erosionswiderstand und deren Veränderlichkeit findet sich bei Bryan (2000). Zanke (1982) stellt dagegen übersichtlich zusammen, welche Ansätze verfolgt werden, um einen kohäsiven Erosionswiderstand mit anderen Bodeneigenschaften in Verbindung zu bringen. Hier sind insbesondere zeitlich veränderliche Eigenschaften wie Verdichtung, Wassergehalt, aber auch Gefügebildung zu nennen. Die Zusammenstellung von Versuchen zu bindigen Böden in Korrelation mit diesen Parametern zeigt jedoch deutliche Widersprüche zwischen den einzelnen Studien auf. Jetten et al. (1999) geben an, dass vor allem besonders sensitive Parameter, wie die Anfangsbodenfeuchte, die hydraulische Leitfähigkeit und die Oberflächenrauigkeit, zeitlich sehr variabel und stark von Bewirtschaftung und Klima abhängig sind. Sie betonen die

Bedeutung solcher Kenntnisse für die Kalibrierung und zeigen damit auch, dass eine Festlegung des Erosionswiderstands aus der Bodenart allein wenig erfolgversprechend ist. Schindewolf & Schmidt (2010) ermittelten Erosionswiderstände für EROSION3D im Parzellenberegnungsexperiment mit einem Schwankungsbereich von ca. 2,5 Zehnerpotenzen bei vergleichbaren Bodenarten. Auch ein Vergleich dieser Beregnungsexperimente mit der hinterlegten Datenbank zeigt für Mittelwerte noch Abweichungen über ca. 1 Zehnerpotenz, wobei die Ergebnisse aus der Datenbank eine deutlich kleinere Variabilität angeben, als die Experimente verzeichnen.

Während es durchaus (wenn auch vereinzelt) Modellansätze gibt, mit denen die Erodibilität der Bodenoberfläche veränderlich durch z.B. Stabilisierung durch Wurzeln oder Pflanzenrückstände dargestellt wird, oder auch Ansätze, die die wirkende Schubspannung durch eine Aufteilung in Kornrauheit und Formrauheit an sich verändernde Randbedingungen anpassen, gibt es verhältnismäßig wenig Ansätze über eine Veränderung der Erosionsparameter selbst. Beispielsweise wird in SWAT versucht, der statistischen Natur des K-Faktors zu begegnen, indem saisonale K-Faktoren eingeführt werden. EROSION3D hat Routinen zur Anpassung der Bodenparameter für Infiltration, um z.B. Effekte von Verschlammung, Makroporeninfiltration und Tonquellung abzubilden. In WEPP sind theoretisch vergleichbare Ansätze auch für die Parameter zum Erosionswiderstand hinterlegt.

Versuche, die Kohäsion bzw. die Partikelinteraktion innerhalb des Bodens direkt zu modellieren, finden auch zum aktuellen Zeitpunkt nur auf einer wesentlich kleineren Skala und für klar abgegrenzte Probleme statt. Ein Beispiel hier ist die Arbeit von Guo & Yu (2023).

2.5. Theoretische Modellanalyse ausgewählter Ansätze

In der folgenden Detailanalyse liegt der Schwerpunkt entsprechend dem Thema der Arbeit auf dem Erosionsmodul und innerhalb des Erosionsmoduls auf der Modellierung des Abtrags durch hydraulische Erosion. Komponenten, welche relevant für die Abflussbildung sind, werden ebenfalls angerissen. Insbesondere in dem kontinuierlichen Modell WEPP gibt es zahlreiche weitere komplexe Modellkomponenten, welche in ihrer Tiefe jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit sind. Mit dem Wettergenerator CLIGEN (Nicks et al. 1995) können anhand von vorhandenen Stationsdaten Statistiken zu dieser Station bestimmt werden, die zur Generierung von Einzelereignissen bestimmter Jährlichkeiten aber auch zur Generierung langer Zeitreihen genutzt werden können (siehe z.B. Haas et al. 2018 für eine ausführliche Darstellung).

2.5.1. (WEPP) Water Erosion Prediction Project

Die folgenden Ausführungen zum Aufbau von WEPP wurden weitgehend aus der technischen Dokumentation von Flanagan & Nearing (1995) abgeleitet. Ergänzende oder abweichende Quellen sind zusätzlich gekennzeichnet.

Die mögliche zeitliche Auflösung der Modellierung in WEPP lässt ausschließlich Tagesschritte zu. Hierbei wird für jeden Tag neben gängigen Klimainformationen zur Temperatur, aber auch z.B. Globalstrahlung und Wind, der Niederschlag über ein mögliches wirksames Ereignis pro Tag konzeptionalisiert. Diesem Ereignis werden Niederschlagshöhe, Dauer und Charakteristika des Verlaufs in Form der Verhältnisse zwischen mittlerer und maximaler Intensität und Dauer bis zur maximalen Intensität zur Gesamtdauer zugewiesen.

Die räumliche Abbildung der modellierten Fläche erfolgt entweder über die Abbildung eines repräsentativen Hangs bzw. einer Fließstrecke mit zugewiesener Breite (Hillslope-Version) oder über die Abbildung eines abstrahierten Einzugsgebiets, wobei Teileinzugsgebiete einem jeweiligen Hang mit zugehöriger Breite entsprechen und über Gerinneelemente verbunden werden können. Ein Hang kann weiter unterteilt werden in homogene Teilabschnitte (Over Flow Elements (OFE)). Diese stellen damit die kleinste räumliche Einheit dar und bestehen aus einem zugewiesenen Boden, Landnutzung sowie einer repräsentativen Hangstrecke.

Die Abbildung des Bodens erfolgt über die Parameter Rauigkeit (gerichtet und ungerichtet), Schüttdichte, effektive hydraulische Leitfähigkeit, Interrillen- und Rillenerodibilität und kritische Schubspannung. Diese können jeweils vom Nutzer oder modellintern über Pedotransferfunktionen gesetzt werden. Weitere Bodenparameter, insbesondere zur Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Oberfläche, werden ausschließlich modellintern bestimmt. Als besonderes sensitiv für den Erosionsprozess gelten die Parameter zur Leitfähigkeit sowie zur Rillenerodibilität (siehe z.B. Schwob 2016, Aksoy & Kavvas 2005, Mullan et al. 2012). Der (potentiell) vom Nutzer angegebene Wert stellt einen Basiswert dar, der abhängig von Bodenbearbeitung, Pflanzenwachstum und Bodenwassergehalt im Tageszeitschritt aktualisiert wird. Hierdurch sollen Effekte wie Bodenverdichtung, Setzung, Verschlammung, aber beispielsweise auch Abbau von Mikrotopographie nach Bodenbearbeitung abgebildet werden.

Die Umwandlung des Niederschlags in eine Abflusswelle wird durch einen hydrologischen Modellkern ermöglicht. Die Infiltration basiert auf dem Modell von Green & Ampt (1911) modifiziert in der Version nach Mein & Larson (1973). In der in WEPP implementierten Variante bildet sich Effektivniederschlag, wenn die Niederschlagsintensität des Modellregens für ein

Zeitintervall die aktuelle Infiltrationsrate entsprechend dem Infiltrationsansatz überschreitet. Über den Niederschlagsverlauf wird der Effektivniederschlag kumuliert und nachträglich um evtl. auftretenden Sättigungsüberschuss sowie Muldenverluste korrigiert. Das ermittelte Volumen bildet die Basis für das Abflussrouting. Dies bedeutet, dass das Modell nur Abfluss aus Infiltrationsüberschuss und nicht aus Sättigungsüberschuss abbilden kann. Sättigungsüberschuss in Phasen, in denen kein Infiltrationsüberschuss herrscht, wird als Zwischenabfluss modelliert, bleibt also in der Wasserbilanz erhalten, kann jedoch nicht abflussbildend und damit erosionswirksam werden. Ebenso kann auch keine Infiltration aus der abfließenden Welle erfolgen. Letzteres wird jedoch konzeptionell korrigiert. Perkolation aus der letzten Bodenschicht wird in der Simulation nicht erfasst, da WEPP nicht über eine Grundwasserkomponente verfügt.

Zur Berechnung der Spitzenabflussrate stehen zwei Ansätze zur Verfügung. Die kinematische Welle (siehe Kapitel 2.3.1) wird genutzt, wenn Einzelereignisse auf einem einzelnen OFE berechnet werden. Für die kontinuierliche Berechnung oder komplexe Strukturen aus OFEs wird eine Annäherung basierend auf der kinematischen Welle genutzt.

Über einen der beiden genannten Ansätze wird die Spitzenabflussrate entlang des Hangprofils bestimmt. Diese wird im Erosionsmodell als stationär-ungleichförmiger Abfluss ($d/dt = 0$; $d/dx \neq 0$), entsprechend dem *steady-state erosion model* von Foster & Meyer (1972) angesetzt. Zur damit notwendigen Korrektur des Abflussvolumens wird eine effektive Dauer eingeführt, die sich aus dem Gesamtabflussvolumen des Ereignisses geteilt durch die Spitzenabflussrate berechnet. Die modellierte Welle wird also in einen Modell-Blockabfluss umgewandelt.

Die Sedimentbilanz berechnet sich in WEPP nach folgender Basisgleichung:

$$\frac{dG}{dx} = D_f + D_i \quad (2-19)$$

G Sedimentfracht (kg/(s*m))

D_f Erosionsrate Rillenerosion für $G < T_c$ und Depositionsrate für $G > T_c$ (kg/(s*m²))

D_i Erosionsrate Interrillenerosion (kg/(s*m²))

T_c Transportkapazität nach Gleichung 2-23(kg/(s*m))

Es findet also eine Aufteilung in Interrillenerosion und Rillenerosion statt. Diese soll konzeptionell die Unterscheidung von Plansch- und hydraulischer Erosion abbilden. Die Aufteilung erfolgt dabei über die Rillendichte als Produkt aus Rillenzahl und Rillbreite. Die Rillenzahl wird entsprechend der Untersuchung von Gilley et al. (1990) modellintern auf 1 Rille / Breitenmeter gesetzt. Die Rillbreite kann vom Nutzer vorgegeben oder modellintern aus der empirischen Beziehung von Gilley et al. (1990) aus dem Abfluss bestimmt werden. Alle Berechnungen in den Rillen erfolgen außerdem unter der Annahme eines rechteckigen Querschnitts.

Die Interrillenprozesse werden nach Gleichung 2-20 ermittelt, wobei Interrillenerodibilität und Niederschlagsintensität den Abtrag bestimmen und die anderen Faktoren konzeptionell einen Transport aus den Interrillen- in die Rillengebiete abbilden. Eine Sedimentbilanz wird dann in den Rillen unter Berücksichtigung der Lieferung aus den Interrillengebieten ermittelt.

$$D_i = K_i I_e \sigma_{ir} SDR_{RR} b \quad (2-20)$$

K_i Interrillenerodibilität (kg*s/m⁴)

I_e effektive Niederschlagsintensität (m/s)

σ_{ir} Abflussrate Interrillen (m/s)

SDR_{RR} oberflächenabhängige Sedimentlieferate (-)

b Breitenanteil Interrillen (-)

Eine hydraulische Erosion und eine vollständige Lösung der Sediment-Kontinuitätsgleichung finden nur in den Rillen statt. Nach Gleichung 2-21 wird der potentielle Sedimentabtrag (Erosionskapazität) auf Basis eines Schubspannungsüberschusses berechnet.

$$D_c = K_r (\tau_f - \tau_c) \quad (2-21)$$

D_c Erosionskapazität (kg/(s*m²))

K_r Rillenerodibilität (s/m)

τ_f wirksame Sohlenschubspannung (Pa)

τ_c kritische Schubspannung (Pa)

Gleichung 2-22 bestimmt den tatsächlichen Sedimentabtrag anhand des Verhältnisses von aktueller Sedimentfracht zur Transportkapazität und der lokalen Sedimentbilanz, wobei für die lokale Sedimentbilanz auch die Lieferung aus dem Interrillenanteil berücksichtigt wird.

$$D_f = D_c * \left(1 - \frac{G}{T_c}\right) \quad (2-22)$$

Ist $G > T_c$ wird statt Erosion Deposition simuliert. Dieser Fall kann insbesondere eintreten, wenn die Transportkapazität durch im Modell eingetragenes Sediment aus den Interrillenprozessen erreicht wird. Die Transportkapazität repräsentiert die Konzentration, für die Abtragsrate und Depositionsrate in einem dynamischen Gleichgewicht stehen. In WEPP wird sie nach einer modifizierten und deutlich vereinfachten Yalin-Gleichung (siehe Kapitel 2.3.2) ermittelt.

$$T_c = k_t * \tau_f^{3/2} \quad (2-23)$$

k_t Transportkoeffizient (m^{0,5}*s²/kg^{0,5})

Gleichung 2-23 unterscheidet sich von dem Ansatz nach Yalin (1963) insbesondere darin, dass angenommen wird, dass $\tau_f \gg \tau_c$ und τ_c damit aus der Gleichung entfernt wird. Alle verbleibenden definierten Einflussgrößen werden in dem Parameter k_t zusammengefasst. Dieser Transportkoeffizient k_t wird nach Finkner et al. (1989) bestimmt, indem die Transportkapazität für einen vereinfachten, repräsentativen Hang mit konstantem Gefälle nach der Yalin-Gleichung bestimmt wird und diese Transportkapazität mit der wirkenden Schubspannung für den tatsächlichen Hang genutzt wird, um ein repräsentatives k_t zu ermitteln. Diese Berechnung erfolgt am Hangende, welches nach Finkner et al. (1989) die kritische Stelle für Transportkapazität ist.

Gleichung 2-24 gibt an, wie die tatsächliche Sohlenschubspannung am Hangende (und entlang des Hangprofils) ermittelt wird, wobei die Bestimmung iterativ unter Berücksichtigung der Kornrauheit f_s mit Hilfe der Allgemeinen Fließformel erfolgt. Für die Gesamtrauheit f_t werden neben der Kornrauheit auch die Fließwiderstände aus der Bodenbedeckung durch Pflanzen berücksichtigt. Die ermittelte Sohlenschubspannung repräsentiert entsprechend die direkt auf die Bodenoberfläche wirkende Schubspannung.

$$\tau_f = \rho g R \sin(\alpha) \frac{f_s}{f_t} \quad (2-24)$$

Die Ermittlung der Parameter f_s und f_t kann anhand der Dokumentation nicht eindeutig nachvollzogen werden. Für die hydraulische Komponente des Modells wird der Ansatz von Gilley et al. (1990) zur Bestimmung der Rauheit f_{sr} in Rillen angegeben. Diese stellt jedoch eine integrale Größe aus Formrauheit und Kornrauheit dar, so dass zu vermuten ist, dass der Parameter f_s des Erosionsmodells hiervon abweicht und anders bestimmt wird.

Um die Rechendauern zu verkürzen, werden alle genannten Gleichungen mit den Bedingungen am Hangende normalisiert.

2.5.2. (KINEROS2) Kinematic Runoff and Erosion Model

Die folgenden Ausführungen zum Aufbau von KINEROS2 sind der technischen Dokumentation von Woolhiser et al. (1989) entnommen. Diese Dokumentation stammt von dem Vorgängermodell KINEROS. Unterschiede, die demgegenüber in KINEROS2 bestehen, wurden der Dokumentation unter USDA (2023) entnommen. Ergänzende oder abweichende Quellen sind zusätzlich gekennzeichnet.

KINEROS2 ist ein rein eventbasiertes Modell, weshalb verschiedene der unter Kapitel 2.4.2 diskutierten Komponenten in diesem Modell nicht vorkommen. Dies betrifft insbesondere alle Komponenten zu Evapotranspiration und Pflanzenwachstum, da diese nur für eine kontinuierliche Simulation benötigt werden. KINEROS2 berechnet jedoch die Umverteilung von Bodenwasser während Phasen ohne Niederschlag, so dass auch lange, komplexe Events modelliert werden können (ohne dass es dadurch ein Kontinuumsmodell im eigentlichen Sinne wird).

Niederschlag wird in KINEROS2 in beliebig genauer zeitlicher Auflösung angegeben, so dass die Dynamik eines Niederschlagsereignisses vollständig wiedergegeben wird. Die zeitliche Auflösung der Modellausgabe kann vom Nutzer festgelegt werden, wobei dies lediglich dazu dient, Ausgabedateien übersichtlich oder leicht vergleichbar mit dem Niederschlag zu halten. Die tatsächliche Berechnung für Infiltration, Bodenwasserhaushalt, Abflussrouting und Sedimenttransport erfolgt auf Basis eines internen Zeitschritts unter Einhaltung eines Stabilitätskriteriums (Courant-Kriterium). Der vom Nutzer definierte Zeitschritt beeinflusst die Berechnung dennoch in der Form, als bei deutlicher größerem Zeitschritt die Dynamik des Niederschlags verloren geht, wodurch sich die Abflussbildung verändern kann (siehe Kaiser 2018).

Räumlich muss eine Einteilung des Modellgebiets in homogene Teilflächen erfolgen, d.h. Gefälle, Bewirtschaftung, Bodeneigenschaften und Niederschlag werden über eine Teilfläche als konstant angenommen. Die hydraulische Modellierung erfolgt als 1D-Ansatz über ein repräsentatives Hangprofil mit einer zugewiesenen konstanten Breite. Das Hangprofil kann nur ein festes Gefälle aufweisen, so dass starke Gefälleänderungen oder ausgeprägte Krümmung über verschiedene Teilflächen abgebildet werden müssen. KINEROS2 ermöglicht die Entwässerung von Teilflächen in eine andere Teilfläche, so dass diese Aufteilung zunächst keine nennenswerte Einschränkung bedeutet. Durch die beliebig feine Aufteilung in Teilflächen kann bei guter Wahl der Teilflächen eine Pseudo-2D-Abbildung erreicht werden.

Die Abbildung des Bodens erfolgt (u.a.) über die Parameter Mikrotopographie in Höhe und Abstand, Rauigkeit in Form eines Strickler-Beiwerts, gesättigte hydraulische Leitfähigkeit,

Plansch-Koeffizient und Kohäsions-Koeffizient. Diese müssen vom Nutzer gesetzt werden, wobei das Handbuch empfohlene Wertebereich abhängig von z.B. Bodenart und Landnutzung dokumentiert. Anfangsbedingungen des Events müssen ebenfalls vom Nutzer vorgegeben werden. Dies betrifft insbesondere die Bodenfeuchte vor Ereignis, Bedeckungsgrad und Rauheitseigenschaften.

Die Infiltration wird nach einem Smith & Parlange (1978) Ansatz in bis zu zwei Bodenschichten abgebildet. Der Bodenwasserhaushalt, z.B. die Bewegung der Sättigungsfront, wird entsprechend dem internen Zeitschritt während des Events aktualisiert. Der implementierte Ansatz kann dadurch sowohl Abfluss durch Infiltrationsüberschuss als auch durch Sättigungsüberschuss abbilden. Da in KINEROS2 alle Modellkomponenten parallel und mit dem gleichen internen Zeitschritt simuliert werden, ist auch eine Infiltration aus der ablaufenden Welle in den nicht vollständig gesättigten Boden möglich. Perkolation aus der letzten Bodenschicht bleibt für die Simulation nicht erhalten, da von dem Modell keine Wasserbilanz simuliert und u.a. auch keine Grundwassersimulation durchgeführt wird.

KINEROS2 nutzt die kinematische Welle für die Hydraulik des Oberflächenabflusses. Die benötigte Wasserstand-Abfluss-Beziehung wird aus der Gleichung nach Manning-Strickler ermittelt. Alternativ besteht die Möglichkeit, dass die Berechnung in Abhängigkeit von der Reynoldszahl intern von einer Fließformel für laminare Strömung auf den Ansatz nach Manning-Strickler für turbulente Fließzustände wechselt.

Der Sedimenttransport wird durch eine Massenbilanzgleichung für konvektiven Transport, vergleichbar zu der kinematischen Wellengleichung für den Abfluss, gelöst. Die lokale Erosionsrate kann hier positiv oder negativ sein, d.h. sie kann Erosion und / oder Deposition dynamisch abbilden, wobei Deposition nur im Prozess der hydraulischen Erosion auftreten kann.

$$\frac{\partial(AC_S)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_S)}{\partial x} = e(x, t) = e_s + e_h + q_s(x, t) \quad (2-25)$$

C_S Sedimentkonzentration (m^3/m^3)

e_s Erosionsrate Planscherosion (m^2/s)

e_h Erosionsrate hydraulische Erosion / Deposition (m^2/s)

q_s Sedimentflux aus dem Gleichungsgebiet bei Abflusskonvergenz und -divergenz (m^2/s)

Die lokale Erosionsrate $e(x, t)$ setzt sich aus Planscherosion und hydraulischer Erosion zusammen, es findet jedoch keine explizite räumliche Trennung der Erosionsformen statt. Begründet wird dies damit, dass die konzeptionelle Unterscheidung zwischen Rillen- und Interrillenprozessen in der Realität nicht umsetzbar ist, da auch Planscherosion in Rillen auftreten kann und auch der flächenhafte Abfluss zu hydraulischer Erosion führt (Smith et al. 1995). Die Komponente der Planscherosion wird nach Gleichung 2-26 berechnet. Da keine räumliche Trennung der Erosionsformen stattfindet, muss ein empirischer wassertiefenabhängiger Reduktionsfaktor $k(h)$ (-) berücksichtigt werden. Dieser beschreibt die abnehmende erosive Wirkung der kinetischen Energie des Niederschlags bei zunehmender Wassertiefe

$$e_s = c_f k(h) r^2 \quad (2-26)$$

c_f Koeffizient Planscherosion (-)

Hydraulische Erosion wird nach einem Schwellenwert- bzw. Überschusskonzept abgebildet, wobei die Bezugsgröße die Strömungsenergie (*unit stream power*) $\Omega = u * I_s$ darstellt. Der Kohäsions-Koeffizient c_g stellt einen Korrelationskoeffizienten zwischen Überschussströmungsenergie und Abtrags- bzw. Depositionsrate dar

$$e_h = c_g(C_m - C_s)A \quad (2-27)$$

c_g Kohäsions-Koeffizient der hydraulischen Erosion (1/s)

C_m Transportkapazität (m^3/m^3)

Die Gleichgewichtstransportkapazität C_m wird in einer modifizierten Form der Gleichung von Engelund & Hansen (1967) gelöst. Hierbei wird (in Abweichung von der Original-Gleichung) ein Schwellenwert in Form einer kritischen Strömungsenergie bei $\Omega_c = 0,004 \text{ m/s}$ entsprechend den Untersuchung von Govers et al. (1990) eingeführt.

$$C_m = \frac{0,05}{d(g\rho-1)^2} \sqrt{\frac{hI_s}{g}} * (u * I_s - 0,004) \quad (2-28)$$

KINEROS2 ermöglicht über eine fraktionsweise Berechnung (bis zu 5 Klassen) des Sedimenttransports auch die Betrachtung von Korngemischen mit flacher Sieblinie. Hierbei wird versucht, wenn möglich ein physikalisch sinnvolles Verhalten nachzubilden. Dies bedeutet zum Beispiel, dass der Erosionsprozess für kleinere Korngrößen im Modell gestoppt wird, wenn keine Erosion einer größeren Korngröße stattfindet, um so den Prozess einer Sohlabpflasterung nachzubilden. Findet Erosion über das gesamte Kornspektrum statt, werden die Anteile der Fraktionen am Gesamttransport entsprechend ihrem Anteil am Korngemisch festgelegt.

2.6. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

In den Kapiteln 2.1 bis 2.5 wurden die Grundlagen zum Themenfeld Erosion, Erosionsmodellierung und Erosionsparameter/ Erodibilität vorgestellt. Die komplexe Natur des Erosionsprozesses lässt sich mit den typischerweise gewählten Ansätzen aus Hydraulik und Sedimenttransport nur eingeschränkt abbilden. Dies liegt zum einen daran, dass der Erosionsprozess wesentlichen Annahmen dieser theoretischen Ansätze widerspricht und auf der anderen Seite daran, dass aufgrund mangelnder theoretischer Grundlagen in vielen Fällen hochgradig empirisch gearbeitet wird und zahlreiche Vereinfachungen bzw. Reduzierungen der Komplexität gegenüber den Basisgleichungen vorgenommen werden. Julien & Simons (1985) halten hierzu klar fest, dass ein Modell, welches in weiten Teilen auf empirischen Gleichungen beruht, eigentlich nicht als physikalisch-basiert bewertet werden kann.

Hierzu fällt insbesondere auf, dass alle vorgestellten Modelle konzeptionell relativ ähnlich aufgebaut sind, da sie alle auf einem hydrologischen Modellkern aufbauen. Dies zeigt sich beispielsweise am Abflussrouting, welches in allen Modellen mit einer 1D-kinematischen Wellengleichung erfolgt. Diesem Ansatz fehlt jedoch die Abbildung der Abflussdivergenz, welche typischerweise zu hohen Fließtiefen innerhalb der Abflussstrukturen und zu niedrigen Fließtiefen in der Fläche führt. Aus der Feststellung zum Modellaufbau kann jedoch nicht abgeleitet werden, dass die Modelle auch quantitativ vergleichbare Ergebnisse liefern würden. Woolhiser et al. (1989) zeigen exemplarisch, dass z.B. der Unterschied zwischen der Transportgleichung nach Yalin (1963) und der nach Engelund & Hansen (1967) bei identischem Korndurchmesser ca. 1 Zehnerpotenz über ein weites Spektrum an Korndurchmessern beträgt. Unterschiede ergeben sich selbstverständlich auch im verwendeten Pedotransfer, in den modellinternen gesetzten Parametern und in den numerischen Lösungsalgorithmen. Die vorgestellten Modelle sind (zumindest in ihrem grundsätzlichen Aufbau) alle im Zeitraum der 1970er bis 1990er Jahre entwickelt worden, also in einer Zeit mit deutlich schwächerer Computerleistung als heute verfügbar. Hieraus erklären sich viele der vorgestellten Vereinfachungen. Ob komplexere Modelle hier bessere Ergebnisse liefern würden, bleibt allerdings offen.

Auch wenn in der hier gezeigten Zusammenstellung nur eine Auswahl der verfügbaren Erosionsmodelle diskutiert wurde, haben die herausgearbeiteten Aussagen Bestand, wenn mit der vorgestellten Überblickliteratur von z.B. Jetten et al. (1999), Boardman (2006) oder Brazier (2013) verglichen wird. In Bezug auf die Ergebnisse ist zunächst die hohe natürliche Variabilität des Erosionsprozesses festzuhalten. Bagarello & Ferro (2012) erreichen mit Replikationsplots (also im Rahmen der Möglichkeiten identischen, benachbarten Plots) eine Korrelation von $R^2 = 0,76$. Vergleichbare Ergebnisse erreicht Nearing (2000). Es sollte also davon ausgegangen werden, dass eine wie auch immer gelungene Computersimulation diese Güte nicht übertreffen kann. Wichtig ist stattdessen, ob die Modelle in der Lage sind, das qualitative Verhalten des Systems korrekt abzubilden und weniger, ob Absolutwerte mit einer bestimmten Genauigkeit getroffen werden. Ein klar erkennbares Problem ist hier jedoch, dass viele Prozesssteile noch nicht ausreichend erforscht und verstanden sind. Brazier (2013) stellt klar, dass aktuell verfügbare Modelle keine besonders gute Übereinstimmung mit Messungen darstellen können, insbesondere wenn gezielt geprüft wird, ob Sedimenttransport mit den richtigen Prozessen modelliert wird. Er empfiehlt eine prozessweise Analyse der Modelle mit gezielter Suche nach Prozessschritten, die besonders zu Modellunsicherheiten beitragen. Auf der anderen Seite empfiehlt er (neben gezielten Experimenten und Versuchen) die numerische Simulation von Erosionsprozessen, auch wenn diese aktuell noch keine gute Modellqualität erreichen, um mehr

Prozesskenntnis zu erlangen. Boardman (2006) stellt in seinem Überblickspaper zum Stand der Erosionsmodellierung fest, dass seit seinem vorangegangenen Überblickspaper (Boardman 1986) wenig bis kein Fortschritt im Feld der Erosionsmodellierung zu verzeichnen sei und betont insbesondere, dass die 1986 identifizierten großen offenen Fragen der Erosionsmodellierung nach wie vor unbeantwortet sind. Renschler & Harbor (2002) geben an, dass die Datenqualität sich in ihrem Überblick über verschiedene Studien als entscheidend für die Modellierungsqualität zeigt und kommen entsprechend zu dem Schluss, dass die Verfügbarkeit von Daten bei der Entwicklung von Modellen bedacht werden muss.

Evans & Brazier (2005) betonen ein grundsätzliches Problem der Erosionsmodellierung, welches darin besteht, dass die Modelle zum einen die Erosion systematisch überschätzen und zum anderen die Häufigkeitsverteilungen der modellierten Erosionsevents deutlich von den gemessenen abweichen. Auch Jetten et al. (1999) zeigen klar, dass die getesteten Modelle insgesamt eher zur Über- als zur Unterschätzung von Erosionsereignissen neigen. Sie geben weiter an, dass sogar zwischen verschiedenen Modellen konsistent ist, welche Ereignisse über- und welche unterschätzt werden und kommen zu dem Ergebnis, dass systematische Fehler in dem Aufbau von Erosionsmodellen vorliegen könnten. Nach Nearing (1998) stammt die generelle Tendenz, große Events zu unter- und kleine Events zu überschätzen, aus der deterministischen Natur des Modells, das die natürliche Varianz nicht abbilden kann. In jedem Fall entspricht diese Tendenz den in diesem Kapitel erarbeiteten strukturellen Defiziten, da die angreifende Kraft (Schubspannungen) aufgrund der Defizite in der Unterscheidung von Korn- und Formrauheit tendenziell überschätzt wird, während die rückhaltenden Kräfte, insbesondere die kritische Schubspannung, durch ihre Ableitung aus der Gerinnehydraulik (welche die Kohäsion nicht berücksichtigt) tendenziell unterschätzt werden. Jetten et al. (1999) stellen noch fest, dass neben der durchwachsenen Abbildung über das Ausmaß der Erosionsprozesse alle getesteten Modelle insbesondere Schwierigkeiten haben, das Auftreten eines Erosionsevents vorherzusagen, d.h. es werden insgesamt zu wenige Events mit zu hoher Erosion je Event modelliert.

Bryan (2000) zeigt für zwei Böden, welche beide als Lehmschluff angesprochen werden, die gemessene Sedimentkonzentration im Verhältnis zu bekannten Basisgrößen der Transportkapazität, Schergeschwindigkeit und Abflussenergie. Die gezeigten Daten zeigen eine erhebliche Bandbreite der Sedimentkonzentration für konstante Abflusskenngrößen. Bryan (2000) verweist hier auf die natürliche Variabilität im System, die Unsicherheit, die durch unklare Initiierung von Rillen entsteht, aber auch auf die Schwierigkeit, die benötigten hydraulischen Kennwerte in flachem Oberflächenabfluss eindeutig zu bestimmen. Jetten et al. (1999) betonen, dass insbesondere die Sedimentmodule der untersuchten Erosionsmodelle Defizite zeigen. Exemplarisch nennen sie die fehlende Berücksichtigung von Gullyerosion. Erosionsmodelle nutzen zur Bestimmung der Transportkapazität entweder Formeln, die ursprünglich für Fließgewässer entwickelt wurden, oder empirische Beziehungen, die die Transportkapazität aus der Fließintensität bestimmen. Nach Abrahams et al. (1998) wurden alle diese Beziehungen in Rinnenversuchen ohne großskalige Formrauheit entwickelt.

Bereits Paaswell (1973) benennt als die zwei großen Schwierigkeiten zur Quantifizierung des Erosionsprozesses auf kohäsiven Böden zum einen die Bestimmung der tatsächlich auf den Bodenkörper wirkenden Schubspannung und zum anderen die Identifizierung der Eigenschaften eines Bodens, die dessen Verhalten als Sohlmaterial definieren, d.h. der Schwäche der Gleichungsansätze steht auf der anderen Seite die dünne Erkenntnisgrundlage zu den Erodibilität des Bodens gegenüber. Diese werden im Wesentlichen nach empirischen

Gleichungen aus Messungen bestimmt, wobei es insbesondere bei 2- oder 3-parametrischen Funktionen schwer ist, die einzelnen Parameter sicher zu bestimmen. Eine weitere Schwierigkeit liegt darin, dass die Wertebereiche dieser Parameter über viele Größenordnungen schwanken, und zwar nicht nur zwischen Hangoberflächen, sondern auch auf einer Hangoberfläche. Krier (1987) gibt an, dass die Parameter sogar innerhalb eines Versuchs bzw. innerhalb eines Events massiv schwanken. Paaswell (1973) nennt als die drei wesentlichen Parameter, die die Erodibilität eines Bodens charakterisieren den Tongehalt, den Plastizitätsindex und den makroskopischen Scherwiderstand. Er ergänzt jedoch, dass diese Parameter die individuelle Charakteristik eines Bodens nicht vollständig erfassen und weitere Eigenschaften berücksichtigt werden müssen. Weiter bezeichnet er sowohl ein vollständiges Verständnis aller relevanten Zustandsgrößen, um geeignete Theorien auszuarbeiten als auch Experimente, mit denen diese geprüft werden können, als essentiell. Brazier et al. (2000) zeigen am Beispiel WEPP, dass ein Modelllauf mit einem zufällig generierten Parametersatz keine schlechtere Abbildung von jährlichen Messreihen erreicht, als ein nach den modellinternen Pedotransferfunktionen gesetzter Parametersatz.

Jetten et al. (1999) kommen zu dem Ergebnis, dass Erosionsmodelle insgesamt Abflussvolumen zuverlässiger vorhersagen als eine Spitzenabflussrate und diese wiederum zuverlässiger als Sedimentaustrag. Ebenso werden zeitlich aggregierte Kennwerte besser getroffen als Einzelwerte. Ereignisse, welche innerhalb des Spektrums der Kalibrierungszeitreihe liegen, werden besser abgebildet als solche, die außerhalb liegen. Sogenannte weiche (*soft*) Informationen insbesondere zur Bodenstruktur erhöhen die Vorhersagequalität deutlich. Ob sich hier ein abnehmendes Prozessverständnis von Infiltration zu Abflussrouting bis Abtrag und Transport zeigt oder ob es sich schlicht um eine Fehlerfortpflanzung handelt, kann nicht ohne weiteres beantwortet werden.

Die angerissene Problematik des fehlenden Prozessverständnisses in Verbindung mit getroffenen Annahmen in empirischen Gleichungen soll beispielhaft am Sedimenttransportansatz in WEPP gezeigt werden. Die Transportkapazität wird in WEPP mit einer Vereinfachung der Yalin-Gleichung nach Finkner et al. (1989) bestimmt. Hier zeigen sich jedoch mehrere offene Fragen. Die Gleichung von Yalin (1963) basiert auf der kinetischen Bilanzierung der Sprünge, die rolliges Material im Geschiebetransport zeigt. Kohäsion und Suspensionstransport werden in dieser Gleichung explizit nicht berücksichtigt. Die Gleichung gilt weiter nur für vollkommen glatte Gewässersohlen, d.h. unter der Annahme, dass die Kornrauheit des Sohlenmaterials der Gesamtrauheit entspricht. Finkner et al. (1989) werden dieser letztgenannten Annahme gerecht, indem in der Yalin-Gleichung die Schubspannung für die ebene Sohle τ gegen den sohlenwirksamen Anteil der Gesamtschubspannung auf unebener Sohle τ_s ersetzt wird. Zumindest für Fließzustände, die durch die Formrauheit dominiert sind, erscheint dieser Ansatz jedoch fraglich, da bei $\tau = \tau_s$ mit τ auf einer glatten Sohle und τ_s auf einer Sohle mit großer Formrauheit eine vollkommen andere Abflusssituation herrscht. Das gilt insbesondere, wenn unterstellt wird, dass erstere Abflusssituation sich auf Gerinneabfluss und zweitere auf seichten Oberflächenabfluss bezieht. Zusätzlich kommt ein Fehler von bis zu 10 % der maximalen Transportkapazität eines Hanges durch die Vereinfachung von Finkner et al. (1989) hinzu. Im klassischen Yalin-Ansatz wird außerdem die Sedimenttransportkapazität für jede Korngrößenklasse zur Gesamttransportkapazität aufsummiert. In WEPP wird nach jeder Korngrößenklasse als Massenanteil gewichtet. Diese hier genannten Aspekte werden weder in Finkner et al. (1989) noch in Flanagan & Nearing (1995) diskutiert. Für den Nutzer eines

Modells ist es daher nicht möglich zu bewerten, mit welchem Fehler aufgrund dieser Vereinfachungen zu rechnen ist.

Wenn der oben ausgeführte Gedanke von Boardman (2006) und Brazier (2013), die Modelle getrennt nach Prozessen zu überprüfen und ggf. durch gezielte Studien offene Fragen zu klären, aufgegriffen wird, lassen sich aus den hier vorgestellten Überlegungen exemplarisch folgende Ansatzpunkte ableiten:

- Die fehlende Möglichkeit, die Bildung von Oberflächenabfluss durch Sättigungsüberschuss adäquat zu modellieren, obwohl bekannt ist (und auch in Kapitel 3 zu sehen sein wird), dass gravierende Abfluss- und Erosionsereignisse durch diese Form der Abflussbildung ausgelöst werden.
- Die Genauigkeit des Pflanzenwachstumsmodells, welches im Kern des Modells steht und Einfluss auf alle Teilprozesse ausübt. In Sensitivitätsstudien wird der Einfluss des Pflanzenwachstumsmodells häufig vernachlässigt, da die benötigten Parameter aus Datenbanken übernommen werden (können) und daher vom Nutzer nicht direkt als Kalibrierparameter wahrgenommen werden. Die Arbeit von Schwob (2016) zeigt aber deutlich den Einfluss von Klimaparametern auf modellierte Abtragsmengen, was nur durch Übertragung auf das Pflanzenwachstumsmodell zu erklären ist.
- Die Abbildung der Geometrie in vielen klassischen Erosionsmodellen erfolgt passend für das vorhandene Abflussrouting als (mehr oder weniger komplexes) repräsentatives Hangprofil mit einer festen Breite. Diese Art des Routings erlaubt keine Abflussdivergenz innerhalb eines Hangprofils. Der Nutzer muss das Gebiet entweder sehr kleinteilig aufbauen, was zu unrealistisch vielen Grabenstrukturen (welche hydraulisch anders berechnet werden) führt oder erhält zwangsläufig eine unrealistisch homogene Welle für jedes Teilgebiet.
- Die fehlende Möglichkeit relativ leicht umsetzbare hydraulische Fallunterscheidungen vorzunehmen. Hierzu zählen z.B. laminare Fließverhältnisse oder tiefenabhängige Strickler-Beiwerte. Dies könnte auch eine Verbesserung in der Unterscheidung zwischen linearen und flächenhaften Abflussformen zur Folge haben, ohne dass explizit Rillen modelliert werden müssen.
- Die fehlende Berücksichtigung der statistischen Natur der Abflusssituation, d.h. die Abbildung von mittleren Fließverhältnissen über eine stark variable Oberfläche. Mit der Gleichung von Einstein stünde hier zumindest ein Konzept zur Verfügung, auch wenn die Gleichung selbst für andere Typen von Fragestellungen konzipiert wurde.
- Die Wahl der Erosionsparameter des Bodens über Pedotransfer aus der Bodenart ohne Berücksichtigung weiterer Bodeneigenschaften und ohne einen Ansatz zur Abbildung der statistischen Natur bzw. der zeitlichen Variabilität.

Dieser letzte Aspekt soll in den folgenden Ausführungen in Kapitel 3 und 4 beispielhaft untersucht werden. Hierfür wird ein 2-parametrischer Modellansatz vom Typ eines Schubspannungsüberschusses genutzt. Die durchgeführten Untersuchungen sollen hier rein qualitative Erkenntnisse liefern, so dass davon ausgegangen wird, dass die gefundenen Beziehungen und Aussagen grundsätzlich auf Modelle der anderen Ansätze übertragbar sind.

3. Modellierungsbeispiele

In Kapitel 2 wurden die theoretischen Grundlagen sowie einige modelltechnische Probleme bei der Modellierung von Bodenerosionsprozessen durch Oberflächenabfluss diskutiert. Es wurde gezeigt, dass komplexe Modelle mit Modellansätzen aus verschiedenen Fachdisziplinen notwendig sind, um den Erosionsprozess adäquat abbilden zu können. Hierbei müssen insbesondere für die Abbildung der hydraulischen Prozessketten zahlreiche Annahmen getroffen werden, die die Aussagekraft der Modellierungsergebnisse in Frage stellen. Aus der Vielzahl der vorhandenen Modellansätze und Modelle wurden die Modelle WEPP und KINEROS2 ausgewählt, um beispielhaft zu prüfen, welche Konsequenz sich aus den getroffenen Annahmen und Vereinfachungen für die Modellierung von Erosionsprozessen ergibt. Dies soll im Folgenden beispielhaft für ein Testeinzugsgebiet untersucht werden. Insbesondere steht im Fokus, welche Rolle die Parametrisierung der Bodenerosionsparameter für die Modellierungsgüte spielt.

In Kapitel 3.1 wird das Studiengebiet für die exemplarischen Modellierungen vorgestellt. Kapitel 3.2 stellt zunächst die vorhandene Datengrundlage vor und zeigt eine phänomenologische Auswertung des Erosionsgeschehens im Studiengebiet. Anschließend werden die aufgebauten Modelldatensätze vorgestellt. In Kapitel 3.3 werden die Modellierungsergebnisse für die untersuchten Modelle vorgestellt und qualitativ und quantitativ mit dem gemessenen Erosionsgeschehen verglichen. Abschließend wird in Kapitel 3.4 ein Fazit zur Eignung der Modellansätze gezogen und die Ergebnisse mit anderen Studien zu ähnlichen Fragestellungen verglichen.

3.1. Studiengebiet

Für die Fragestellung wird ein Testhang mit langjährigen Messungen von Niederschlag, Klimagrößen, Abfluss, Sedimentaustrag und Bewirtschaftungsparametern benötigt, so dass die Messungen mit der Modellierung qualitativ und quantitativ verglichen werden können.

Der verwendete Testhang gehört zur Versuchsstation Klostergut Scheyern des Forschungsverbunds Agrarökosysteme München (FAM) (z.B. Auerswald et al. 2000). In der Versuchsstation wurde zwischen 1990 und 2002 eine umfangreiche Ökosystemanalyse im Spannungsfeld Bewirtschaftung und Bodendegradation durchgeführt. Ein Teil der zahlreichen Untersuchungen bezog sich auch auf Bodenerosionsprozesse. Die durchgeführten Untersuchungen zeichnen sich besonders durch die langjährigen Messungen auf der Skala eines Feldes oder kleinen Teileinzugsgebiets aus. Diese Skala wird für Abtragsmessungen selten gewählt (Fiener & Auerswald 2007), stellt aber eine gute Grundlage für den Test von physikalisch basierten Erosionsmodellen dar, da diese insbesondere auf der Feld-Skala arbeiten.

Die Versuchsstation mit einer Größe von ca. 150 ha liegt in Süddeutschland, ca. 40 km nördlich von München im oberbayerischen Schichtstufenland auf einer Höhenlage von 440 bis 500 m ü. NHN. Klimatisch handelt es sich um ein typisches deutsches Mittelgebirgsklima mit gemäßigten Temperaturen (langjährige Durchschnittstemperatur 8,5 °C (DWD CDC 2023b)) mit jahreszeitlichem Gang und durchschnittlichen jährlichen Niederschlägen von 814 mm (DWD CDC 2023c).

Geologisch liegt die Versuchsstation Scheyern im Tertiärhügelland. Bei den anstehenden Grundgesteinen handelt es sich um tertiäre und quartäre Sedimente mit einer Ausformung des

Reliefs im Quartär (Sinowski & Auerswald 1999). Bei den anstehenden Böden handelt es sich großteilig um Lössderivate aus tertiärem Löss mit quartären Sanden an den Rändern des Gebiets (Sinowski & Auerswald 1999).

Im Zuge des Forschungsvorhabens wurde die Bewirtschaftung des Kloosterguts in zahlreichen Aspekten umgestellt. Insgesamt wurden 114 ha in zwei unterschiedlichen Systemen bewirtschaftet (Auerswald et al. 2000): 68 ha im nach der Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Landbau (AGÖL) zertifizierten ökologischen Landbau (*certified organic farming*) und 46 ha im konventionellen integrierten Anbau (*conventional integrated farming*). Die Trennung der beiden Bewirtschaftungssysteme erfolgte entlang der Hauptwasserscheide. Innerhalb der gesamten bewirtschafteten Fläche wurden 14 Teileinzugsgebiete mit Abflussmessung abgegrenzt (Abbildung 3-1). Die Teileinzugsgebiete haben insgesamt eine Größe von 45 ha, wobei die Größen der einzelnen Gebiete zwischen 0,8 ha und 7,8 ha liegen. Die Abtrennung der einzelnen Teileinzugsgebiete erfolgte so, dass die Größenausdehnung vor allem orthogonal zu den Falllinien war, da hierdurch die Homogenität der Bodeneigenschaften innerhalb eines Testhangs höher ist (Sinowski & Auerswald 1999) und sich die Erosionsneigung insgesamt reduziert.

In den Jahren 1991 und 1992 wurden alle Felder identisch bewirtschaftet, um entsprechend identische Anfangsbedingungen zu schaffen. Ab 1993 setzte eine Bewuchsrotation ein, wobei im integrierten Landbau eine vierjährige, im ökologischen Landbau eine siebenjährige Fruchtfolge gewählt wurde. Für alle Felder eines Bewirtschaftungssystems wurde zu einem unterschiedlichen Zeitpunkt innerhalb der jeweiligen Fruchtfolge gestartet. Umfangreiche Messungen für die 14 Teileinzugsgebiete wurden zwischen 1994 und 2001 durchgeführt.

Als ergänzende Bodenschutzmaßnahmen wurden Mulchen (*mulch tillage*), das Verbleiben von Bewuchsresten auf den Feldern (*plant residues*) und Zwischenfrüchte (*undercrops*) verwendet, um eine möglichst lang andauernde hohe Bodenbedeckung zu gewährleisten. Auch schonendes Pflügen mit leichtem Gerät mit breiter Bereifung zur Reduzierung der Bodenkompaktierung wurde verwendet.

Verschiedene ergänzende Maßnahmen zur Reduzierung des Sedimentaustrags wie Rückhalteflächen / Sedimentationsflächen (*retention ponds*) und bewachsene Talwege (*grassed waterways*) auf Abflussbahnen, auf denen im Vorfeld Gullyerosion festgestellt wurde, wurden vereinzelt zu Vergleichszwecken implementiert. Die Resultate sind z.B. bei Auerswald et al. (2000) und Fiener & Auerswald (2003) dokumentiert und werden in Kapitel 3.2.2 kurz aufgegriffen.

Für die vorliegende Fragestellung wird das Teileinzugsgebiet 3 (TEZG 03 / W 03) innerhalb der Versuchsstation Scheyern gewählt, um die vorliegenden Messdaten auszuwerten und mit Beispielmodellierungen zu vergleichen. Abbildung 3-1 zeigt die Lage und Topographie des TEZG 03 innerhalb des Versuchsgebiets Scheyern. Das TEZG hat eine Größe von 4,2 ha mit einem mittleren Gefälle von 7,3 % (Fiener & Auerswald 2007). Die Abmessungen sind etwa rechteckig, mit einer Länge von ca. 180 m in Richtung des Hauptgefälles und einer Breite von ca. 230 m orthogonal zum Hauptgefälle. Der Verlauf der Höhenlinien zeigt eine Abflusssenke etwa in der Mitte des TEZG.

Das TEZG 03 liegt innerhalb des konventionellen, integrierten Landbaus mit Ackerbau in rotierender Bewuchsfolge. Die Bewuchsrotation der Felder des integrierten Pflanzenbaus war Kartoffel, Winterweizen, Mais, Winterweizen, jeweils mit Senf als Zwischenfrucht. Zur

Reduzierung von Erosionsprozessen wurde (u.a.) nach dem Winterweizen eine Zwischenfrucht vor der jeweiligen Reihenkultur (*row crops*) gepflanzt. Notwendige Bodenbearbeitungen (*potato ridges*) für die Reihenkulturen wurden bereits durchgeführt, bevor die Zwischenfrucht gepflanzt wurde und die Reihenkulturen wurden direkt in den durch Frosteinwirkung abgestorbenen Senf gepflanzt. Die Bewuchsrotation startete Herbst 1992, die Messungen starteten 1994 und dauerten bis 2001, so dass 2 volle Rotationen abgedeckt sind.

In dem TEZG wurden keine zusätzlichen Maßnahmen zur Reduzierung des Sedimentaustrags (Rückhalteflächen, bewachsene Talwege) implementiert, die die Modellierung beeinflussen würden.

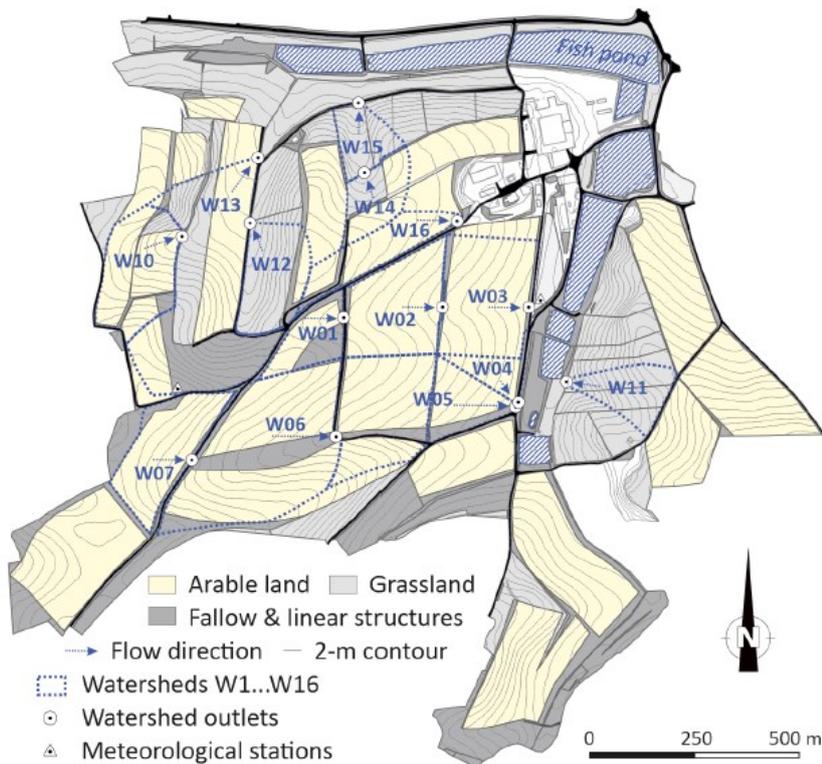


Abbildung 3-1: Detailansicht Versuchsgut Scheyern mit TEZG 03 (W 03) (Fiener et al. 2019)

3.2. Datengrundlage und Modellaufbau

Zunächst soll das Erosionsgeschehen über den Beobachtungszeitraum von 1994 – 2001 sowohl quantitativ als auch qualitativ analysiert werden. Dies dient dazu, den Erosionsprozess im TEZG 03 genauer zu beschreiben und zu bewerten. Weiter kann hiermit auch eine Referenz für die Qualität der Modellierung gewonnen werden. Zunächst erfolgen eine Aufbereitung der Messdaten und die Ableitung sekundärer Informationen. Aus den so aufbereiteten Daten werden Kennzahlen des Erosionsgeschehens sowie qualitative Charakteristika abgeleitet.

3.2.1. Datengrundlage und Datenaufbereitung

Im Rahmen des FAM-Projekts Scheyern wurde eine Vielzahl von Messdaten erhoben. Alle verfügbaren Datensätze werden von Fiener et al. (2019) referenziert. Folgende Messdaten wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung für das TEZG 03 ausgewertet:

- Niederschlagsaufzeichnungen mit einer Auflösung von 0,2 mm an zwei Stationen innerhalb des Scheyern-Gebiets. Die Aufzeichnungen beginnen am 01.04.1994. Der Zeitraum von 01.01.1994 bis 31.03.1994 wurde aus Daten einer nahe gelegenen Station (Vogelried) gewonnen. Für den beobachteten Zeitraum beträgt der durchschnittliche Jahresniederschlag 834 mm (Fiener & Auerswald 2007), mit Juli als durchschnittlich nassestem Monat mit 116 mm und Januar als durchschnittlich trockenstem Monat mit 33 mm (Fiener & Auerswald 2003). Weiter standen Stunden- und Tagesganglinien der Niederschläge zur Verfügung sowie eine Auswertung der Erosivität für Niederschlagsereignisse. Hier wurde jedes Event abgegrenzt, einer Eventnummer zugeordnet und Charakteristika inkl. der Erosivität ermittelt.
- Weitere Klimaaufzeichnungen an vorgenannten Stationen mit u.a. Lufttemperatur, Bodentemperatur, Luftfeuchte, Windstärke und Windrichtung sowie Globalstrahlung. Für den Beobachtungszeitraum lag die Durchschnittstemperatur bei 8,4 °C (Fiener & Auerswald 2007). Die Klimaaufzeichnungen liegen als Stunden- und als Tageswerte vor.
- Abfluss- und Sedimentmessung am tiefsten Punkt des Plots (hinter einem Damm) mit Zulauf zur Messeinrichtung (ohne Retentionswirkung). Die Messung des Abflusses erfolgte mit einem Coshocton-Abfluss-Sammler mit Aliquot von ca. 0,5 % des Abflusses. Über eine Ofentrocknung wurde die Sedimentkonzentration bestimmt. Messpunkte liegen im Falle eines Events mit etwa täglicher Auflösung vor. Zu den Abfluss- und Sedimentmessungen stand ebenfalls eine Einteilung in Events zur Verfügung.
- Untersuchungen von Bodeneigenschaften aus Bodenproben auf einem 50 * 50 m Grid mit insgesamt über 400 Messpunkten, davon 19 im TEZG 03. Für das TEZG 03 zeigt sich eine durchschnittliche Korngrößenverteilung von 21 % Ton, 58 % Schluff und 21 % Sand. Hieraus wurde ein K-Faktor für die USLE von 0,49 ermittelt (Fiener & Auerswald 2007). Der Boden ist damit den Tonschluffen, schluffiger Lehm (Lu) zuzuordnen.
- Dokumentation der Bewirtschaftung: Fruchtfolge, Managementoperationen zu Saat, Düngung, Schädlingsbekämpfung, Bodenbearbeitung und Ernte. Aufzeichnung des Bedeckungsgrades zu Beginn durch Auswertung von Fotos der Oberfläche. Später erfolgte eine Schätzung des Bedeckungsgrades auf Basis monatlicher Mittelwerte.
- Digitales Geländemodell des Projektgebiets in der Auflösung 5 m (DGM5).

Zur Aufbereitung der vorhandenen Rohdaten sind verschiedene Arbeitsschritte notwendig. Es erfolgt eine Aufbereitung in drei verschiedenen Formaten – als kontinuierliche Zeitreihen (Ganglinien), eine tageweise Auswertung und eine eventweise Auswertung. Da Abflussvolumina nur unregelmäßig und eventbezogen gemessen werden, ist eine eindeutige Zuordnung zum Niederschlagszeitpunkt und auch zum Ereignistag nicht durchweg möglich.

So werden für den Beobachtungszeitraum kontinuierliche Zeitreihen mit tageweisem Zeitschritt über Niederschlag (Höhe, Dauer, Intensität), Temperatur (Min, Mittel, Max), Windgeschwindigkeit und -richtung sowie Taupunkttemperatur erstellt. Niederschlagszeitreihen werden auch mit höheren zeitlichen Auflösungen von 1 h und 15 min erstellt. Diese Zeitreihen werden insbesondere für die sekundären Größen Niederschlagsdauer und maximale Niederschlagsintensität in einem 15-min-Zeitschritt benötigt, sind aber gleichzeitig die Grundlage für die folgende kontinuierliche Modellierung. Auch aus der Bewirtschaftung werden verschiedene Zeitreihen erstellt. Diese umfassen zum einen den dokumentierten Bedeckungsgrad sowie Zeitpunkte der Bewirtschaftung und/oder Bodenbearbeitung. Die Bearbeitungszeitpunkte und Bearbeitungsschritte werden ebenfalls in der folgenden kontinuierlichen Modellierung als Grundlage für das Bewuchsmodell benötigt. Der aufgezeichnete Bedeckungsgrad wird hierbei verwendet, um die Parameter des Bewuchsmodells zu kalibrieren.

Zur Generierung der kontinuierlichen Zeitreihen müssen insbesondere Messlücken geschlossen werden. Die Niederschlagsdaten weisen Datenlücken vom 01.01.1994 bis zum 31.03.1994, von September 1999 bis Juni 2000 im 0,2 mm Tigger, sowie am 02.09.2000 und am 16.12.2001 in den Stundenwerten auf. Diese wurden mit Daten naheliegender Stationen aufgefüllt. Für den erstgenannten Zeitraum stand die Station Vogelried zur Verfügung. Für die einzelnen Fehltag wurde eine nahegelegene DWD-Station (DWD CDC 2017) ausgewählt. Die weiteren Klimadaten zeigen ebenfalls Datenlücken im Zeitraum 01.01.1994 – 31.01.1994 sowie an den beiden Tagen 02.09.2000 und 16.12.2001, die ebenfalls über Aufzeichnungen nahegelegener Stationen (Vogelried, DWD) geschlossen wurden. Einzelne Klimakenngrößen z.B. Luftfeuchtigkeit, Globalstrahlung, Windrichtung zeigen weitere Datenlücken, welche vergleichbar behandelt wurden.

Abgeleitete Einheiten, die in den folgenden Schritten der Modellierung benötigt werden (z.B. max. Intensität in 15 min), werden ermittelt. Wo Messungen nur mit geringerer Auflösung vorhanden sind, z.B. nur in Tagesschritten, werden diese Größen durch gleichmäßige Disaggregation (insbesondere Disaggregation der Stundenwerte auf 15 min-Werte für den Zeitraum September 1999 bis Juni 2000) erzeugt. Auf Basis der Zeitreihen kann auch eine tageweise Auswertung der Messdaten vorgenommen werden, indem jeder Tag als ein Datensatz ausgewertet wird. Hierfür werden die Messwerte aus Niederschlag, Abfluss und Sediment um abgeleitete Größen wie Vorregensummen und Zeiträume seit der letzten Bodenbearbeitung oder dem letzten Erosionsereignis erweitert.

Eine Auswertung auf Basis einzelner Events erfordert weitere Aufbereitungen der Messdaten. Da sich ein Event über mehrere Tage erstrecken kann oder mehrere Events auf einen Tag fallen können, muss eine Zuordnung von Niederschlag zu dem korrespondierenden Abflussereignis händisch vorgenommen werden. Hierfür werden zunächst Kleinst-Ereignisse abgetrennt und nur Ereignisse mit einem Gesamtabtrag größer 8 kg beibehalten. Diese decken 91 % des gesamten Abtrags während des Beobachtungszeitraums ab. Die abschließende Zuordnung von Niederschlagsaufzeichnung zu Abfluss- und Abtragsaufzeichnung zu einem Event erfolgt

händisch. Es ist daher wichtig, dass diese Auswertungen nur qualitativ verstanden werden können. Einige Events können für die vorliegende Untersuchung nicht ausgewertet werden. Dies betrifft insbesondere die Winterereignisse, da hier zum Teil auf Grund von Frost- und Tauperioden keine eindeutige Zuordnung von Niederschlag- und Abflussereignis möglich ist. Events mit markierten Messfehlern bei Abfluss- und Sedimentmessung wurden weiterverwendet, die enthaltenen Unschärfen bei ihrer Auswertung aber qualitativ berücksichtigt. Die verwendete Abgrenzung der Events weicht aufgrund der unterschiedlichen Fragestellung und der subjektiven, händischen Abgrenzung von den Events nach z.B. Fiener & Auerswald (2007) teilweise ab.

Darstellung der aufbereiteten Zeitreihen als Tageswerte zeigt Abbildung 3-2. Die zugehörigen Daten finden sich in Anhang 3-1.

Aus den vorliegenden Bodeninformationen werden für jeden Messpunkt Bodenhorizonte mit Korngrößenverteilungen je Horizont definiert.

3.2.2. Qualitative Beschreibung des Erosionsgeschehens im TEZG 03

Die beschriebene umfangreiche Messreihe erstreckt sich für das Teileinzugsgebiet (TEZG 03) auf die Jahre 1994 – 2001 (Jahre ab 1991 waren zur Herstellung eines „0“-Zustands). Fiener & Auerswald (2007) grenzen insgesamt 198 Events (*rainfall-runoff-events*) in dem genannten Zeitraum ab, was durchschnittlich ca. 25 Events pro Jahr entspricht und weit geringer als die durchschnittliche Anzahl von Niederschlagsereignissen einzuordnen ist. Abfluss und Sedimentabtrag variieren zwischen den individuellen Events um bis zu 6 Größenordnungen (Fiener & Auerswald 2003) und sind damit als hochgradig heterogen einzuschätzen.

Vor der Umgestaltung der Versuchsstation wurde für die Versuchsstation Scheyern insgesamt eine mittlere Erosionsrate von $9,1 \text{ t}/(\text{ha} \cdot \text{a})$ geschätzt (lokale Bodenbildungsrate ist bei $1 \text{ t}/(\text{ha} \cdot \text{a})$ angegeben). Nach den implementierten Maßnahmen reduziert sich dies auf im Mittel (1994-1998) $0,05 \text{ t}/(\text{ha} \cdot \text{a})$ (Auerswald et al. 2000). Das gewählte TEZG 03 zeigt daher innerhalb der Station Scheyern leicht überdurchschnittliche Abträge.

Abbildung 3-2 zeigt die aufgezeichneten Zeitreihen für das TEZG 03. Über die Dauer des Messzeitraums wird ein Abtrag von 14.941 kg Sediment aufgezeichnet, was einem Durchschnitt von $0,44 \text{ t}/(\text{ha} \cdot \text{a})$ entspricht. Von der abgetragenen Sedimentmasse entfallen 5.754 kg auf das größte Event am 28. / 29.10.1998, was bereits 38 % des gesamten Abtrags entspricht. Unter Berücksichtigung der direkt an dieses Event folgenden Abträge bis zum 11.11.1998 erhöht sich der Anteil auf 9.220 kg bzw. 61%. Der niedrige Gesamtabtrag sowie die Dominanz des Sedimentabtrags durch wenige große Events decken sich im Wesentlichen mit den Erwartungen. Zum einen sind die geringen Erosionsraten eine Folge der bodenschützenden Bewirtschaftung, zum anderen deckt sich das Auftreten weniger großer Events mit Beobachtungen von z.B. Halbfaß & Grunewald (2008), Schwertmann et al. (1987), Bryan (2000) für (u.a.) die Region des deutschen Mittelgebirges.

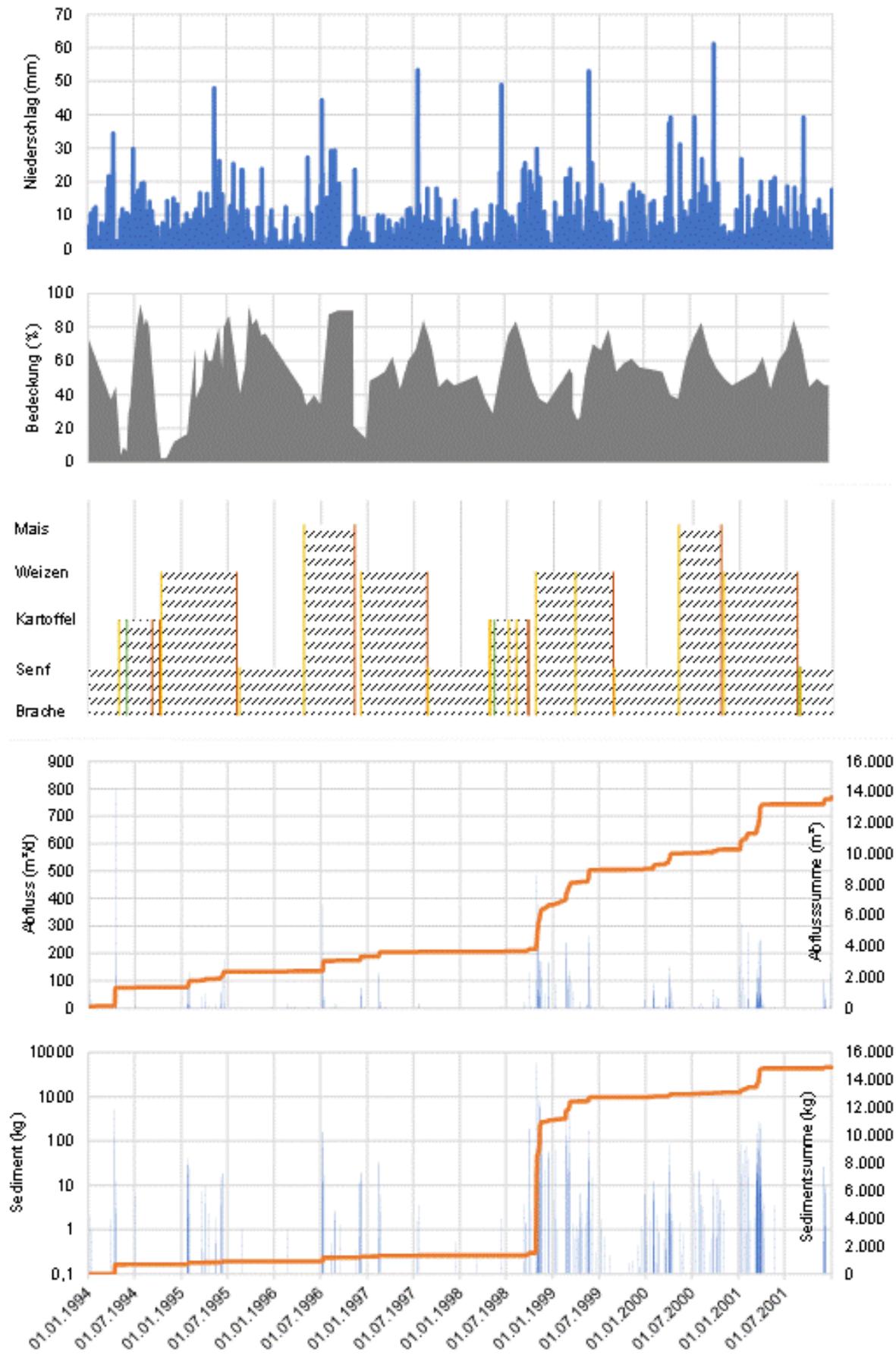


Abbildung 3-2: Ganglinien TEZG 03: Tagesniederschlag, Bedeckungsgrad, Fruchtfolge mit Bearbeitungsoperation (gelb: Einsaat, grün: Bearbeitung, rot: Ernte), Abfluss, Sediment (jeweils blau: Tageswerte, orange: Summenlinie)

Aufgrund der zeitlichen Auflösung der Abfluss- und Sedimentmessungen können die Ganglinien insgesamt nur eingeschränkt Auskunft über das Erosionsgeschehen und Kausalzusammenhänge geben. Einige Aspekte fallen dennoch auf. Es ist deutlich, dass die höchsten Abflüsse nicht klar mit höchsten Niederschlägen und ebenso nicht klar mit den größten Erosionsereignissen korrespondieren.

In den Ganglinien auffällig ist besonders das Ereignis im Oktober 1998. Dies betrifft jedoch nicht nur das Ausmaß des Abtrags, 38 % des Gesamtabtrags eines 8-Jahres-Zeitraums an einem Tag, sondern auch die Beziehungen mit anderen Aspekten der Ganglinien. Zunächst fällt auf, dass das Ereignis nicht mit einem besonders ausgeprägtem Niederschlag und/oder einem besonders ausgeprägtem Abfluss zusammenfällt. Zwar zeigt die Summenlinie der Abflüsse im Zeitraum des Ereignisses einen ausgeprägteren Anstieg als im übrigen Verlauf. Dieser ist jedoch nicht in der gleichen Größenordnung wie dies für die Summenlinie der Abträge der Fall ist und wird auch nicht durch einen Tag verursacht. Dem Tag selbst (29.10.1998) ist nur ein Abfluss von 488 m³ zugeordnet. Eine Größenordnung, die während des 8-Jahres-Zeitraums wiederholt auftritt. Dagegen zeigt die Darstellung von Bewirtschaftung und Bewuchs eine mehrwöchige Lücke nach der Kartoffelernte. Diese findet sich nicht in der Ganglinie des Bedeckungsgrades. Da letzteres ab 1997 eine Abbildung monatlicher Mittelwerte darstellt, ist hier die Aufzeichnung der Bewirtschaftung maßgebend.

Weiter fällt bei der Betrachtung der Ganglinien bereits optisch auf, dass Abfluss- und Abtragsereignisse nach dem Ereignis im Herbst 1998 deutlich zunehmen. Dies betrifft eine sichtbare Zunahme der Anzahl der Ereignisse und insbesondere beim Abfluss auch die Höhe der Ereignisse. Dieser Effekt scheint (nach optischer Bewertung) bis etwa 2001 anzudauern. Eine ebenso ausgeprägte entsprechende Veränderung in den Niederschlags- und/oder Bewirtschaftungszeitreihen ist nicht zu erkennen.

Der beschriebene Eindruck lässt sich anhand der dokumentierten Ganglinien auch quantifizieren. Der Zeitraum vor dem Ereignis am 29.10.1998 umfasst 1762, der Zeitraum nach diesem Ereignis 1159 Tage. Vor dem 29.10.1998 treten 892 Tage mit Niederschlag mit insgesamt 3795 mm Niederschlag auf. Dies entspricht einem Ereignis jeden zweiten Tag mit einer durchschnittlichen Höhe je Ereignistag von 4,3 mm. Nach dem 29.10.1998 werden 608 Tage mit Niederschlag und einer Summe von 2909 mm registriert. Auch dies entspricht einem Ereignis jeden zweiten Tag mit einer durchschnittlichen Höhe von 4,8 mm. Die Niederschlagscharakteristik zeigt also keine auffällige statistische Veränderung. Die Anzahl der Abflussereignisse erhöht sich jedoch von 170 (1 Ereignis alle 10 Tage) vor dem 29.10.1998 auf 175 (1 Ereignis alle 6,5 Tage), wobei sich auch das mittlere Abflussvolumen je Ereignis von 25,5 m³ Abfluss auf 53,4 m³ verdoppelt. Für den Abtrag erhöht sich die Anzahl Ereignisse von 71 (1 Ereignis alle 25 Tage) auf 160 (1 Ereignis alle 7 Tage), wobei sich der durchschnittliche Abtrag je Ereignis ebenfalls verdoppelt.

Aus der Bewertung der Ganglinien ergibt sich daher der Eindruck, dass das Ereignis am 29.10.1998 nicht nur in seiner Ausprägung und Charakteristik aus dem übrigen Messzeitraum heraussteicht, sondern auch das Systemverhalten des Testezugsgebiets nachhaltig, mindestens bis 2001, verändert. Aufgrund dessen wird dieses Ereignis im Folgenden als singuläres Ereignis angesprochen.

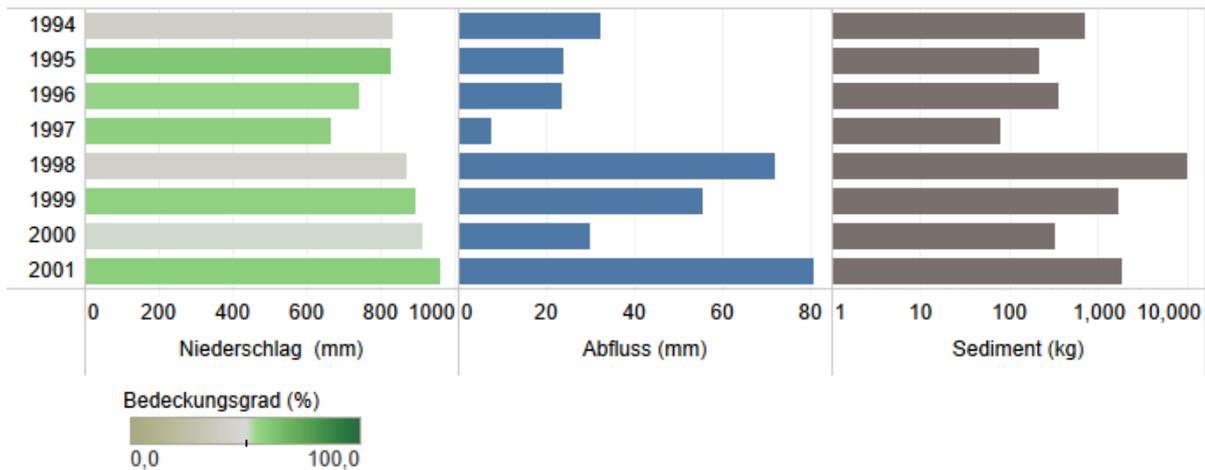


Abbildung 3-3: Jahresmittelwerte für Niederschlag, Abfluss und Sedimentabtrag in Verbindung mit dem mittleren Bedeckungsgrad während jeden Jahres

Werden die Messwerte in Form jährlicher Mittelwerte ausgewertet, ergibt sich ein ähnliches Bild (Abbildung 3-3). Die Auswertung zeigt eine geringe Zunahme der Niederschläge in der zweiten Hälfte des Messzeitraums. Diese Zunahme zeigt sich auch in den gemessenen Abflüssen und Sedimentaustträgen. Auffällig ist jedoch, dass die Abflüsse in den Jahren 1998, 1999 und 2001 deutlich stärker ansteigen als die korrespondierenden Jahresniederschläge. Ähnliches gilt für die Sedimentaustträge in diesen Jahren. Eine Korrelation zum Bedeckungsgrad scheint auf dieser Skala nicht zu existieren. Ohnehin variiert der mittlere Bedeckungsgrad nur wenig (zwischen 40 % 1994 und 62 % 1995) und in wesentlich geringerem Ausmaß als Abfluss und Sedimentabtrag. Weder Jahresniederschlag noch mittlerer Bedeckungsgrad scheinen sinnvolle Größen zur Beurteilung des mittleren jährlichen Sedimentaustzugs. Die Beziehung zwischen Abflusshöhe und Sedimentausttrag ist dagegen enger, hat allerdings einen exponentielle Charakter.

Fiener & Auerswald (2007) beschreiben beispielsweise die Relevanz der Vorfrucht im Vergleich zur Frucht während des Events, die im Rahmen dieser Betrachtung jedoch nicht näher untersucht werden kann. Der Zeitpunkt innerhalb der Rotation wird jedoch als eine mögliche Erklärung für die relativ abrupt ansteigenden Abflüsse und Abträge im Jahr 1998 gesehen. Weitere mögliche Erklärungen könnten eine Veränderung der Messapparatur, eine dauerhafte Veränderung des Oberbodens durch das singuläre Ereignis oder eine zunehmende Verdichtung des Oberbodens im Zuge der kontinuierlichen Bodenbearbeitung sein. Eine nähere Betrachtung dieser Frage ist sicher lohnend und könnte neue Erkenntnisse zum Erosionsprozess liefern, übersteigt jedoch das Ziel und die Möglichkeiten der hier vorliegenden Untersuchungen.

Aufgrund der Art der Abfluss- und Sedimentmessung (siehe Kapitel 3.2.1) können aus den zeitlich aufgelösten Ganglinien keine direkten Beziehungen zwischen Eingangsgrößen und Abfluss und Abtrag bewertet werden. Aus diesem Grund werden im Rahmen dieser Arbeit 42 individuelle Abtrags-Events abgegrenzt und bewertet. Für jedes Event wurde eine Liste von Eigenschaften bestimmt und in einer Datenbank (siehe Anhang 3-2) hinterlegt, so dass Faktoren, welche den Abtragsprozess beeinflussen, systematisch ausgewertet werden können.

Abbildung 3-4 zeigt die Beziehung zwischen der Niederschlagshöhe (mm) und Abflusshöhe (mm) eines Events und der gemessenen Sedimentmasse. Da in der Abbildung die Y-Achse logarithmisch dargestellt ist, sind beide gezeigten Regressionen exponentielle Beziehungen. Für die Abflusshöhe ist diese Beziehungen mit einem Korrelationskoeffizienten R^2 von 58 % jedoch

deutlich enger als für den Niederschlag mit R^2 von 12 %. Weiter ist zu sehen, dass die Beziehung zwischen Abfluss und Abtrag auch ohne das singuläre Ereignis weitgehend unverändert bleiben würde oder anders gesagt, dass das singuläre Event hier durchaus in die etablierte Beziehung passt.

Für den Niederschlag fällt besonders das Extremereignis im April 1994 mit > 120 mm Niederschlag (siehe Tabelle 3-1) auf, welches möglicherweise mit einem zu geringen Abtrag angegeben ist. Für den Niederschlag zeigt auch die Niederschlagsintensität keine oder nur eine sehr untergeordnete Relevanz für das Ausmaß des Sedimentabtrag. Sowohl die durchschnittliche Intensität als auch die max. Intensität in einem 15 min-Intervall zeigen ein R^2 bei maximal 5 %.

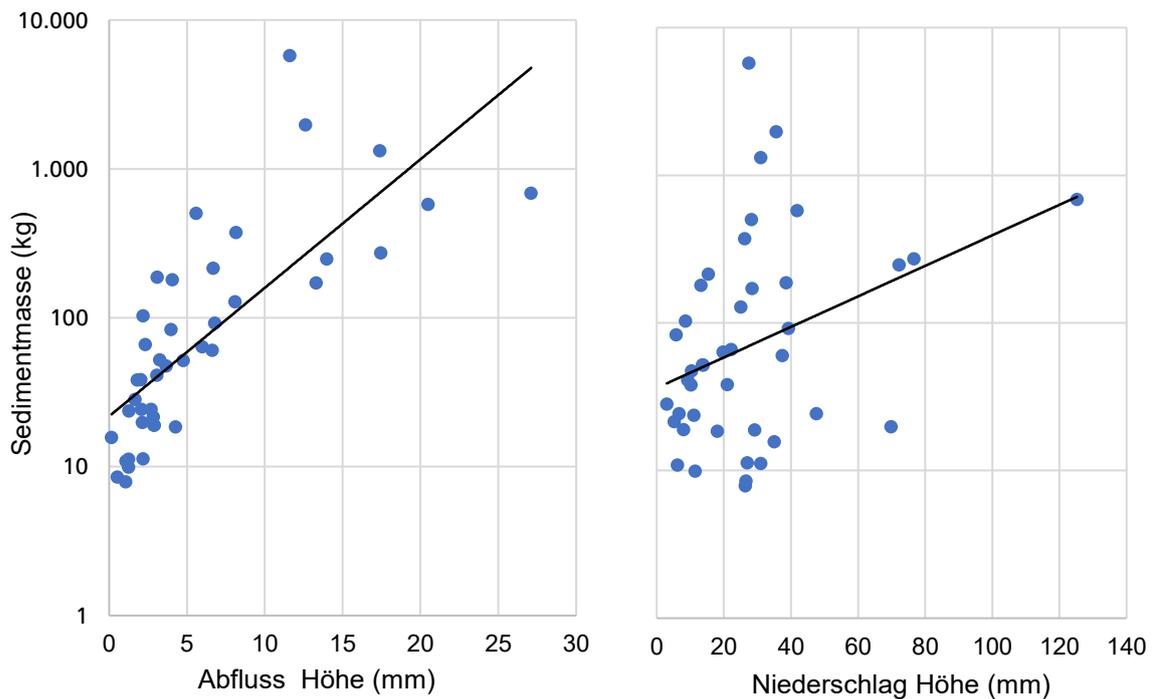


Abbildung 3-4: Regression zwischen Abflusshöhe (links) und Niederschlagshöhe (rechts) und dem Sedimentabtrag für die 42 abgegrenzten Abtragsevents

Weiter wurden auch die Beziehungen zu anderen in der erzeugten Datenbank hinterlegten Faktoren untersucht. Abbildung 3-5 zeigt dies exemplarisch für die Vorregensumme in 5 Tagen, die vergangenen Tage seit der letzten Bodenbearbeitung und den Bedeckungsgrad. Für alle diese Parameter lassen sich Beziehungen finden, wobei die Korrelationskoeffizienten hierfür durchweg unter R^2 von 20 % bleiben. Die engste Beziehung zeigt sich wie zu erwarten zum Bedeckungsgrad mit $R^2 = 18$ %, da dieser sowohl die Abflussbildung beeinflusst als auch ein Maß für Bodenstabilisierung durch Bewuchs und Pflanzenrückstände auf der Bodenoberfläche darstellt. Vergleichbar eng ist die Beziehung zur vergangenen Zeit seit der letzten Bodenbearbeitung mit $R^2 = 15$ %, wobei die beiden letztgenannten Parameter untereinander ebenfalls ein R^2 von 37 % zeigen, so dass nicht klar getrennt werden kann, welchen Anteil an der Beziehung zwischen Zeit seit letzter Bodenbearbeitung und Abtrag durch die zunehmende Bedeckung begründet ist.

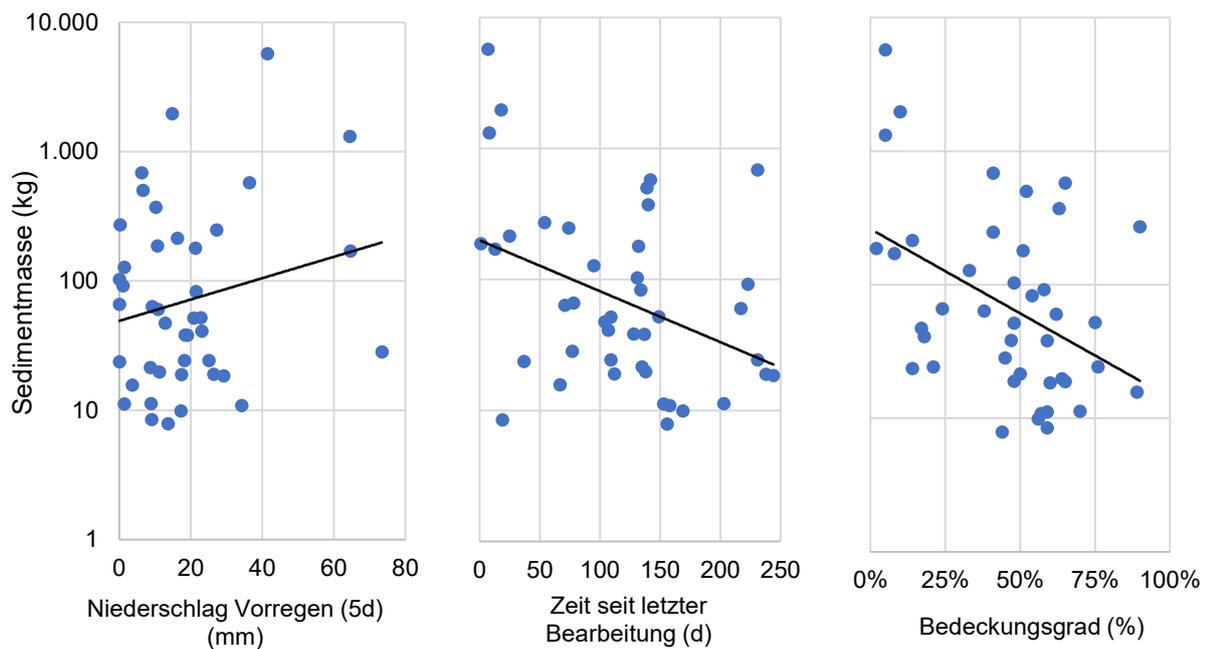


Abbildung 3-5: Regression zwischen 5-Tage-Vorregen (links), Tagen seit letzter Bodenbearbeitung (mitte) und Bedeckungsgrad (rechts) und dem Sedimentabtrag für die 42 abgegrenzten Abtragevents

Zur Vorregensumme lässt sich nur eine Beziehung mit R^2 von 5 % feststellen. Qualitativ kann hier jedoch sehr wohl eine Aussage abgeleitet werden. Neben der abgebildeten 5 Tage Vorregensumme wurde auch die 1 Tag Vorregensumme sowie die 21 Tage Vorregensumme gebildet. Hierbei fällt auf, dass der größte Teil der Ereignisse bei überdurchschnittlichen Vorregensummen stattfindet. Dies ist besonders relevant, da mit den in Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5 gezeigten Auswertungen zwar Aussagen über Charakteristika der Events getroffen können, nicht jedoch über deren Auftreten. Die Vorregensumme und damit die aktuelle Bodenfeuchte kann durchaus als Größe ausgemacht werden, die das Auftreten eines Events bestimmt.

Die Bedeutung des singulären Events lässt sich ebenfalls anhand der Auswertung der Events zeigen. Von den insgesamt 96 Monaten des Messzeitraums liegen 58 (60 %) vor dem singulären Ereignis und 38 (40 %) nach dem singulären Ereignis, dennoch liegen lediglich 13 Ereignisse (30 %) davor und 29 Ereignisse (70 %) danach. Dies entspricht im Mittel einem Ereignis je 4,5 Monaten vor dem singulären Ereignis und einem Ereignis je 1,3 Monaten danach, also mehr als einer Verdreifachung bzgl. der Anzahl. Dies lässt sich auch an den Charakteristika der Ereignisse nachvollziehen. Der durchschnittliche Abflussbeiwert bei einem Ereignis erhöht sich von 22 % auf 27 %; die durchschnittliche Sedimentkonzentration von $0,4 \text{ kg/m}^3$ auf $1,1 \text{ kg/m}^3$ (wird das singuläre Ereignis selbst nicht berücksichtigt, liegt die Sedimentkonzentration immer noch bei $0,8 \text{ kg/m}^3$).

Interessanterweise kann festgestellt werden, dass keines der Events durch klassische Starkniederschläge (kurze Dauerstufe mit seltener Eintretenswahrscheinlichkeit) ausgelöst wurde, sondern es sich durchweg um Ereignisse mit mittleren Niederschlagshöhen und großen Dauerstufen handelt. Auf Grund des unter klimatischen Gesichtspunkten geringen zeitlichen Umfangs der Aufzeichnungen soll hieraus keine generelle Feststellung über den Erosionsprozess abgeleitet werden, sondern die Tatsache lediglich für die Modellierung festgehalten werden.

Dennoch wird geprüft, ob es im Messzeitraum zum Auftreten von Starkregenereignissen gekommen ist. Tabelle 3-1 zeigt alle Niederschlagsereignisse im Messzeitraum, welchen nach KOSTRA 2010R (DWD CDC 2023a) eine Jährlichkeit von 2 oder größer zuzuordnen ist.

Tabelle 3-1: Übersicht über Starkniederschläge während des Messzeitraums 1994-2001

| | Ereignis | Dauer | Höhe (mm) | Intensität ¹ (mm/h) | maßgebende Dauerstufe (min) | Höhe in Dauerstufe (mm) | Wiederkehrintervall (a) |
|---|-------------------------|------------|-----------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 12.04.1994-14.04.1994 | ca. 39 h | ca. 118 | 3,0 / 10,8 | 1440 | 94,6 | > 100 |
| 2 | 29.06.1994 | ca. 45 min | 28,8 | 38,4 / 139,2 | 45 | 28,8 | 5-10 |
| 3 | 01.08.1994 | ca. 35 min | 19,2 | 32,9 / 91,2 | 15 | 15,8 | 2-3 |
| 4 | 13.05.1995 | ca. 24 h | ca. 48 | 2,0 / 8,4 | 1440 | 48,0 | ca. 2 |
| 5 | 05.07.1996 | ca. 20 min | 16,1 | 48,3 / 108,0 | 10 | 13,4 | 2-3 |
| 6 | 28.07.1996 | ca. 15 min | 12 | 48,0 / 108,0 | 5 | 9,0 | ca. 2 |
| 7 | 26.08.1996 | ca. 3,5 h | 27,4 | 7,8 / 67,2 | 60 | 22,0 | ca. 2 |
| 8 | 18.07.1997 – 19.07.1997 | ca. 29 h | ca. 65 | 2,2 / 24,0 | 1440 | 61,3 | 5-10 |
| 9 | 20.05.1999 – 22.05.1999 | ca. 30 h | 56,3 | 1,9 / 12,0 | 1080 | 53,3 | 3-5 |
| 10 | 05.04.2000 | ca. 9 h | 39,2 | 4,4 / nn ² | 360 | 38,6 | ca. 3 |
| 11 | 07.07.2000 | ca. 2 h | 36,1 | 18,1 / 136,8 | 20 | 25,5 | 5-10 |
| 12 | 20.09.2000 – 22.09.2000 | ca. 37 h | 69,6 | 1,9 / 16,8 | 1440 | 61,5 | 5-10 |
| ¹ erste Zahl Mittelwert über Ereignis, zweite Zahl 5min-Maximum ² Ereignis nur aus Stundenwerten bekannt | | | | | | | |

Hier ist zu sehen, dass es im Messzeitraum tatsächlich nicht zu seltenen Starkregenereignissen mit kurzer Dauerstufe gekommen ist. Abgesehen von dem ersten Ereignis überschreitet keines der Ereignisse eine Jährlichkeit von 10 a. Nur 4 der in Tabelle 3-1 aufgelisteten Ereignisse lösen entsprechend der Messaufzeichnungen ein Erosionsereignis aus, dies sind die Nummern 1, 9, 10 und 12. Zu bemerken ist, dass 8 der 12 stärksten Niederschläge vor dem singulären Ereignis liegen, wobei von diesen 8 lediglich 1 ein Erosionsevent auslöst. Auf der anderen Seite lösen 3 der 4 Niederschlagsereignisse nach dem singulären Ereignis auch ein Erosionsevent aus.

Das erste Ereignis aus Tabelle 3-1 zeigt eine Jährlichkeit > 100 a. Das zugehörige Erosionsevent ist mit einem Abtrag von 687 kg das viertgrößte Event in der Messaufzeichnung. Nach Fiener et al. (2019) löst dieses Niederschlagsereignis in 4 der Teileinzugsgebiete der FAM-Station Scheyern das größte Erosionsevent der Messaufzeichnung für das jeweilige TEZG aus.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die Daten eine gute Korrelation zwischen Abflusshöhe und Sedimentaustrag zeigen. Eine vergleichbar enge Beziehung zum Niederschlag lässt sich weder bei tageweiser noch bei eventweiser Betrachtung finden. Dies ist mit Blick auf die Modellierung besonders relevant, da es die Bedeutung von Abflussbildungsansätzen für Erosionsmodelle zeigt. Überraschend erscheint, dass sich auch keine Beziehung zur Niederschlagsintensität finden lässt, die als Approximation für den Spitzenabfluss und Geschwindigkeit gesehen werden könnte, so dass entsprechend eine enge Beziehung zum Abtrag erwartet werden könnte. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich bei allen untersuchten Events um wenig intensive Niederschläge handelt, so dass ein Vergleich mit Niederschlägen hoher Intensität in den Daten nicht repräsentiert ist. Auf der anderen Seite kann

vermutet werden, dass andere Charakteristika des Erosionsevents die Bedeutung der Abflussspitzen in der Auswertung überdecken. In Anlehnung an die Untersuchungen von z.B. Govers et al. (1990) könnte auch vermutet werden, dass die totale wirkende Abflussenergie eine dominierende Größe für die Abtragsintensität ist als die üblicherweise verwendete Spitzenabflussrate.

Die Auswertung erlaubt eine qualitative Beschreibung des TEZG 03. Während des achtjährigen Messzeitraums kam es im Mittel nur zu geringer Abflussbildung, wobei eine Zunahme mit dem Jahr 1998 zu beobachten ist. Korrespondierend mit den niedrigen Abflüssen ist auch der Sedimentaustrag insgesamt gering, wobei der Großteil des abgetragenen Sediments durch wenige Ereignisse entsteht. Das größte singuläre Ereignis lässt sich auf sehr spezifische Bedingungen der Bodenbearbeitung zurückführen, so dass die Vermutung nahe liegt, dass zumindest deutliche Abgrenzung dieses Events zu den anderen aufgezeichneten Events im Modell nicht gelingen wird. Dennoch zeigt sich, dass sich auch dieses Event noch relativ gut in die aus kleineren Events etablierten Korrelationsbeziehungen einbinden lässt (wobei die Korrelationsbeziehungen ohne Berücksichtigen dieses Events anders aussehen), so dass es zumindest qualitativ in die etablierten Zusammenhänge passt.

In den folgenden Modellierungskapiteln wird die Frage diskutiert werden, ob die Modelle in der Lage scheinen die etablierten qualitativen Zusammenhänge abzubilden oder ob zu Ermittlung vergleichbarer Abtragsraten Kalibrierungen notwendig sein werden, die qualitativ stark abweichenden Prozessen entsprechen.

3.2.3. Auswahl der Ereignisse für die Modellierung

Für die Beispielmmodellierung werden 4 Events aus der Eventliste (siehe Anhang 3-2) ausgewählt. Diese werden sowohl in WEPP als auch in KINEROS2 als singuläre Events modelliert und ausgewertet und zusätzlich als singuläre Events innerhalb einer kontinuierlichen Modellierung mit WEPP ausgewertet.

Die Ereignisse wurden danach ausgewählt, dass es sich um möglichst große Ereignisse (mit hohem Abfluss und Sedimentabtrag) handelt. Gleichzeitig sollten die 4 Ereignisse möglichst unterschiedlich sein in den Aspekten Intensität, Vorereignisse, Jahreszeit, Bewuchs, Abflussbeiwert, Verhältnis von Oberflächenabfluss zu Sedimentabtrag. Besonders relevant ist innerhalb der Ereignisse, die sich insgesamt durch lange Dauern von mehreren Tagen und niedrige Intensitäten auszeichnen, möglichst kurze Ereignisse auszuwählen. Da die Modellierung in WEPP auf Basis von Tagen rechnet, führen Ereignisse mit einer Dauer von >> 24 h bereits bedingt durch die Modellstruktur zu Verzerrungen. Details zur Auswahl der Events finden sich auch in Kaiser (2018).

Weitere Einschränkungen betreffen den Temperaturverlauf, da sichergestellt sein soll, dass die Ereignisse nicht durch Schneeschmelze ausgelöst sind. Insbesondere KINEROS2, welches nur eventbasiert arbeiten kann, kann keine ergänzenden Klimadaten verarbeiten, welche notwendig für die Modellierung von Schneeschmelze sind. Auch soll das Ereignis nicht im Zeitraum der Datenlücke des 0,2 mm Tiggers (September 1999 – Juni 2000) liegen, da durch die Verwendung der alternativ verfügbaren Stundenwerte die zeitliche Auflösung der Modellierung reduziert wird.

Aus der Eventliste wurden 27 Ereignisse ausgewählt, welche den genannten Anforderungen grundsätzlich entsprechen. Die zur Auswahl stehenden Ereignisse decken folgendes Spektrum an Charakteristika ab:

- Niederschlag von 8,6 mm bis 125,2 mm
- Abfluss von 1,8 mm bis 27,1 mm
- Abflussbeiwert von 6 % bis 56 %
- Dauer von 0,2 Tage bis 3,0 Tage
- Durchschnittsintensität von 0,3 mm/h bis 4,9 mm/h
- Max. Intensität von 2 mm/h bis 14,4 mm/h
- Bedeckungsgrad von 2 % bis 90 %
- Alle Pflanzen aus der Bewuchsrotation vertreten
- Zeit seit letzter Bodenbearbeitung 1 Tag bis 240 Tage
- Vorregensumme (5d) von 0 mm bis 64 mm
- Sedimentmasse von 41,1 kg bis 5.755 kg

Für die folgende Auswertung der Ereignisse werden diese zur besseren Vergleichbarkeit mit der Nummerierung entsprechend Fiener et al. (2019) bezeichnet. Diese ist in Anhang 3-2 ebenfalls vermerkt. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die hier modellierten Events typischerweise nur

einen Ausschnitt der Events bei Fiener et al. (2019) und auch der Events aus Anhang 3-2 abbilden, da versucht wurde, die Events für die Modellierung möglichst kompakt abzugrenzen.

Ereignis 175 (10.-12.07.1996)

- Auf dem Feld wachsen Maispflanzen
- ca. 15h vorher letzter Niederschlag
- Niederschlag ca. 26 mm
- Gesamtabfluss ca. 580 m³ (Abflussbeiwert 0,55)
- Gesamtabtrag ca. 250 kg
- maximaler Abtrag am 11.07.1996 um 14:30 Uhr von 87,83 kg

Ereignis 228 (29.10.1998) (singuläres Ereignis):

- direkt nach der Saat von Winterweizen
- ca. 15h vorher letzter Niederschlag
- Niederschlag ca. 35 mm
- Gesamtabfluss ca. 490 m³ (Abflussbeiwert 0,36)
- Gesamtabtrag ca. 5.750 kg
- maximaler Abtrag am 29.10.1998 um 08:30 Uhr von 4.319,16 kg

Ereignis 229 (09.-12.11.1998):

- direkt nach der Saat von Winterweizen
- mehrere Tage vorher kein Niederschlag
- Niederschlag ca. 36 mm
- Gesamtabfluss ca. 530 m³ (Abflussbeiwert 0,38)
- Gesamtabtrag ca. 1970 kg
- maximaler Abtrag am 11.11.1998 um 12:30 Uhr von 778,58 kg

Ereignis 331 (21.-22.03.2001):

- im vorherigen Herbst wurde Winterweizen ausgesät
- ca. 31,5h vorher letzter Niederschlag
- Niederschlag ca. 26 mm
- Gesamtabfluss ca. 340 m³ (Abflussbeiwert 0,33)
- Gesamtabtrag ca. 370 kg
- maximaler Abtrag am 21.03.2001 um 17:00 Uhr von 213,23 kg

3.2.4. Modellaufbau

Am Beispiel des TEZG 03 der Forschungsstation Scheyern soll die Modellierung von Bodenerosionsprozessen mit zwei ausgewählten Modellen untersucht werden. Zur Auswahl der beiden Modelle siehe Kapitel 2.5. Die besondere Möglichkeit dieser Untersuchung besteht darin, dass für einen relativ langen Zeitraum Messungen auf der Größe eines Feldes bzw. kleinen Einzugsgebiets vorliegen, so dass Modellierungsergebnisse und tatsächlicher Sedimentabtrag direkt verglichen werden können. Dies ist in den meisten Fällen nicht oder nur für deutlich schwächere Datensätze möglich. Zusätzlich kann aus der ausführlichen Datenanalyse auch die Charakteristik des Erosionsprozesses bzw. der Erosionsereignisse mit den Modellierungsergebnissen verglichen werden. Es ist daher möglich, sowohl quantitativ als auch qualitativ zu überprüfen, ob die gewählten Modelle das Erosionsgeschehen nachbilden können.

Die Modellierung erfolgt mit zwei Modellen (und wird ergänzend mit Modellierungen in anderen Modellen aus der Literatur verglichen), um die Aussagestärke der Ergebnisse zu verbessern und insbesondere um sowohl kontinuierlich als eventbezogen vergleichen zu können. So kann eine stärkere Aussage über die Bedeutung der Parametrisierung der Bodenerosionsparameter und damit zur Forschungsfrage gemacht werden, als wenn nur ein Modell betrachtet wird. Es wurde darauf geachtet, dass beide Modelle bzw. alle drei Modellvarianten soweit möglich identisch parametrisiert werden, um eine möglichst belastbare Aussage treffen zu können. Dort, wo dies aufgrund abweichender Modellstruktur oder widersprüchlicher Modellierungsergebnisse nicht möglich ist, wird versucht, realistische Parameter zu wählen, d.h. die Parameter so zu setzen, wie diese in einer Modellierung in der Praxis gewählt werden würden.

Das Ziel ist an dieser Stelle nicht, die beiden Modelle oder drei Modellvarianten in ihrer Qualität zu vergleichen, sondern zu testen, ob innerhalb jeder Modelllogik das Systemverhalten des TEZG 03 während des Messzeitraums wiedergegeben werden kann.

Geometrie und Systemlogik

Beide gewählten Modelle können (unter anderem) auf der Basis von Teilflächen und Transportstrecken arbeiten, wobei Teilflächen möglichst homogen in Bezug auf alle Abfluss und Erosion bestimmenden Eigenschaften sein müssen, da sie in beiden Modellen als homogene Flächen abgebildet werden. Beide Modelle lösen auch für in der Fläche definierte Gebiete eine 1D-Gleichung für den Oberflächenabfluss (siehe Kapitel 2.3.1). Entsprechend müssen Gebiete als Fließweg mit fester Breite definiert werden.

Für die Modellierung in KINEROS2 kann den Teilflächen (im Gegensatz zu WEPP) kein Gefälleprofil / Höhenprofil zugewiesen werden, d.h. jede Fläche kann nur ein konstantes Gefälle erhalten, was die Ausweisung relativ kleiner Teilflächen notwendig macht. Diese Abbildung von Flächen und Hängen wird so auch für WEPP übernommen.

Für den Modellaufbau in WEPP ist es nicht möglich, dass eine Fläche in eine andere entwässert. Es muss daher ein Anschluss direkt an ein Gerinneelement erfolgen (siehe Tabelle 3-2). Für die beiden WEPP Varianten Kontinuum und Einzelereignis wird die gleiche Geometrie genutzt.

Unter vorstehenden Randbedingungen erfolgt die Abgrenzung der Teilflächen durch eine Fließwegeanalyse / Abgrenzung von Flächen gleicher Fließrichtung in ArcGIS. Weitere Eigenschaften müssen zur Abgrenzung der Teilflächen nicht berücksichtigt werden. Das

Ergebnis ist eine Einteilung des TEZG 03 in fünf Teilflächen gleicher Fließrichtung und vier Transportstrecken (Channel) (Abbildung 3-6). Der in Abbildung 3-6, rechts dargestellte Systemplan gilt für KINEROS2; für WEPP wird Teilfläche 4 direkt an Channel 13 angeschlossen.

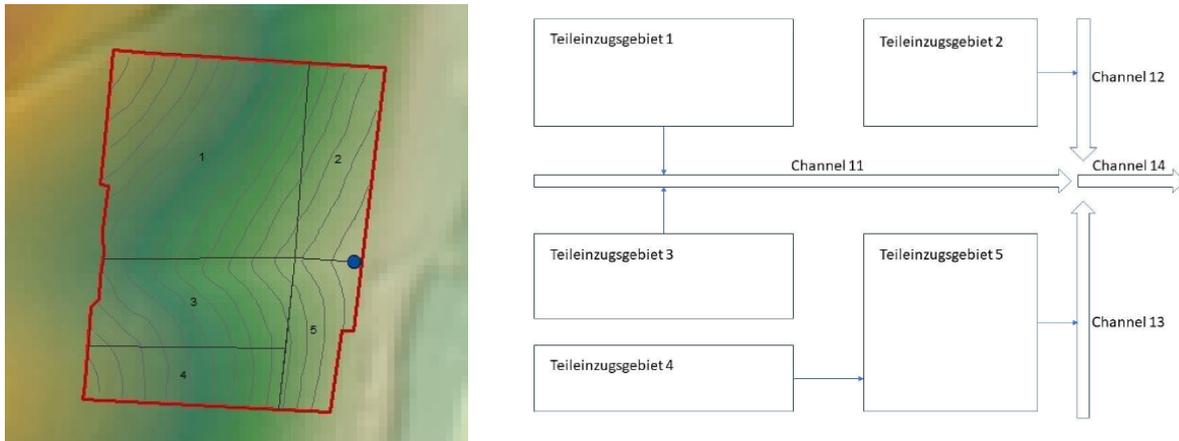


Abbildung 3-6: Geometrie und Systemplan: Abgegrenzte Teilflächen im GIS (links), Systemplan (rechts, Kaiser 2018)

Tabelle 3-2 zeigt die definierten Parameter Länge, Breite und Gefälle für die abgegrenzten Teilflächen. Die Transportstrecken werden modelltechnisch benötigt, werden jedoch in ihren Boden- und Bewirtschaftungseigenschaften identisch zu den Hangflächen definiert.

Tabelle 3-2: Geometrie und Systemlogik der 5 gewählten Teilflächen

| Teilfläche | Länge (m) | Breite (m) | Gefälle (%) | Anschluss WEPP | Anschluss KINEROS2 |
|------------|-----------|------------|-------------|----------------|--------------------|
| 1 | 140 | 133 | 7,5 | Channel 11 | Channel 11 |
| 2 | 49 | 133 | 7,0 | Channel 12 | Channel 12 |
| 3 | 60 | 131 | 7,2 | Channel 11 | Channel 11 |
| 4 | 172 | 39 | 6,7 | Channel 13 | Teilfläche 5 |
| 5 | 39 | 64 | 7,7 | Channel 13 | Channel 13 |

Böden und Korngrößen

Zur Abbildung der Böden werden in WEPP die Anteile der Kornfraktionen Sand und Ton sowie Grobboden und Organik angegeben. Dabei können mehrere Horizonte sowie stauende Schichten definiert werden. Die Bodenparameter zur effektiven, hydraulischen Leitfähigkeit, Rillen- und Interrillenerodibilität sowie kritischen Schubspannung können entweder aus den angegebenen Korngrößen programmintern ermittelt oder vom Benutzer vorgegeben werden, wobei die programminternen Pedotransferfunktionen in der Dokumentation mit sinnvollen Wertespannen und Anwendungsgrenzen angegeben sind.

In KINEROS2 können bis zu 5 Kornfraktionen frei definiert werden. Um die Vergleichbarkeit mit den WEPP Ergebnissen zu gewährleisten, werden hierfür die Kornfraktionen für Ton (0,002 mm), Schluff (0,063 mm), Sand (2 mm) und Grobboden bei 20 mm entsprechend der Bodeneingabe in WEPP definiert. Auf Grund der besonderen Bedeutung für Erosionsprozesse wird die Fraktion Feinsand (0,063 – 0,2 mm) separat ausgewiesen. Die Bodenparameter müssen vom Anwender geschätzt werden. Die Dokumentation bietet jedoch Hinweise, wie die Parameter sinnvoll zu wählen sind.

In KINEROS2 ist die Anzahl der Horizonte auf 2 begrenzt. Daher werden anhand der Bodenproben (siehe Kapitel 3.2.1) 2 Horizonte abgegrenzt, welche für die Modellierung in

WEPP gleichermaßen angesetzt werden. Die Bodendaten liegen in 5 Horizonten bis 2 m Tiefe vor. Für die Modelle erfolgt die Abgrenzung der 2 Horizonte mit 20 cm Deckschicht und einem zweiten Horizont von 1,8 m.

Für das TEZG 03 zeigen sich die Horizonte 1 und 2 nahezu deckungsgleich, für die übrigen Teilflächen zeigt Horizont 2 dagegen einen höheren Anteil in der Tonfraktion (~ 5 %-Punkte) und zum Teil auch in der Schlufffraktion. Insgesamt variiert die Feinkornfraktion (Schluff und Ton) zwischen 78 % und 85 % (Schluff 52 % - 60 %), die Tonfraktion zwischen 18 % und 29 % und die Sandfraktion zwischen 98 % und 99 % (Summelinie). Der Skelettanteil ist insgesamt gering, jedoch im ersten Horizont ausgeprägter als im zweiten.

Da in der vorliegenden Untersuchung ein besonderer Fokus auf die Bodenparameter in den verschiedenen Modellen gelegt wird, werden diese in Kapiteln zu den jeweiligen Modellen detailliert beschrieben.

Landnutzung und Oberflächeneigenschaften

Eine besondere Herausforderung für die kontinuierliche Modellierung stellt die Abbildung der Bewirtschaftung dar. WEPP ermöglicht dies über ein Pflanzenwachstumsmodell, welches über die Angabe von Bearbeitung und Pflanzencharakteristika den Bewuchs und die resultierenden Änderungen der Oberfläche z.B. für Rauheit, Evapotranspiration, Interzeption aber auch für die kritische Schubspannung und die Erodibilität abbildet.

Für die Abbildung des Bewuchses standen mehrere Managementinformationen zur Verfügung. Dies waren zum einen Zeitpunkte von Managementoperationen genauso wie Kurzbeschreibungen mit notwendigen Spezifikationen, welche Operationen durchgeführt wurden. Weiter standen Aufzeichnungen des Bedeckungsgrades zur Verfügung. Letzterer war insbesondere notwendig, da die Pflanzen in der Fruchtfolge zum Teil nicht in WEPP-internen Datenbank zur Verfügung stehen. Es musste die Crop Parameter Intelligent Database System (CPIDS) (Ascough et al. 1998) verwendet werden, um über Eingabe von Charakteristika der Pflanze eine neue Frucht in WEPP anzulegen. Die sinnvolle Wahl dieser Charakteristika wurde anhand der resultierenden Bedeckungsgrade überprüft. Dennoch gibt es einige Besonderheiten in der Bearbeitung, die so im Modell nicht abgebildet werden können, z.B. Nachsaat von Sommerweizen aufgrund von Schäden im Winterweizen im Frühjahr 1999.

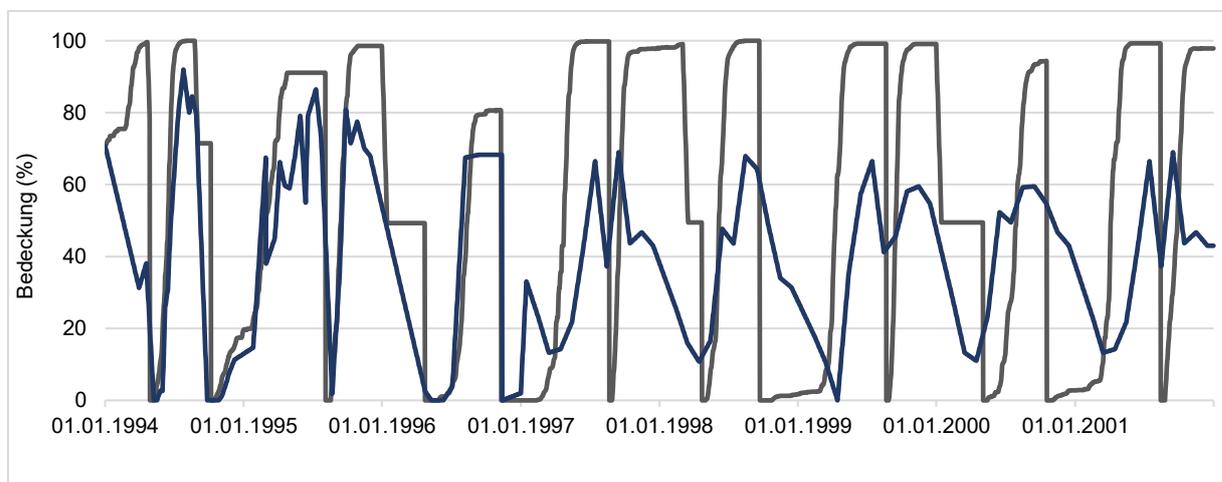


Abbildung 3-7: Bedeckungsgrad für das TEZG 03, bestehend aus Bewuchs + Rückständen entsprechend der Aufzeichnung (blau) und die kalibrierte Ganglinie aus dem Pflanzenwachstumsmodell in WEPP (grau)

Abbildung 3-7 zeigt die Bedeckungsgrade aus dem kalibrierten Pflanzenwachstumsmodell im Modell WEPP im Vergleich zu den aufgezeichneten Bedeckungsgraden. Hier ist zu sehen, dass das kalibrierte Modell die Aufzeichnung für die Jahre 1994 - 1996 gut reproduzieren kann. Ab 1997 wurden die Aufzeichnungen des tatsächlichen Bedeckungsgrades im FAM Projekt nicht fortgeführt, sondern stattdessen monatliche Mittelwerte angesetzt (Fiener et al. 2008).

Dies ist in der Aufzeichnung auch deutlich erkennbar. Es wird daher anhand der gelungenen Anpassung der ersten 3 Jahre davon ausgegangen, dass das Pflanzenwachstumsmodell geeignet ist, um die tatsächliche Bewuchssituation im Rahmen der Kontinuumssimulation wiederzugeben.

Für die beiden Varianten der ereignisbasierten Modellierung wurden in WEPP und KINEROS2 jeweils die Parameter %Bedeckung; %Rückstände und Rauheit nach Tabelle 3-3 gesetzt. Hierbei wurde die Bedeckung zu den Ereigniszeitpunkten aus den Aufzeichnungen verwendet.

Tabelle 3-3: Landnutzungs- und Oberflächeneigenschaften für die ereignisbasierte Modellierung

| | Datum | Pflanze | % Bedeckung | % Rückstände | Rauigkeit (cm) |
|-----|----------------|--------------|-------------|--------------|----------------|
| 175 | 10-12.07.1996 | Mais | 17 | 28 | 5 |
| 228 | 29.10.1998 | Winterweizen | 3 | 2 | 2 |
| 229 | 09.-11.11.1998 | Winterweizen | 8 | 3 | 2 |
| 331 | 21.-22.03.2001 | Winterweizen | 22 | 42 | 2 |

Niederschlag

Zur Abbildung der Niederschlagsdaten in der kontinuierlichen Simulation gibt es innerhalb des Klimamodells von WEPP CLIGEN verschiedene Ansätze. Die Modellierung in WEPP betrachtet die Niederschläge und resultierenden Abflüsse auf Tagesbasis. Das bedeutet konkret, dass für jeden Tag (mit Niederschlag) die Information Niederschlagshöhe, Niederschlagsdauer, Maximale Intensität in einem 15-min. Zeitabschnitt sowie Zeitpunkt bis zum Erreichen der maximalen Intensität definiert werden. Zur Modellierung kann der Niederschlag in dieser Form bereits von Nutzer aufbereitet werden oder es kann eine Zeitreihe mit höherer zeitlicher Auflösung vorgegeben werden, aus welcher die benötigten Kennwerte in CLIGEN errechnet werden.

In Rebscher & Schmalz (2018) werden u.a. drei unterschiedliche Auflösungen der Niederschlagsdaten im Rahmen einer Modellierungsreihe getestet. Dies umfasst die direkte Vorgabe der benötigten Kennwerte auf Tagesbasis und die Vorgabe von Zeitreihen mit stündlicher und viertelstündlicher Auflösung. Unterschiede in den Modellierungsergebnissen zeigen sich primär bei den modellierten Abträgen, die sich zwischen den 3 Varianten erheblich unterscheiden, während die Abflüsse nur geringe Unterschiede bis +/- 10 % zeigen. In allen Modellvarianten werden mit den Viertelstundenwerten die höchsten Abträge modelliert, mit Tageswerten liegen die modellierten Abträge bei ca. 60 % – 80 % der Modellierung mit Viertelstundenwerten, während die Modellierung mit Stundenwerten 50 % oder weniger der Modellierung mit Viertelstundenwerten erreicht. Die Umwandlung der aufgelösten Zeitreihen, in die von WEPP benötigten Kennwerte, scheint also nicht die gleiche Zeitreihe zu generieren, wie wenn diese in CLIGEN intern erzeugt werden. Für die Modellierung im Rahmen dieser Arbeit werden daher die Viertelstundenwerte in Verbindung mit CLIGEN genutzt.

Zur Modellierung der Einzelereignisse müssen die benötigten Kennwerte jedoch selbst erzeugt werden, insbesondere da 3 von 4 Beispielergebnisse mehr als 24 h umfassen. Hier würden in

CLIGEN sonst Referenzwerte genutzt, um das Ereignis auf 24 h zu kürzen. Die entsprechenden Werte enthält Tabelle 3-4.

Tabelle 3-4: Kennwerte des Niederschlags in WEPP für die 4 Beispiereignisse

| | Höhe (mm) | Dauer (min) | Max. Intensität (mm/h) | Dauer bis Max (%) |
|------------|-----------|-------------|------------------------|-------------------|
| 175 | 26,6 mm | 1.917 | 18 | 75 % |
| 228 | 34,8 mm | 1.454 | 12,8 | 15 % |
| 229 | 35,8 mm | 3.120 | 5,6 | 0,1 % |
| 331 | 26,2 mm | 2.943 | 5,6 | 98 % |

In KINEROS2 können Niederschlagsganglinien in beliebiger zeitlicher Auflösung verwendet werden, so dass die 4 Beispiereignisse hier direkt aus dem vorhanden 0,2 mm Tigger (siehe Kapitel 3.2.1) verwendet werden.

3.3. Modellierungsergebnisse

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Modellierungen werden zunächst individuell vorgestellt und anschließend sowohl untereinander als auch mit den Feldmessungen verglichen. Hierbei wird für die Modelle eine kalibrierte und eine nicht kalibrierte Variante vorgestellt. Die Bewertung der Modellierungen im Vergleich zu den Messungen erfolgt vor allem qualitativ, d.h. ob das Modell die Prozesse im Testgebiet qualitativ wiedergibt und nur eingeschränkt anhand der absoluten Werte oder von Güteparametern. Für die kontinuierliche Simulation bedeutet dieser qualitative Vergleich vor allem ob die Zeitpunkte des Auftretens von Erosion und die Größenordnungen zwischen den einzelnen Erosionsevents vergleichbar sind. Weiter wird bewertet, ob sich diese qualitative Bewertung durch die Kalibrierung wesentlich verbessert und wie weit die kalibrierten (Boden)parameter von den nicht kalibrierten (sondern nach Empfehlungen bzw. Pedotransferfunktionen gesetzten) Bodenparametern abweichen.

3.3.1. Kontinuierliche Modellierung mit WEPP

Die kontinuierliche Simulation in WEPP erfolgt entsprechend dem Modellansatz auf Tagesbasis, d.h. für jeden Tag kann ein Modellregen entsprechend der Klimabedingungen mit zugehörigem Abfluss und Abtrag gerechnet werden. Für jeden Tag werden der Bewuchs aktualisiert, Evapotranspiration für das Bewuchsmodell gerechnet und die Bodeneigenschaften aktualisiert.

Das Modell wird für gemessene Eigenschaften zu Boden und Bewuchs im Rahmen der Möglichkeiten kalibriert, d.h. insbesondere Eigenschaften von Infiltration und Erosionswiderstand, Bewuchs und Bewirtschaftung werden kalibriert, jedoch so, dass keine Widersprüche zu den Messdaten oder anderen Modellierungsversionen entstehen. Für die kontinuierliche Simulation wurden die Bodenparameter hydraulische Leitfähigkeit, kritische Schubspannung und Erodibilität in den Rillen kalibriert und die Ergebnisse verglichen (Tabelle 3-5). Weitere Kalibrierungen insbesondere zum Pflanzenwachstumsmodell wurden bereits im Vorfeld vorgenommen, wobei die Kalibrierung an den Bedeckungsgraden und nicht an den Ganglinien zu Abfluss und Sediment erfolgt ist. Ergänzend wurde im Rahmen von Rebscher & Schmalz (2018) die Bedeutung der räumlichen und zeitlichen Auflösung des aufgebauten Modells für die kontinuierliche Simulation in WEPP untersucht. Hierbei wurden insgesamt 18 Modellvarianten verglichen, wobei 9 unterschiedliche Konfigurationen aus zeitlicher Auflösung der Eingangsdaten (Tageswerte, Stundenwerte, Viertel-Stundenwerte) und Aufbau des Modellgebiets (Repräsentatives Geländeprofil, Konzeptionelle Teileinzugsgebiete, Realistische Teileinzugsgebiete) jeweils in der kalibrierten und nicht kalibrierten Variante ausgewertet wurden. Die Kalibrierung der 3 Kennwerte erfolgte dabei für alle 18 Modellläufe auf den gleichen Wert, so dass die Mitte der Modellläufe den gemessenen Werten am nächsten kommt.

Tabelle 3-5: Im Rahmen der kontinuierlichen Modellierung kalibrierte Bodenparameter (Rebscher & Schmalz (2018))

| | Hydraulische Leitfähigkeit (mm/h) | Kritische Schubspannung (Pa) | Erodibilität der Rillen (s/m) |
|------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Nicht Kalibriert | 3,2 | 3,4 | 0,0095 |
| Kalibriert | 2,6 | 1,1 | 0,02 |

Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9 zeigen den Vergleich zwischen gemessener und modellierter Summenlinie von Abfluss und Abtrag jeweils in einer kalibrierten und einer nicht kalibrierten Variante. Hierbei wird durchweg die Konfiguration Viertelstundenwerte und Realistische Teileinzugsgebiete verwendet.

Der gemessene Abfluss über den 8-Jahre Messzeitraum liegt mit 13.684 m^3 nur geringfügig ($\sim 10 \%$) unter den modellierten Abflüssen von 14.305 m^3 bzw. 15.457 m^3 . Der Vergleich der Summenlinien zeigt jedoch qualitativ einen anderen Verlauf für Modellierung und Messung, wobei die Modellierung weniger Abflussereignisse mit zum Teil deutlich höheren Abflüssen je Ereignis liefert. Tabelle 3-6 quantifiziert diese optische Bewertung. Gemessen wurden im Zeitraum von 8 Jahren 345 Tage mit Abflussgeschehen. Modelliert sind dagegen nur halb so viele Tage mit Abflussgeschehen (173 respektive 175 Tage). Entsprechend liegt der durchschnittliche Abfluss pro Tag mit Abflussgeschehen für die Modellierung ca. doppelt so hoch.

Weiter fällt auf, dass die Reduzierung der hydraulischen Leitfähigkeit zwischen nicht-kalibrierter und kalibrierter Modellvariante zwar die Höhe des Abflusses verändert, nicht jedoch das Auftreten von Abflussereignissen und damit auch nicht den qualitativen Verlauf der Summenlinie. In Rebscher & Schmalz (2018) ist zu sehen, dass dies auch für andere Modellkonfigurationen zutrifft. Das Auftreten der Ereignisse und damit der qualitative Verlauf sind für alle 18 Modellläufe nahezu identisch, lediglich die absolute Höhe einzelner Ereignisse unterscheidet sich zwischen den Modellläufen. Hierbei hat die Modellkonfiguration (zeitliche und räumliche Auflösung) einen ebenso großen Effekt auf die Abflusshöhe wie die Kalibrierung des Bodenparameters hydraulische Leitfähigkeit.

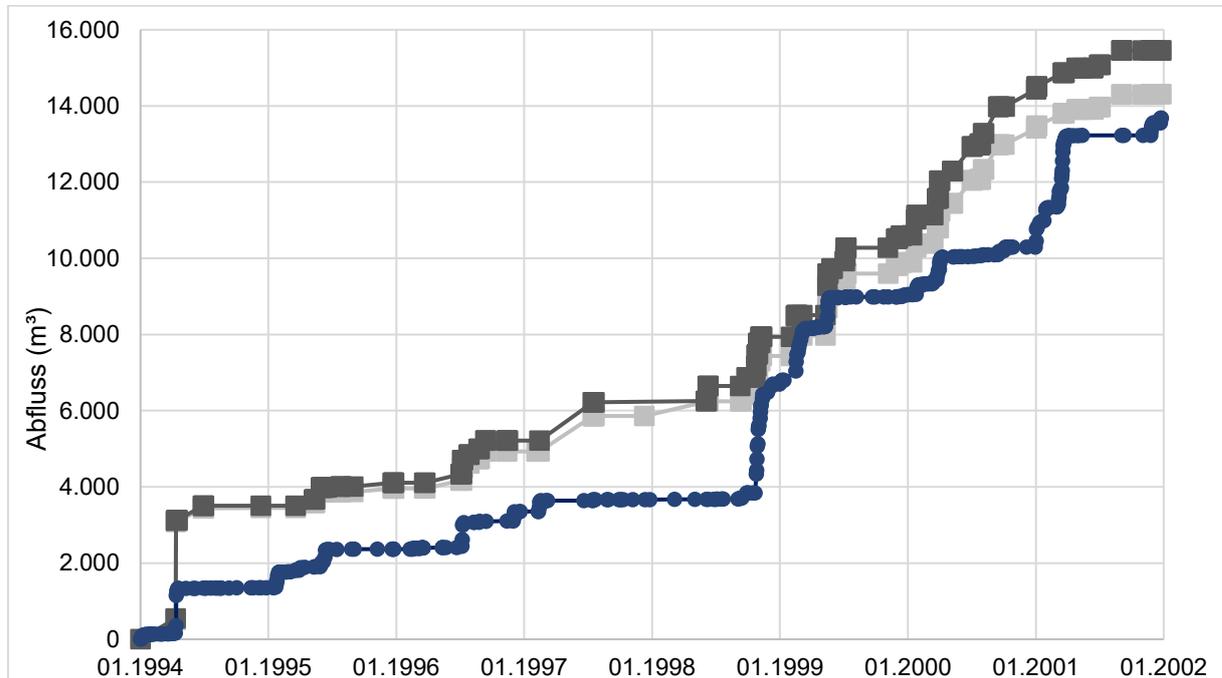


Abbildung 3-8: Summenlinien der Abflüsse gemessen (blau) und modelliert mit zeitlicher Auflösung der Klimadaten von 15 min, vor der Kalibrierung (hellgrau) und nach der Kalibrierung (dunkelgrau), (Rebscher & Schmalz 2018), verändert

Tabelle 3-6: Kennwerte zu modellierten und gemessenen Abflüssen im Zeitraum 1994-2001, erste Zahl – gesamter Messzeitraum, zweite Zahl – Messzeitraum vor dem singulären Ereignis (29.10.1998) und dritte Zahl – Messzeitraum nach dem singulären Ereignis

| Modellierung / Messung | Anzahl Tage mit Ereignis (-) | | | Durchschnittliche Höhe pro Ereignis-Tag (m³) | | | Summe (m³) | | | Max. Tageswert (m³) | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------|-----------|--|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|---------------------|-----------|-----------|
| | 1994-2001 | 1994-1998 | 1998-2001 | 1994-2001 | 1994-1998 | 1998-2001 | 1994-2001 | 1994-1998 | 1998-2001 | 1994-2001 | 1994-1998 | 1998-2001 |
| Modellierung unkalibriert | 173 | 68 | 105 | 82,7 | 94,7 | 74,9 | 14305 | 6442 | 7863 | 2570 | 2570 | 727 |
| Modellierung kalibriert | 175 | 70 | 105 | 88,3 | 98,3 | 81,7 | 15457 | 6878 | 8579 | 2567 | 2567 | 771 |
| Messung | 345 | 169 | 176 | 39,7 | 22,7 | 55,9 | 13684 | 3844 | 9840 | 800 | 800 | 488 |

In Tabelle 3-6 wird auch geprüft, wie sich das System durch das singuläre Ereignis am 29.10.1998 verändert hat, d.h. die ermittelten Kennwerte des Abflussgeschehens werden sowohl für den Gesamtzeitraum als auch für den Zeitraum vor (58 Monate) und nach (38 Monate) dem singulären Ereignis getrennt ausgewertet. Hier ist zu sehen, dass die Häufigkeit von Abflussereignissen nach dem singulären Ereignis zunimmt. Während im Gesamtzeitraum im Mittel alle 8 - 9 Tage ein Abflussereignis auftritt, ist dies vor dem singulären Ereignis ca. alle 10 - 11 Tage der Fall. Nach dem singulären Ereignis verkürzt sich der Zeitraum auf ca. 6 - 7 Tage. Für die beiden Modellierungsvarianten ist ein vergleichbarer Effekt zu sehen, wobei Tage mit Abflussereignis insgesamt deutlich seltener auftreten. Vor dem singulären Ereignis wird 1 Tag mit Abfluss alle 26 Tage modelliert, nach dem Ereignis ändert sich dieser Wert auf alle 11 Tage. Die Betrachtung der Summenlinien suggeriert jedoch, dass diese Änderung im System für die Modellierung nicht mit dem singulären Ereignis, sondern bereits im Sommer 1998 beginnt. Das singuläre Ereignis selbst ist abflusseitig weder in der Modellierung noch in der Messung ausgeprägt. Auffällig in der Modellierung ist ein großes Ereignis Mitte April 1994, welches dem 100 a-Ereignis der Niederschläge zuzuordnen ist (siehe Kapitel 3.2.3). Dieses ist auch in der Messung verzeichnet, jedoch deutlich weniger ausgeprägt (ca. 2500 m³ im Vergleich zu 800 m³). Für dieses Ereignis ist in der Aufzeichnung der Messung ein Messfehler zugeordnet, so dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass dieses Ereignis tatsächlich eine Ausprägung aufgewiesen hat, wie die Modellierung suggeriert. Wird dieses Ereignis außer Acht gelassen, fällt auf, dass Modellierung und Messung bis ca. Sommer 1998 sehr ähnliche Verläufe aufweisen. Erst im Anschluss weichen die Verläufe qualitativ stark voneinander ab, insbesondere in den Jahren 2000 und 2001.

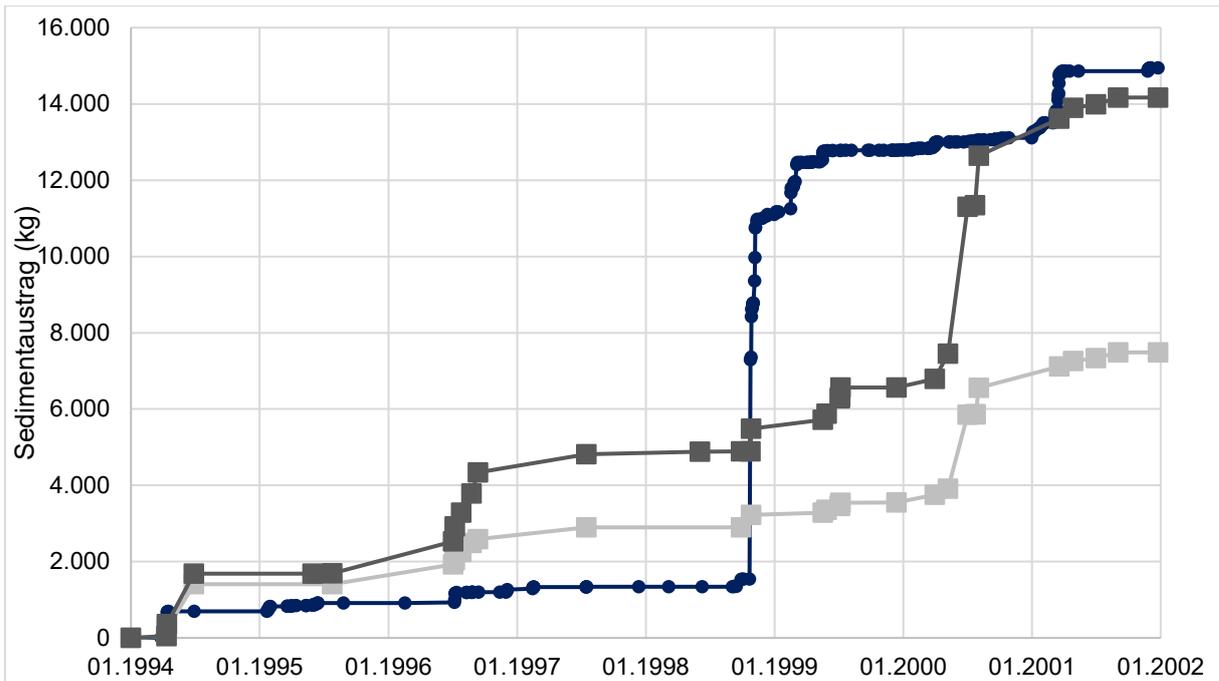


Abbildung 3-9: Summenlinien des Sedimentaustrags gemessen (blau) und modelliert mit zeitlicher Auflösung der Klimadaten von 15 min, vor der Kalibrierung (hellgrau) und nach der Kalibrierung (dunkelgrau), (Rebscher & Schmalz 2018), verändert

Tabelle 3-7: Kennwerte zu modellierten und gemessenen Abträgen im Zeitraum 1994-2001, erste Zahl – gesamter Messzeitraum, zweite Zahl – Messzeitraum vor dem singulären Ereignis (29.10.1998) und dritte Zahl – Messzeitraum nach dem singulären Ereignis

| Modellierung / Messung | Anzahl Tage mit Ereignis (-) | | | Durchschnittliche Höhe pro Ereignis-Tag (kg) | | | Summe (kg) | | | Max. Tageswert (kg) | | |
|---------------------------|------------------------------|----|-----|--|-----|------|------------|------|-------|---------------------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Modellierung unkalibriert | 28 | 11 | 17 | 267 | 264 | 270 | 7486 | 2901 | 4586 | 1938 | 1180 | 1938 |
| Modellierung kalibriert | 30 | 14 | 16 | 472 | 350 | 580 | 14168 | 4894 | 9274 | 3852 | 1318 | 3852 |
| Messung | 231 | 70 | 161 | 64,7 | 22 | 83,2 | 14941 | 1540 | 13401 | 5754 | 541 | 5754 |
| Messung ohne 29.10.98 | 230 | 70 | 160 | 39,9 | 22 | 47,8 | 9187 | 1540 | 7647 | 1063 | 541 | 1063 |

Für gemessenen und modellierten Abtrag (Abbildung 3-9 und Tabelle 3-7) zeigt sich eine gänzlich andere Situation. Herausstechend ist insbesondere das singuläre Ereignis, welches in der gemessenen Summenlinie den Verlauf dominiert, in der Modellierung jedoch einem durchschnittlichen Ereignis entspricht. Für die kalibrierte Modellvariante mussten die Bodeneigenschaften deutlich erodibler gewählt werden, um den Gesamtabtrag nach 8 Jahren zu erreichen. Auch die kalibrierte hydraulische Leitfähigkeit trägt zu einer Erhöhung des Abtrags bei. Würde man das singuläre Ereignis aus der Modellierung ausklammern, müsste der Boden jedoch im Gegenteil in der nicht-kalibrierten Variante belassen werden, um die 8-Jahres-Summe zu treffen. Im Vergleich zu der Modellierung des Abflusses fällt auf, dass die Kalibrierung auch hier insbesondere die Ausprägung der modellierten Ereignisse beeinflusst, nicht jedoch deren Auftreten, wobei dieser Effekt für den Abtrag deutlich ausgeprägter ausfällt. Während die Modellierung der Abflüsse im Vergleich zur Messung ca. halb so viele Ereignisse bei durchschnittlich doppelt so hohem Abfluss zeigt, werden für den Abtrag nur ca. 10 % der gemessenen Tage mit Ereignis mit entsprechend höheren Abträgen modelliert. Ebenfalls vergleichbar zu den Abflüssen verdoppelt sich das Auftreten von Tagen mit Abtrag für die Modellierung nach dem singulären Ereignis, wobei auch hier die Ganglinie vermittelt, dass

diese Veränderung zeitlich nicht direkt mit dem singulären Ereignis zusammenfällt, sondern eher die drei Sommer 1999, 2000 und 2001 betrifft. In der Messung dagegen verdreifacht sich das Auftreten von Tagen mit Abtrag, wobei diese Veränderung klar mit dem singulären Ereignis zusammenfällt. Die durchschnittliche Höhe pro Ereignistag ist für die Messung durchweg deutlich niedriger, als dies modelliert wird, das Verhältnis vor und nach dem singulären Ereignis gleicht sich jedoch zwischen Messung und Modellierung.

Auffällig ist auch für die Summenlinie des Abtrags, dass die Modellläufe die Messung bis etwa zu dem singulären Ereignis im Verlauf qualitativ recht gut treffen. Das singuläre Ereignis sowie die anschließenden Ereignisse im Herbst / Winter 1998 können dagegen nicht modelliert werden. Das Jahr 1999 kann erneut qualitativ gut modelliert werden. Dagegen passen die Ganglinien ab Frühjahr 2000 bis zum Ende des Messzeitraums nicht mehr zueinander.

Tabelle 3-8: Vergleich der 4 Beispielergebnisse innerhalb der Kontinuumssimulation mit den Messungen

| Ereignis | Abfluss WEPP (m³) | Abfluss Messung (m³) | Sediment WEPP (kg) | Sediment Messung (kg) |
|----------|-------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|
| 175 | 420 | 583 | 386 | 246 |
| 228 | 291 | 488 | 1 | 5.754 |
| 229 | 153 | 530 | 0 | 1.975 |
| 331 | 0 | 342 | 0 | 373 |

Für die exemplarisch ausgewählten Ereignisse zeigt sich in der Kontinuumsmodellierung (Tabelle 3-8), dass die Abflüsse für die Ereignisse durchweg unterschätzt werden, wobei dies für die Ereignisse 229 und 331 nach dem singulären Ereignis deutlich gravierender ausfällt. Ähnlich zeigen sich die modellierten Abträge. Während das erste Ereignis trotz zu niedrigem Abfluss überschätzt wird, werden die drei Folgeereignisse in WEPP überhaupt nicht als Abtragsereignis abgebildet.

3.3.2. Eventbezogene Modellierung mit KINEROS2

Mit dem Modell KINEROS2 wurden ebenfalls die vorgestellten 4 exemplarischen Ereignisse modelliert. Da dieses Modell nur eventbasiert arbeitet, kann hier kein Vergleich mit einer Kontinuumssimulation im gleichen Modell erfolgen, sondern lediglich ein Vergleich mit der Messung sowie der eventbasierten Modellierung in WEPP.

Vergleichbar mit der Modellierung in WEPP wurden auch in KINEROS2 zunächst einige grundlegende Einstellungen des Modells im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf die Modellierungsergebnisse hin untersucht (Kaiser 2018). Dies umfasst insbesondere eine Untersuchung über den Einfluss des Zeitschritts der Modellierung, da dieser (im Unterschied zu WEPP) vorgegeben werden kann. Kaiser (2018) hat für zwei der vier Beispielergebnisse Modellläufe mit identischer Parametrisierung bei Rechen-Zeitschritten zwischen 1 min und 300 min untersucht. Hierbei fällt auf, dass modellierte Abflüsse und Abträge bei höheren Zeitschritten ansteigen. Für die untersuchten Zeitschritte 1 min, 2 min, 5 min und 20 min sind die Ergebnisse dabei nahezu identisch, während bei einem Rechenzeitschritt von 60 min bereits ca. 25 % mehr Abfluss und Abtrag simuliert werden und sich Abfluss und Abtrag bei einem Rechenzeitschritt von 300 min mehr als verdoppeln. Da die untersuchten Ereignisse jeweils mehrere Tage umfassen und in verschiedenen Varianten gerechnet werden müssen, wird der Rechenzeitschritt von 20 min gewählt, als größtmöglicher Zeitschritt, der keine starken Abweichungen von den höheren zeitlichen Auflösungen zeigt.

Methodisch wurde das Modell entsprechend der Empfehlungen aus Woolhiser et al. (1989) parametrisiert und zunächst nur der Abfluss in diesem unkalibrierten Zustand mit den Messergebnissen verglichen. Abbildung 3-10 zeigt für die 4 modellierten Ereignisse die Summenlinien des Abflusses über die Ereignisdauer für die kalibrierte und die unkalibrierte Modellvariante sowie für die Messung. Es ist zu sehen, dass für die drei ersten Ereignisse mit den im Voraus gewählten Parametern jeweils eine Überschätzung des Abflusses zwischen 20 % und 80 % bzw. zwischen 100 m³ und 300 m³ stattfindet, während im letzten Ereignis der Abfluss um ca. 10 % unterschätzt wird. Da die Modellierungsergebnisse direkt mit den Messungen verglichen werden, welche in den dargestellten Auflösungen durchgeführt wurden, kann über die Dynamik des Abflusses nur wenig gesagt werden. Dennoch ist auch hier erkennbar, dass durch eine Kalibrierung der Bodeneigenschaften lediglich eine Veränderung der Abflussmenge erreicht wird, nicht jedoch die Dynamik des Abflusses verändert werden kann.

Insgesamt wird das Abflussgeschehen für die Ereignisse trotz deren unterschiedlicher Charakteristik bereits in der nicht-kalibrierten Variante gut wiedergegeben. Entsprechend wurde entschieden, zur Kalibrierung lediglich die Fließzeiten durch Anpassung der Strickler-Beiwerte geringfügig zu verändern. Dies ist für 3 der Ereignisse bereits ausreichend, um das Abflussvolumen an die Messung anzupassen. Für Ereignis 228 bleibt hierbei eine Überschätzung des Abflusses um ca. 20 % erhalten. Um die Vergleichbarkeit zur kontinuierlichen Modellierung weitgehend zu erhalten, wurden die Infiltrationseigenschaften des Bodens zwischen den Ereignissen nicht verändert, sondern lediglich seine Oberflächencharakteristik verändert, wie dies z.B. durch Bodenbearbeitung passiert, sowie die Anfangsbedingungen des Ereignisses in Form der Bodenfeuchte zu Ereignisbeginn.

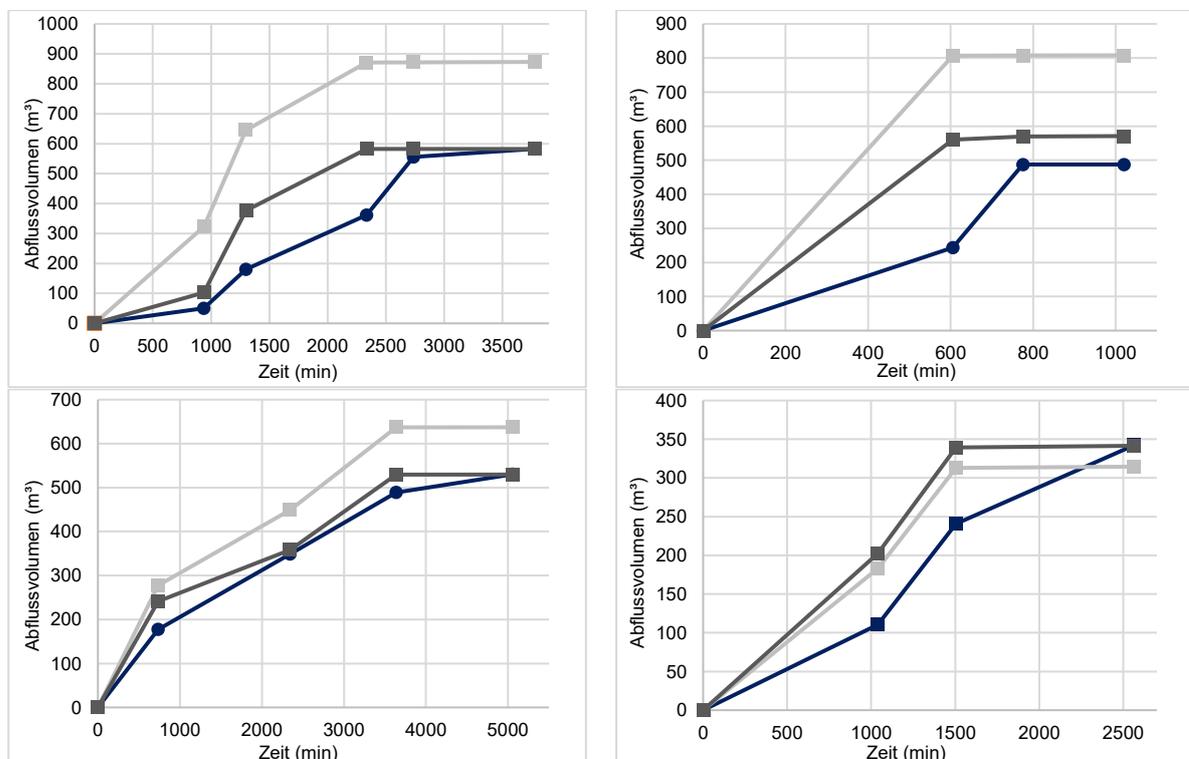


Abbildung 3-10: Gemessene (blau) und modellierte (unkalibriert (hellgrau), kalibriert (dunkelgrau)) Summenlinien des Abflussvolumens für 4 Beispielergebnisse: 175 – links oben, 228 – rechts oben, 229 – links unten, 331 – rechts unten, (Kaiser 2018), verändert

Für die Sedimentsummenlinien je Ereignis (Abbildung 3-11) wird lediglich eine Variante mit den bereits kalibrierten Abflüssen gerechnet und die für die Erosion verfügbaren Parameter so gesetzt, dass für diesen Abfluss eine passende Menge Abtrag in dem Ereignis entsteht. Die kalibrierten Parameter zum Erosionsverhalten des Bodens umfassen den Rainsplash-Koeffizienten sowie den Kohäsions-Koeffizient (siehe Tabelle 3-9 am Ende). Es fällt auf, dass bei Kalibrierung dieser Faktoren für alle 4 Ereignisse der Gesamtaustrag gut getroffen werden kann. Für die Ereignisse 1, 3 und 4 liegt der Fehler bei < 2 % und auch für das am schlechtesten getroffene Ereignis 2 bleibt der Fehler mit 10 % Unterschätzung moderat. Im qualitativen Verlauf zeigen sich ähnliche Abweichungen wie bei der Modellierung der Abflüsse. Hier lässt sich also schlussfolgern, dass die Dynamik des Sedimentabtrags ebenso wie die Dynamik des Abflusses durch eine Kalibrierung nicht korrigiert werden kann. Die gute Reproduzierbarkeit der Gesamtabträge für die 4 untersuchten Ereignisse ist insbesondere zu betonen, da die Gesamtabträge sich zwischen der Ereignissen um einen Faktor 20 unterscheiden, während dies bei den Abflüssen lediglich ein Faktor 2 ist.

Tabelle 3-9: Überblick über die gewählten Kalibrierparameter, (Kaiser 2018), verändert

| Ereignis | 175 | | 228 | | 229 | | 331 | |
|------------------------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|
| | Un-kalibriert | kalibriert | Un-kalibriert | kalibriert | Un-kalibriert | kalibriert | Un-kalibriert | kalibriert |
| Strickler ($m^{1/3}/s$) | 9 | 4 | 20 | 1 | 13 | 4 | 5 | 25 |
| Mikrorelief (mm) | 10 | 2 | 10 | 1 | 10 | 2 | 10 | 2 |
| Abstand Relief (mm) | 5 | 7 | 5 | 3 | 5 | 7 | 5 | 7 |
| | | | | | | | | |
| Sättigung (%) | 50 | 43 | 50 | 30 | 40 | 27 | 35 | 32 |
| CV (-) | 0,12 | 0,8 | 0,12 | 0 | 0,12 | 0 | 0,12 | 0 |
| Kapillarer Aufstieg (mm) | 200 | 180 | 200 | 230 | 200 | 180 | 200 | 180 |
| | | | | | | | | |
| Rainsplash-Koeffizient (s/m) | | 5 | | 90 | | 60 | | 50 |
| Kohäsions-Koeffizient (1/s) | | 0,00016 | | 11,5 | | 0,4 | | 0,00031 |

Bei der Betrachtung der kalibrierten Erosionsparameter fällt jedoch auf, dass die Anpassung des Modells an die stark unterschiedlichen Ereignisse nur durch extreme Veränderung des Kohäsions-Koeffizienten gelingt. Dieser variiert bei den Ereignissen 1, 3 und 4 bereits um 3 Größenordnungen und muss für das singuläre Ereignis um eine weitere Größenordnung erhöht werden.

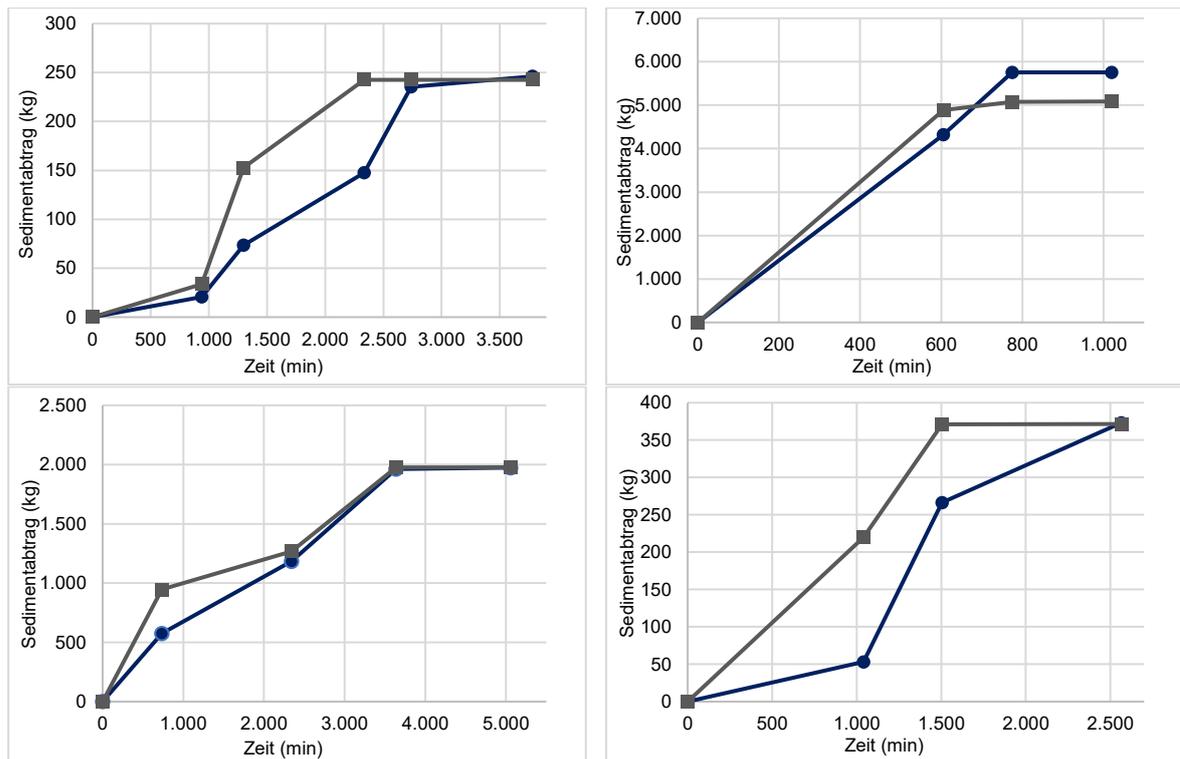


Abbildung 3-11: Gemessene (blau) und modellierte (dunkelgrau) Summenlinien des Sedimentabtrags für 4 Beispielergebnisse: 175 – links oben, 228 – rechts oben, 229 – links unten; 331 – rechts unten, (Kaiser 2018), verändert

3.3.3. Eventbezogene Modellierung mit WEPP

Die Modellierung der Einzelereignisse in WEPP sollte insbesondere auch mit der Modellierung der Einzelereignisse in KINEROS2 verglichen werden. Da beide Programme die Eingabe der Bodeneigenschaften sehr unterschiedlich halten (siehe Kapitel 3.2.4), wurde zunächst versucht, die Bodeneigenschaften über die jeweilige modellinterne Pedotransferfunktion zu bestimmen. Dieser Ansatz gewährleistet, dass für beide Modelle die Bodeneigenschaften so bestimmt werden, wie es für die jeweiligen Modellansätze stimmig ist und erscheint damit zunächst vergleichbarer, als die Bodeneigenschaften in beiden Modellen identisch zu setzen, obwohl stark abweichende Modellansätze genutzt werden (siehe Kapitel 2.5).

Dieser theoretisch stimmige Ansatz führt jedoch dazu, dass in WEPP für keines der vier Beispielergebnisse Abfluss und in der Folge auch kein Abtrag modelliert wird (siehe Kaiser 2018). Es werden daher zum Vergleich die Bodeneigenschaften für die Infiltration so gesetzt, wie auch in der KINEROS2 Modellierung. Für die sonstigen Unterschiede im Modellaufbau siehe Kapitel 3.2.4.

Abbildung 3-12 zeigt für Ereignis Nr. 228 beispielhaft die Modellierung als Einzelereignis in WEPP verglichen mit der Modellierung in KINEROS2. Hierbei ist zu sehen, dass die Umwandlung der Niederschläge in WEPP in je einen Modellregen je 24 h (siehe Kapitel 3.2.4) kaum geeignet ist. Im Modell wird ein Einzelereignis so abgebildet, wie dieses Ereignis auch in der Kontinuumssimulation dargestellt wird. Der Unterschied zur Kontinuumssimulation besteht lediglich darin, dass veränderliche Eigenschaften des Systems, z.B. Bedeckungsgrad, Bodenfeuchte, etc. direkt als Anfangsbedingung definiert werden und nicht aus der Modellierung des vorherigen Zeitraums stammen.

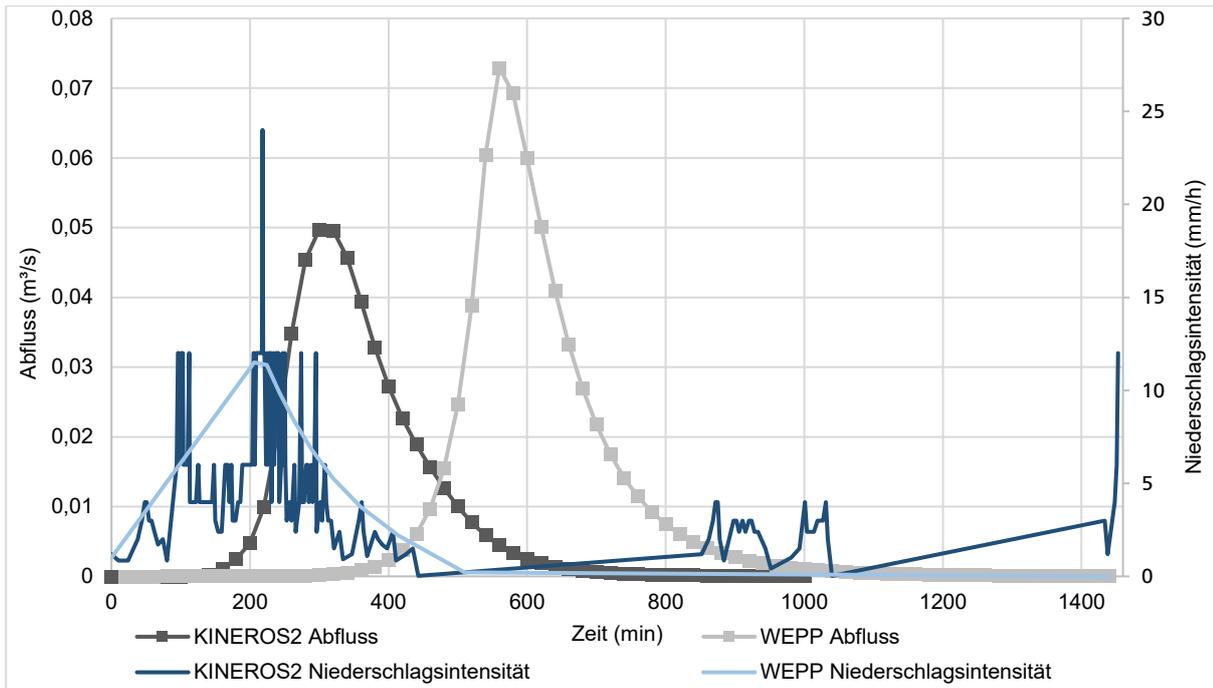


Abbildung 3-12: Vergleich von Niederschlag- und Abflussganglinie in den Modellen KINEROS2 und WEPP für das Ereignis 228

Die Dauer des modellierten Niederschlags hängt von dem Verhältnis der mittleren Intensität zur Spitzenintensität in einem 15 min Intervall ab. Für das Ereignis 228 (Abbildung 3-12) ergibt sich hierbei noch eine relativ passende Übertragung der Dynamik in den Modellregen. Tabelle 3-4 zeigt jedoch, dass das Verhältnis für die anderen Ereignisse ungünstiger ist, so dass der in WEPP modellierte Modellregen weiter von der tatsächlichen Dynamik abweicht.

Der Verlust der Niederschlagsdynamik durch die Umwandlung in einen Modellregen führt entsprechend auch zu einem Verlust der Abflussdynamik. Der Abfluss in Abbildung 3-12 zeigt den modellierten Abfluss in KINEROS2, da keine entsprechend hochaufgelöste Messung verfügbar ist. In Verbindung mit Abbildung 3-8 kann jedoch angenommen werden, dass die modellierte Dynamik der tatsächlichen Dynamik während des Ereignisses nahekommt. Die aus dem Modellregen resultierende Welle ist kürzer und steiler als die tatsächliche Welle, wobei auch dieser Effekt umso größer wird, je weiter die mittlere Intensität des Niederschlags von der Spitzenintensität abweicht. Es muss also festgestellt werden, dass das Beispiereignis 228 aus den hier gewählten Beispielen den günstigsten Fall für die Übertragung von Niederschlag und Abfluss in WEPP darstellt.

Tabelle 3-10: Gemessene und in WEPP eventbasiert modellierte Summen für Abfluss und Abtrag für die 4 Beispiereignisse

| Ereignis | Abfluss WEPP (m³) | Abfluss Messung (m³) | Sediment WEPP (kg) | Sediment Messung (kg) |
|----------|-------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|
| 175 | 318 | 583 | 1.997 | 246 |
| 228 | 765 | 488 | 59.587 | 5.754 |
| 229 | 806 | 530 | 31.621 | 1.975 |
| 331 | 529 | 342 | 488 | 373 |

Tabelle 3-10 gibt einen Überblick über die Messung und die Modellierung der Einzelereignisse in WEPP für die 4 exemplarisch ausgewählten Ereignisse. Es ist zu sehen, dass die Abflüsse im

Mittel leicht überschätzt werden. Insgesamt werden die Abflüsse jedoch vertretbar gut getroffen. Dies gilt insbesondere, wenn bedacht wird, dass die Kalibrierung der Bodenwerte zu Infiltration aus KINEROS2 übernommen wurde und diese daher nicht für die Abflussbildung in WEPP optimiert sind. Der Sedimentabtrag kann dagegen von WEPP nicht korrekt wiedergegeben werden. 3 von 4 Ereignissen werden deutlich überschätzt, die Ereignisse 228 und 229 um eine Größenordnung. Hier ist insbesondere darauf hinzuweisen, dass diese beiden Ereignisse innerhalb der Kontinuumssimulation unterschätzt werden. In der Kontinuumssimulation werden ebenfalls die Abflüsse unterschätzt. Für Ereignis 331 wird dagegen der Abfluss in der Einzelereignismodellierung in ähnlichem Maße überschätzt wie der Sedimentabtrag für die beiden Vorgenannten. Der modellierte Abtrag wird jedoch nicht um eine Größenordnung, sondern wird lediglich um ca. 25 % überschätzt. Für Ereignis 175 wird dagegen der Abfluss sogar unterschätzt, während der Abtrag ebenfalls fast um eine Größenordnung überschätzt wird. Es scheint also kein einzelner Aspekt verantwortlich für die massive Überschätzung der Abträge zu sein.

Im Unterschied zur Modellierung der Einzelereignisse stammen die Anfangsbedingungen für ein Ereignis in der Kontinuumssimulation aus dem Modell. Hier kann also vermutet werden, dass trotz gut auf den mittleren Abtrag kalibrierter Modelle das Systemverhalten über die Zeit nicht realistisch abgebildet wird. Dies könnte bedeuten, dass die Anfangsbedingungen für die exemplarisch modellierten Ereignisse in der Kontinuumssimulation deutlich von der Simulation der Einzelereignisse abweichen und diese Anfangsbedingungen einen erheblichen Einfluss auf die Simulation haben.

Weiter erfolgt die Umrechnung der Niederschlagsdynamik in die gezeigten Modellregen sowohl für ein Einzelereignis als auch in der Kontinuumssimulation auf Tagesbasis. Für die gezielte Modellierung der Einzelereignisse mussten die Ereignisse hierfür jedoch auf 24 h gekürzt werden, während sie in der Kontinuumssimulation als 2 separate Tage / Ereignisse simuliert werden. Ebenso erfolgt die Umrechnung der täglichen Niederschlagsdynamik auf den Modellregen für Einzelereignisse aus der Berechnung von Kennwerten außerhalb von WEPP, während diese für die Kontinuumssimulation aus der zeitlich aufgelösten Zeitreihe der Niederschläge modellintern umgerechnet wird. Der Einfluss der Datengrundlage, z.B. der zeitlichen Auflösung, auf der die Kennwerte für die Modellregen in WEPP aufgebaut sind, auf die Modellierungsergebnisse wurde bereits in Rebscher & Schmalz (2018) gezeigt.

Die Modellierung der Abträge zeigt allerdings ein Verhalten, das trotz der genannten Aspekte nicht erklärbar scheint. Hierbei handelt es sich um eine Form eines Kippunkts der modellierten Abflüsse bzw. des modellierten Spitzenabflusses. Wird dieser Kippunkt erreicht, nehmen die Abträge massiv / überproportional zu. In Baffaut et al. (1998) wird bereits darauf hingewiesen, dass in WEPP Hänge mit mehr als 100 m Fließweg über mehrere Teileinzugsgebiete mit Fließwegen von jeweils unter 100 m abgebildet werden sollten. Für die hier gezeigte Modellierung scheint dies jedoch schon für Fließlängen von ca. 75 m zuzutreffen (siehe Kaiser 2018). Der verwendete Routing-Ansatz der kinematischen Welle führt in Kombination mit den hohen Spitzenabflüssen, welche die Modellregen typischerweise liefern, möglicherweise ab einer gewissen Fließlänge zu einem übertriebenen Aufsteilen der Welle und damit zu den angesprochenen überproportionalen Abträgen. Möglich ist auch, dass ab einem gewissen Grenzwert der Schubspannung der Abtrag aus Rillen unverhältnismäßig groß wird. In Rebscher & Schmalz (2018) zeigen Simulationsläufe mit einem langen Hang unter den kalibrierten Bodenparametern dieses Verhalten, während die unkalibrierten es nicht zeigen. Bei Schwob (2016) zeigt sich eine hohe Sensitivität der kalibrierten Abflüsse nur für einen konvexen, nicht

jedoch für einen uniformen Hang. Da es auf einem konvexen Hang zu einer Beschleunigung des Abflusses kommt, passt dies qualitativ zu der Vermutung, dass der beschriebene Kippunkt-Effekt mit dem Abflussrouting und dem Abtrag in Rillen zusammenhängt.

Al-Mukhtar et al. (2014) erreichen in einer vergleichbaren Modellkonfiguration tatsächlich eine deutliche Verbesserung der modellierten Abflüsse, indem die Rillenerodibilität reduziert wird. Da aber bereits diskutiert wurde, dass die Umwandlung der Niederschlagsdynamik in einen Modellregen für die hier getesteten Beispielergebnisse keine plausiblen Ergebnisse liefern kann, wird auf eine weitergehende Kalibrierung dieser Modellvariante verzichtet und die folgende Einschätzung anhand der bis hierhin erzielten Ergebnisse durchgeführt.

3.4. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde eine 8-jährige Messreihe für ein TEZG von 4,2 ha aus der FAM Versuchsstation Scheyern ausgewertet. Es zeigt sich, dass die implementierte Bewirtschaftung zu insgesamt deutlich geringerer Erosion führt. Im Laufe der 8 Jahre wurden lediglich 42 Erosionsereignisse verzeichnet, wobei die meisten dieser Ereignisse sehr gering ausfallen. Ca. 60 % der insgesamt verzeichneten Bodenerosion entfallen auf ein Ereignis im Herbst 1998 und einige Niederschlagsereignisse in den folgenden Tagen. Anhand verschiedener Auswertungen lässt sich zeigen, dass dieses Ereignis das Erosionsgeschehen im Testeinzugsgebiet jedoch nachhaltig verändert. Es lässt sich vermuten, dass das Gebiet ca. 2 Jahre benötigt, um qualitativ ein vergleichbares Erosionsgeschehen, wie vor diesem singulären Ereignis aufzuweisen.

Eine Auswertung der Messreihen auf Eventbasis zeigt eine enge Beziehung zwischen den gemessenen Abflüssen und Abträgen ($R^2 = 58 \%$). Niederschlagshöhe, Intensität und weitere Niederschlagskennwerte zeigen sich dagegen nicht als gute Vorhersage für das Ausmaß des Bodenabtrags, während das Entstehen von Erosionsereignissen eine deutliche Abhängigkeit von Vorgeschichte, Boden- und Bewuchseigenschaften und ebenfalls deutlich weniger von der tatsächlichen Niederschlagshöhe zeigt. Einschränkend muss hierzu jedoch festgehalten werden, dass in dem Messzeitraum keine klassischen Starkregenereignisse mit kurzen Dauerstufen und hohen Jährlichkeiten verzeichnet wurden. Es wird vermutet, dass die oben getroffenen Aussagen für solche Events nicht im gleichen Maße zutreffen.

Die Reproduktion des Abfluss- und Abtragsgeschehens im Testeinzugsgebiet wurde mit drei unterschiedlichen Modellansätzen in zwei unterschiedlichen Erosionsmodellen versucht. Ziel dieser Untersuchung war die Frage, ob es grundsätzlich gelingen kann, das komplexe Erosionsgeschehen, wie es in der Auswertung der Messungen herausgearbeitet wurde, mit einem Erosionsmodell qualitativ und quantitativ korrekt nachzubilden. Es zeigt sich, dass nur einer der drei gewählten Ansätze dies mit Einschränkungen leisten kann. Bewertet wurde bei der Untersuchung vor allem die qualitative Komponente, d.h. es wurde weniger betrachtet, ob die Modelle korrekte Abtragsmengen simulieren, sondern ob davon ausgegangen werden kann, dass das Modell in der Lage ist, das Systemverhalten korrekt wiederzugeben. Im Kontrast sei beispielsweise ein Modell genannt, das zwar den korrekten Abtrag simuliert, im Modell jedoch ein abtragsbegrenzter Erosionsprozess gerechnet wird, während der reale Prozess transportbegrenzt ist (siehe Kapitel 2.1). In diesem Fall erscheint es unwahrscheinlich, dass das Modell geeignet ist, um z.B. Bewirtschaftungsszenarien zum Erosionsschutz korrekt zu bewerten.

In der Kontinuumssimulation in WEPP fällt insbesondere auf, dass das Modell deutlich weniger Ereignisse für Abfluss und insbesondere auch Abtrag dafür mit höheren mittleren Werten je Ereignis simuliert als gemessen wurden. Dies konnte durch eine Kalibrierung der bestimmenden Parameter zu Infiltration und Erodibilität nicht geändert werden, da diese Parameter lediglich die Ausprägung der Ereignisse zu beeinflussen scheinen und nur sehr begrenzt deren Auftreten. Der Vergleich zwischen modellierten und gemessenen Ganglinien legt jedoch nahe, dass eine Modellierung deutlich besser gelingen könnte, wenn die Zeitabschnitte vor und nach dem singulären Ereignis jeweils getrennt simuliert werden, d.h. wenn eine Kalibrierung für den Zeitraum vor und eine Kalibrierung für den Zeitraum nach dem Ereignis gefunden wird. Dies passt zur der Auswertung der Messungen, welche eine Änderung des Systemverhaltens mit dem singulären Ereignis nahelegt.

Die Modellierung der Einzelereignisse in WEPP zeigt sich dagegen für die Modellierung des hier ausgewählten Testgebiets grundsätzlich nicht geeignet. Aus diesem Grund wurde auch auf eine weitergehende Kalibrierung des Modells verzichtet. Die Umrechnung der Niederschlagsdynamik in ein repräsentatives Ereignis über einen Tag führt für die hier aufgetretenen Ereignisse mit Ereignisdauern über einem Tag zu groben Verzerrungen. Zur Modellierung müsste das Ereignis auf mehrere Tage aufgeteilt werden. Da dies in WEPP dann aber modelltechnisch dem Ansatz einer Kontinuumssimulation entspricht – nur für einen deutlichen kürzeren Zeitraum – wird der Ansatz nicht weiterverfolgt.

Die augenscheinlich besten Anpassungen konnten mit der Einzelereignismodellierung in KINEROS2 erzielt werden. Die Modellierung der Abflüsse gelingt über den vorgegebenen Pedotransfer für die hydraulische Leitfähigkeit bereits zufriedenstellend und kann über kleine Anpassungen an den Anfangsbedingungen und spezifischen Eigenschaften der Oberfläche weiter verbessert werden. Auch hier zeigt sich jedoch, dass durch die Kalibrierung im Wesentlichen das Abflussvolumen, nicht jedoch die Dynamik verändert wird. Die Modellierung des Abtrags gelingt nur durch individuelle Kalibrierung des Kohäsions-Koeffizienten der Abtragungsgleichung innerhalb einer großen Wertespanne von mehreren Zehnerpotenzen. Ob der Erosionsvorgang im Modell qualitativ dem tatsächlichen Erosionsvorgang entspricht, kann jedoch aufgrund der fehlenden Dynamik in Abfluss- und Abtragsmessung nicht beantwortet werden. Kaiser (2018) vergleicht auch die verwendeten Ansätze zur Abflussbildung und Sedimenttransport zwischen WEPP und KINEROS2 und kommt zu dem Ergebnis, dass die in KINEROS2 verwendeten Ansätze grundsätzlich stabilere Ergebnisse liefern können.

In der Untersuchung von Fiener et al. (2008) zu dem FAM-Gebiet Scheyern wird eventbasiert, aber mit einem festen Parametersatz, Erosion modelliert. Trotz der insgesamt zufriedenstellenden Modellierung zeigen sich vergleichbare Phänomene wie in der hier vorgestellten Bearbeitung. Die dominierenden Events im Oktober / November 1998 werden von dem Modell deutlich (Faktor 2,5 bzw. Faktor 8) unterschätzt, während kleine Events eher überschätzt werden. Einige Unterschiede zu den hier implementierten Modellansätzen seien jedoch kurz angesprochen. Der gewählte Modellansatz enthält keinen zu kalibrierenden Erosionsparameter des Bodens, sondern arbeitet mit festen Grenzwerten, welche (u.a.) direkt aus der Korngrößenverteilung gewonnen werden. Routing auf der Hangoberfläche erfolgt auf einem GIS-basierten Grid und lässt insbesondere Abflussdivergenz und Konvergenz zu. Dass trotz dieser Unterschiede im Modellansatz im vgl. insbesondere zu der WEPP Kontinuumssimulation qualitativ sehr ähnliche Ergebnisse erzielt werden, weist auf grundsätzliche Probleme in der Erosionsmodellierung, die vom Modellansatz unabhängig sind, hin.

Vergleichbare Ergebnisse erzielen z.B. auch Centeri et al. (2009), Kinnell (2017) und Raclot & Albergel (2006). Centeri et al. (2009) vergleicht verschiedene Erosionsmodelle (u.a. WEPP) mit Erosionsmessungen im mediterranen Raum. Auch hier wird eine grundsätzliche Neigung der Modelle, kleine Events zu über- und große Events zu unterschätzen, dargelegt. Auch in dieser Studie werden weniger Events modelliert als gemessen und es gelingt in keinem Modell eine gute Anpassung an die zeitlich aufgelöste Messung zu erzielen. Betont wird die Bedeutung der Anfangsbodenfeuchte für die Modellierungsergebnisse, was auch in Kapitel 3.3.3 als These für die starken Unterschiede zwischen Kontinuumssimulation und Einzelereignissen formuliert wurde. Kinnell (2017) betont die gleichen grundsätzlichen Zusammenhänge für seine Studie, die ebenfalls im Rahmen eines Modellvergleichs stattfindet. Insbesondere wird betont, dass sich Abflüsse mit den getesteten Modellen gut reproduzieren lassen, während die zugehörigen

Abträge zum Teil deutlich über- oder unterschätzt werden. Raclot & Albergel (2006) testen WEPP gezielt für ein mediterranes Einzugsgebiet. Sie weisen insbesondere auf die Problematik der Übertragbarkeit der im amerikanischen Raum gewonnenen Pedotransferfunktionen sowie auf die Möglichkeit, saisonale Veränderung der Bodens (Beispiel *cracking soils*) abzubilden, hin.

Es lässt sich festhalten, dass alle drei getesteten Modelle trotz ihrer unterschiedlichen Modellansätze sehr sensitiv auf die gewählten Parameter für das Erosionsverhalten des Bodens reagieren. In der Modellierung in KINEROS2, der die Bodenerodibilität einparametrig abbildet, musste dieser Parameter über die vier Beispielergebnisse um vier Zehnerpotenzen variiert werden. Die Kontinuumsmodellierung in WEPP zeigt in den Varianten in Rebscher & Schmalz (2018) eine hohe Sensitivität auf die Parameter Rillenerodibilität und kritische Schubspannungen, die in Kombination mit einem zu langen Hang zu einem drastischen Überschätzen der Abträge führt. Ein vergleichbares Phänomen wird für zwei der vier in WEPP modellierten Einzelereignisse auch bei niedrigen Abflüssen und vom Modell nach internen Pedotransferfunktionen gesetzten Eigenschaften festgestellt. Schwob (2016) zeigt dies für die beiden genannten Parameter im Detail. Beide zeigen zu dem modellierten Sedimentabtrag hochgradig variable Beziehungen, die keine direkte Abschätzung der Veränderung des Sedimentabtrags mit der Veränderung dieser Parameter möglich macht. Dies wird auf komplexe Rückkopplungsprozesse innerhalb des Modells zurückgeführt. Die Komplexität der Modelle macht es daher schwierig, diese zu passend zu kalibrieren, selbst wenn Messungen zur Kalibrierung verfügbar sind.

Besonders bemerkenswert ist, dass sich dieses Verhalten der drei getesteten Modellvarianten in den Messungen wiederfinden lässt. Eine Beziehung zwischen Abflussvolumen und Abtrag lässt sich lediglich mit einer exponentiellen Regression finden, nicht jedoch mit einer linearen, während in den meisten Modellen die Erosionsparameter in einer linearen Beziehung zwischen Schubspannung (oder anderen aus dem Abfluss abgeleiteten Größen) und der Erosionsrate definiert sind (siehe Kapitel 2.4.3). Diese Beziehung bleibt auch dann erhalten, wenn das singuläre Event aus der Auswertung ausgeschlossen wird.

Diese Beobachtung lässt grundsätzlich zwei Schlussfolgerungen zu. Es ist möglich, dass sich der Abtrag mit dem Abfluss nicht linear ändert, oder es müssen innerhalb der linearen Beziehung exponentiell veränderliche Erosionsparameter zugelassen werden.

Letzteres deckt sich mit Untersuchungen von z.B. Hanson & Simon (2001), Meier (2010) oder den theoretischen Überlegungen von Bryan (2000) zu der Entstehung von Erosionsstabilität in bindigen Böden aus Kohäsion. Wirtz et al. (2013) untersuchen systematisch Abtragsmessungen auf Beziehungen zwischen der wirkenden Schubspannung (als aus dem Abfluss abgeleitete Größe) und den resultierenden Abtragsraten und geben an, keine Beziehung, die die Ableitung eines konstanten Bodenparameters zulässt, zu finden. Wischmeier (1976) betont für die USLE explizit, dass diese Gleichung zu Ermittlung langjähriger Mittelwerte des Abtrags dient und nicht zu Bewertung einzelner Events. Dies wird insbesondere auf die statistische Natur des K-Faktors und damit auf die hohe zeitliche Variabilität des Erosionswiderstands zurückgeführt. In der vorgestellten Untersuchung lässt sich dies besonders an dem Unterschied vor und nach Ereignis erkennen.

In WEPP wird die skizzierte Problematik grundsätzlich angesprochen und versucht, Erosionsparameter zeitlich variabel und abhängig von z.B. der Bodenbearbeitung oder Frost- und Tau-Zyklen anzupassen (Flanagan & Nearing 1995). Für die hier abgeleiteten Erkenntnisse

scheint dieser Ansatz grundsätzlich vielversprechend, die Modellierungsergebnisse legen jedoch nahe, dass die Umsetzung noch nicht zufriedenstellend erfolgt.

An dem Fallbeispiel FAM-Projekt Scheyern konnte exemplarisch anhand der umfangreichen Messdaten sowie drei exemplarisch getesteter Modellansätze gezeigt werden, dass das häufig verwendete Konzept zeitlich und räumlich unveränderlicher Bodenparameter zur Abbildung der Erodibilität eines Bodens keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern kann. Diese Erkenntnis wurde auch mit verschiedenen theoretischen und praktischen Erörterungen aus der Literatur abgeglichen. Ein Vergleich mit den verfügbaren Messdaten zeigt jedoch auch, dass sich in der hier verwendeten räumlichen und zeitlichen Auflösung nicht klar abgrenzen lässt, welche Defizite in der Modellierung der Abbildung des Strömungsangriffs und welche den Konzepten zur Erodibilität zuzuordnen sind. Im folgenden Kapitel soll daher untersucht werden, ob sich kleinskalige Messapparaturen besser eignen, um Erkenntnisse über die Veränderlichkeit der Erodibilität zu gewinnen und hieraus ggf. neue Ansätze für die Abbildung in der Modellierung abzuleiten.

4. Versuche mit dem JET Erosion Test

Im Anschluss an die vorangegangenen Ausführungen zur Bedeutung der Erodibilität von Oberböden soll im Folgenden ein messtechnischer Ansatz verfolgt werden. Hierzu wird zunächst ein Überblick über die verschiedenen Ansätze zur kleinskaligen Bestimmung des Erosionswiderstands und die Umsetzung in bekannte Pedotransferansätze gegeben (Kapitel 4.1). Besonders vielversprechend zeigt sich im hier aufgespannten thematischen Kontext der JET Erosion Test, welcher im Detail in Kapitel 4.2 dargestellt wird. Auf Basis verfügbarer Konstruktionshinweise wird in Kapitel 4.3 ein JET vorgestellt, welcher im Rahmen dieser Arbeit am ihwb konstruiert, kalibriert und zunächst getestet wurde. Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse in Kapitel 4.4 diskutiert, bevor im folgenden Kapitel 5 eine exemplarische Anwendung des entwickelten JETs im Rahmen der formulierten Forschungsfragen erfolgt.

4.1. Bestimmung des Erosionswiderstands

Nachdem im letzten Kapitel die Bedeutung der (kleinskaligen) Messtechnik über den Kontext der Modellierung herausgearbeitet wurde, soll im Folgenden ein Überblick über die messtechnischen Ansätze zur Bestimmung der Erodibilität des Oberbodens gegeben werden. Kapitel 2.2 hat bereits einen Überblick über die definierten Eigenschaften des Oberbodens und gängige Methoden zu ihrer Bestimmung und damit zur Charakterisierung des Oberbodens gegeben. Neben den erwähnten grundsätzlichen Eigenschaften zu Genese, Horizontrierung, Korngrößen, Zustandseigenschaften, Lagerung und Porenräumen, etc. existieren zahlreiche weitere Charakteristika, welche benötigt werden, um einen Boden im (z.B.) wasserwirtschaftlichen Kontext ausreichend zu beschreiben. Hierzu zählen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) Eigenschaften zu Wasserrückhalt und Transport: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, Infiltrationskapazität, Saugspannungskurven (Welkepunkt, nutzbare Feldkapazität, Feldkapazität), etc. sowie chemische Eigenschaften und Eigenschaften zur Stabilität des gesamten Bodengefüges und / oder von Bodenaggregaten. Sie bestimmen letztendlich maßgeblich den Erosionswiderstand eines Bodens gegenüber den einwirkenden Kräften und bilden damit eine wesentliche Eingangsgröße für das Themenfeld der Erosionsmodellierung. In Kapitel 2.4.3 wurde ein Überblick über die Abbildung des Erosionswiderstands in den verschiedenen Modellen und Ansätzen zur Ermittlung von Bodenerosion gegeben. Im Wesentlichen wird der Erosionswiderstand dabei über 3 Methoden abgebildet:

- Eine Variante des K-Faktors mit integraler Betrachtung der verschiedenen Erosionsprozesse auf einem Hang in einem Faktor, der auf die USLE zurückgeht.
- -Eine Variante des Schubspannungsüberschusses mit zeitlich aufgelöster Modellierung des Strömungsangriffs und des Abtragsprozesses, die konzeptionell an die Gerinnehydraulik angelehnt.
- Ein Proportionalitätsfaktor zur Ablösung in Bezug auf eine Sedimenttransport-Gleichung, deren Ansatz nicht primär auf der Schubspannung, sondern auf anderen Größen des Strömungsangriffs basiert.

Diese Ansätze erscheinen zunächst verschieden und zeigen entsprechende Unterschiede in der Bestimmung und Anwendung der gesuchten Erosionsparameter sowie den resultierenden

Modellergebnissen. Dennoch zeigen diese Ansätze auch Gemeinsamkeiten. Dies betrifft insbesondere die Bestimmung der gewünschten Größe zum Erosionswiderstand aus einer anderen, einfacher zu bestimmenden Größe über eine empirische Beziehung, den sogenannten Pedotransfer. Dies geht damit einher, dass die gesuchten Größen zumindest im Kontext der kohäsiven Böden, der in der Erosionsmodellierung typischerweise gegeben ist, keine eindeutige physikalische Definition haben, so dass keine physikalische Herleitung der Größe möglich ist und stattdessen auf die erwähnten empirischen Beziehungen zurückgegriffen werden muss. Auch werden diese Beziehungen meist aus einfach zu bestimmenden und zeitlich als konstant angesehenen Größen abgeleitet. Hier sind insbesondere Kennzahlen der Korngrößenverteilung zu nennen.

Hinsichtlich der Versuchskonzeption zur direkten Messung oder als Basis für den erwähnten Pedotransfer kann unterschieden werden zwischen:

- Feldmessungen (In Situ – Basis für Pedotransfer)
- Rinnenversuche (Labor – Basis für Pedotransfer)
- Messapparaturen zur Bestimmung der Makroskopischen Stabilität (In Situ oder Labor – Basis für Pedotransfer oder direkte Messung)
- Kleinskalige Messapparaturen (In Situ oder Labor – Basis für Pedotransfer oder direkte Messung)

Diese Ansätze sollen im Folgenden kurz diskutiert und auf ihre Eignung im hier aufgespannten Kontext geprüft werden.

4.1.1. Grundlagen zum Pedotransfer

Historisch bestand der Wunsch einfache Beziehungen zwischen den Erosionsparametern und anderen einfach zu bestimmenden Bodeneigenschaften zu finden wie z.B. dem Ton-Anteil oder dem Plastizitätsindex zu finden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Entstehung des Erosionswiderstands komplex ist. (Hanson & Cook 2004)

Aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren ist die Bestimmung des Erosionswiderstands eines Bodens nur auf experimentellem Weg möglich. Dabei sollen in den hierfür erforderlichen Versuchen mit geringem Aufwand Ergebnisse mit dennoch hoher Aussagekraft erreicht werden. Die in den Versuchen gewonnenen Ergebnisse können unmittelbaren Eingang in die Erosionsmodellierung (direkte Messung) finden. Primär dienen sie aber zur Aufstellung funktionaler Abhängigkeiten zwischen den Versuchsergebnissen und den Erosionswiderstand beschreibender Parameter. Über diese sog. Pedotransferfunktionen (PTFs) finden Versuchsergebnisse mittelbaren Eingang in die Erosionsmodellierung.

Pedotransferfunktionen meinen im Allgemeinen die Übertragung einer bekannten, leicht zu messenden oder leicht zu schätzenden Eigenschaft eines Bodenkörpers auf eine korrelierte und schwer zu bestimmende Eigenschaft desselben Bodenkörpers, welche jedoch als Eingangsgröße für einen Modellansatz benötigt wird. Der Pedotransfer ist in zahlreichen Modellen bereits im Modellansatz integriert, in der Form, dass vom Nutzer nur die Eingangsgrößen für den Pedotransfer definiert werden müssen und die eigentliche Größe als Eingangsparameter modellintern generiert wird. Diese Methoden sind insbesondere bekannt aus der

Bodenhydraulik, wie z.B. die Ableitung der hydraulischen Leitfähigkeit aus der Korngrößenverteilung (siehe z.B. Van Looy et al. 2017).

Bei der Ermittlung des Erosionswiderstands kohäsiver Böden ist zu beachten, dass das Kräftegleichgewicht am individuellen Korn zugunsten integraler Definitionen aufgegeben werden muss, da die Widerstandskraft des Bodens gegen die angreifende Kraft nicht aus dem Gewicht des individuellen Kornes, sondern primär aus anziehenden Kräften zwischen den Bodenkörnern (Kohäsion) besteht. Auch der Kraftangriff richtet sich nicht auf ein individuelles Korn, sondern auf Kornverbände, Bodenaggregate oder die geschlossene Bodenoberfläche, wobei gleichzeitig auch individuelle Körner aus dem Verband gelöst werden können. Die integrale Beschreibung der angreifenden Kräfte ist ausführlich in Kapitel 2.3.2 erläutert. Die Darstellung des Erosionswiderstands erfolgt, wie eben erwähnt, mittels verschiedener Ansätze.

Um Pedotransferfunktionen für Bodenparameter zu bestimmen, muss eine empirische Beziehung über eine Messreihe erstellt werden. Hierbei wird auf der einen Seite der Bodenabtrag in einer definierten zeitlichen und räumlichen Auflösung bestimmt und auf der anderen Seite die Bodenparameter untersucht, welche in der zugrunde liegenden Modellvorstellung als korreliert mit dem Erosionswiderstand angesehen werden. Eine Verknüpfung beider Messungen gelingt durch eine Theorie zu Sedimentabtrag und / oder Sedimenttransport. Diese Theorie muss einen oder mehrere Erosionsparameter mit einer Abtragsrate verknüpfen, so dass die Abtragsmessung nach den gesuchten Erosionsparametern aufgelöst werden kann. Die gemessenen Bodeneigenschaften können bei ausreichend Messpunkten mit den errechneten Widerstandsparametern korreliert werden, wobei die resultierende Korrelation die gesuchte Pedotransferfunktion darstellt. Dieser skizzierte Ablauf zeigt, dass bei der Ermittlung einer PTF zwei Theorien a priori zu Grunde liegen müssen. Sie werden typischerweise entsprechend der Fragestellung gewählt, die zur Bestimmung des Pedotransfers geführt hat. Genauso bestimmen die gewählte zeitliche und räumliche Auflösung, welche Pedotransferfunktion ermittelt wird. Hieraus wird klar, dass die Übertragbarkeit von Pedotransferfunktionen in einen anderen Kontext als den ihrer Ermittlung schwer bis gar nicht möglich ist. Dies bedeutet, dass bei hohem Aufwand der Ermittlung das zukünftige Anwendungsfeld typischerweise klein ist.

In z.B. Daly et al. (2015) oder Atioda Agokeng (2019) wird bereits ein Überblick über verschiedene Pedotransferfunktionen zur Bestimmung von Erosionsparametern gegeben. Der erste Ansatz zur Berücksichtigung der Bodeneigenschaften in der Erosionsmodellierung stammt von Browning et al. (1947), welcher das Konzept der Bodenerodibilität als Verhältnis zwischen der auf den Boden wirkenden Energie und dem resultierenden Bodenabtrag einführt und diesen Faktor relativ zu seinem Testboden für 12 Böden tabelliert (Van Looy et al. 2017).

4.1.2. Bestimmung des K-Faktor durch Feldversuche

Die wesentliche Weiterentwicklung der verfügbaren Datengrundlage zu einer universell anwendbaren Gleichung erfolgte durch Wischmeier & Smith (1965) in Form der USLE. Hier wird die erste PTF zur Bestimmung der Erodibilität von Oberböden abgeleitet. Die volle Beziehung basiert auf 24 Bodenparametern und ist entsprechend komplex, neben den bereits erwähnten Parametern wie den Massenanteilen von Ton, Schluff und Sand werden auch strukturelle Parameter, wie das Vorhandensein einer kalkhaltigen Basislage genutzt (Wischmeier & Mannering 1969). Obwohl mit diesem Ansatz etwa 98% der beobachteten experimentellen Varianz in den 55 ausgewerteten Böden erklärt werden konnte, ist er aufgrund

der großen Zahl schwer zu bestimmender Bodeneigenschaften kaum praxisrelevant (Flanagan 2004). Die mittlerweile mit der USLE assoziierte PTF stammt aus einer reduzierten Auswertung der gleichen Versuchsreihe publiziert in Wischmeier et al. (1971) und ermittelt eine Schätzung für die Erodibilität anhand der Massenanteile Ton, Schluff und Organik sowie der klassifizierten Bodenstruktur und Permeabilität über ein Nomogramm (Abbildung 4-1).

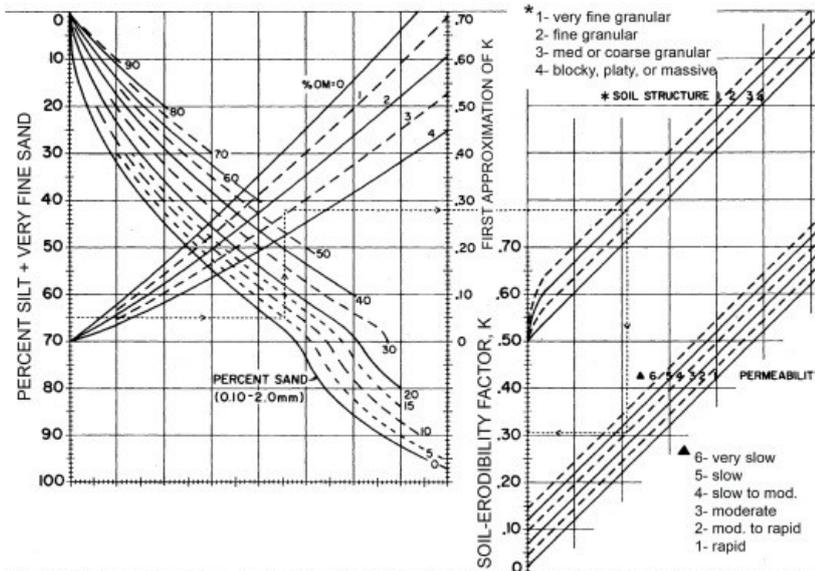


Abbildung 4-1: Erodibilität in Abhängigkeit der Massenanteile Ton, Schluff und Organik sowie der klassifizierten Bodenstruktur und Permeabilität (Wischmeier et al. 1971)

Die Steinbedeckung wurde in Wischmeier et al. (1978) als sechste Komponente hinzugefügt. In der Praxis sind jedoch diese Parameter häufig nicht in der benötigten Auflösung ermittelbar, so dass der K-Faktor als Funktion der Bodenart (siehe z.B. Sponagel 2005) bestimmt wird und damit alle Komponenten, welche nicht direkt die Bodenart betreffen, implizit auch durch Pedotransfer bestimmt werden.

In der späteren Überarbeitung der Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) wird die Erodibilität ausschließlich aus der Korngrößenverteilung abgeleitet. Die Beziehung ist jedoch komplex und verwendet verschiedene Kenngrößen aus der Korngrößenverteilung in einer exponentiellen Beziehung. Für die Beziehung wird ein Determinationskoeffizient von 0,98 angegeben (Renard et al. 1997).

Die gängigste Form, Pedotransferfunktionen für den Erosionswiderstand in integraler Form (vergleichbar mit dem K-Faktor) zu bestimmen, stellen integrale Feldmessungen in verschiedenen Zeit- und Größenskalen dar. Die Basis für den K-Faktor nach Wischmeier & Smith (1965) waren Messungen auf Hangskala (Plot-Scale), wobei meist der Niederschlag die dominante erosive Kraft darstellt. Auch wenn Wischmeier & Smith (1965) über eine große Datenbasis mit > 10000 Parzellen-Jahren verfügen, liegt der Schwerpunkt auf kurzen und flachen Hängen (Standardhang mit einer Länge von 22,1 m und einem Gefälle von 9 %), so dass bei deren Bestimmung des Erosionswiderstands implizit angenommen wird, dass Plansch-Erosion die dominierende Erosionsform darstellt, wohingegen beispielsweise Erosion durch Bildung von Rinnen bei der genannten Topographie wenig auftritt.

Da Feldmessungen mit Niederschlag als erosiver Komponente grundsätzlich integrale Erosionsgrößen ermitteln und keine Unterscheidung der verschiedenen Erosionsprozesse

ermöglichen (siehe z.B. Stein & Nett 1997), resultiert, dass eine Anwendung außerhalb der zeitlichen und räumlichen Randbedingungen der Ermittlung (Extrapolation) nicht möglich ist, d.h. das beispielsweise zur Bestimmung eines eventbezogenen K-Faktors auch eine eventbezogene Messreihe zu Grunde liegen muss. Hierbei gilt es zu bedenken, dass der langjährige Abtrag von Flächen von wenigen großen Events dominiert wird. Diese entstehen typischerweise, wenn starke Niederschläge auf brachliegende Böden unter ungünstigen Bedingungen treffen (siehe z.B. Janicki et al. 2002). Das Modellierungsbeispiel in Kapitel 3 zeigt, dass ein großer Teil der Erosion in einem Zeitraum von 8 Jahren durch ein Ereignis ausgelöst wurde. Die eventbezogene Feldmessung einer K-Faktor ähnlichen Größe ist daher an das Auftreten eines solchen Events während der Messdauer gebunden und resultiert entsprechend in einer typischerweise dünnen Datenbasis.

Deutlich weitreichender als die Bestimmung des K-Faktors ist jedoch dessen Verwendung. Wie von Wischmeier (1976) klargestellt, handelt es sich bei dem K-Faktor um eine rein empirische Größe ohne physikalische Grundlage, welche daher nicht über die Bedingungen bei ihrer Herleitung hinaus extrapoliert werden darf. Dies bedeutet für den K-Faktor lediglich eine Verwendung auf der Hangskala (Plot-Scale) zur Ermittlung eines langjährigen Durchschnittswerts. Die Verwendung für kürzere Zeiträume (z.B. einzelne Jahre), aber insbesondere auch die Verwendung für Einzelereignisse sowie die Nutzung in einer räumlich deutlich größeren oder deutlich kleineren Skala, schließt Wischmeier (1976) mit Hinweis auf die statistische Natur des Kennwerts explizit aus.

4.1.3. Bestimmung der kritische Schubspannung durch Rinnenversuche

Ansätze zum Schubspannungsüberschuss arbeiten im Gegensatz zu dem zuvor vorgestellten integralen K-Faktor mit einer zeitlich aufgelösten Betrachtung des Erosionsprozesses. Hierbei wird eine Erosionsrate mit einer hydraulischen Strömungsgröße, der wirkenden Schubspannung, verknüpft. Abhängig von der zugrunde liegenden Theorie werden hierfür ein bis drei Bodenparameter benötigt. Diese Konzepte bestimmen damit eine Abtragsrate und nehmen damit meist implizit einen abtragsbegrenzten Erosionsprozess an (siehe Kapitel 2.3.2). Einzelne Modelle verknüpfen die Abtragsgleichung mit einer Transportgleichung, um auch transportbegrenzte Erosionsprozesse berücksichtigen zu können. Hierfür müssen ggf. weitere Bodenparameter geschätzt werden.

Die Ansätze zum Schubspannungsüberschuss haben ihren Ursprung in der Beschreibung des Sedimenttransports in Fließgewässern, in der aufbauend auf der Arbeit von Shields (1936) vielfach das Konzept einer wirkenden Schubspannung der Strömung in Beziehung zu einer kritischen, von der Korngröße des Sohlsediments abhängigen Schubspannung genutzt wird, um den Bewegungsbeginn einer Fließgewässersohle zu definieren. Die dimensionslos dargestellte Beziehung dieser Größen zeigt Abbildung 4-2. Überschreitet die aus der mittleren Strömungsgeschwindigkeit abgeleitete dimensionslose Schubspannung die dimensionslose kritische Schubspannung eines Sediments, kommt es zum Bewegungsbeginn. Obwohl sich verschiedene Studien kritisch mit dem Diagramm von Shields auseinandergesetzt haben, wird es laut Zanke (1982) in der Praxis für Fließgewässer genutzt.

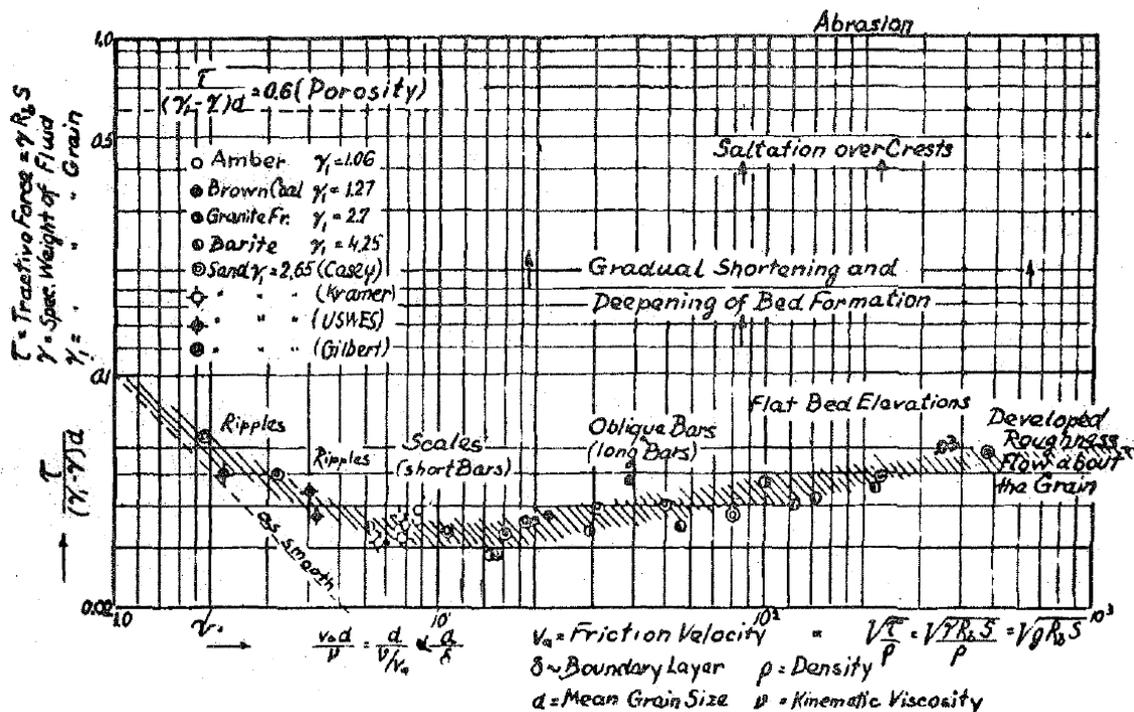


Abbildung 4-2: Bewegungsbeginn kohäsionsloser Sedimente in Fließgewässern (Shields-Diagramm), schraffiert: Bereich des Bewegungsbeginns entsprechend Messungen (Shields 1936)

Im Unterschied zu dem zuvor vorgestellten K-Faktor wird der Erosionsprozess mit Gleichungen zum Schubspannungsüberschuss zeitlich aufgelöst und dominiert durch den Abfluss betrachtet. Dies bedingt die Notwendigkeit für ein Messkonzept, welches es ermöglicht, hydraulische Strömungsgrößen entweder zu messen oder aus der Anlagenkonstruktion abzuleiten. Bedingt durch den Ursprung der Schubspannungsüberschussansätze ist dies häufig die Freispiegel-Laborrinne. Ein wesentlicher Unterschied bei Rinnenversuchen im Vergleich zu den Feldversuchen, wie sie für die Bestimmung des K-Faktors und andere integrale Ansätze genutzt werden, ist der hohe Aufwand für einen individuellen Versuch: Krier (1987) hat insgesamt 7 Versuche zum Thema Erosionsverhalten kohäsiver Gewässersohlen durchgeführt. Ein Versuch dauerte bis zu 1.400 h. Um eine ungestörte Sohle nachzuempfinden, war zudem je Versuch ein Zeitraum von 40 Tagen für Einbau und Ruhezeit erforderlich. Zimmermann (1992) führte ebenfalls Rinnenversuche zur phänomenologischen Beschreibung der Erosion einer kohäsiven Fließgewässersohle durch. Er verwendete einen Boden und führte insgesamt 25 Versuche durch, welche bis zu 1.930 h dauerten. Durch den hohen Zeitaufwand für die Rinnenversuche ergibt sich für den angestrebten Pedotransfer nur eine verhältnismäßig kleine Datenbasis. Neben den Freispiegel-Laborrinnen sind auch Rinnen für In-Situ Messungen entwickelt worden (Aberle et al. 2002).

Bei Messungen mit kohäsionslosem Sediment in der Laborrinne hat die kritische Schubspannung eine konkrete physikalische Bedeutung. Für kohäsives Material gibt es aufgrund des komplexeren Erosionsvorgangs keine vergleichbare Definition. Wirtz et al. (2013) diskutieren die unklare Definition der Begriffe Schubspannung und insb. kritische Schubspannung, wobei sie sich hier nicht explizit auf kohäsive Sedimente beschränken. Sie vergleichen die Bestimmung beider Größen über eine Reihe von Publikationen und können zeigen, dass die Begriffe von unterschiedlichen Autoren unterschiedlich belegt werden. Es wird auch betont, dass selbst die physikalische Einheit beider Größen nicht in jeder Publikation klar

definiert ist, was dem Anspruch an eine physikalisch basierte Modellierung nicht gerecht werden kann. Borhardt (2016) vergleicht die Definition des Bewegungsbeginns zwischen verschiedenen Studien und kommt zu einem ähnlichen Ergebnis in Bezug auf die unklaren Definitionen.

Wirtz et al. (2013) geben auch einen Überblick über Pedotransferfunktionen, welche zur Bestimmung der kritischen Schubspannung genutzt werden. Diese reichen von hydraulisch-geometrischen Beziehungen mit einfachen Eingangsgrößen, u.a. mittlerer Partikeldurchmesser, Gefälle und Wassertiefe, über Beziehungen zum Strickler-Beiwert und damit der Oberflächenrauheit bis zu Beziehungen, welche Bodenparameter insb. Ton- und Sandanteil nutzen.

Zanke (2003) stellt den Bewegungsbeginn in einer scharf abgegrenzten, expliziten Kurve dar, welche auch den Bereich der kohäsiven Böden umfasst. Implizit besteht hier jedoch die Annahme, dass die Strömung bei kohäsivem Boden ein hydraulisch glattes Wandverhalten zeigt. Diese Annahme ist bei Fließtiefen in einem Gewässer mit entsprechender Ausbildung der Gewässersohle sinnvoll und entspricht dem klassischen Versuchsaufbau in der Freispiegel-Laborrinne, ist jedoch nicht auf Filmabfluss auf der Geländeoberfläche übertragbar (siehe Kapitel 2.3.1).

Nach Hillebrand (2008) besteht kein allgemeingültiger Ansatz, um den Erosionsbeginn und damit die kritische Schubspannung mit anderen bodenmechanischen und physiko-chemischen Parametern zu korrelieren.

4.1.4. Direkte Messmethoden

In Kapitel 3 wurde versucht, anhand einer Auswertung von umfangreichen Messdaten und dem Vergleich zwischen dieser Messung und der Modellierung die Veränderung des Erosionswiderstands des Bodens über den Messzeitraum zu bewerten. Es zeigt sich jedoch, dass hinsichtlich der Modellierung von Bodenerosionsprozessen zu viele Unsicherheiten in Bezug auf die wirkenden Prozesse und deren modelltechnische Abbildung bestehen, dass Defizite bei den Modellierungsergebnissen sich nicht eindeutig einer fehlerhaften Modellierung des Strömungsangriffs oder einer fehlerhaften Modellierung des Strömungswiderstands zuordnen lassen.

Näher betrachtet wird daher noch der Arbeitsbereich der kleinskaligen Messungen in Form von Messapparaturen. Diese haben gegenüber den zuvor aufgeführten Rinnen- und Plotmessungen den Vorteil, dass sie zumindest theoretisch die direkte Messung auf dem zu bewertenden und/oder zu modellierenden Hangstück / Oberfläche erlauben. Dies liegt zum einen an dem im Vergleich zum Aufbau eines Plot- oder Rinnenversuchs geringen Aufwand dieser Messtechnik und zum anderen an der kompakten Bauform, die nur eine entsprechend kompakte Bodenprobe benötigt. Zudem erlauben viele Messapparaturen dieses Typs auch die Untersuchung ungestörter Bodenproben. Besondere Relevanz hat außerdem, dass im Unterschied zu den vorgestellten Rinnen- und Plotmessungen eine klare Begrenzung der Messung auf den Sedimentabtrag erfolgt. Die Nutzung dieser Messgeräte kann dadurch zweigeteilt sein – zum einen können sie vergleichbar zu den zuvor vorgestellten Messtechniken als Basis für Prozessverständnis und Pedotransfer dienen, zum anderen können sie direkt zur Bewertung In-Situ angewendet werden. Die direkte Messung wird (wenn auch mit anderen Techniken) z.B. von HEC-RAS oder EUROSEM (siehe Kapitel 2.4) empfohlen.

Die für das Modell EUROSEM empfohlene Messtechnik fällt dabei in die Gruppe der Makroskopischen Methoden zur Bestimmung der Scherfestigkeit, d.h. es wird nicht die Stabilität einzelner Partikel oder Aggregate innerhalb des Bodengefüges bewertet, sondern die Stabilität des Bodengefüges selbst. Hanson (1990) verwendet hier die Interpretation, dass die makroskopische Stabilität mit der Fähigkeit des Bodens zusammenhängt, Energie zu absorbieren und sich zu deformieren, bis es zum Versagen kommt. In die Gruppe der Messmethoden zur Bestimmung der makroskopischen Stabilität fallen z.B. der Torvane Test, das Rahmenschergerät oder der Triaxialversuch. Einen guten Überblick über diese Methoden liefert z.B. Zimbone et al. (1996). Die Beziehung zwischen dieser makroskopischen Stabilität und dem Erosionswiderstand ist jedoch umstritten. Aufgrund der unklaren Eignung der makroskopischen Methoden zur Bestimmung des Erosionswiderstands bindiger Böden, wird dieser Ansatz in der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt.

Krier (1987) gibt einen guten Überblick über grundsätzliche Bauformen für die direkte Messung. Er unterscheidet neben verschiedenen Bauformen der Laborrinne, Druckrohr-Bauformen, sowie rotierende Bauformen – rotierender Zylinder und rotierende Scheibe - und das Prallstrahlgerät. In seiner Arbeit werden alle Bauformen außer der Freispiegel-Laborrinne verworfen, da die Gerätebauformen praxisferne Fließsituationen erzeugen. Genannt werden insbesondere unnatürlich hohe Turbulenzbildung z.B. durch Umlenkung (Prallstrahlgerät) oder auf der anderen Seite laminare Fließzustände ohne Turbulenz (rotierende Apparaturen). Hierbei ist zu beachten, dass diese Bewertung im Kontext der Sohlenerosion in Fließgewässern entstanden ist. Die Überbetonung von Strömungsangriff durch turbulenzbedingte Fluktuationen im Vergleich zur Hauptströmung scheint im Kontext der Bodenerosion durch Oberflächenabfluss weniger problematisch (siehe Kapitel 2.3.3 für Besonderheiten von Filmabfluss auf kohäsiven Böden).

Eine aktuellere Zusammenstellung von Hanson & Hunt (2007) nennt neben der Laborrinne verschiedene Techniken, die der Gruppe der kleinskaligen Messapparaturen zuzuordnen sind, insbesondere die Apparaturen des Jet Erosion Tests (JET), welche im Wesentlichen dem Prallstrahlgerät entspricht, und des Hole Erosion Tests (HET). Beide Messapparaturen dienen explizit der Bestimmung des Erosionswiderstands. Rinnenmessungen werden hier zwar als die zuverlässigste Messmethode genannt, gleichzeitig wird aber auf den hohen Aufwand für einzelne Versuche sowie die fehlende Möglichkeit ungestörte Bodenproben zu testen hingewiesen.

In der kleinskaligen Bauform wird aus der Gerätegeometrie und einer zugrundeliegenden Theorie über die Hydraulik des Geräts eine Beziehung zur wirkenden Schubspannung auf die Bodenprobe abgeleitet. Die Messung des Abtrags erfolgt durch Gewicht, Volumen oder Tiefenermittlung, so dass die Notwendigkeit einer Sedimentmessung im Volumenstrom entfällt.

Unterschiede zwischen JET und HET liegen dabei vor allem darin, wie der Strömungsangriff auf die Bodenprobe erzeugt wird. Während der JET, wie erwähnt, durch Umlenkung eines Prallstrahls eine Schleppspannung auf die Probenoberfläche aufbringt, wird im HET eine Druckströmung durch ein künstliches Loch in der Achse der Probe erzeugt. Hiermit verbunden sind umgekehrte Verläufe der wirkenden Schubspannung. Während beim JET die auf die Bodenprobe wirkende Schubspannung im Versuchsverlauf abnimmt, bis im Idealfall der Abtrag zum Erliegen kommt, wird beim HET (vergleichbar mit Rinnenversuchen) die wirkende Schubspannung so lange erhöht, bis Abtrag einsetzt. Dies führt dazu, dass HET-Versuche meist mit Schubspannungen nahe der kritischen Schubspannung durchgeführt werden, während JET-

Versuche meist mit deutlichem Schubspannungsüberschuss beginnen. In einem umfassenden Vergleich der Methoden gibt Wahl (2010) an, dass diese Unterschiede im Versuchskonzept dazu führen, dass die beiden Versuche trotz konzeptioneller Ähnlichkeit in abweichenden Absolutwerten für die Erosionsparameter resultieren. Hierzu wird weiter ausgeführt, dass die qualitativen Bewertungen von Bodenproben zwischen beiden Versuchen dennoch vergleichbar sind und die Abweichungen in den Absolutwerten auf Defizite in der zugrundeliegenden Theorie hinweisen.

Es finden sich jedoch einige Hinweise auf Vorteile des JET im Rahmen der vorliegenden Fragestellung. Wahl (2010) führt hierzu an, dass der HET insgesamt schwieriger auszuführen ist und das Spektrum der Erodibilität, für das der Test erfolgreich realisierbar ist, kleiner ist. Ein besonderer Vorteil ist hierzu nach Pinettes et al. (2011), dass JET Tests sowohl In-Situ als auch im Labor durchführbar sind, wobei auch im Labor ungestörte Bodenproben genutzt werden können. In Verbindung mit der Bewertung von Wahl (2010), dass die qualitativen Aussagen der beiden Messapparaturen vergleichbar sind, wird daher der JET Erosion Test zur Durchführung der Messungen im Rahmen der vorliegenden Untersuchung gewählt.

4.2. Grundlagen zum JET

Als wesentliche Kenngröße bei der Beurteilung der Erosionsstabilität von Böden wird die kritische Schubspannung τ_c , also die Schubspannung bei der Bewegungsbeginn (*incipient motion*) eingesetzt, herangezogen. Bei kohäsionslosen Böden resultiert der Widerstand eines Bodenpartikels gegen die wirkende Kraft aus der Strömung nahezu vollständig aus seinem Gewicht. Shields (1936) hat diesen Zusammenhang in dem nach ihm benannten Shields-Diagramm beschrieben, das insgesamt als zuverlässigster Ansatz zur Bestimmung des Erosionswiderstands angesehen wird. Bei kohäsiven Böden wirken dagegen primär elektrochemische Bindungskräfte zwischen den einzelnen Bodenpartikeln, die für kleine Körnung deutlich größer ausfallen als die wirkenden Gewichtskräfte. Da es für die Quantifizierung dieser Widerstandskräfte bis dato keine schlüssige Theorie gibt, scheint die Messung der einzig gangbare Weg.

Die messtechnische Bestimmung des Bewegungsbeginns über Rinnenversuche zeigt sich jedoch aus mehreren Gründen als problematisch. Zum einen sind Rinnenversuche sehr aufwendig und eignen sich daher schlecht zur Beantwortung spezifischer lokaler Fragestellungen (siehe Kapitel 4.1.3), ebenso ist es durch den notwendigen Aufbau in der Rinne nicht möglich, einen ungestörten Bodenkörper zu testen. Zuletzt ist es bei kohäsiven Böden nur schwer bzw. subjektiv möglich, den Bewegungsbeginn optisch zu bestimmen, da keine Bewegung individueller Körner sichtbar wird.

Als Ansatz zur Lösung dieses Problems entwickelte Hanson (1990) den Prototyp für das Messgerät JET Erosion Test (JET). Dieser diente der direkten Messung der Stabilität von Dammstrukturen gegen Erosion durch Schubspannungen der Strömung. Er eignet sich zur Messung einzelner Bodenproben bzw. -oberflächen mit deutlich geringerem Aufwand im Vergleich zum Rinnenversuch. Ursprünglich als In-Situ-Messgerät konzipiert, bietet es die Möglichkeit, die Bodenoberflächen ungestört zu testen und erlaubt durch das geänderte Messprinzip ein objektiveres Kriterium zur Beurteilung des Bewegungsbeginns (bzw. zur Bestimmung der kritischen Schubspannung).

Vergleichbar mit dem Rinnenversuch stellt der Schubspannungsüberschuss (*shear stress excess*) die theoretische Grundlage dar. Im Unterschied zum Rinnenversuch, bei welchem die wirkende Schubspannung kontinuierlich erhöht wird, bis der Bewegungsbeginn eintritt, wird beim JET in seiner ursprünglichen Entwicklung die Schubspannung kontinuierlich reduziert, bis die Bewegung (der Abtrag) aufhört.

Weiterhin wird der Ansatz des Schubspannungsüberschusses bei kohäsiven Böden als zweiparametrische Funktion beschrieben, mit der Erodibilität k_d als Proportionalitätsfaktor zwischen dem Schubspannungsüberschuss und der Transportrate.

Dieses ursprüngliche In-Situ-Gerät ist noch in verhältnismäßig großer Bauform mit einem Außendurchmesser von $\sim 0,5$ m entworfen (Hanson 1990). Folgende Modelle von Hanson (z.B. Hanson & Hunt 2007) sind in kleineren Abmessungen bis hin zum Mini-Jet (Al-Madhhachi et al. 2013) sowohl als In-Situ- als auch als Labor-Geräte, entwickelt worden. Der grundsätzliche Messaufbau ist jedoch in allen Varianten identisch.

4.2.1. Messprinzip

Abbildung 4-3 zeigt das grundsätzliche Messprinzip eines eingetauchten radial-symmetrisch auftreffenden Strahls (*submerged impinging circular jet*). Die Theorie baut auf der Arbeit von Rajaratnam (1976) zum turbulenten Freistrahls auf.

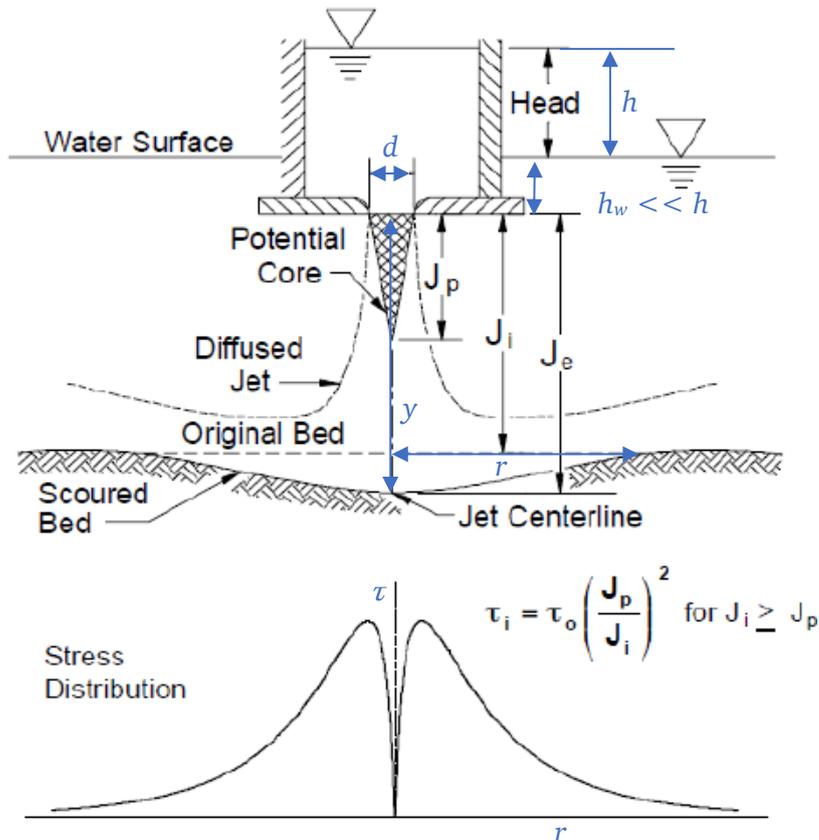


Abbildung 4-3: Systemskizze JET Erosion Test (verändert nach Hanson & Cook 2004)

Im oberen Teil der Abbildung ist als Detail der Strahl (*jet*) zwischen Düse und Bodenoberfläche zu sehen. Sowohl die Düse als auch die in einem festen Abstand unter ihr befindliche Bodenoberfläche (Laborprobe oder Bodenkörper) sind in einen Wasserkörper eingetaucht (*submerged*). Der Wasserkörper hat eine freie Oberfläche (*water surface*) mit einer anstehenden Druckhöhe von wenigen Zentimetern oberhalb der Düse (h_w), so dass diese in den folgenden Berechnungen keinen maßgeblichen Einfluss hat und gewöhnlich vernachlässigt werden kann. Über der Düse steht ein definierter Wasserdruck bzw. eine feste Druckhöhe (*head*), die in ihrer Größenordnung deutlich größer ist als die Druckhöhe des freien Wasserspiegels. Da die Druckhöhe und der Düsendurchmesser (sowie alle Systemverluste) bekannt sind, kann der Durchfluss aus der Düse nach der Formel von Torricelli bestimmt werden. Nach dem Ansatz von Albertson et al. (1950) weitet sich der austretende Strahl bis in eine Tiefe von 6,3 Düsendurchmessern (Hanson & Cook 1997) nicht wesentlich auf. Diese Tiefe (J_p) wird als Potentialkern (*potential core*) bezeichnet. Unterhalb dieser Tiefe findet eine signifikante Aufweitung des Strahls durch Diffusionsprozesse statt, wodurch die Fließgeschwindigkeit mit der Tiefe abnimmt.

Beim Auftreffen (*impinging*) auf die Bodenoberfläche hat der Strahl die Fließgeschwindigkeit U_0 , mit $U_0(y) = f(h, d, y)$. Durch die orthogonal zu Fließrichtung angeordnete

Bodenoberfläche wird der Strahl parallel zur Bodenoberfläche umgelenkt, so dass die Strömung eine Schubspannung auf die Bodenoberfläche abhängig von der Fließgeschwindigkeit ausübt.

Die wirkende Schubspannung an einem Punkt der Bodenoberfläche ist eine Funktion des anstehenden Wasserdrucks (h) und des Düsendurchmessers (d), des Abstands der Bodenoberfläche von der Düse (y) und des Abstands von dem Zentrum der Bodenprobe (r) und liefert die Schubspannungsverteilung $\tau(y, r) = f(h, d, y, r)$. Theoretisch hat die Schubspannung in der Strahlachse den Wert null (Staupunkt), wächst dann mit zunehmendem Abstand auf einen Maximalwert an, um von diesem mit noch weiter steigendem Abstand auf kleine Werte (asymptotisch null) abzufallen (Abbildung 4-3, unten). In der Praxis zeigt sich jedoch, dass aufgrund der geringen Ausdehnung des Versuchsaufbaus die reale Schubspannungsverteilung von der theoretischen dahingehend abweicht, dass der Maximalwert mit der Strahlachse zusammenfällt.

Die resultierende Schubspannung bewirkt einen Bodenabtrag. Durch ihn entfernt sich die Bodenoberfläche von der Düse und die wirkende Schubspannung reduziert sich, theoretisch so lange, bis das Maximum der noch wirkenden Schubspannung der kritischen Schubspannung entspricht und kein Abtrag mehr stattfindet. Die Erodibilität ergibt sich dabei aus der Geschwindigkeit, bis der Gleichgewichtszustand erreicht ist unter der Annahme, dass die Erodibilität eine Proportionalitätskonstante zwischen dem Schubspannungsüberschuss und dem resultierenden Abtrag bzw. der Rate des Abtrags ist.

4.2.2. Grundsätzlicher Aufbau

Die Kernelemente des JET sind bereits unter Messprinzip (Kapitel 4.2.1) angesprochen. Die beschriebene Düse ist der Auslass aus einer Röhre (*JET-tube*), die den konstanten Wasserdruck bzw. die konstante Druckhöhe gewährleistet. Der Einlauf in den JET kann aus einer Pumpe (zum Beispiel In-Situ direkt am Gewässer), einem Gebäude-Wasseranschluss oder (üblicherweise) aus einem Hochbehälter erfolgen. JET-Röhre und Düse sind mit einem Deckel bzw. Aufsatz verbunden, der in der In-Situ-Bauform direkt auf die Bodenoberfläche aufgesetzt werden kann und für den notwendigen Abstand zwischen Düse und Bodenoberfläche sorgt. In der Labor-Bauform sitzt der Aufsatz bzw. die JET-Röhre auf einem wassergefüllten Körper mit freiem Wasserspiegel, in welchem die zu testende Bodenprobe versenkt ist. In der Mini-JET Bauform ist der Aufsatz direkt auf der Bodenprobe montiert. Der Abfluss aus dem Gerät erfolgt entweder als freier Ausfluss oder durch einen Auslass. Neben den bereits beschriebenen Kernelementen gibt es weitere Bauteile, die die grundsätzliche Funktion des JET ermöglichen.

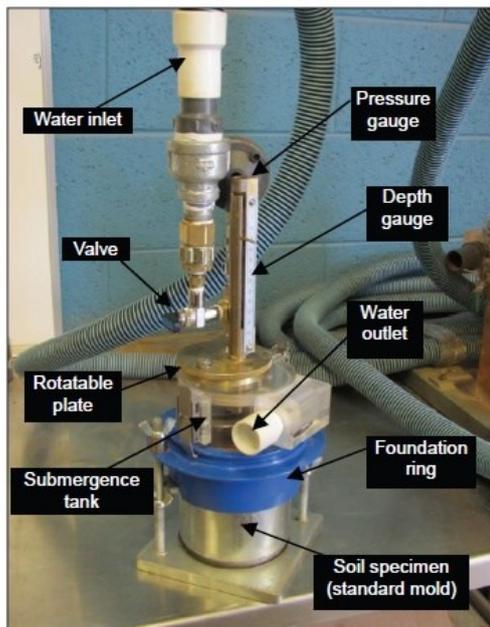


Abbildung 4-4: Beispielabbildungen für JET-Bauformen, Mini-JET (links; Al-Madhhachi et al. 2013, In-Situ-JET (rechts, Hanson & Cook 2004)

Wesentlich ist, dass der wirkende Wasserdruck bzw. die Druckhöhe während des Versuchs konstant bleibt und möglichst exakt bekannt ist. Wie bereits erwähnt, werden dafür grundsätzlich verschiedene Ansätze verwendet. Die Bauform Mini-JET (Abbildung 4-4, links) wird typischerweise an einen gewöhnlichen Gebäude-Wasserhahn angeschlossen. Hier muss jedoch ein konstanter Druck bzw. Durchfluss sichergestellt werden. In der In-Situ-Bauform (Abbildung 4-4, rechts) hat sich eine Kombination aus Pumpe in einem örtlichen Wasserkörper und Hochbehälter bewährt. In den Labor-Bauformen wird ebenfalls gewöhnlich ein Hochbehälter verwendet. Für den Befüll- und Entleerungsvorgang verfügt die JET-Röhre außerdem über ein Entlüftungsventil.

Um die Erodibilität einer Probe anzugeben, muss die Geschwindigkeit des Abtragsprozesses bzw. die Abtragsrate in Abhängigkeit von der Zeit bekannt sein. Hierfür wird während eines Versuchs mehrfach der erreichte Abtrag bzw. die erreichte Tiefe gemessen, wofür der Erosionsprozess unterbrochen werden muss. In der gängigsten Bauform, z.B. nach Hanson & Hunt (2007) wird dies über eine Ablenkplatte (*deflection plate*) erreicht. Diese ist in einer Tiefe zwischen Düse und Bodenoberfläche beweglich montiert, so dass der Erosionsprozess nach einem Zeitintervall durch Bewegung der Platte unterbrochen werden kann. Die Messung der Tiefe nach einem Zeitintervall erfolgt über einen Tiefenmesser bzw. Messstab (*depth gauge*). Hierzu wird der Messstab durch die Düse bewegt. Da beide einen nahezu identischen Durchmesser haben, wird die Strömung unterbrochen. Die Ablenkplatte kann wieder von der Bodenoberfläche entfernt und die Tiefe abgelesen werden, bei der der Messstab die Bodenoberfläche berührt. Bei dieser Technik erfolgt die Messung jeweils in der Mitte der Bodenprobe, was dem höchsten Abtrag, also dem Maximum der Tiefe entspricht, so dass eine Erosionsrate als Strecke pro Zeit und nicht als Volumen pro Zeit bestimmt wird. Andere Bauformen, z.B. nach Hanson (1990), aber auch Nguyen et al. (2017) bestimmen das gesamte pro Zeiteinheit erodierte Volumen.

4.2.3. Auswertungsmethodik

Die Auswertung der JET Versuche erfolgt gewöhnlich unter Ansatz einer linearen Theorie zum Schubspannungsüberschuss (*linear shear stress excess*), d.h. die wirkende Schubspannung wird in einer linearen Beziehung mit der gemessenen Abtragstiefe korreliert:

$$\frac{dh}{dt} = E = k_d(\tau - \tau_c)^a \quad (4-1)$$

E Erosionsrate – hier als Tiefenänderung $\frac{dh}{dt}$ (m/s)

a Exponent – im linearen Fall gilt $a = 1$

Während der Durchführung eines JET-Versuchs wird mehrfach (in regelmäßigen oder unregelmäßigen Abständen) der Versuch (der Durchfluss) gestoppt und die erodierte Tiefe (bzw. das erodierte Volumen) gemessen, so dass als Ergebnis des Versuchs für den zu beprobenden Boden die erodierte Tiefe (oder Volumen) gegen die Zeit aufgetragen werden kann (Abbildung 4-5).

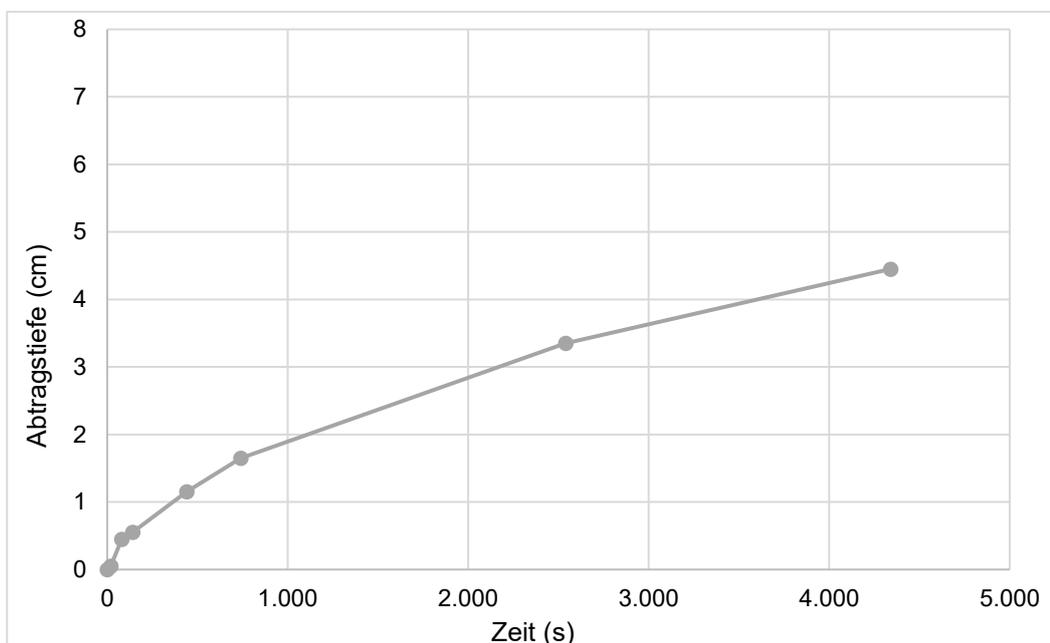


Abbildung 4-5: Beispiel für gemessenes Zeit-Abtrags-Diagramm aus JET-Versuch

Wenn die anstehende Druckhöhe und die Anlagenparameter (z.B. Düsendurchmesser) bekannt sind, ist unter Annahme der Gültigkeit der zugrunde liegenden Theorie des JET auch die Schubspannungsverteilung während des Versuchs über Zeit und Ort bekannt. Hieraus kann die kritische Schubspannung über die ermittelte Gleichgewichtstiefe und die Erodibilität über die Abtragsgeschwindigkeit proportional zur jeweils wirkenden Schubspannung ermittelt werden. Umgekehrt kann für bekannte Erosions- und Anlagenparameter der theoretische Abtrag über die Zeit ermittelt werden, z.B. durch abschnittsweise Integration der zugrundeliegenden Differentialgleichungen.

Diese theoretische Abtragslinie lässt sich in einem praktischen Versuch jedoch kaum erreichen, insbesondere aufgrund von Inhomogenität des Bodens, Messungenauigkeiten aber auch auf Grund des begrenzten Versuchszeitraums und der begrenzten Anzahl Messungen. Vor allem die Ermittlung der Gleichgewichtstiefe ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Dies ist die Tiefe, in der wirkende Schubspannung und Erosionswiderstand ausgeglichen sind. Die wirkende

Schubspannung an der Gleichgewichtstiefe entspricht damit der kritischen Schubspannung des zu testenden Bodens.

Parallel zu der Entwicklung des JET haben sich entsprechend verschiedene Methoden etabliert, die Messergebnisse einer JET-Messung auszuwerten und daraus die Bodenerosionsparameter zu ermitteln.

Für hohe wirkende Schubspannungen bzw. einen deutlichen Schubspannungsüberschuss kann die kritische Schubspannung vernachlässigt werden und die Abtragsrate ist direkt proportional zur wirkenden Schubspannung. Hier wird davon ausgegangen, dass $\tau \gg \tau_{crit}$. Dies bedeutet implizit, dass die Messung während des Versuchsablaufs deutlich oberhalb der Gleichgewichtstiefe liegt, so dass diese Modellvorstellung theoretisch keine Gleichgewichtstiefe erreicht. Entsprechend muss nur die Erodibilität als Bodenparameter bestimmt werden. Dies erfolgt z.B. bei Hanson & Hunt (2007), indem die Abtragsrate abschnittsweise über der wirkenden Schubspannung aufgetragen wird. Die Erodibilität ergibt sich abschnittsweise oder integral aus der Steigung der Kurve.

Ist die Annahme einer fehlenden Gleichgewichtstiefe nicht akzeptabel, kann diese theoretisch über Messungen ermittelt werden, indem der Versuch bis zu der Tiefe läuft, in der dauerhaft kein Abtrag mehr stattfindet. Dies ist zunächst ein objektives Kriterium, den Punkt des Bewegungsbeginns festzulegen. Es kommt jedoch auch bei einem sehr geringen Schubspannungsüberschuss noch zu Abtrag, so dass der Messzeitraum bis zum Erreichen der Gleichgewichtstiefe sehr lang werden kann. Dies liegt zum einen daran, dass die Gleichgewichtstiefe asymptotisch (und damit theoretisch nie) erreicht wird. Zum anderen kann es auch nach Erreichen der theoretischen Gleichgewichtstiefe durch turbulente Geschwindigkeitsfluktuationen noch zu spontanen Abträgen einzelner Bodenpartikel kommen. Dieser Effekt wird umso größer, je inhomogener die Bodenprobe ist und ist damit für ungestörte Feldproben deutlich ausgeprägter als für aufbereitete Laborproben.

Entsprechend kann es notwendig sein, die Gleichgewichtstiefe aus dem gemessenen Abtragsverlauf abzuleiten. Hierfür hat sich aus der Arbeit von Hanson & Cook (1997) ein Ansatz aufbauend auf Blaisdell et al. (1981) etabliert, der auch aktuell als Standard-Methode für die Auswertung von JET-Versuchen gilt (siehe z.B. Khanal et al. (2016)). Ermittelt wird hierbei die Gleichgewichtstiefe durch Anpassung und Extrapolation der aufgezeichneten dimensionslosen Messungen unter Ansatz einer hyperbolischen Funktion. Die dimensionslose Gleichgewichtstiefe ergibt sich dann aus dem Schnittpunkt der an die Ausgleichsfunktion angelegten Asymptote mit der y-Achse des Diagramms. Die skizzierte grundsätzliche Vorgehensweise veranschaulicht Abbildung 4-6, im Detail wird sie unter Kapitel 4.3.4 erläutert. Im Anschluss an die Ableitung der kritischen Schubspannung aus der Gleichgewichtstiefe wird die Erodibilität durch Anpassung an die Messwerte ermittelt. Marot et al. (2011), Karamigolbaghi et al. (2017), u.a. weisen darauf hin, dass mit dieser Methode die Gleichgewichtstiefe leicht überschätzt bzw. die kritische Schubspannung unterschätzt wird. Dies liegt vor allem daran, dass die hyperbolische Funktion ursprünglich als ideale Anpassungsfunktion für Auskolkungsvorgänge ermittelt wurde und der Abtragsprozess im JET eine durchaus andere Charakteristik aufweist.

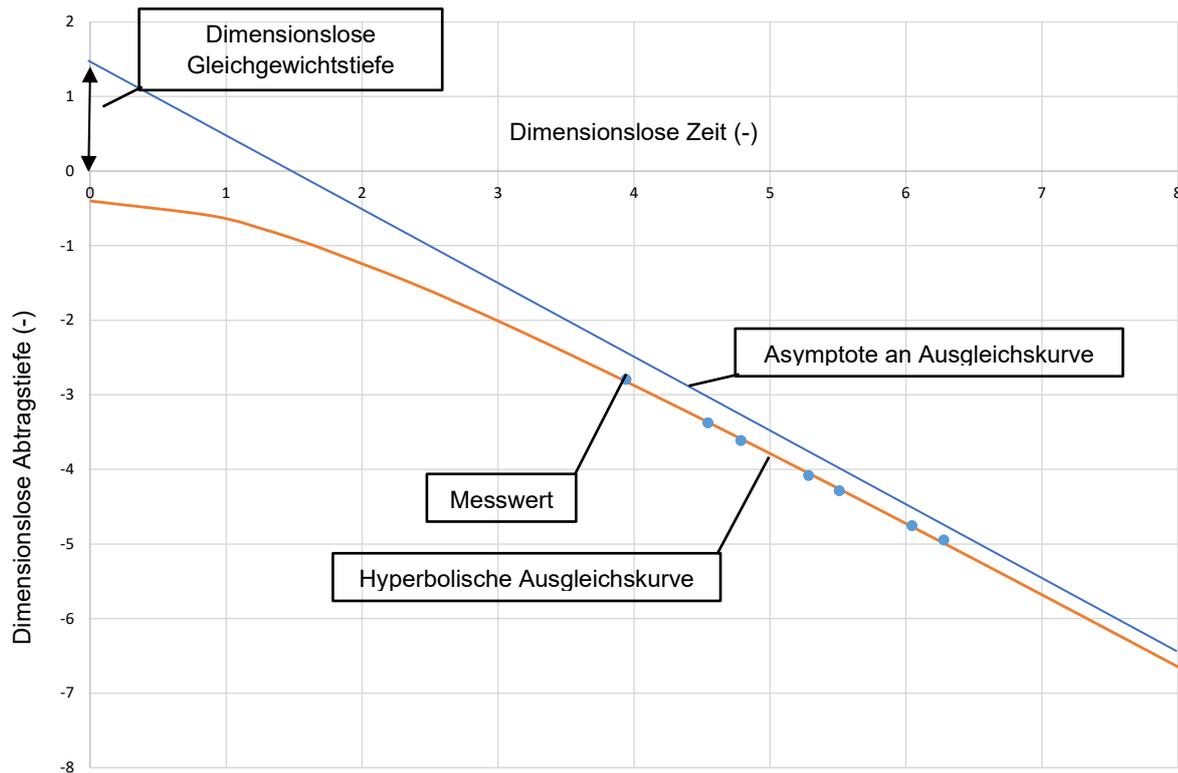


Abbildung 4-6: Prinzipskizze zur Ableitung der Gleichgewichtstiefe im JET-Versuch nach Blaisdell et al. (1981)

Ein letzter Ansatz die JET-Messungen auszuwerten, ist keinen der beiden Bodenparameter zu vernachlässigen oder a priori zu schätzen, sondern in einer gemeinsamen Optimierung beide Parameter mit dem theoretischen Abtrag über eine Fitting-Routine (z.B. kleinste Fehlerquadrate) zu bestimmen. Dies wird z.B. bei Pinettes et al. (2011) und Daly et al. (2013) umgesetzt.

In den ursprünglichen Versuchen zum JET von Hanson (1990) wurde noch keine Theorie zur Schubspannungsverteilung auf der Bodenoberfläche aufgestellt. Die Auswertung der Versuche wurde daher mit einer dimensionsbereinigten Analyse empirischer Versuche in Verbindung mit zugehörigen Rinnenexperimenten durchgeführt. Hierfür wurden 3 Böden mit dem In-Situ-JET gemessen. Je Boden wurden 6 Testläufe mit unterschiedlichen Durchflüssen und zu 4 Messzeitpunkten ausgewertet. Insgesamt standen 18 Testläufe bzw. 75 Datenpunkte zur Verfügung, die mit Rinnenversuchen zu den 3 Böden kalibriert wurden.

4.2.4. Gleichungssystem

Die in den vorangegangenen Abschnitten qualitativ erläuterten Zusammenhänge werden durch das folgende Gleichungssystem beschrieben.

Die Formel von Torricelli gibt die Fließgeschwindigkeit für den freien Auslass aus einem großen Behälter (ruhender Wasserkörper) an.

$$U_o = C\sqrt{2gh} \quad (4-2)$$

mit U_o = Fließgeschwindigkeit am Austrittspunkt (m/s)

C = Düsenverlustbeiwert, geometrieabhängig (-)

h = Druckhöhe über Auslass, Druckhöhe in der JET-Röhre (m)

Die Formel von Torricelli eignet sich beim JET zur Bestimmung der Austrittsgeschwindigkeit an der Düse, zum einen, da die Druckhöhe in der JET-Röhre über die Dauer des Versuchs konstant gehalten wird (ruhender Wasserkörper), zum anderen kann die Bedingung eines freien Auslasses als erfüllt angesehen werden, da die Überstauhöhe im Vergleich zur Druckhöhe in der JET-Röhre vernachlässigbar klein ist (siehe Kapitel 4.2.1). Im Falle einer nicht vernachlässigbaren Überstauhöhe kann für h in Gleichung 4-2 die Differenzdruckhöhe zwischen JET-Röhre und Überstau angesetzt werden.

Die Schubspannung τ_o (Pa) im Potentialkern errechnet sich aus

$$\tau_o = C_f * \rho_W * U_o^2 \quad (4-3)$$

Mit C_f = Reibungskoeffizient = 0,00416, nach Hanson & Cook (2004) (-)

Die Schubspannung τ_i (Pa) in einem Abstand J_i (m) von der Düse ergibt sich aus folgender Beziehung

$$\tau_i = \tau_o \left(\frac{J_p}{J_i}\right)^2 \quad (4-4)$$

mit J_p = Länge des Potentialkerns (m) und

$$J_p = C_d d \quad (4-5)$$

mit C_d = Diffusionskonstante = 6,3, nach Hanson & Cook (2004) (-)

d = Düsendurchmesser (m)

Zusammengefasst liefern die Gleichungen mit den definierten Konstanten folgenden Zusammenhang für die Schubspannung τ_i in der Tiefe (Abstand von der Düse) J_i :

$$\tau_i = C_f * \rho_W * C * 2gh * \left(\frac{C_d * d}{J_i}\right)^2 \quad (4-6)$$

bzw.

$$\tau_i = C * 3239 * h * \left(\frac{d}{J_i}\right)^2 \quad (4-7)$$

wobei die Parameter C und d feste Anlagenparameter darstellen.

4.3. Konstruktion JET am ihwb

Am ihwb wird im Rahmen dieser Arbeit ein eigenes Messgerät vom Typ JET Erosion Test entworfen und gebaut. Als Grundlage für den Bau und für wesentliche konstruktive Elemente dienen die Arbeiten von Hanson & Simon (2001), Hanson & Cook (2004), Pinettes et al. (2011) und Al-Madhhachi et al. (2013). Die genaue Bauform und Ausführung soll jedoch an die vor Ort bestehenden Notwendigkeiten und Materialverfügbarkeiten angepasst werden. Außerdem ermöglicht die eigene Dimensionierung und Konstruktion ein ausreichend tiefes Detailverständnis für die Funktion des Messgerätes.

4.3.1. Planungsgrundlagen

Der JET am ihwb wird als Laborgerät in einer Ausführung mittlerer Größe konstruiert. Die Ausführung als Mini-JET Al-Madhhachi et al. (2013) erscheint für den Testbetrieb mit mehr potentiellen Fehlerquellen verbunden als die größer dimensionierte Variante. Weiter wird eine Ausführung der äußeren Bauteile in Acrylglas festgelegt, damit eine Auswertung der Erosionsprozesse im Messgerät auch qualitativ durch Beobachtung erfolgen kann. Die zu wählenden Abmessungen werden durch das Kernstück des Geräts, einen zentral angeordneten Stechzylinder, definiert.

Im Unterschied zu den Beispielen aus den oben genannten Literaturquellen soll der JET am ihwb die anstehende Druckhöhe nicht über einen Wassertank, sondern über eine Pumpe gewährleisten. Ziel ist es, dass mit einem Gerät eine große Bandbreite an Druckhöhen und damit an wirkenden Schubspannungen realisiert werden kann.

Nach Cossette et al. (2012) ist es sinnvoll, den JET in einer ähnlichen Größenordnung der Schubspannungen zu betreiben, wie die auftretenden Schubspannungen bei dem zu untersuchenden und zu modellierenden Phänomen. In der vorliegenden Bearbeitung geht es um Bodenerosion durch Filmströmungen und in flachen Rinnen.

4.3.2. Konstruktive Ausbildung des JETs

Stechzylinder

Als Stechzylinder wird ein Standardmodell mit den Abmessungen Durchmesser $d = 10$ cm und Höhe $h = 12$ cm gewählt. Diese Größe erscheint im Vergleich zu kleineren Stechzylindern mit $d = 5$ cm zweckmäßiger und wird häufig in JET Konstruktionen verwendet. Das Tauchbecken (*submergence tank*) muss entsprechend größer dimensioniert werden und erhält $d = 30$ cm und $h = 32$ cm.

Im Tauchbecken muss der Stechzylinder perfekt mittig und stabil platzierbar sein. Hierfür wird in den Boden mit Stärke $s = 2$ cm eine Aussparung mit $s = 1$ cm gefräst. Die Stechzylinder zeigen an einer Seite eine Fase, welche bei der Entnahme ungestörter Bodenprobe in den Bodenkörper gerammt wird (siehe Kapitel 4.4.3) und damit die Unterseite darstellt. Entsprechend soll diese für die Beprobung ungestörter Proben ebenfalls die Unterseite darstellen, so dass die Seite mit Fase in der Aussparung sitzen kann. Um zu verhindern, dass Wasser von unten in die Probe eindringen kann und ggf. zu einem hydrostatischen Auftrieb / hydraulischen Grundbruch führt, wird neben der präzisen Fertigung der Aussparung eine EPDM-Abdichtung mit $d = 1$ mm vorgesehen.

JET-Röhre

Die JET-Röhre wird über dem Tauchbecken bzw. der Bodenprobe mit einem abnehmbaren Deckel befestigt. In diesem Teil sind sowohl die JET-Röhre mit Düse, der Einlauf in den JET, als auch die Messeinrichtung zur Bestimmung der Abtragstiefe verbaut. Die Durchmesser der JET-Röhre (6 cm) und der Düse (0,6 cm) wurden entsprechend den Empfehlungen aus Hanson & Cook (2004) gewählt. Die Höhe des Einlaufs in die JET-Röhre über der Düse (20,2 cm) wurde so gewählt, dass die Strömung bis zum Erreichen der Düse beruhigt ist. Die Höhe der JET-Röhre über dem Deckel ist für die Konstruktion nicht primär relevant, da das Gerät auch im Überdruck betrieben werden soll. Soll der JET mit einem freien Wasserspiegel in der JET-Röhre betrieben werden, welcher der Druckhöhe entspricht, muss die Höhe der JET-Röhre entsprechend dem Wasserspiegel dimensioniert werden. Im vorliegenden Fall wurde die Höhe der JET-Röhre nur nach praktischen Gesichtspunkten gewählt (75 cm). Eine gewisse Mindesthöhe ist vor allem notwendig, um Platz für die Messeinrichtung zu schaffen, so dass diese während der Abtragsphasen nicht die Strömung beim Einlauf in die Düse stört. Da die Messeinrichtung außerdem konstruktiv die größte Herausforderung darstellt, wurde der JET zu Beginn so konstruiert, dass die Messeinrichtung notfalls auch mehrere Male getauscht werden kann. Da jeder Austausch den Verlust von einigen Zentimetern Höhe der JET-Röhre bedeutet, wurde die JET-Röhre mit etwa 10 cm Reserve geplant.

Abstand Düse - Bodenprobe

Eine wichtige konstruktive Entscheidung ist die Höhe der Düse oberhalb der Bodenprobe. Unter Annahme der Prinzipien, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, bleibt die Strömung nach dem Austritt aus der Düse zunächst nahezu gleichförmig. Dieser Abschnitt entspricht dem Potentialkern. Danach weitet sich die Strömung auf und Geschwindigkeit und resultierende Schubspannung bei der Umlenkung auf der Bodenoberfläche nehmen ab.

Abhängig von der Distanz zwischen Düse und Bodenoberfläche ist die wirkende Schubspannung also geringer. Hanson & Hunt (2007) empfehlen einen Abstand von 12 bis 18 mal dem Düsendurchmesser. Dies entspricht Schubspannungen zwischen 15 und 20 % der Schubspannung im Potentialkern

Konstruktion Tiefenmesser

Eine besondere Herausforderung in der Konstruktion stellt der Tiefenmesser dar. Die eigentliche Messung erfolgt mit einem 6 mm Aluminium-Stab, welcher nach unten bewegt wird. Zunächst muss der Stab die Düse passieren, um die Strömung zu unterbrechen. Hierfür wird das Messende des Stabs mit einer Fase ausgeführt. Der Stab kann weiter nach unten bewegt werden, bis das Messende die Bodenoberfläche berührt, und die entsprechende Höhe kann am Skalenende des Stabs abgelesen werden. Da der JET mit dem Ansatz variabler Druckhöhen auch im Überdruck betrieben werden können muss, ist es notwendig, die Messeinrichtung so zu gestalten, dass sie am Ende der JET-Röhre bei Drücken bis zu 0,2 Bar (2 m Wassersäule) dicht und trotzdem beweglich ist. Der Tiefenmesser muss also in einem Spannungsfeld aus Abdichtung und damit der Möglichkeit, hohe Druckhöhen zu erzeugen, einerseits und einer hohen Genauigkeit der Messung andererseits erstellt werden. In der Literatur kann kein Hinweis zur Konstruktion des Tiefenmessers gefunden werden. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit im Laufe der Konstruktion verschiedene Konzepte ausprobiert. Abschließend wurde eine Bauform mit kalkuliertem Ringspalt gewählt. Hierfür ist der Messstab in einem Messingkörper als Führung oberhalb der JET-Röhre gelagert. Die Länge der Führung und das

Spiel des Messstabs innerhalb der Führung wurden so dimensioniert, dass der Druckverlust in dem Spalt zwischen Führung und Messstab größer ist als die maximal anstehende Druckhöhe von 0,2 Bar und das Gerät damit abgedichtet ist. Dies wurde bei einer Länge der Führung von 10 cm und einem maximalen Spaltmaß von $10 \mu\text{m}$ als gegeben errechnet. So wird es ermöglicht, dass die Dichtung keinen störenden Widerstand bei der Bewegung des Tiefenmessers erzeugt und damit die Wahrnehmung der Bodenoberfläche nicht beeinträchtigt wird. Dennoch ist die Tiefenmessung in ihrer Genauigkeit begrenzt.

Zulaufleitung zum Jet

Der Durchmesser der Zulaufleitung wurde so gewählt, dass bei den zu erwartenden Durchflüssen (50 l/h – 600 l/h) der Druckverlust auf der Fließstrecke in der Zulaufleitung von 2 m den Durchfluss um nicht mehr als 10 % der Pumpenleistung verringert. Hierbei hat sich ein Durchmesser von $\frac{3}{4}$ Zoll für den Zulauf ergeben. Zur Vermeidung von Rückstau im Gerät wurde der Ablauf geringfügig weiter mit 1 Zoll gewählt.

Abbildung 4-8 zeigt schematisch einen Schnitt durch den konstruierten JET (mit einer älteren Version des Tiefenmessers). Die Konstruktionszeichnung im Detail (mit der hier beschriebenen Version des Tiefenmessers) findet sich in Anhang 4-1.

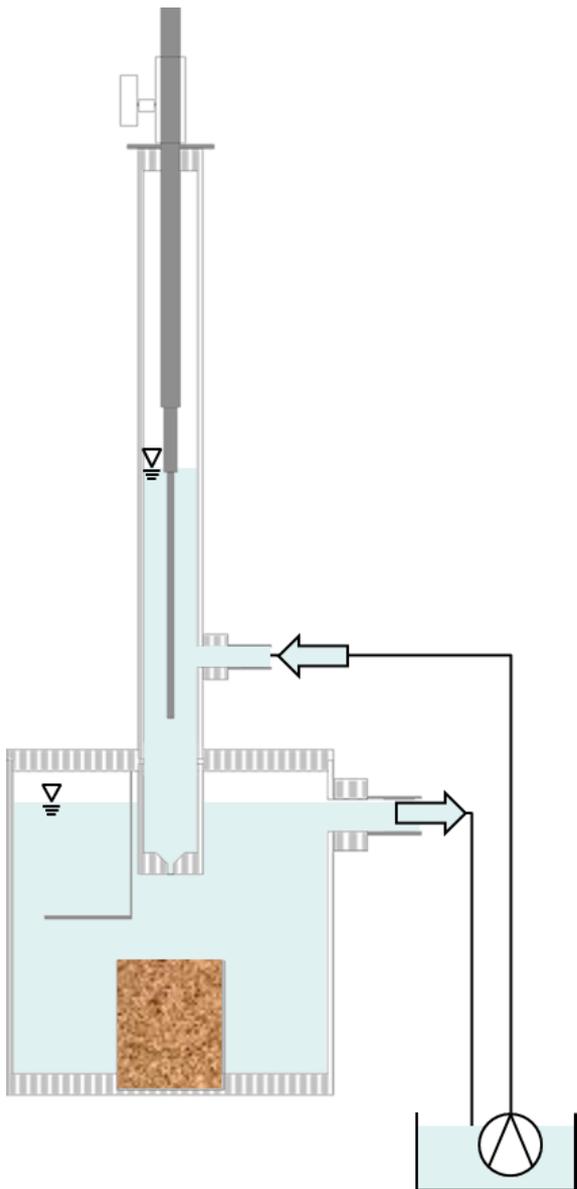


Abbildung 4-7: Schnitt durch den am ihwb konstruierten JET

4.3.3. Kalibrierung des JETs

Je nach Konstruktion des JET kann die anstehende Druckhöhe in der JET-Röhre oder dem angeschlossenen Hochbehälter abgelesen werden. Im konstruierten Modell soll die Druckhöhe jedoch über eine große Spannweite variabel sein, so dass auch Druckhöhen, die größer sind als die JET-Röhre, umgesetzt werden müssen. Im Folgenden wird dann davon gesprochen, dass der JET unter Druck betrieben wird oder Überdruck in der JET-Röhre herrscht. In diesem Fall kann die Druckhöhe und damit der Durchfluss nicht abgelesen werden, sondern muss entweder durch Messung oder rechnerisch ermittelt werden. Da die Durchflussmessung aufwendig und fehleranfällig ist, soll eine Durchflussmessung bei jedem Versuchslauf vermieden werden und stattdessen rechnerisch eine Beziehung zwischen der Standhöhe des JET und dem herrschenden Überdruck bestimmt werden. Hierfür muss zur jeder möglichen Standhöhe ein Schnittpunkt zwischen Pumpenkennlinie und Anlagenkennlinie gefunden, also der Durchfluss, für den sich Pumpenleistung und Drosselleistung der Düse im Gleichgewicht befinden. Auch dieses Problem wird zumindest teilweise rechnerisch gelöst und nicht durch bloße Messung der Durchflüsse

auf der jeweiligen Standhöhen, so dass das Prinzip geeignet ist, um weitere JET-Geräte zu dimensionieren und zu konstruieren.

1) Verlustkoeffizient an der Düse (Düsenverlustbeiwert C)

Für das neu konstruierte Gerät muss zunächst der Düsenverlustbeiwert C (Gleichung 4-2) bestimmt werden.

An der JET-Düse entstehen Verluste durch Verwirbelungen am Einlauf von der JET-Röhre mit einem Durchmesser von 6 cm zu der Düse mit einem Durchmesser von lediglich 0,6 cm.

Die Verluste werden durch wiederholte Messung des Durchflusses am JET-Auslauf in stationärem Strömungszustand bestimmt. Hierzu wird der JET bei niedrigen Druckhöhen betrieben, so dass die Druckhöhe am Wasserstand in der JET-Röhre abgelesen werden kann. Der theoretische Durchfluss im stationären Zustand am JET-Auslauf ermittelt sich nach Gleichung 4-2. Aus dem Verhältnis von dem so theoretisch ermittelten Durchfluss zu dem gemessenen Durchfluss ergibt sich der Verlustbeiwert. Es werden 4 Wiederholungsmessungen bei verschiedenen Druckhöhen durchgeführt. Außerdem wird eine Fehlerrechnung hinterlegt. Weitere Details zu dieser Messung finden sich auch in Hannappel (2017). Als mittlerer Düsenverlustbeiwert ergibt sich $C = 0,925$, d.h. dass etwa 7,5 % der potentiellen Energie der Strömung durch Einlaufverluste an der Düse nicht in kinetische Energie umgewandelt werden. Typische Werte für den Düsenverlustbeiwert geben z.B. Al-Madhhachi et al. (2013) mit 0,7 – 0,75 für den Mini-JET bis 0,95 – 1,0 für den JET in der originalen Bauform an.

2) Pumpenkennlinie

Allgemein wird bei einer Pumpe mechanische Leistung in die Erhöhung der potentiellen Energie einer Strömung umgesetzt. Im Fall der vorliegenden Pumpe (Heissner Smartline 3100 l/h; Typ-Nr.: HSP3000-00) wird eine konstante elektrische Leistung von 48 W abgenommen und in mechanische Bewegung des Pumpenrads umgesetzt. Da die Leistung konstant ist, nimmt die Drehzahl des Pumpenrads mit steigendem hydrostatischem Druck gegen das Pumpenrad ab, d.h. mit zunehmender Förderhöhe bzw. erreichter potentieller Energie nimmt die Förderleistung bzw. der Durchfluss ab. Diese Beziehung wird in der sogenannten Pumpenkennlinie ausgedrückt.

Für die Heissner Smartline Pumpe wird zwar eine Pumpenkennlinie vom Hersteller zur Verfügung gestellt, diese ist in Ihrer Genauigkeit für die Kalibrierung der Messeinrichtung jedoch nicht ausreichend. Folglich muss die Pumpenkennlinie selbst eingemessen werden. Hierin werden die kontinuierlichen und örtlichen Verluste zwischen Pumpe und Messgerät berücksichtigt (insb. Zulaufleitung und Einlaufstutzen). Dies erscheint sinnvoll, da so bei der Kalibrierung das Zulaufsystem (Pumpe und Zulaufleitung) und das Anlagensystem (JET) in einen Gleichgewichtszustand gebracht werden. Bei einer separaten Betrachtung der Zulaufleitung müssten drei Systeme in einen Gleichgewichtszustand gebracht werden, was wesentlich komplexer ist. Außerdem ist es im Rahmen der Fragestellung nicht relevant, die Verluste in der Zulaufleitung separat zu quantifizieren.

Um die Pumpenkennlinie zu bestimmen, wird zum einen die maximale Förderhöhe ausgemessen (die Höhe der Zulaufleitung, bei der die Strömung gerade abreißt) und zum anderen der Durchfluss bei einer Förderhöhe von 0 m. Diese beiden Messungen bilden Anfang und Ende der Pumpenkennlinie. Zwischen der Höhe 0 und der maximalen Förderhöhe wird das

Ende der Zulaufleitung (höchster Punkt der Zulaufleitung) auf 7 Höhen stabilisiert und der zugehörige Durchfluss je in drei Messungen ermittelt. Die Messergebnisse sind im Detail bei Hannappel (2017) dargestellt.

3) Anlagenkennlinie

Für das JET-Messgerät gilt eine umgekehrte Beziehung – je größer die Druckhöhe (erreichte Förderhöhe) im Gerät, desto größer wird der Durchfluss, wobei die begrenzende Größe der Auslauf aus der Düse ist (siehe 1) Verlustbeiwert). Die Austrittsgeschwindigkeit an der Düse leitet sich aus der Druckhöhe entsprechend Gleichung 4-2 ab, so dass für jede anstehende Druckhöhe die zugehörige Austrittsgeschwindigkeit direkt ermittelt werden kann. Der Durchfluss folgt im Allgemeinen aus der Integration der Geschwindigkeit über den Querschnitt bzw. wie im vorliegenden Fall der mittleren Geschwindigkeit U_o durch deren Multiplikation mit der Querschnittsfläche. Die Anlagenkennlinie wird daher rein rechnerisch ermittelt.

4) Betriebszustände des JET

Für die Anlagenkennlinie und die Pumpenkennlinie kann ein Schnittpunkt gefunden werden, d.h. ein Punkt, an dem beide Kennlinien identische Druckhöhen und Durchflüsse haben. Hier herrscht ein Gleichgewicht zwischen beiden Teilen des Aufbaus und es kann sich ein stationärer Strömungszustand einstellen. Ein solcher Punkt wird im Folgenden als Betriebszustand des JET bezeichnet.

Der beschriebene Betriebszustand stellt sich jedoch nur ein, wenn das Bezugsniveau (die Höhe 0) für Pumpe und JET identisch sind. Dies ist nur der Fall, wenn die Düse des JETs (Bezugsniveau des JETs) auf der gleichen Höhe liegt, wie der Wasserspiegel im Vorlagebehälter der Pumpe (Bezugsniveau der Pumpe). Stehen beide Geräte auf einer Höhe, befindet sich das Bezugsniveau des JETs bauartbedingt ca. 7 cm über dem Bezugsniveau der Pumpe (siehe Skizze in Abbildung 4-7). Dieser Unterschied im Bezugsniveau wird berücksichtigt, in dem die Pumpenkennlinie um die gleiche Höhe verschoben und so ein neuer Gleichgewichtszustand ermittelt wird. Entsprechend resultiert für jede Standhöhe des JETs ein neuer Gleichgewichtszustand aus Druckhöhe und Durchfluss bzw. ein neuer Betriebszustand. Hierdurch ist es möglich, den JET durch Wahl einer Standhöhe bei unterschiedlichen Durchflüssen und damit unterschiedlichen wirkenden Schubspannungen zu betreiben. Abbildung 4-9 zeigt den Betriebszustand für JET und Becken beide auf dem Boden, sowie verschiedene Betriebszustände für unterschiedliche Standhöhen des JET.

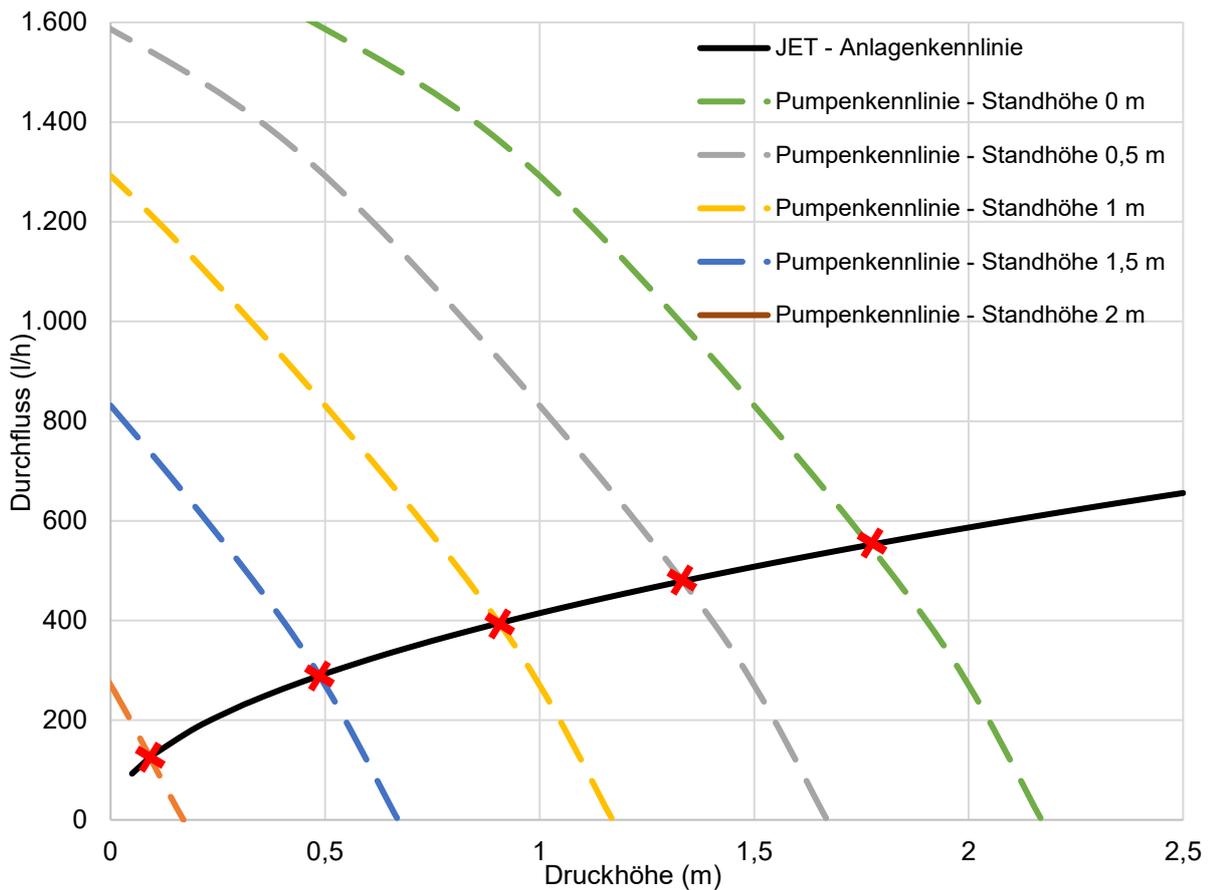


Abbildung 4-8: Ermittlung der Betriebszustände für verschiedene Standhöhen, Betriebszustände rot markiert

Aus den ermittelten Betriebszuständen wird eine kontinuierliche Funktion des Betriebszustands, also des Durchflusses, abhängig von der Standhöhe des JET interpoliert und damit die Fließgeschwindigkeit an der Düse U_o gemäß Gleichung 4-2 aus der Standhöhe bestimmt. Weiterhin ergibt sich die Schubspannung τ_o an der Düse aus Gleichung 4-3 und die Schubspannung τ_i im Abstand J_i von der Düse entsprechend Gleichung 4-4. Diese Kennlinien zur Beziehung von Standhöhe und wirkenden Geschwindigkeiten und Schubspannungen (Abbildung 4-9) dienen als Grundlage für die folgenden Auswertungen der JET-Messungen.

Gleichung 4-6 wird mit den bekannten Anlagenparametern $C=0,925$ und $d=6$ mm zu

$$\tau_i = 0,11 * \frac{h}{J_i^2} \quad (4-8)$$

und beschreibt die wirkende Schubspannung im Versuchsverlauf.

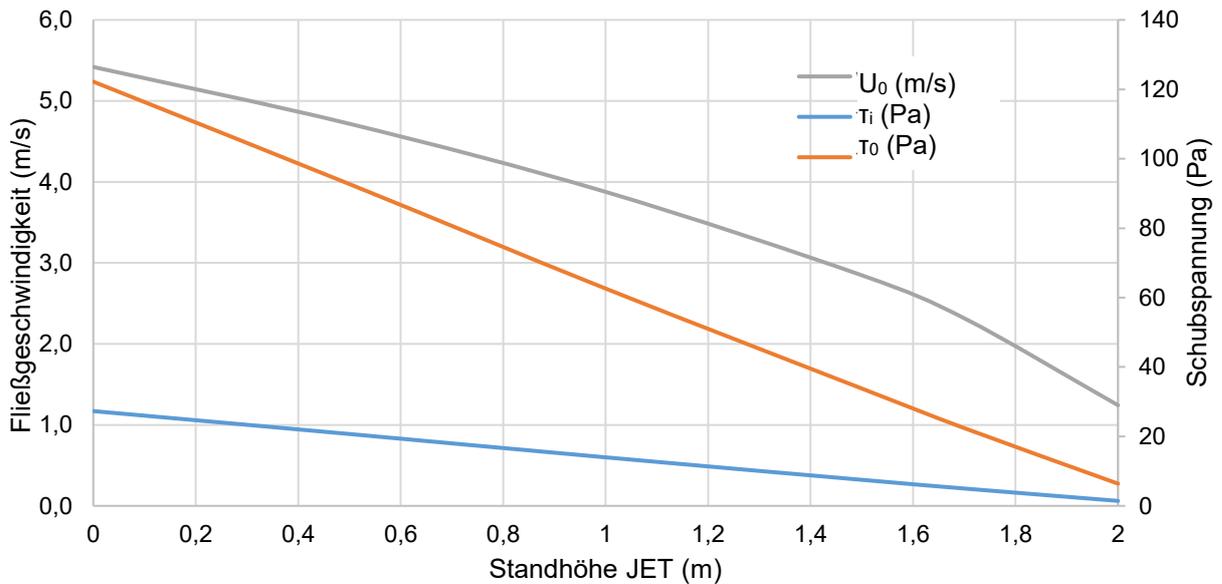


Abbildung 4-9. Kennlinien für die Geschwindigkeit an der Düse, die Schubspannung an der Düse und die Schubspannung an der initialen Bodenoberfläche in Abhängigkeit der Standhöhe für den konstruierten JET

4.3.4. Routinen zur Auswertung der JET-Versuche

Da es über das Ziel dieser Arbeit hinausgeht, alle Ansätze zur Auswertung eines JET-Versuchs umfassend zu vergleichen, werden drei Auswertungsroutinen implementiert. Für einen umfassenden Vergleich zu den verschiedenen Auswertungsansätzen sei z.B. auf Pinettes et al. (2011) und Wahl (2010) verwiesen. Ein kurzer Überblick mit Diskussionsgedanken findet sich in Kapitel 4.2.3.

Zur Auswertung wird zunächst eine Standardroutine nach Blaisdell et al. (1981) in MS Excel implementiert und anhand der Messreihen aus Hanson & Cook (2004) verifiziert.

Ergänzend werden in einem zweiten Schritt eine Routine mit einem reinen Fitting-Ansatz, wie z.B. in Daly et al. (2013) verwendet, sowie ein Ansatz über die Erosionsraten als Vergleich implementiert.

Auswertungsroutine nach Blaisdell

Wie in Kapitel 4.2.3 ausgeführt, ist das Auswertungsverfahren für JET-Versuche unter der Anwendung der Ergebnisse von Blaisdell et al. (1981) ein zweistufiges Verfahren zur Lösung der linearen Gleichung des Schubspannungsüberschusses. Im ersten Schritt wird aus den durchgeführten Messungen (Messpunkte mit verstrichener Erosionszeit und zugeordneter Abtragstiefe) die Gleichgewichtstiefe über Anpassung an eine hyperbolische Funktion geschätzt. Aus der Gleichgewichtstiefe kann direkt die kritische Schubspannung ermittelt werden. Im zweiten Schritt kann durch Anpassung der Messpunkte an eine theoretische Abtragskurve die Erodibilität bestimmt werden.

Für den ersten Schritt werden die Messpunkte aus verstrichener Zeit t (s) und Abtragstiefe J (m) unter Nutzung der Anlagenparameter in dimensionslose Messwerte umgewandelt. Die X-Achse (x) bzw. die Zeit-Achse gibt den dekadischen Logarithmus der dimensionslosen Messzeit an, welche über das Verhältnis von Geschwindigkeit an der Düse zu Düsendurchmesser dimensionsbereinigt wird.

$$x = \log \left(\frac{U_0 t}{d} \right) \quad (4-9)$$

Die Y-Achse (f) wird aus dem dekadischen Logarithmus des Verhältnisses von Abtragstiefe zu Düsendurchmesser und dessen Differenz zu x gebildet.

$$f = \log \left(\frac{J}{d} \right) - x \quad (4-10)$$

Die so dimensionsbereinigten Messwerte werden an einen theoretischen Abtrag angepasst mit f fortlaufend kleiner 0 und x aus der hyperbolischen Gleichung

$$x^2 = (f - f_0)^2 - A^2 \quad (4-11)$$

wobei f_0 den dekadischen Logarithmus der mit dem Düsendurchmesser dimensionsbereinigten Gleichgewichtstiefe (Schnittpunkt der Asymptote mit der Y-Achse) und A den Schnittpunkt der tatsächlichen Kurve (keine physikalische Entsprechung) angibt. Diese beiden Größen sind im Rahmen der Anpassung zu optimieren.

Die Gleichgewichtstiefe J_e errechnet sich aus der optimierten Größe f_0 nach

$$J_e = 10^{f_0} * d \quad (4-12)$$

Aus der Gleichgewichtstiefe J_e bestimmt sich τ_c über (vgl. Gleichung 4-4)

$$\tau_c = \tau_0 * \left(\frac{J_p}{J_e} \right)^2 \quad (4-13)$$

Die Anpassung von f_0 und A erfolgt z.B. mit Hilfe des Verfahrens der kleinsten Fehlerquadrate.

Das beschriebene Prinzip zur Ermittlung von τ_c veranschaulicht Abbildung 4-6.

Im zweiten Schritt kann auf Basis der ermittelten Gleichgewichtstiefe die Erodibilität bestimmt werden, indem erneut eine Anpassung an den theoretischen Abtrag auf Basis dimensionsloser Größen erfolgt (Abbildung 4-10).

Hierzu werden zunächst dimensionsbereinigte Zwischenwerte zu Abtragstiefe und Abtragszeit bestimmt.

Die fiktive Referenzzeit t_r (s) stellt eine Annäherung für die Zeit bis zum Erreichen der Gleichgewichtstiefe dar und bestimmt sich nach

$$t_r = \frac{J_e}{\tau_c k_d} \quad (4-14)$$

Die Tiefen J_p^* und J_b^* sind relative Tiefen in Bezug auf die Gleichgewichtstiefe und verstehen sich als Prozentsatz der Werte J_p (Tiefe des Potentialkerns unterhalb der Düse) und J_b (Tiefe der initialen Bodenoberfläche unterhalb der Düse) zur Gleichgewichtstiefe.

Zugehörig zu den Tiefen J_p^* und J_b^* werden die Zeiten T_p^* und T_b^* ermittelt, die ebenfalls als Prozentsatz zu t_r zu verstehen sind, also als Anteil der Zeit bis zum Erreichen des jeweiligen Wertes im Verhältnis zur Zeit t_r .

Aus den relativen Zeiten T_p^* und T_b^* können die Zeiten t_p und t_b bestimmt werden, die jeweils die fiktive Zeit (s) bis zum Erreichen der Tiefe des Potentialkerns respektive bis zum Erreichen der initialen Bodenoberfläche darstellen.

$$\text{Mit } t_p = T_p^* * t_r \text{ und } t_b = T_b^* * t_b \quad (4-15)$$

Die vorhandenen Messwerte aus dem Versuch werden anhand dieser Kenngrößen in absolute Messpunkte aus Zeit und Abtragstiefe umgewandelt, d.h. in die (fiktive) verstrichene Zeit für den Abtrag ab Höhe der Düse und die (fiktive) Abtragstiefe ab Höhe der Düse. Hieraus können die relativen Messwerte T_i^* und J_i^* , die jeweils wieder den Prozentsatz zur Gleichgewichtstiefe bzw. den Prozentsatz der Zeit bis zum Erreichen der Gleichgewichtstiefe darstellen, ermittelt werden.

Diese werden angepasst an den theoretischen Verlauf von Zeit T^* auf der X-Achse und der Tiefe J^* auf der Y-Achse, wobei J^* fortlaufend zwischen 0 % und 100 % und T^* über abschnittsweise Integration der Differentialgleichung des Abtrags (Hanson & Cook 1997) (siehe Gleichung 4-1) definiert ist.

Für den Bereich bis zur Tiefe des Potentialkerns bzw. bis J_p^* ändert sich die Schubspannung mit der Tiefe nicht und T_i^* ermittelt sich nach:

$$T_i^* = J_i^* * \frac{J_p^{*2}}{1 - J_p^{*2}} \quad (4-16)$$

Für alle Tiefen größer als die Tiefe des Potentialkerns nimmt die Schubspannung nach der bekannten Beziehung aus Gleichung 4-6 ab und T_i^* ermittelt sich nach:

$$T_i^* = 0,5 * \ln\left(\frac{1+J_i^*}{1-J_i^*}\right) - J^* - 0,5 * \ln\left(\frac{1+J_b^*}{1-J_b^*}\right) + J_b^* + T_b^* \quad (4-17)$$

Die Anpassung der dimensionsbereinigten Messwerte an den theoretischen, dimensionslosen Verlauf erfolgt im Fall von k_d rein optisch, da dieser Parameter sehr sensitiv ist und auch bei einer ungünstigen optischen Anpassung kein Fehler > 5 4-10% zu erwarten ist.

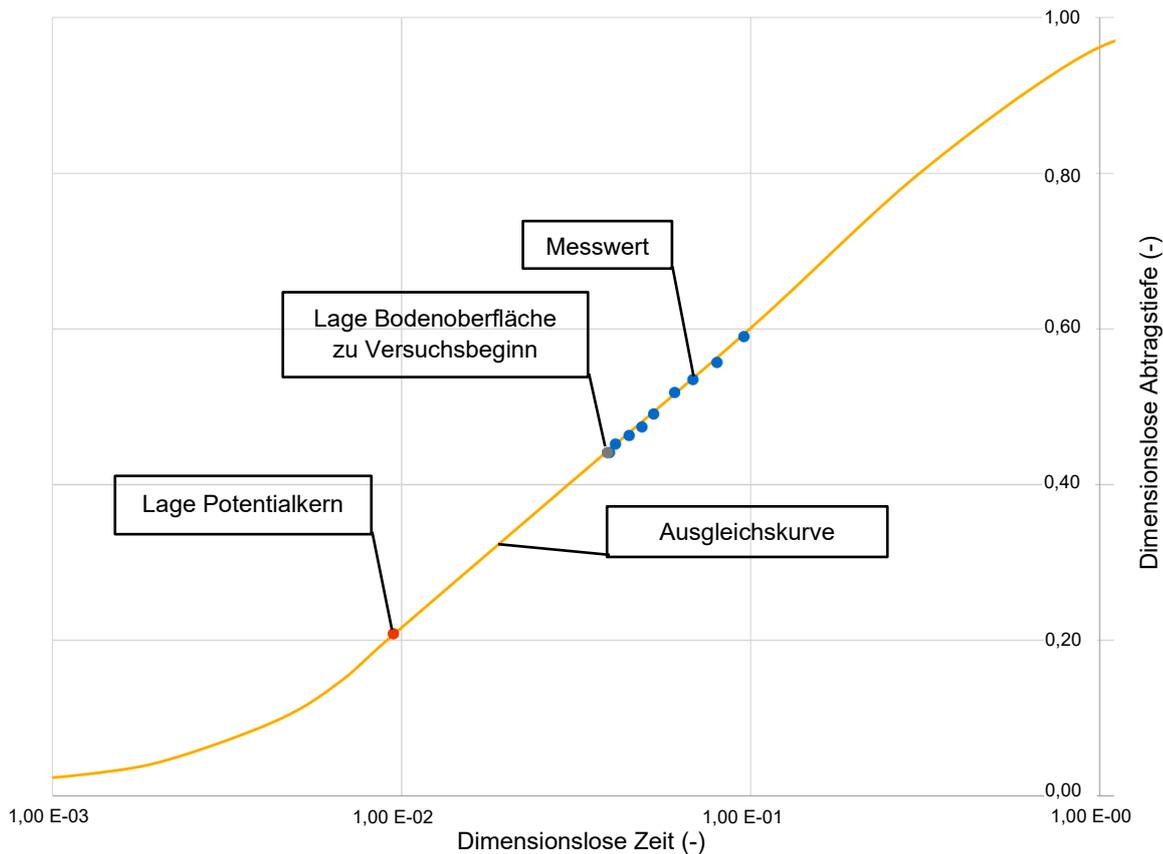


Abbildung 4-10: Grafische Darstellung des zweiten Auswertungsschritts zur Bestimmung von k_d in der implementierten Auswertungsroutine

Alternative Auswertungsroutinen

Alternative Methoden zeichnen sich insbesondere dadurch aus, dass die Parameter τ_c und k_d gleichzeitig bestimmt werden. Die Anpassung erfolgt hier jedoch nicht an theoretische dimensionslose Kennlinien, sondern direkt an die theoretische Abtragskurve. Hierbei werden die Parameter τ_c und k_d so optimiert, dass die resultierende theoretische Abtragslinie einen möglichst geringen Fehler zu den Messwerten aufweist. Die theoretische Abtragslinie kann dabei aus der Blaisdell-Formel oder direkt durch abschnittsweise Linearisierung aus dem linearen Schubspannungsüberschuss gewonnen werden. Ansätze dieser Form beschreiben z.B. Simon et al. (2010) (*Iterativ Approach*) oder Daly et al. (2013) (*Scour Depth Approach*) wobei diese Ansätze sich im Wesentlichen nur darin unterscheiden, wie die Startwerte für die Anpassung gefunden werden. Die Anpassung selbst erfolgt iterativ typischerweise über eine Bestimmung der kleinsten Fehlerquadrate, z.B. über den MS Excel Solver. Abbildung 4-11 zeigt für einen Beispieldatensatz, wie die theoretische Abtragskurve mit den beiden zu optimierenden Parametern an die Messwerte angepasst wird.

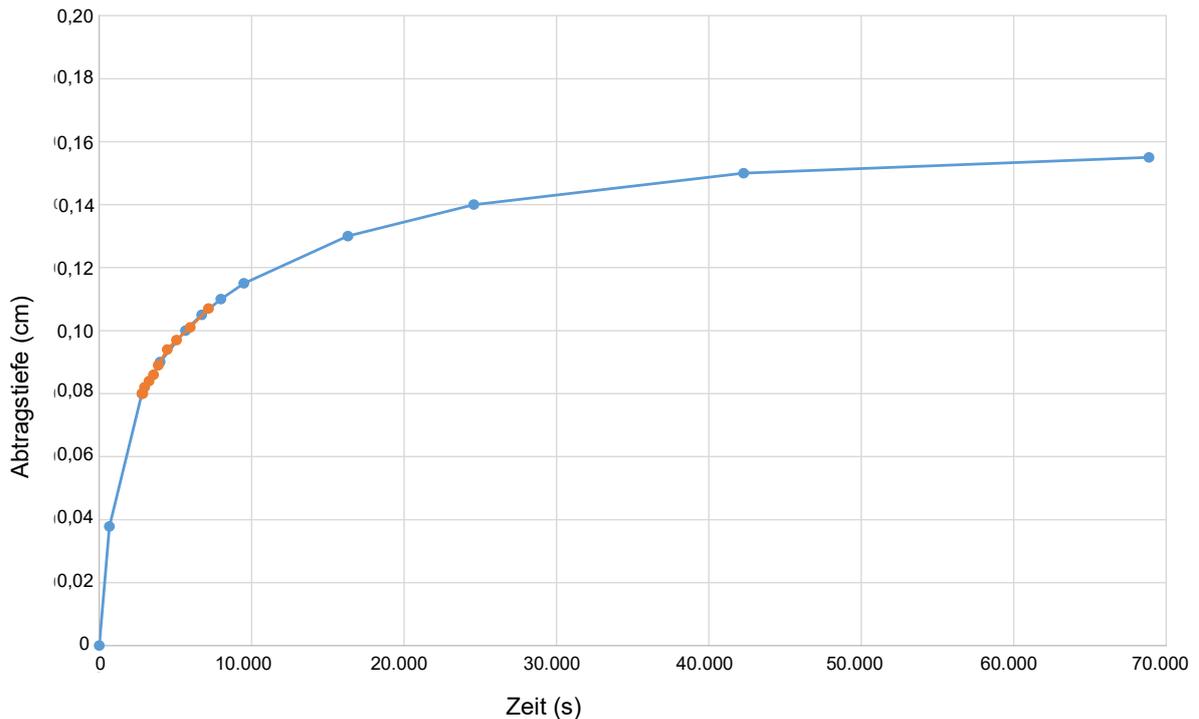


Abbildung 4-11: Theoretische Abtragskurve für optimierte Parameter τ_c und k_d (blau) und Messwerte (orange)

Der Erosionsraten-Ansatz (Cossette et al. 2012) nutzt ebenfalls den linearen Schubspannungsüberschuss. Im Unterschied erfolgt die Anpassung einer theoretischen Funktion an die Messwerte aber nicht durch die Erosionstiefe, sondern durch die Erosionsrate. Für jeden Messpunkt werden die wirksame Schubspannung sowie die Erosionsrate bestimmt und grafisch aufgetragen (siehe Abbildung 4-12). Auch hier erfolgt die Bestimmung der individuellen Punkte durch abschnittsweise Linearisierung. Durch die aufgetragenen Messpunkt wird eine Regressionsgerade gelegt. Der Schnittpunkt dieser Regressionsgerade mit der X-Achse entspricht τ_c , die Steigung k_d .

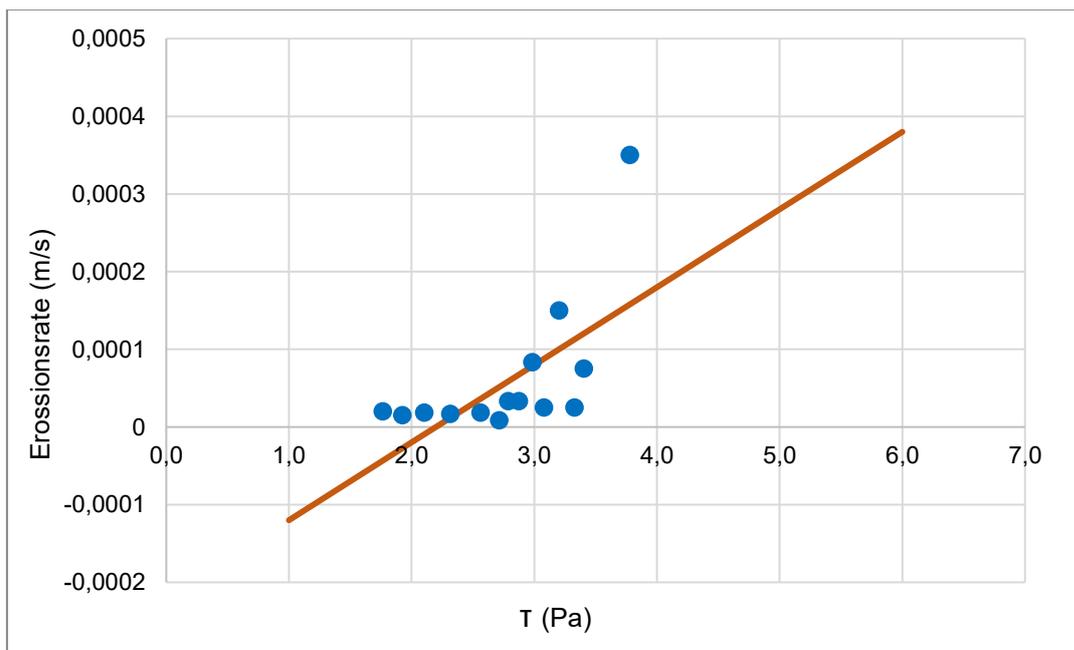


Abbildung 4-12: Erosionsrate und wirksame Schubspannung an den Messpunkten (blau) und Regressionsgerade (orange)

Alle drei gezeigten Methoden bauen auf einem vergleichbaren theoretischen Gebäude auf, die Unterschiede beziehen sich insbesondere darauf, wie die Schätzung der Parameter erfolgt.

4.3.5. Probeläufe mit einem Standardboden

Im Anschluss an Kalibrierung und Aufbau der Auswerteroutine wurden zunächst Probemessreihen zur Erarbeitung einer geeigneten Versuchsmethodik sowie zum Nachweis der Funktionsfähigkeit der Anlage und der Auswertungsalgorithmen durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurden auch Prozeduren für die Aufbereitung der Bodenproben etabliert und Anwendungsgrenzen für einen JET-Versuch erarbeitet.

Um den Einfluss des Bodenmaterials auf die Ergebnisse auszuschließen, wurden alle Versuche in dieser Phase mit dem gleichen Bodenmaterial, im Folgenden als Standardboden bezeichnet, durchgeführt. Um die Reproduzierbarkeit der Standardboden-Proben zu gewährleisten, kann nur mit aufbereiteten Proben, im Folgenden als Laborproben bezeichnet, gearbeitet werden.

Ein Probevolumen von etwa 30 kg wurde mit Genehmigung aus einer Baugrube in lehmigem Untergrund auf der grünen Wiese im Juli 2017 als Mischprobe entnommen (Eingang der Bodenprobe am 08.08.2017). Dieser Boden wurde zunächst mit Wasser vermischt, homogenisiert und anschließend bei 105 °C 24 Stunden getrocknet, zerkleinert und in verschlossenen Probeneimern gelagert.

Der so getrocknete Boden ermöglicht, dass der Wassergehalt für diese ersten Versuche präzise eingestellt werden kann, während für Feldproben nur der vorhandene Wassergehalt nachträglich bestimmt werden kann.

Mit dem aufbereiteten Standard wurden verschiedene Versuche zu einer geeigneten Verdichtung der Laborproben durchgeführt sowie dazu, welcher Wassergehalt sich für die Versuche mit Laborproben eignet. Weiter wurden mehrere Messungen mit identischer Bodenaufbereitung, aber verschiedenen Einstellungen der Anlage durchgeführt und die resultierenden Erosionsparameter verglichen, um so die Gültigkeit der Testmethode zu erproben. Auch wurden identische Proben- und Versuchsparameter von unterschiedlichen Personen wiederholt, um auch den subjektiven Aspekt bei der Versuchsdurchführung quantifizieren zu können.



Abbildung 4-13: Getrockneter Standardboden (links) und aufbereiteter Standardboden mit Wassergehalt = 15% (rechts)

Im Einzelnen wurden sechs Versuchsdurchgänge mit Proben gleichen Wassergehalts und gleicher Dichte (Standard) mit unterschiedlichen Standhöhen des JET durchgeführt. Weiterhin wurden sechs Vergleichsproben untersucht mit gegenüber dem Standard veränderten Wassergehalten und Dichten. Weiter wurde eine Vergleichsprobe (siehe Tabelle 4-1 – V3) unter identischen Bedingungen wie die vorangegangenen Standardproben getestet jedoch wurde der Versuch durch eine andere Person durchgeführt.

Tabelle 4-1: Übersicht über die Versuchsreihen mit dem Standardboden

| Bezeichnung | Wassergehalt (%) | Lagerungsdichte (g/cm ³) | Standhöhe JET (m) |
|-------------|------------------|--------------------------------------|-------------------|
| S1 (M3) | 15 | 2,10 | 1,68 |
| S2 (M4) | 15 | 2,02 | 1,68 |
| S3 (M5) | 15 | 2,13 | 1,83 |
| S4 (M6) | 15 | 2,17 | 1,83 |
| S5 (M7) | 15 | 2,08 | 1,43 |
| S6 (M8) | 15 | 2,04 | 1,43 |
| V1 (M1) | 5 | 1,63 | 1,68 |
| V2 (M2) | 10 | 1,79 | 1,68 |
| V3 | 15 | 1,98 | 1,83 |
| V4 | 20 | 1,97 | 1,20 |
| V5 | 12 | 1,94 | 1,72 |
| V6 | 6 | 1,66 | 1,72 |

Die detaillierten Ergebnisse der Versuche werden in Kapitel 5.3. beschrieben. Unabhängig von diesen Ergebnissen wurden die Versuche mit dem Standardboden jedoch, wie oben erwähnt, genutzt, um für die folgenden Versuchsreihen den Versuchsaufbau und die Auswertalgorithmen zu verifizieren und Protokolle für die Probenaufbereitung zu erarbeiten.

Für die 6 als Standard bezeichneten Proben (gleicher Boden, gleicher Wassergehalt, gleiche Dichte) konnte auch bei unterschiedlichen Standhöhen des JET (unterschiedliche wirkende Schubspannung) vergleichbare Erosionsparameter ermittelt werden. Dies zeigt, dass die Messmethode und die zugehörige Auswertungsroutine grundsätzlich valide Ergebnisse liefern können.

Aus den 6 Vergleichsversuchen konnten die Grenzen für minimalen und maximalen Wassergehalt der Proben ermittelt werden, die für eine Untersuchung in dem konstruierten JET-Messgerät geeignet sind. Dies umfasst ca. das Spektrum von 5 % bis 30 %. Bei deutlich kleineren Wassergehalten treten keine ausreichenden kohäsiven Kräfte auf, so dass der Bodenkörper auch bei geringen wirkenden Schubspannungen in kurzer Zeit vollständig erodiert wird. Bei deutlichen höheren Wassergehalten verhält sich der Boden im JET-Versuch wie ein zähes Fluid, so dass keine belastbaren Tiefenmessungen mehr möglich sind.

Weiterhin haben diese Versuche gezeigt, dass für die aufbereiteten Bodenproben eine Mindestdichte von ca. 1,2 g/cm³ erforderlich ist, da sonst vergleichbar mit zu niedrigem Wassergehalt keine ausreichenden Kohäsionskräfte innerhalb des Bodenkörpers wirken.

Für die 12 Standardversuche werden die drei vorgestellten, in der Literatur üblichen Methoden zur Auswertung der JET-Versuche getestet, um die Eignung des Messgeräts und der Auswertung für die im folgenden geplanten Untersuchungen zu bewerten. Tabelle 4-2 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Standard-Versuche.

Tabelle 4-2: Auswertung der JET-Versuche – Ergebnisse für drei getestete Ansätze zur Auswertung

| Versuch | Blaisdell | | Fitting | | Erosionsraten | |
|---------|---------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|
| | τ_c (Pa) | k_d (cm ³ /Ns) | τ_c (Pa) | k_d (cm ³ /Ns) | τ_c (Pa) | k_d (cm ³ /Ns) |
| V1 | 0,012 | 220 | 0,37 | 280 | 0,15 | 260 |
| V2 | 0,031 | 200 | 1,2 | 770 | 0,4 | 370 |
| S1 | 0,45 | 16 | 1,6 | 26 | 2,9 | 100 |
| S2 | 0,45 | 16 | 1,4 | 21 | 2,8 | 100 |
| S3 | 0,30 | 14 | 0,66 | 19 | 1,6 | 80 |
| S4 | 0,43 | 15 | 1,6 | 44 | 2,2 | 100 |
| S5 | 0,36 | 10 | 1,1 | 12 | 3,1 | 100 |
| S6 | 0,55 | 10 | 2 | 15 | 3,7 | 75 |
| V3 | 0,2 | 20 | 0,91 | 46 | 2,5 | 285 |
| V4 | 1,04 | 10 | 4,4 | 30 | 4,5 | 30 |
| V5 | 0,2 | 18 | 0,74 | 22 | 1,4 | 31 |
| V6 | 0,16 | 24 | 1,96 | 63 | 1,5 | 47 |

Es ist zu sehen, dass die ermittelten Erosionsparameter τ_c , und k_d zwischen den drei getesteten Methoden deutlich abweichen, wobei der Ansatz nach Blaisdell die niedrigsten kritischen Schubspannungen und der Ansatz der Erosionsraten die höchsten kritischen Schubspannungen liefert. Der Fitting-Ansatz liegt zwischen diesen Ergebnissen (Eine Ausnahme hiervon stellen die Vergleichsproben V1 und V2 dar.). Dies bedeutet, dass die Blaisdell-Routine die Proben erodibler einstuft, als dies die Fitting- und die Erosionsraten-Routinen tun. Für k_d zeigt sich ein gegenläufiges Ergebnis. Nach der Blaisdell-Routine werden auch hier nominell die niedrigsten Werte ermittelt, was jedoch der am wenigsten erodiblen Bewertung entspricht. Durch dieses gegenläufige Verhalten kann davon ausgegangen werden, dass die Einschätzung der Erodibilität der Proben zwischen den Routinen zumindest qualitativ vergleichbar ist.

Für alle drei Routinen zeigt sich, dass die 6 Standardproben S1 - S6 einen Unterschied von weniger als Faktor 2 aufweisen. Eine Ausnahme hiervon stellen die Werte für τ_c , in der Probe S3 für die Fitting- und Erosionsraten-Routine sowie der Wert für k_d in der Probe S4 für die Erosionsraten-Routine dar. Für diese drei genannten beträgt die Abweichung bis zu Faktor 3. Ergänzend kann auch festgestellt werden, dass sich die ermittelten Parameter für τ_c , und k_d für die 6 Standardproben auch innerhalb einer Auswertungsroutine ausgleichen, d.h. die Proben, welche eine höhere kritische Schubspannung aufweisen, zeigen dafür einen erodibleren Wert für k_d .

Die beschriebenen Trends lassen sich so grundsätzlich auch für die sechs Vergleichsproben feststellen. Diese weichen nominell etwas (V3 - V6) bis deutlich (V1, V2) stärker von den Standardproben ab. Die Auswertung für die Vergleichsproben V1 und V2 weicht dabei von den übrigen Versuchen dahingehend ab, dass hier die Fitting-Routine die höchsten kritischen Schubspannungen ermittelt.

Neben den ermittelten Erosionsparametern soll auch die Anpassungsqualität zwischen den Auswertungs-Routinen verglichen werden. Abbildung 4-14 zeigt exemplarisch die angepassten Abtragskurven für 2 Beispielproben mit den 3 Auswertungs-Routinen. Gewählt wurde ein Beispiel, das über alle Routinen eine gute Anpassungsqualität zeigt (V5) und eines, welches über alle Auswertungs-Routinen eine schwächere Anpassungsqualität (S4) zeigt. Die ermittelten Gleichgewichtstiefen betragen für V5 40 cm, respektive 21 cm, respektive 15 cm. Für S4 liegen sie bei 25 cm, respektive 13 cm, respektive 11 cm.

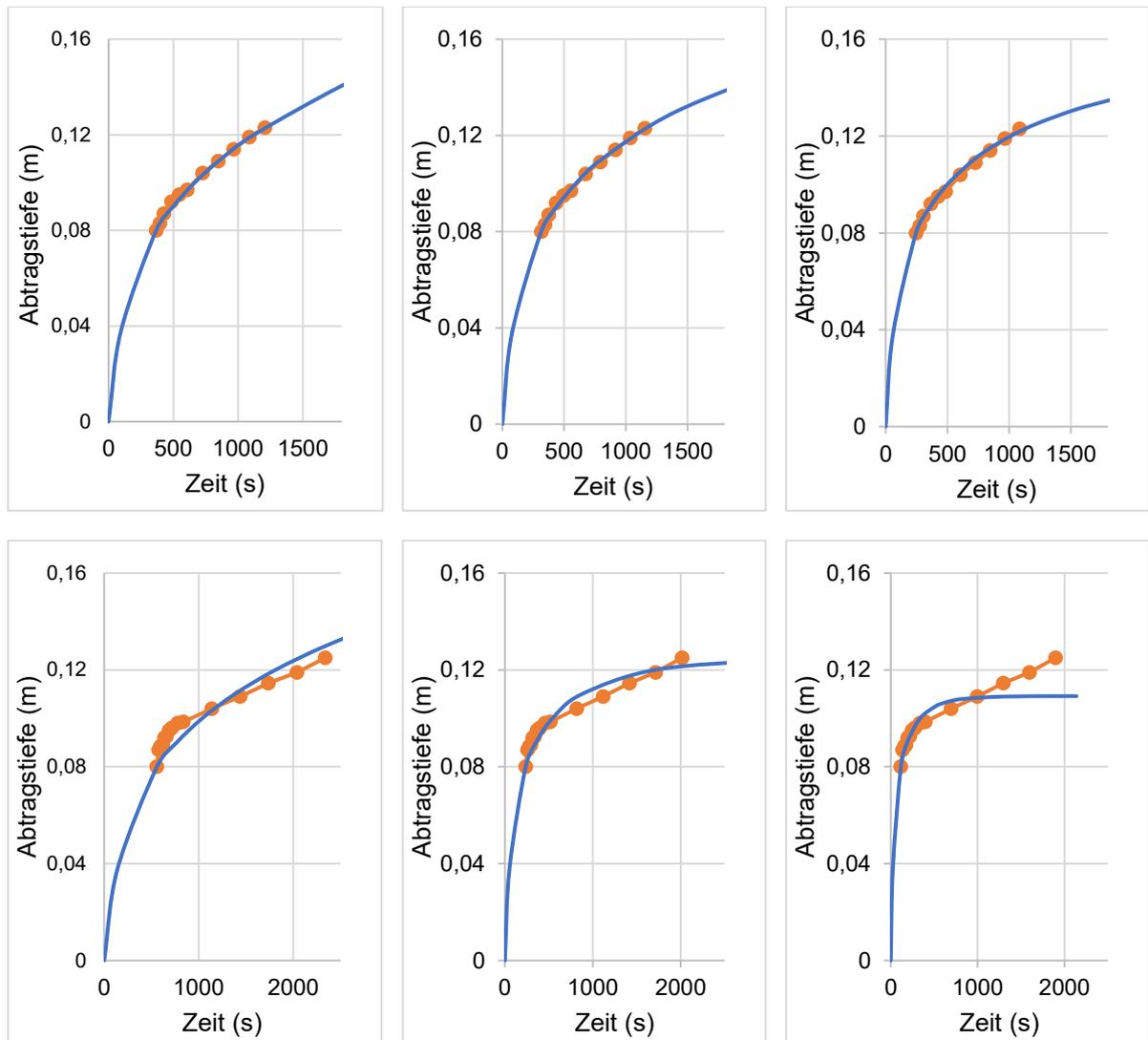


Abbildung 4-14: Auswertung der JET-Versuche über Anpassung der Messpunkte (orange) an eine theoretische Abtragskurve (blau); Auswertung über den Ansatz nach Blaisdell (links), Fitting (mitte) und Erosionsraten (rechts) für die Versuche V5 (oben) und S4 (unten)

Wie angesprochen, ist zu sehen, dass die Anpassungen für das obere Beispiel insgesamt besser gelingen als für das untere Beispiel. Dies bestätigt die aus den nominellen Parametern abgeleitete Erklärung zu dem gegenläufigen Verhalten von τ_c und k_d in der Form, als es zeigt, dass sich (zumindest für einige Versuche) verschiedene Kombinationen aus τ_c und k_d finden, welche in einer guten Anpassung an eine theoretische Kurve resultieren. Hierfür müssen die Parameter jedoch das beschriebene gegenläufige Verhalten zeigen.

Es lassen sich dennoch in beiden Beispielen die gleichen Effekte in den Anpassungs-Routinen erkennen, welche lediglich in dem unteren Beispiel ausgeprägter zu sehen sind. Für alle

Versuche (und auch für die Beispiele) zeigt sich, dass die Abtragsraten zu Beginn des Versuchs überproportional größer sind als gegen Ende des Versuchs. Gut zu erkennen, ist dies an den Abtragsraten in Abbildung 4-12. Dies fällt zusammen mit mehr Messungen zu Beginn des Versuchs. Dies ist darin begründet, dass zu Beginn des Versuchs hohe Abtragsraten vorliegen und damit kürzere Abstände zwischen den Messpunkten erforderlich werden. Da keine der Methoden bei der Anpassung eine Gewichtung der Messpunkte vornimmt, orientiert sich die Anpassung stark an den (vermeintlich) zu hohen Abtragsraten zu Beginn des Versuchs. Am stärksten ausgeprägt ist dieser Effekt in der Erosionsraten-Routine, da hier die tatsächliche Anpassung ebenfalls über die Erosionsraten geschieht. In der Fitting-Routine werden die hohen Abtragsraten durch die kurzen korrespondierenden Messdauern ausgeglichen und der Effekt fällt moderater aus. Die Blaisdell-Routine kann hier in den gezeigten Beispielen den sinnvollsten Ausgleich erzeugen.

Im ersten (oberen) Beispiel fällt außerdem auf, dass alle drei gezeigten Routinen eine optisch vergleichbar gute Anpassung erzeugen. Ein gleichzeitiges Fitting beider Parameter über kleinste Fehlerquadrate zeigt hier entsprechend ebenfalls nur sehr geringe Unterschiede in den ermittelten Fehler für die drei gezeigten Varianten.

Zuletzt zeigt sich in den Beispielauswertungen (nicht in Abbildung 4-14 zu sehen), dass die Fitting- und die Erosionsraten-Routine schlecht in der Lage sind, sehr kleine kritische Schubspannungen trennscharf zu bestimmen. Ein kleines τ_c bedeutet, dass die durchgeführte Messung deutlich oberhalb der Gleichgewichtstiefe liegt oder, anders gesagt, die wirkenden Schubspannungen während des Versuchs deutlich größer als die kritische Schubspannung sind. Die Wahl eines τ_c hat daher wenig Einfluss auf die Qualität der Anpassung. Die Blaisdell-Routine findet als einzige Methode einen Ansatz, die Gleichgewichtstiefe auch dann trennscharf zu bestimmen, wenn diese deutlich tiefer liegt als die durchgeführten Messungen. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass die beiden anderen getesteten Methoden nur sicher angewendet werden können, wenn im Voraus ein passender Schubspannungsbereich bestimmt werden kann.

4.4. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Nachdem im vorangegangenen Kapitel herausgearbeitet wurde, dass Aussagen zur Variabilität des Erosionswiderstands kohäsiver Böden messtechnisch nur aus kleinskaligen Versuchen abgeleitet werden können, wurden in diesem Kapitel zunächst die grundsätzlichen messtechnischen Ansätze betrachtet. Hierzu sei auch auf Hanson (1990) verwiesen, welcher die Ergebnisse des ASCE Task Committees on Erosion of Cohesive Materials (ASCE, 1968) wiedergibt, welche (u.a.) besonders die Bedeutung der Entwicklung kleiner Testgeräte betont, welche kontrollierte Bodenbedingungen inkl. Test an ungestörten Böden erlauben.

Die kleinskaligen Messapparaturen zeichnen sich besonders dadurch aus, dass der Aufwand für eine Messung ebenso wie der Eingriff in den zu testenden Boden gering ist. Innerhalb dieser Gruppe der kleinskaligen Messapparaturen wurde der JET Erosion Test nach Hanson (1990) ausgewählt, da dieser in der Gestaltung des Kraftangriffs verhältnismäßig nah am Phänomen Erosion durch Oberflächenabfluss liegt und ein großes Spektrum an Bodenproben inkl. ungestörter Proben und In-Situ Untersuchungen ermöglicht.

Im Folgenden wurde der im Rahmen dieser Studie am ihwb konstruierte JET vorgestellt. Die Konstruktion orientiert sich an der grundsätzlichen Bauform nach Hanson (1990), wobei Konstruktionshinweise nach Hanson & Simon (2001), Mazurek et al. (2001), ASTM Standard D5852-00 (2007) und Pinettes et al. (2011) berücksichtigt wurden. Da das Messgerät mit einem Standardstechzylinder (ideal zur Probenahme) verwendet wird, wurde die übrige Geometrie an diese definierten Maße angepasst. Zur Einstellung der benötigten Druckhöhe über der Düse wurde eine Konstruktion aus Pumpe und verstellbarer Standhöhe des JET gewählt. Dies ermöglicht mit technisch einfachen Mitteln, ein Spektrum an möglichen Druckhöhen zu erzeugen und ist gleichzeitig portabel.

Zur Verifizierung des entwickelten JET wurden zunächst Versuche mit Laborproben aus einem Standardboden genutzt. Es wurden 6 Standardversuche auf unterschiedlichen Standhöhen und damit unterschiedlichen wirksamen Schubspannungen durchgeführt. Mit dem gleichen Boden wurden 6 Vergleichsversuche bei abweichendem Wassergehalt und abweichender Proben-Lagerungsdichte durchgeführt (in Kapitel 5 folgen weitere Wiederholungsversuche zu Verifizierung der Methode). Die durchgeführten Versuche haben zunächst gezeigt, dass die Einführung eines standardisierten Messprotokolls im Rahmen der vorliegenden Studie nicht zielführend ist. Der Vergleich mit dem geltenden US-amerikanischen Standard ASTM Standard D5852-00 (2007) zeigt, dass das dort etablierte Messprotokoll (Druckhöhe, Anzahl Messungen und Messdauer) für deutlich weniger erodible Böden entwickelt wurde. Bei einem Vergleich mit Basisliteratur zu diesem technischen Standard, z.B. Hanson (1990) und Stein & Nett (1997) fällt auf, dass diese durchweg im Kontext der Stabilität von Dammstrukturen entstanden ist. Für die untersuchten Böden bedeutet dies, dass es sich um Böden mit hohen Tonanteilen, voll wassergesättigt und mit hoher Verdichtung handelt. Es ist also zu erwarten, dass diese Böden deutlich weniger erodibel sind als der untersuchte Standardboden bzw. die in den folgenden Messkampagnen untersuchten Böden (siehe Kapitel 5). Für das Messprotokoll hat dies zur Folge, dass insbesondere die Empfehlungen zu Messdauer und Messzeitpunkten für die hier untersuchten Böden nicht geeignet waren. Auch für die hier untersuchten Böden lässt sich bereits aufgrund der Unterschiede in der Erodibilität keine standardisierte Messdauer vorgeben. Ein solches standardisiertes Messprotokoll erfordert ein deutlich größeres Spektrum an realisierbaren Schubspannungen, was z.B. durch austauschbare Pumpen umgesetzt werden könnte.

Zur Auswertung der Versuche wurden insgesamt drei verschiedene in der Literatur publizierte (teil-) automatisierte Routinen getestet. Die Basis für alle Routinen ist, dass die zwei Parameter τ_c und k_d für den linearen Schubspannungsüberschuss geschätzt und eine theoretische Funktion so an die Messwerte angepasst wird, dass der Fehler möglichst klein ist. Ansätze, die ohne die Nutzung einer kritischen Schubspannung auskommen (1-parametrische Funktionen) oder eine nicht-lineare Beziehung zwischen Schubspannung und Abtrag unterstellen, wurden im Rahmen dieser Studie nicht getestet, da sie (aktuell) wenig Praxisrelevanz haben. Für einen Vergleich dieser Ansätze siehe z.B. Karamigolbaghi et al. (2017).

Im direkten Vergleich zeigt sich, dass die Blaisdell-Routine die niedrigsten und die Erosionsraten-Routine durchweg die höchsten kritischen Schubspannungen liefert. Der Wert für k_d ändert sich entsprechend, so dass die Erodibilität insgesamt zumindest qualitativ ausgewogen bleibt. Für die Fitting-Routine zeigt sich, dass das automatisierte Fitting nicht immer stabile Ergebnisse liefert. Es finden sich Beispiele, in denen für das gleichzeitige Fitting zwei unterschiedliche Parametersätze gefunden werden können, welche nahezu identisch in Bezug auf die Anpassungsqualität sind. Auch hier zeigt sich das beschriebene Phänomen, dass die Gesamterodibilität nicht beeinflusst wird, dennoch konterkariert die Existenz gleich guter, aber deutlich abweichender Ergebnisse den Ansatz einer automatisierten Auswertung. Zu vergleichbaren Ergebnissen kommen auch Hanson & Cook (1997) in ihrem ursprünglichen Vergleich verschiedener Auswertemethoden, in welchen das gleichzeitige Fitting als Methode 1 getestet wird. Abweichend hiervon nutzen diese Methode z.B. Simon et al. (2010), Pinettes et al. (2011) und Daly et al. (2015), welche jeweils stabile Ergebnisse der Methode bei einer Lösung mit dem MS Excel Solver postulieren. Die Erosionsraten-Routine liefert typischerweise eine besonders hohe kritische Schubspannung (siehe z.B. Cossette et al. 2012). In den hier untersuchten Beispielen ist dies in auffällig hohen Erosionsraten zu Versuchsbeginn begründet, welche die Regressionsgerade steiler werden lassen und in hohen kritischen Schubspannungen resultieren.

Es zeigt sich, dass Unterschiede in den verschiedenen Auswerterroutinen vor allem darin bestehen, dass diese den Bereich des Abtragsprozesses, in dem die Probe getestet wurde, anders bewerten oder, in anderen Worten, zu einer anderen Bewertung, wie weit die Tiefe des Versuchs von der Gleichgewichtstiefe entfernt liegt, führen. Der Methodenvergleich für die Standardversuche zeigt also einige Ansatzpunkte für die weitere Untersuchung einer optimalen Auswertung der JET-Versuche. Dies geht jedoch über den Rahmen dieser Arbeit hinaus.

Unabhängig von der verwendeten Auswerterroutine zeigt sich, dass Abtragsraten in der ersten Phase des Versuchs durchweg höher sind, als die Theorie vorsieht. Hier sind verschiedene Erklärungen denkbar. Als konstruktiv schwierig wurde der Tiefenmesser vorgestellt. Zu Beginn des Versuchs werden sehr kurze Abtragsintervalle verwendet, so dass schon kleine Ungenauigkeiten bei der Tiefenmessung zu einer deutlichen Erhöhung der Erosionsrate führen können. Auch die Hydrodynamik des JET könnte hier möglicherweise eine Ursache darstellen. Nach einer Tiefenmessung wird der Tiefenmesser aus der Düse gezogen, so dass sich ein stationärer Strahl einstellen kann. Die Bodenoberfläche ist jedoch durch die Abdeckplatte geschützt, so dass sich der umgelenkte Strahl einige Zentimeter über der Bodenoberfläche einstellt. Bei Öffnung der Abdeckplatte tritt ein kurzer instationärer Moment auf, in welchem sich der Strahl diese wenigen Zentimeter nach unten verlagert. Es kann vermutet werden, dass diese kurze Phase der Instationarität mit kurzzeitigen höheren Schubspannungen und geringfügig erhöhten Abträgen korrespondiert, welche sich in der Anfangsphase eines JET-

Versuchs mit vielen Abtragsmessungen summieren. Das skizzierte Phänomen könnte aber gezielt untersucht werden, z.B. unter Nutzung hochaufgelöster 3D – CFD-Simulationen.

Denkbar ist, dass die zugrundeliegende Theorie der linearen Beziehung zwischen Schubspannung und Abtrag die vorliegende Abtragsituation nicht zutreffend beschreibt. Untersuchungen von z.B. Khanal et al. (2016) zeigen, dass die Wahl eines Exponenten > 1 für den Schubspannungsüberschuss die Abtragsituation in den untersuchten Fällen treffender beschreibt. Khanal et al. (2016) zeigen außerdem, dass in Abtragskurven über einen weiten Bereich der wirkenden Schubspannung trotz einer insgesamt nicht-linearen Beziehung lineare Abschnitte auftreten und vermuten, dass diese der Ursprung der postulierten linearen Theorie sind. Auch hieran kann potentiell ein Ansatzpunkt gesehen werden, warum die unterschiedlichen Auswertemethoden die Lage des Versuchs relativ zur Gleichgewichtstiefe anders verorten.

Bei einem Vergleich mit der verfügbaren Literatur zeigen sich darüber hinaus offene Frage in Bezug auf das theoretische Gebäude des JET bzw. die räumliche und zeitliche Verteilung der auf die Probenoberfläche wirkenden Schubspannung. Fraglich ist hier zum einen die Theorie zur Energiedissipation im Strahl unter Beachtung der Gerätegeometrie (*confinement*, siehe hierzu z.B. Ghaneeizad et al. (2015)). Auf der anderen Seite berücksichtigt die Schubspannungsverteilung auf der Probenoberfläche in dem theoretischen Gebäude nicht die Veränderungen durch den laufenden Versuch. Die Theorie geht von einem 90° umgelenkten Strahl auf einer glatten Oberfläche aus, während sich diese Bedingungen im Laufe des Versuchs z.T. deutlich verändern. Auch für diese Fragen sei darauf verwiesen, dass hochaufgelöste CFD-Simulationen das Potential haben, die Theorie hier weiter zu verbessern.

Trotz dieser skizzierten Unschärfen bei der Auswertung der Versuche kann gezeigt werden, dass die Methode insgesamt valide Ergebnisse liefert. Für die 6 Standardversuche konnten (innerhalb jeder Auswertungsmethode) konstante Ergebnisse für die Erosionsparameter erzielt werden, obwohl die Versuche mit abweichenden Druckhöhen durchgeführt wurden. Für die 6 Vergleichsversuche zeigen sich Abweichungen der Ergebnisse von diesem Standard, die passend zu den Veränderungen der Bodeneigenschaften erscheinen. Weiter kann gezeigt werden, dass bei zunehmender kritischer Schubspannung die Erodibilität entsprechend dieser etablierten Beziehung zunimmt und die Gesamterodibilität der Probe damit gleichbleibend ist. Auch wenn die oben etablierten Punkte Anlass geben, die ermittelten Absolutwerte in Frage zu stellen, kann festgehalten werden, dass die qualitativen Beziehungen in allen Auswertemethoden ein geschlossenes Bild ergeben. Die qualitative Einschätzung zum Erosionswiderstand einer Probe kann also als belastbar angesehen werden. Diese Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen, die aus der verfügbaren Literatur gewonnen werden. Beispielsweise kann in Studien von Simon et al. (2010) oder Pinettes et al. (2011) festgestellt werden, dass unterschiedliche Auswerterroutinen stark abweichende Ergebnisse in Bezug auf die Absolutwerte der Erodibilität zeigen. Die qualitative Einschätzung zur Erodibilität wird jedoch in allen Studien als belastbar eingeschätzt. In gleicher Weise kann auch festgestellt werden, dass die qualitative Bewertung zur Erodibilität einer Probe zwischen unterschiedlichen Geräten konstant bleibt, auch wenn hier die Absolutwerte deutliche Unterschiede aufweisen. Wahl (2010) vergleicht JET-Messungen mit HET-Messungen und kommen zu dem Ergebnis, dass die Absolutwerte bis zu zwei Zehnerpotenzen abweichen, die qualitative Bewertung der Proben jedoch deckungsgleich ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Konstruktion des JET nach den definierten Anforderungen gelungen ist. Insbesondere der Ansatz, verschiedene Druckhöhen über eine Pumpe in Verbindung mit unterschiedlichen Standhöhen zu erzeugen, hat sich als stabil und gut sowie einfach umsetzbar erwiesen. Die technisch größte Herausforderung – die Konstruktion des Tiefenmessers - konnte für die Anforderungen dieser Untersuchung zufriedenstellend umgesetzt werden. Dennoch zeigt sich der Tiefenmesser als kritisches Bauteil für die Qualität der JET-Messungen. Weitere Ansätze zur Konstruktion wären hier vorteilhaft. Es konnte gezeigt werden, dass das etablierte Messprotokoll entsprechend ASTM Standard D5852-00 (2007) für den Kontext der Erosion kohäsiver (und erodibler) Böden durch Oberflächenabfluss wenig geeignet ist, da die Böden deutlich erodibler sind als Böden, in deren Kontext der Standard entwickelt wurde. Für Böden in diesem Kontext existiert kein standardisiertes Messprotokoll, was die Vergleichbarkeit von Messungen erschwert, da z.B. der genannte Effekt der Abtragsraten zu Beginn des Versuchs zwischen verschiedenen Studien und auch innerhalb einer Studie unterschiedlich ausgeprägt ist.

Der JET ist ein vielversprechendes Messgerät. Dennoch zeigen sich Defizite und offene Fragen in der zugrunde liegenden Theorie zu dem Gerät selbst sowie insbesondere ein ausreichendes Maß an Studien, das sich mit dem Themenfeld Bodenerosion durch Oberflächenabfluss beschäftigt. Bis dato ist der Schwerpunkt der JET-Anwendungen in der Dammstabilität und damit im Bereich künstlich und gezielt verdichteter sowie voll wassergesättigter Böden.

5. Exemplarische Untersuchungen mit dem JET Erosion Test

Im folgenden Kapitel werden aufbauend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 4 exemplarische Fragestellungen zur Erodibilität mit dem konstruierten JET untersucht. Hierfür wird das Fischbach-Einzugsgebiet im Vorderen Odenwald als Studiengebiet gewählt, da dieses als Feldlabor für das Fachgebiet ihwb genutzt wird. Die Arbeiten sind eingebettet in weitere Untersuchungen zu Geologie und Böden im Fischbach-Einzugsgebiet, welche hier teilweise mit vorgestellt werden. In Kapitel 5.1 werden das Fischbach-Einzugsgebiet vorgestellt sowie die notwendigen Kriterien, um möglichst repräsentative Aussagen zum Mittelgebirge und dem Vergleich mit dem Gebiet Scheyern zu erhalten. Hierauf aufbauend wird eine GIS-basierte Suche nach einem geeigneten Testhang sowie die anschließende Bohrstockkartierung der potentiellen Hänge skizziert. In Kapitel 5.2 werden die durchgeführten Messkampagnen im Feld sowie die Auswertungsmethoden im Bodenlabor und in der Wasserbauhalle beschrieben. Kapitel 5.3 zeigt Ergebnisse zu den exemplarischen Fragestellungen zur Erodibilität von kohäsiven Böden, insbesondere zur Bedeutung von konstanten und variablen Bodeneigenschaften. Die Ergebnisse werden in Kapitel 5.4 diskutiert und in einen Kontext mit anderen Studien gebracht.

5.1. Auswahl von Testhängen

Erkenntnisse zum Erosionswiderstand des Oberbodens sollen primär aus Feldproben des deutschen Mittelgebirges gewonnen werden. Der entwickelte JET (Kapitel 4.3) zeigt insbesondere zwei große Stärken, die bei der Versuchskampagne genutzt werden. Dies ist zum einen der Betrieb mit Standardstechzylindern. Hierdurch ist es möglich, typische Stechzylinderfeldproben, d.h. ungestörte Oberflächenproben, zu testen, so dass ein Teil der Kampagnen auch den Vergleich von gestörten mit ungestörten Oberflächenproben umfassen kann. Zum anderen kann durch die gewählte Konstruktion eine große Bandbreite an Schubspannung auf die Probe aufgebracht werden. Beide Aspekte sind wesentlich für die Arbeit mit Feldproben. Die Feldkampagnen werden innerhalb des Fischbach-Einzugsgebiets, dem hydrologischen Feldlabor des ihwb, durchgeführt. Im folgenden Kapitel wird zunächst das Studiengebiet Fischbachtal vorgestellt, anschließend werden die wesentlichen Kriterien für einen geeigneten Versuchsstandort, die GIS-basierte Standortsuche und die Standortauswahl beschrieben. Zuletzt folgt die methodische Erörterung der durchgeführten Feldkampagnen.

5.1.1. Studiengebiet Fischbach-Einzugsgebiet

Zur Analyse des Fischbach-Einzugsgebiets lagen die Studie von Schmalz & Kruse (2019) sowie verschiedene Datensätze vor. Letztere umfassen insbesondere das Digitale Geländemodell 1 m (DGM1) (HVBG 2017b), die geologische Übersichtskarte 1:200.000 (GÜK200) (BGR 2017), die geologische Karte 1:25.000 (GK25) (HLNUG 2017b), die Bodenflächendaten 1:50.000 (BFD50) (HLNUG 2017a) sowie der topographisch-kartographische Datensatz ATKIS® (HVBG 2017a).

Das Fischbach-Einzugsgebiet liegt im vorderen Odenwald in Südhessen und ist Teil des Einzugsgebiets der Gersprenz. Die Gersprenz verläuft von der Quelle auf der Neunkircher Höhe durch den kristallinen Odenwald und das Reinheimer Hügelland und mündet in der Untermainebene bei Stockstadt in den Main (Abbildung 5-1, Abbildung 5-3). Insgesamt umfasst das Einzugsgebiet der Gersprenz 513 km². Der Fischbach ist ein linksseitiges Nebengewässer, das bei Groß-Bieberau in die Gersprenz mündet. Das Einzugsgebiet des Fischbachs hat eine

Größe von 38 km² und umfasst die beiden Gewässerläufe Fischbach und Rodauer Bach, wobei letzterer kurz vor der Ortslage Groß-Bieberau in den Fischbach mündet.

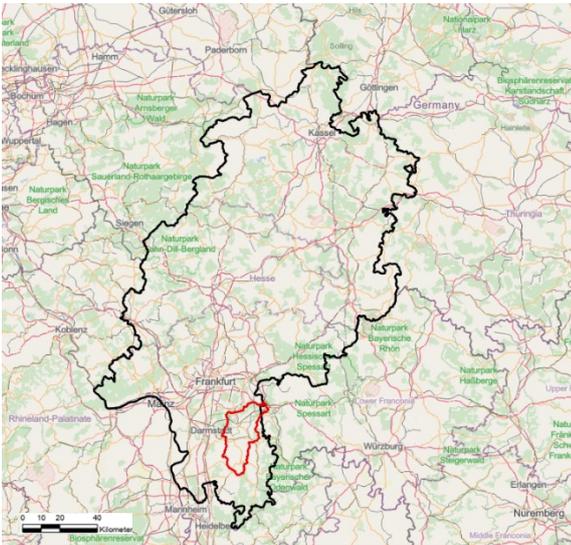


Abbildung 5-1: Lage des Gersprenz-Einzugsgebiets in Hessen

Die Lage in Südhessen bedeutet ein kühlgemäßigtes Klima mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 9,3 °C und 1005 mm Jahresniederschlag. In den Sommermonaten herrschen monatliche Durchschnittstemperaturen von 13,7 bis 15,9 °C, in den Wintermonaten liegen die Temperaturen zwischen 2,4 und 5,2 °C. Der Jahresniederschlag fällt weitgehend gleichmäßig mit geringfügig trockeneren Frühjahr- und Herbstmonaten und feuchteren Sommer- und Wintermonaten (Abbildung 5-2) (DWD CDC 2022, Modautal-Neunkirchen, 1991 - 2020).

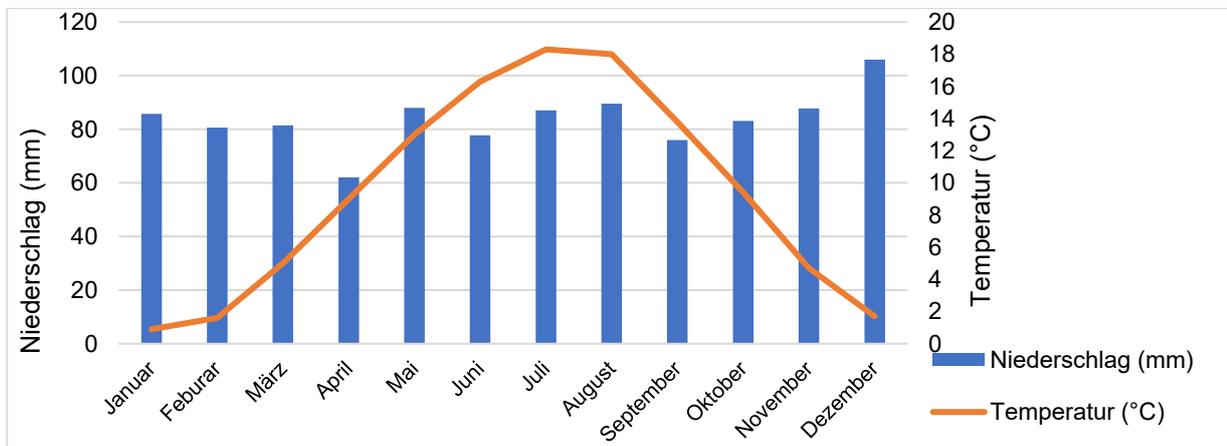


Abbildung 5-2: Klimadiagramm für die Station Modautal-Neunkirchen (DWD CDC (2022)): Niederschlag durchschnittliche Monatssumme, Temperatur monatliche Durchschnittstemperatur

Der Fischbach entspringt auf der Neunkircher Höhe am Rand der Ortslage Modautal-Lützelbach auf einer Höhe von ca. 400 m ü. NHN. Er mündet nach einer Fließstrecke von rd. 10 km bei Groß-Bieberau auf einer Höhenlage von ca. 160 m ü. NHN in die Gersprenz (Abbildung 5-4). Dies entspricht einem mittleren Gefälle des Bachlaufs von ca. 2 %.

Die Geologie ist von der Lage im vorderen bzw. kristallinen Odenwald geprägt. Dieser ist die westliche der beiden naturräumlichen Einheiten des Odenwalds, einem Teil des rd. 320 bis 380 Mio. Jahre alten variszischen Gebirges. Er ist gleichzeitig das Grundgebirge der nach Osten anschließenden naturräumlichen Einheit, dem Buntsandstein-Odenwald (Abbildung 5-3).

Innerhalb des kristallinen Odenwalds liegt das Fischbachtal in der Flasergranitoid-Zone und ist primär geprägt von Granitoiden und Grano-Dioriten. Im Norden des Gebiets verläuft ein Amphibolitzug. Vereinzelt Hänge im Nordwesten sind von Lössschichten bedeckt (Abbildung 5-4). Der Grundwasserhaushalt ist geprägt von Kluftsystemen im kristallinen Grundgebirge.

Die Landnutzung im Gebiet ist vor allem forst- und landwirtschaftlich geprägt. Der Waldanteil am gesamten Einzugsgebiet liegt bei ca. 50 %, davon entfallen ca. 44 % auf Mischwald. Die landwirtschaftlich genutzten Flächen machen ca. 42 % des Einzugsgebiets aus. Es überwiegen Weideflächen (ca. 20 %) und Ackerstandorte (ca. 20 %), letztere vor allem für den Anbau von Wintergetreide (Abbildung 5-4).

Im Fischbachtal liegen die Gemeinden Fischbachtal und Groß-Bieberau, wobei erstere den größten Teil des Einzugsgebiets einnimmt. Der Anteil der Siedlungsflächen am Einzugsgebiet liegt bei 6,5 %, so dass eine im Mittel dünne Besiedlung vorherrscht.

Die Böden im Gebiet sind dominiert von Braunerden mit Vergrusungszonen über dem kristallinen Grundgebirge. Bis zu der Vergrusungszone bzw. dem Cv-Horizont weisen die Braunerden eine mittlere Mächtigkeit von ca. 50 cm auf, mit einer typischen Ah/BBv/CCv Horizontfolge. Die Bodenarten der Braunerden reichen von Lehmschluffen in den oberen Horizonten zu schluffigen oder lehmigen Sanden mit hohen Grobbodenanteilen in den tieferen Horizonten (Vergrusungszonen). Diese Böden bedecken den größten Teil des Fischbachtals und kommen an Kuppen, Hängen und in Umlagerungszonen vor (Abbildung 5-4).

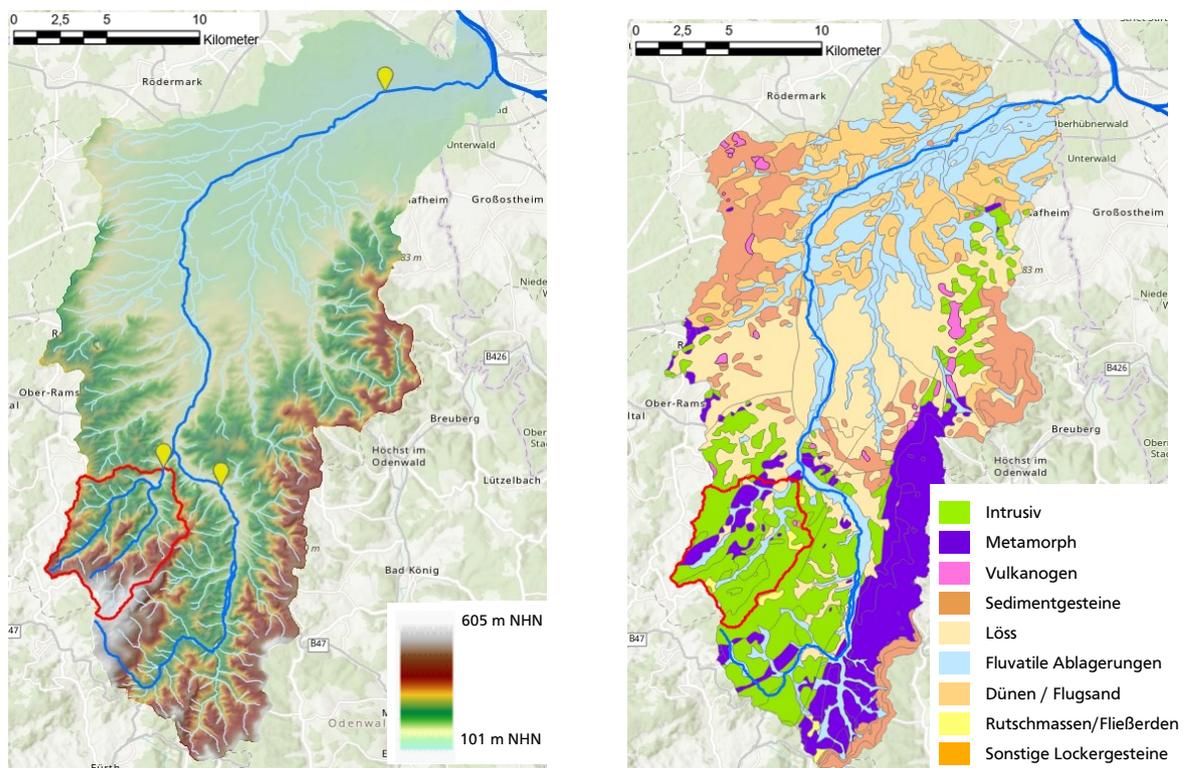


Abbildung 5-3: Einzugsgebiet Fischbach innerhalb Gersprenz-Einzugsgebiet, Topographie (DGM1) und Gewässerpegel (links) sowie Geologie (rechts) (GÜK 200)

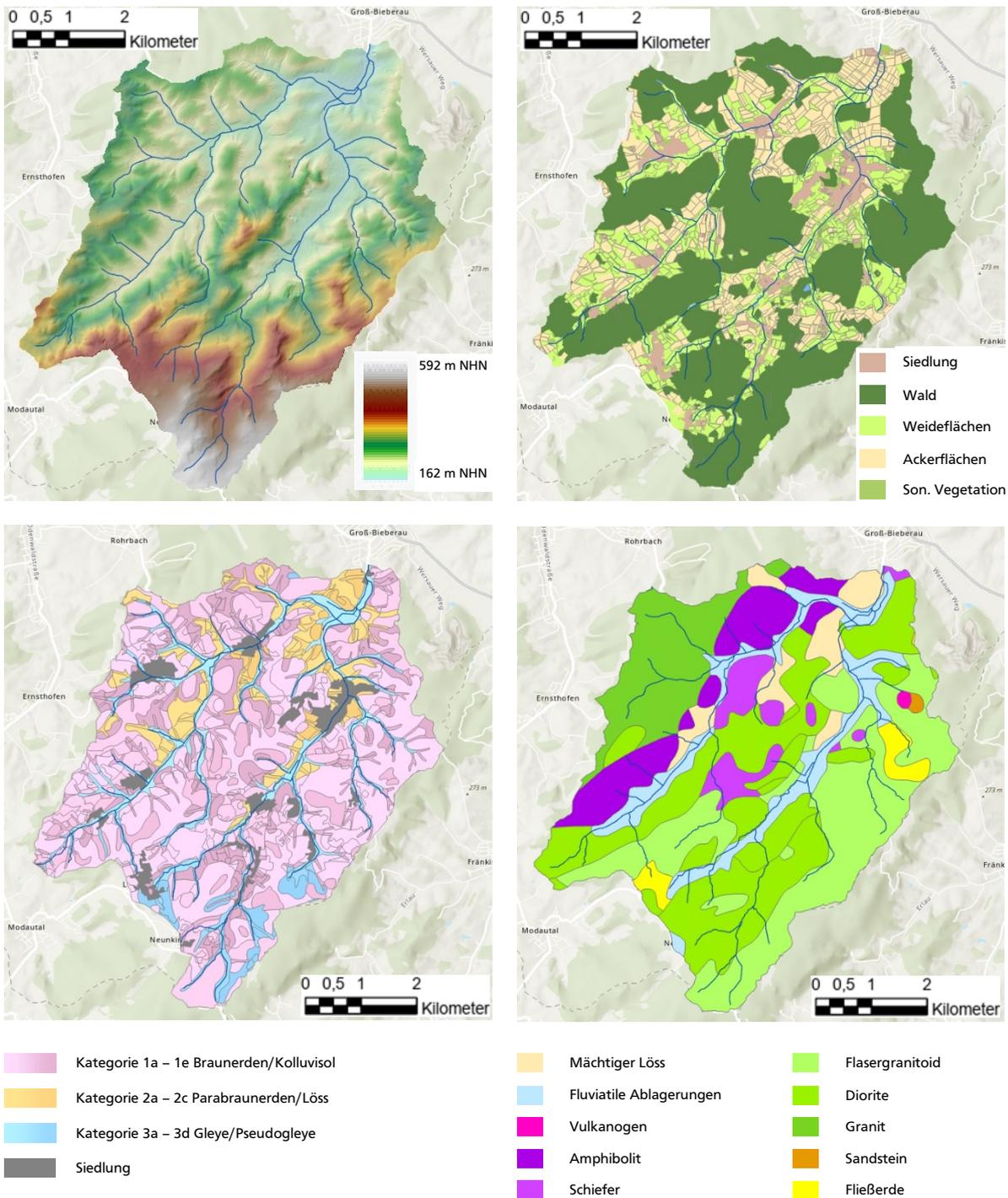


Abbildung 5-4: Einzugsgebiet Fischbach, Topographie (links oben) (DGM1), Flächennutzung (rechts oben) (ATKIS), Böden (links unten) (BFD 50) und Geologie (rechts unten) (GÜK 200)

Insbesondere in den Tälern finden sich vereinzelt nässe-geprägte Gley-Böden. Im unteren Teil des Gebiets, insbesondere an ausgeprägten Westhängen, überwiegen Böden aus Lössauffüllungen, vor allem Parabraunerden und vereinzelt Pararendzina. Diese zeigen insbesondere größere Mächtigkeiten (bis 2 m), enge Korngrößenverteilungen im Schluff (Schluffanteile 80 – 100 %) und keine Grobbodenanteile auch bis in tiefere Horizonte. Die Parabraunerden weisen dabei ausgeprägte Horizonte mit einer charakteristischen tonhaltigen Stauschicht im B-Horizont auf. Die Pararendzina sind dagegen weniger entwickelte Böden, die im Gebiet charakteristisch für diese Bodenart keinen B-Horizont zeigen.

Informationen zu Abflüssen aus dem Fischbachtal liegen vor allem am Pegel Groß-Bieberau 2 vor. Dieser liegt am Ortseingang der Ortslage Groß-Bieberau und wird vom Regierungspräsidium Darmstadt betrieben. Hier finden kontinuierliche Wasserstandsmessungen statt, ein eingemessenes Pegelprofil sowie eine Pegelschlüsselkurve liegen vor. Weiter werden seit 2016 am gleichen Standort auch kontinuierliche Wasserstandsmessungen durch das ihwb durchgeführt. Wöchentliche Messungen von Abfluss und Wasserstand liegen außerdem für 16 Standorte entlang der Gewässerläufe im Fischbachtal vor.

5.1.2. Standortkriterien und Standortsuche

Als Schwerpunkt der Untersuchungen im Fischbachtal soll ein Hang gefunden werden, der zum einen repräsentativ für einen landwirtschaftlich genutzten Hang im deutschen Mittelgebirge ist, zum anderen vergleichbare Charakteristika wie der Testhang im Modellgebiet Scheyern aufweist, um eine gewisse Vergleichbarkeit zwischen den Erkenntnissen aus der Modellierung und der Messung zu ermöglichen.

Zur Identifikation eines geeigneten Hangs werden Kriterien definiert und zunächst GIS-basiert (Arc GIS 10.5.1) hierzu passende Gebiete bzw. Hänge gesucht. Die vorausgewählten Hänge werden durch Begehung und ggf. anschließende Bohrstockkartierung weiter auf ihre Eignung für das Forschungsvorhaben untersucht. Folgende Randbedingungen bzw. Idealbedingungen für den Testhang werden definiert:

- **Lage innerhalb des ihwb Feldlabors Fischbachtal**
Dies garantiert eine besonders hohe Datenverfügbarkeit. Das Gersprenz-Gebiet weist weiter im Unterstrom (Reinheimer Hügelland) größere Lössgebiete auf, diese sollen jedoch außen vor bleiben.
- **Lössboden**
Vorzugsweise ein Boden mit C-Horizont (reiner Löss) in Teilen auf der Oberfläche ausstreichend, aber zumindest mit Bohrstock erreichbar.
- **Größe ca. 4 ha**
Vergleichbar zum TEZG 03 in Scheyern.
- **Fließweg / Fließlänge ca. 300 m**
Vergleichbar mit TEZG 03 in Scheyern; Beginn an lokaler Wasserscheide, d.h. der Fließweg ist als absoluter Wert ab Wasserscheide und nicht relativ auf dem Hang zu verstehen.
- **Gefälle und komplexe Topographie**
Vergleichbar zum TEZG 03 in Scheyern (Mittelwert Gefälle ca. 12 - 13 %; Standardabweichung Gefälle ca. 5 %, Umfang Gefälle ca. 0 - 50 %)
- **Klassische Bewirtschaftung**
Z.B. Kartoffeln, Getreide, Rüben, etc. (landwirtschaftliche Fläche, aber keine Weidefläche, kein explizierter Ökolandbau oder besondere Anbauform).
- **Klimatische Bedingungen**
Sind in Gebieten des deutschen Mittelgebirges grundsätzlich ausreichend vergleichbar.

Die genannten Kriterien umfassen zunächst rein quantitative Informationen, wie Größe des EZG, Länge des Fließwegs, Größe und Gefälle des Ackerschlags. Für diese Kriterien werden

jeweils rote, gelbe und grüne Werte-Bereiche definiert, also jeweils eine sehr gut geeignete Wertespanne, welche nah um den Wert in Scheyern liegt, ein mäßig gut geeignete und eine nicht geeignete. Grundlage für alle Auswertungen ist das DGM1, aus dem u.a. Einzugsgebietsgrenzen und Fließwege ermittelt werden (siehe Abbildung 5-5).

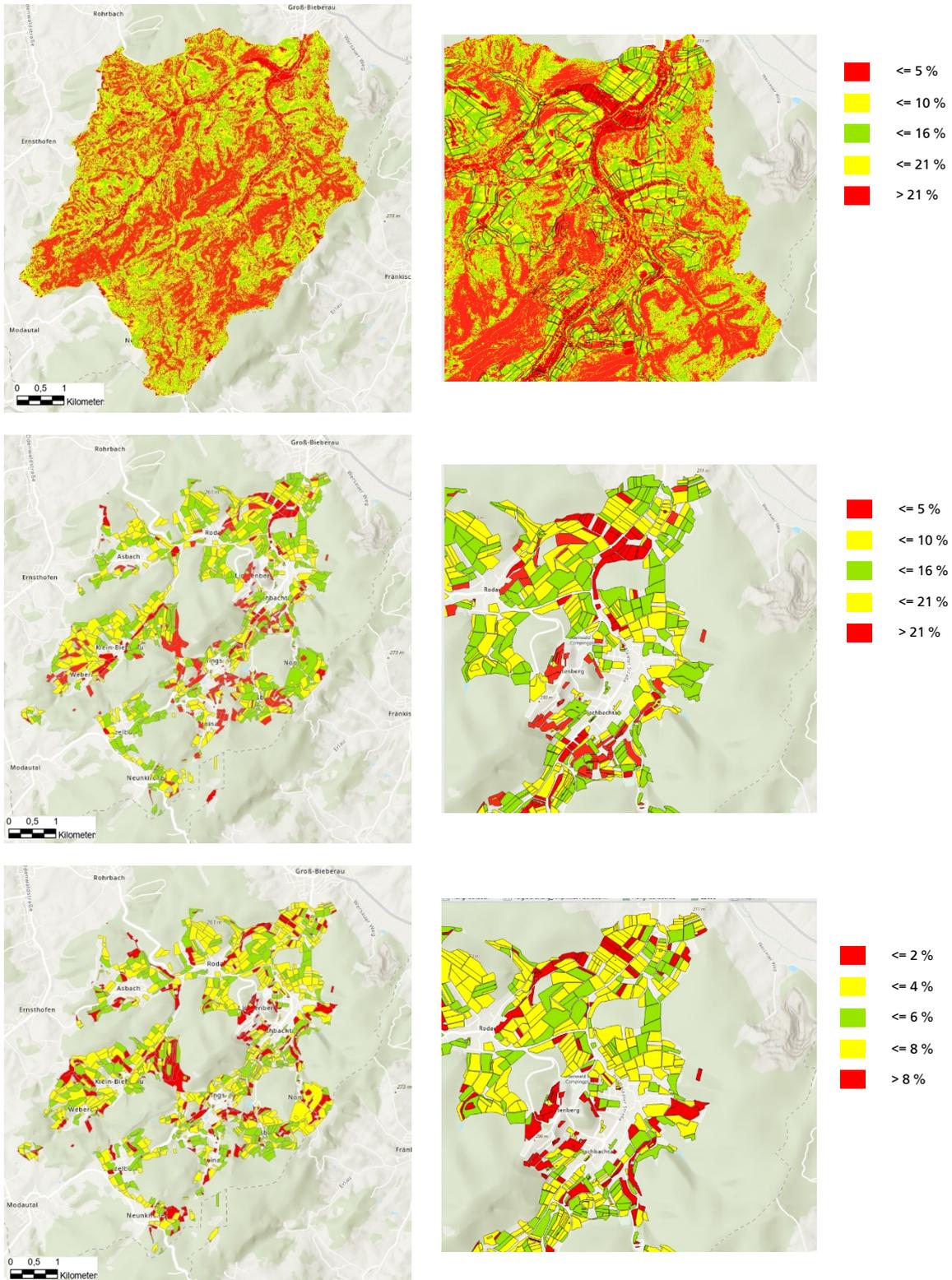


Abbildung 5-5: Beispielhafte Auswertung des Kriteriums Geländegefälle; Mittelwert (oben, mitte), Standardabweichung (unten), Übersicht (links), Detail (rechts)

Die Kriterien Böden und Bewirtschaftung lassen sich nicht auf vergleichbare Art auswerten. Für die Bewirtschaftung werden geeignete und nicht geeignete Bewirtschaftungen händisch definiert.

Die Auswahl des Bodens für geeignete Standorte ist dagegen komplexer. Dieser soll, wie erwähnt, vergleichbar zum Standort Scheyern sein. Außerdem soll die typische Komplexität des Erosionsprozesses entlang der Topographie erfasst werden können. Gesucht wird daher ein Boden, bei dem verschiedene Schichten an verschiedenen Stellen des Geländes ausstreichen. Dies kann so im Feldversuch vor Ort festgestellt werden. Voraussetzung ist allerdings, dass die Schichtenfolge geeignete Charakteristika aufweist. Dies umfasst für einen Lössboden typische Korngrößenverteilungen mit hohen Anteilen im Schluff und weitgehend fehlenden Grobbodenanteilen im Oberboden sowie die Bildung über echtem Löss.

Die verwendete geologische Übersichtskarte (GÜK200) kann aufgrund der Auflösung lediglich einen Hinweis, aber keine endgültige Sicherheit zur Lage von Hängen auf tiefem / mächtigem Löss bieten. Daher wird primär die Bodenkarte BFD50 und hier insbesondere Angaben zu Grobbodenanteilen in tieferen Horizonten als Indikator verwendet. Die endgültige Beurteilung erfolgt erst in der Ortsbegehung (siehe Kapitel 5.1.3).

Durch Auswertung der Bodenkarte werden verschiedene Bodentypen anhand der Korngrößenverteilung, der Horizontfolge, der Mächtigkeit, der Grobbodenanteile und der Vernässungsneigung definiert (siehe Anhang 5-1). Unterschieden werden drei Klassen mit jeweils mehreren Untertypen. Für die GIS-basierte Standortwahl werden insbesondere die Böden der Klasse 2a und eingeschränkt 2b und 2c, welche den gesuchten Lössböden entsprechen, als geeignet ausgewertet. Das Ergebnis der Klassifizierung veranschaulicht Abbildung 5-4.

Als Grundlage für die Auswahl geeigneter Hänge werden für die verschiedenen Kriterien GIS-Layer der Eignung erzeugt und die resultierenden Layer verschnitten, so dass ein Raster der Standorteignung vorliegt. Als Basis zur Auswertung der Hänge werden im GIS zunächst die bekannten Ackerschläge verwendet. Zu jedem Ackerschlag werden lokale Statistiken der Eignung als Tabelle erstellt und mit den Ackerschlägen verknüpft (Abbildung 5-6).

Zunächst werden mehrere mögliche Hänge ausgewählt, für die Ortsbegehungen stattfinden sollen. Weitere Hänge, die den Anforderungen weitestgehend entsprechen, werden als Reserve ermittelt und gekennzeichnet, falls keiner der vorab gewählten Hänge passend ist. Ergänzend wird auf der gleichen Datenbasis ein Vergleichshang ausgewählt. Dieser soll dem anderen im EZG häufig vertretenen Bodentyp der Braunerde angehören.

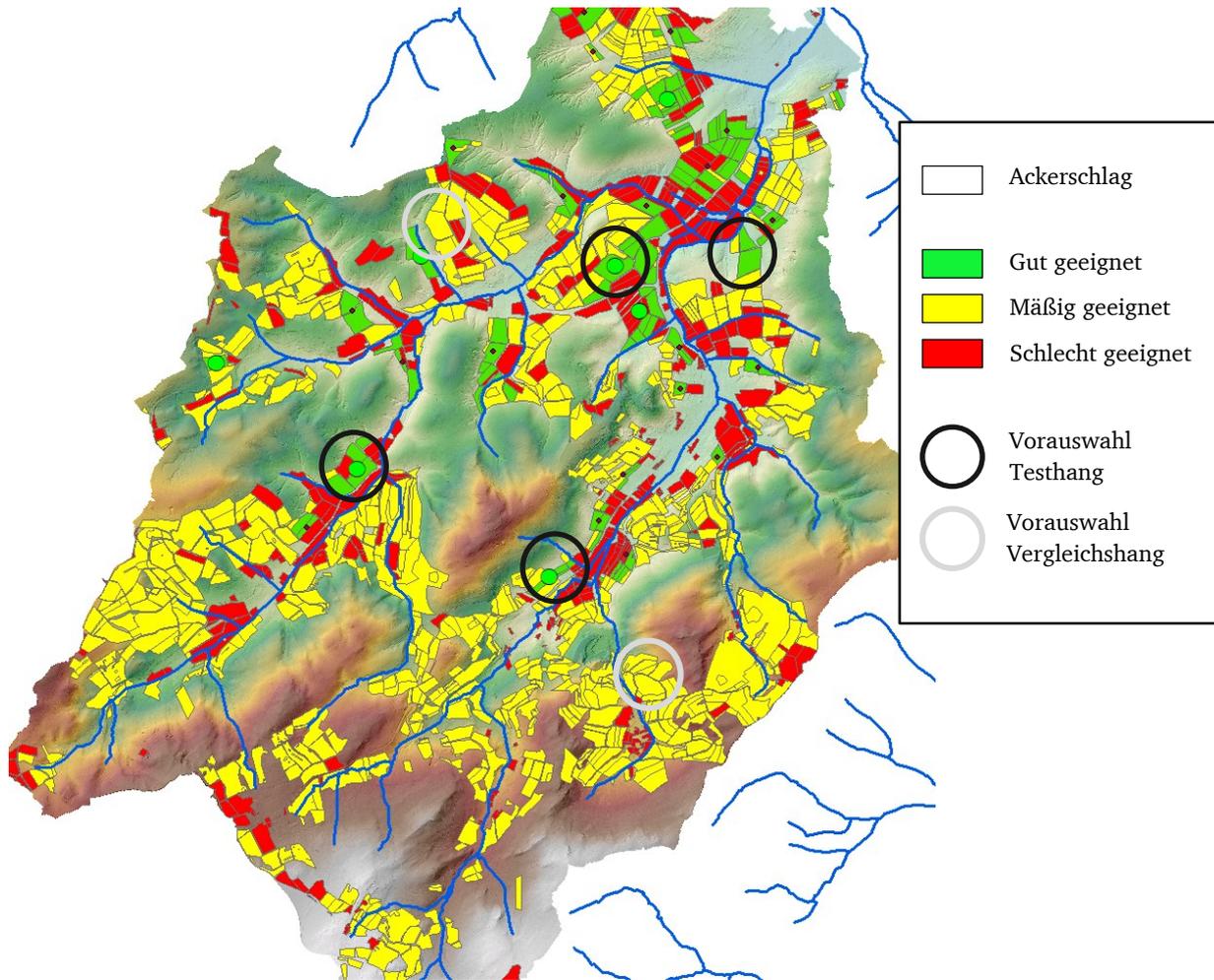


Abbildung 5-6: Ackerschläge im EZG Fischbachtal mit Bewertung der Eignung als Testhang sowie exemplarische Hänge als Vorauswahl zur Ortsbegehung

5.1.3. Feldkampagnen

Chronologische Übersicht über alle durchgeführten Feldtermine

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchung wurden insgesamt 15 Feldtermine über einen Zeitraum von 2 Jahren (Herbst 2016 bis Herbst 2018) durchgeführt (Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Übersicht über die Feldtermine

| Datum | Gegenstand der Begehung | Kategorie |
|------------|---|-----------|
| 23.09.2016 | Begehung zur Standort-Vorauswahl | 1 |
| 13.10.2016 | Begehung zur Standort-Vorauswahl | 1 |
| 25.11.2016 | Bohrstock Vorerkundung Löss | 1 |
| 12.12.2016 | Bohrstock Detail Löss Teil 1 | 2 |
| 26.01.2017 | Bohrstock Vorerkundung Grus | 1 |
| 17.03.2017 | Leitprofil Lösshang | 2 |
| 28.03.2017 | Bohrstock Detail Löss Teil 2 und Bohrstock Detail Grus Teil 1 | 2 |
| 19.04.2017 | Bohrstock Detail Grus Teil 2 | 2 |
| 22.05.2017 | Leitprofil Grushang | 2 |
| 03.08.2017 | Begehung zum Fortschritt der Frucht (Auswahl Probenahmezeitpunkt) | 4 |
| 07.09.2017 | Erste Kampagne Oberflächenproben am Lösshang | 3 |
| 16.04.2018 | Vergleichsprobenahme im B-Horizont am Lösshang | 3 |
| 26.04.2018 | Begehung zum Zustand nach Starkregenereignis | 4 |
| 22.07.2018 | Begehung zum Fortschritt der Frucht (Auswahl Probenahmezeitpunkt) | 4 |
| 15.08.2018 | Zweite Kampagne Oberflächenproben am Lösshang | 3 |
| Kategorie | | |
| 1 | Begehungen zur Standortauswahl | |
| 2 | Auswahl von Probenahmepunkten auf den Hängen | |
| 3 | Entnahme von Oberflächenproben | |
| 4 | Erfassung Zustand der Testhänge | |

Begehungen zur Standortauswahl

Für die vorausgewählten Hänge werden Ortbegehungen und teilweise Vorsondierungen mit dem Bohrstock durchgeführt, um die Ergebnisse aus der GIS-Studie zu verifizieren und die definierten Anforderungen an den Boden prüfen zu können. Als Ergebnis dieser Begehungen werden der Testhang und der Vergleichshang festgelegt. Diese werden in Kapitel 5.1.4 im Detail vorgestellt.

Auswahl von Probenahmepunkten auf den Hängen

Für beide ausgewählte Hänge werden detaillierte Bohrstockkartierungen entlang der bewirtschafteten Hangfläche durchgeführt sowie ein Leitprofil des ungestörten Bodenprofils aufgenommen. Die Lage der Ansatzpunkte der Bohrstockkartierungen bzw. der Leitprofile kann Abbildung 5-9 entnommen werden. Diese dienen zum einen als Referenzdatensatz zum Hang und zum anderen der Auswahl von Probenahmepunkten auf der Oberfläche. Letztere sind in Abbildung 5-11 (Testhang) dargestellt.

Feldtermine zur Entnahme von Oberflächenproben

Im Rahmen dieser Termine werden (gestörte und ungestörte) Bodenproben direkt aus der Bodenoberfläche der bewirtschafteten Hangfläche des Testhangs in zwei aufeinanderfolgenden Bewirtschaftungsjahren genommen. Auf Basis der vorgenannten Arbeiten werden hierfür in Hinsicht auf Topographie und Bodenentwicklung repräsentative Punkte auf der Hangfläche ausgewählt. Die gewählten Punkte zur Entnahme von Oberflächenproben werden in Kapitel 5.1.4. gezeigt. Ein Überblick über alle entnommenen Proben liefert Kapitel 5.2.1. Am Standort des Referenzprofils auf dem Testhang wurde außerdem in einem weiteren Termin erneut eine Bodenprobe aus dem B-Horizont entnommen.

Begehungen zum Zustand der Hänge

Diese Begehungen dienen zur Sichtung des Zustands des Testhangs, um einen geeigneten Zeitpunkt für die Feldtermine zur Entnahme von Oberflächenproben entsprechend der Bewirtschaftung festzulegen. Weiter wurde infolge des Starkregenereignisses vom 23.04.2018 eine Begehung durchgeführt, um tatsächliche Erosionserscheinungen (u.a.) auf dem gewählten Hang zu dokumentieren. Diese können als qualitative Referenz zur Bewertung der Messergebnisse genutzt werden.

5.1.4. Ausgewählte Hänge

Mit den in Kapitel 5.1.2 und 5.1.3 vorgestellten Methoden wurden innerhalb des ihwb Feldlabors ein Testhang und ein Vergleichshang ausgewählt. Der Testhang ist als primäres Untersuchungsgebiet für die anstehenden umfassenden Versuchsreihen zu verstehen. Dieser wurde so ausgewählt, dass möglichst vergleichbare Charakteristika zum Modellhang Scheyern vorliegen und ein möglichst vollständiges Profil eines Lössbodens untersucht werden kann. Für den Vergleichshang wird ein Hang ausgesucht, der in Bezug auf Topographie und Bewirtschaftung möglichst ähnlich ist, aber eine deutlich unterschiedliche Bodencharakteristik aufweist.

Testhang

Der ausgewählte Testhang liegt ca. 800 m südlich der Ortslage Groß-Bieberau und ca. 350 m östlich der Landstraße 3106. Im Norden grenzt der Hang an den Gewässerrandstreifen des Fischbachs. Der Pegel Groß-Bieberau 2 liegt ca. 1 km stromab (Abbildung 5-7, links). Insgesamt ist die Lage im Rahmen der Arbeiten im Feldlabor Fischbach ideal. Die große Nähe zum Pegelstandort ermöglicht regelmäßige Begehungen des Standorts ohne erheblichen Zusatzaufwand, die Nähe zur Landstraße stellt wetterunabhängig eine gute Erreichbarkeit mit Fahrzeugen sicher.

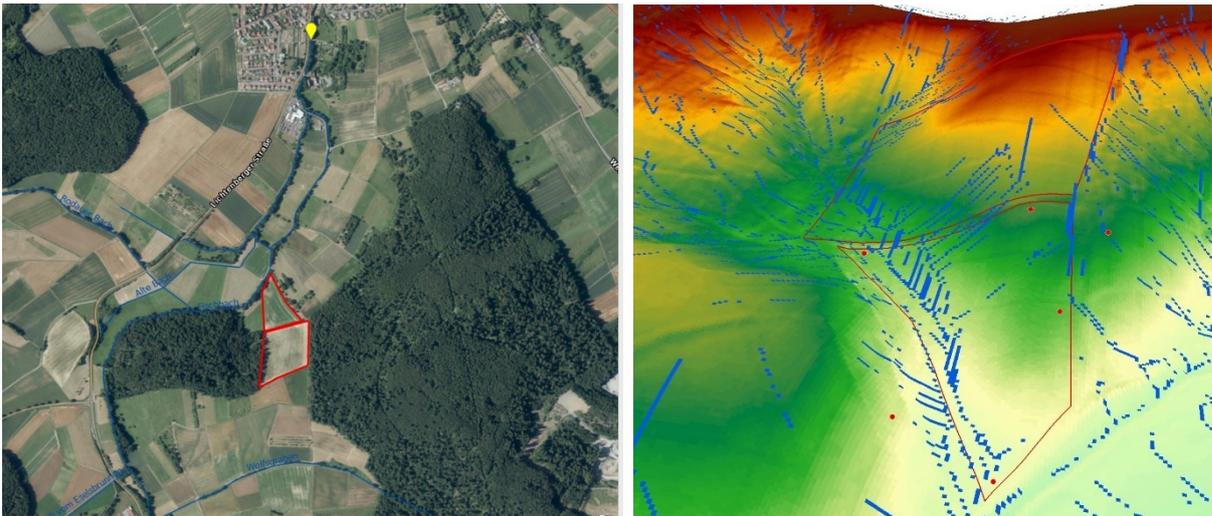


Abbildung 5-7: Lageplan zum ausgewählten Testhang (links) und Fließwege auf dem Testhang (DGM1) (rechts)

Der Testhang besteht aus zwei Ackerschlägen, einer südlichen hangaufwärts gelegenen Teilfläche mit einer Größe von ca. 3,4 ha und einer nördlichen hangabwärts gelegenen Teilfläche mit einer Größe von ca. 1,7 ha. Die südliche Teilfläche beginnt wenige Meter unterhalb der lokalen Wasserscheide, der längste Fließweg auf dem Testhang beträgt 1.470 m (längster Fließweg auf dem südlichen Hang 620 m). Das Hauptgefälle auf dem Hang orientiert sich in Nord-Süd-Richtung (Abbildung 5-7, rechts), mit einem mittleren Gefälle von 15 %. Das Gefälle variiert jedoch entlang des Hauptfließweges. Weiter gibt es neben der primären Gefälle-Richtung ein Gefälle in östliche Richtung auf dem nördlichen Hangabschnitt. Beide Ackerschläge zeigen jeweils südlich am Hangbeginn eine Abrisskante, die auf erosive Prozesse entlang des Hangs hinweist. Der Hangfuß am nördlichen Hangabschnitt zeigt außerdem abgelagertes Bodenmaterial, ebenso wie die Senke am nordöstlichen Rand des südlichen Hangabschnitts.

Die Bodenkarte sowie die geologische Karte sind in der näheren Umgebung des Hangs stark ausdifferenziert. Der Hauptabschnitt des Hangs ist mit Böden aus tiefem Löss ausgewiesen, die Ränder, insbesondere der Fließweg am östlichen Rand, mit Böden aus Abschwemmmassen lössbürtiger Substrate und vereinzelt mit Böden aus fluviatilen Sedimenten. In der Klassifizierung nach Anhang 5-1 gehören die Böden primär zum Typ 2a (einzelne Abschnitte 2b und 3a), der sich durch eine große Mächtigkeit von ca. 2 m, keine Grobbodenanteile und reinen bis schwach tonigen Schluff als Bodenarten auszeichnet. In der direkten Umgebung finden sich außer dem gewählten Hangabschnitt jedoch ausschließlich Böden der Bodentypen 1a, 1b, 1f (Braunerden). Letztere passen zu der Eintragung in der GÜK200, welche Gabbrodiorit als anstehendes Gestein nennt und der GK25, welche Gabbro nennt und in Teilen Gehängelehm.

Im Zuge der Begehung am 25.11.2016 wurden Bohrstockbeprobungen (siehe Kapitel 4.5.2) an sechs Punkten durchgeführt (Abbildung 5-9, rechts), um die Zuordnung aus der Bodenkarte zu verifizieren. Die detaillierten Ergebnisse sind bei Ngassam (2018) zusammengestellt. Wesentlich ist, dass die Begehungen die Informationen der Bodenkarte bzgl. der Bodenarten bestätigen. Die Bohrstockprofile zeigen in unterschiedlichen Tiefen eine positive Karbonatprobe (siehe Kapitel 5.2.4), so dass es als gesichert angesehen werden kann, dass es sich bei dem anstehenden Boden um auf Löss entwickelte Parabraunerde handelt. An den beschriebenen Abrisskanten streicht karbonathaltiges Substrat auch an der Oberfläche aus. Dies und die

unterschiedlichen Tiefen des C-Horizonts in den Bohrstockproben weisen auf unterschiedlich ausgeprägte Abtragungs- und Verlagerungsprozesse entlang des Hangs hin.

Die Bewirtschaftung des Hangs variiert in unterschiedlichen Jahren und teilweise auch zwischen den beiden Hangabschnitten. U.a. wurden Zuckerrüben oder Winterweizen angebaut. Es handelt sich jedoch durchgängig um eine konventionell bewirtschaftete Ackerfläche.

Vergleichshang

Weiter südlich (stromauf) im Einzugsgebiet wird der Vergleichshang ausgewählt. Dieser liegt ca. 250 m vom Meßbach und der gleichnamigen Ortslage entfernt (Abbildung 5-8).



Abbildung 5-8: Lageplan zum ausgewählten Vergleichshang

Auch der Vergleichshang besteht aus zwei Ackerschlägen mit Größen von ca. 1,2 ha und 1,1 ha. Die östliche, hangaufwärts gelegene Teilfläche beginnt ebenfalls wenige Meter unterhalb der lokalen Wasserscheide, der längste Fließweg auf dem Testhang beträgt 390 m. Das Hauptgefälle auf dem Hang orientiert sich in Ost-West-Richtung mit einem mittleren Gefälle von 15 bis 16 % mit einem steileren Abschnitt in der Mitte des östlichen Hangs. Weiter gibt es neben der primären Gefälle-Richtung auch Gefälle Richtung Süden bzw. Norden an den Hangrändern. Der Hang zeigt oberflächlich keine oder weniger Erosionszeichen, was sich mit den Ansprüchen an den Vergleichshang deckt.

Die Böden in der näheren Umgebung des Hangs sind durchweg von den Typen 1a und 1d, was Braunerden und Kolluvisols aus lössreichem, grusführendem Schluff entspricht. Diese zeichnen sich durch Mächtigkeiten von ca. 1 m und sandig-lehmige Bodenarten mit Grobbodenanteilen in allen Horizonten aus. Diese passen zu der Eintragung in der GÜK200, welche Flasergranitoid als anstehendes Gestein nennt, und der GK25, welche mittelkörnigen Biotitgranit, flaserig nennt sowie glimmerreiche Schieferhornfelse und Wiesenlehm am südlichen Rand des Hangs.

Auch für diesen Hang wurde im Rahmen der Begehung am 26.01.2017 eine Bohrstockbeprobung durchgeführt, die ebenfalls die Ergebnisse aus der Bodenkarte bestätigt. Die detaillierten Ergebnisse sind bei Ngassam (2018) zusammengestellt.

5.2. Messungen und Messreihen

Im Rahmen der Versuche sollen verschiedene Fragestellungen zum Verhalten der Erodibilität, aber auch zur Messmethodik beantwortet werden. Hierfür wird eine Kombination verschiedener Böden, verschiedener Techniken zur Probenahme und verschiedener Methoden zur Probenaufbereitung untersucht. In mehreren Versuchsgestaltungen, im Folgenden als Messreihen bezeichnet, werden die ursprünglich formulierten Fragen zu den Erosionsparametern aufgegriffen.

Kapitel 5.2.1 gibt einen Überblick über die Messreihen mit der jeweils betrachteten Fragestellung, den verwendeten Methoden und dem Umfang der Messreihen. Kapitel 5.2.2 - 5.2.4 beschreiben knapp die Methoden, mit welchen die jeweiligen relevanten Bodenkennwerte ermittelt wurden und Kapitel 5.2.5 gibt einen Überblick über die verwendeten Methoden, die zur Auswertung der gewonnenen Datensätze genutzt wurden.

5.2.1. Überblick

Die durchgeführten Versuche und Messungen lassen sich thematisch in vier Messreihen unterteilen, die jeweils zur Beantwortung spezifischer Fragestellungen zur Erodibilität von Oberböden konzipiert sind. Ergänzende Aspekte können bei der Auswertung der Versuche herausgearbeitet werden.

Erste Messreihe - Etablierung des Standards

Mit einem im Folgenden als Standard bezeichneten Boden wurden zunächst geeignete Protokolle zur Aufbereitung von Proben und zur Durchführung der Versuche etabliert. Dies diente auch dazu, das konstruierte Messgerät mit der erarbeiteten Auswertungsroutine zu validieren (siehe Kapitel 4.3.5). Da dieser Boden lediglich als Referenz bzw. Standard dient und nicht mit Eigenschaften eines konkreten Hanges oder Gebiets in Beziehung gesetzt wird, war lediglich die Anforderung formuliert worden, einen Boden mit einer weitgestuften Korngrößenverteilung mit signifikanten bindigen Anteilen (lehmiger Boden) zu wählen.

Mit dem Standard wurden verschiedene Versuche zu einer geeigneten Aufbereitung der Laborproben durchgeführt. Es wurden verschiedene Messungen mit identischer Bodenaufbereitung, aber abweichenden Einstellungen der Anlage und / oder wechselnden den Versuch durchführenden Personen verglichen, um so die Gültigkeit der Testmethode zu erproben.

Neben dem JET-Test wurden für jeden Versuch verschiedene weitere Bodeneigenschaften, insbesondere Korngrößenverteilung sowie Wassergehalt und Lagerungsdichte (Probendichte) bestimmt. Da als Grundlage für die Versuche der getrocknete Boden vorlag, wurde der Wassergehalt der Probe nicht gemessen, sondern durch Vermischung mit Wasser eingestellt. Derart erzeugte Proben werden in der vorliegenden Untersuchung als Laborproben bezeichnet.

Mit dem Standardboden wurden insgesamt 15 JET-Versuche durchgeführt (Testläufe zur Erarbeitung geeigneter Einstellungen sind hier nicht mitgezählt). 6 dieser Versuche wurden unter identischen Bedingungen zur Validierung der Test-Methodik durchgeführt. 9 Versuche wurden mit variierenden Bodeneigenschaften (Wassergehalt, Lagerungsdichte) und mit insgesamt 4 verschiedenen Personen durchgeführt. Hiervon wurden 12 JET-Versuche im Rahmen der Etablierung des Standards durchgeführt (siehe Kapitel 4.3.5).

Zweite Messreihe - Vergleich zweier Bodenprofile

Bodenproben, welche im Rahmen von Leitprofilen aus zwei Hängen innerhalb des Feldlabors Fischbachtal entnommen wurden, wurden im Rahmen der zweiten Messreihe verglichen. Hier wurde zum einen innerhalb eines Leitprofils der Unterschied zwischen den Horizonten bewertet, um eine Beziehung zu den Oberflächeneigenschaften der Hangfläche abhängig von Verlagerung und Reduzierung der Horizonte gewinnen zu können. Weiter wurde ein Vergleich zwischen den unterschiedlichen Bodentypen (Parabraunerde / Braunerde bzw. Löss / Grus) der beiden Leitprofilen angestrebt. Auch wurden im Rahmen dieser Kampagne umfangreiche Bodenkennwerte der verschiedenen Proben im Bodenlabor ermittelt, um Korrelationen zwischen diesen Kennwerten und den ermittelten Erosionsparametern bestimmen zu können.

17 JET-Versuche wurden mit Bodenproben aus verschiedenen Horizonten der beiden Leitprofile durchgeführt. Aus dem Grus-Leitprofil wurden insgesamt 5 Versuche aus insgesamt 3 verschiedenen Horizonten durchgeführt. Aus dem Löss-Leitprofil wurden insgesamt 12 Versuche aus insgesamt 4 verschiedenen Horizonten durchgeführt. Die Proben stammen von 2 Entnahmezeitpunkten (siehe Aufstellung der Feldkampagnen in Kapitel 5.1.3). Bei allen verwendeten Bodenproben handelt es sich um gestörte Feldproben.

Dritte Messreihe - Kleinräumige Variabilität auf der Oberfläche

Aufbauend auf der zweiten Messreihe wurden auf dem Testhang an 6 ausgewählten Probenahmepunkten gestörte und ungestörte Proben der Hangoberfläche genommen. Diese Messreihe diente zum einen dazu, die kleinräumige Variabilität auf einem typischen Mittelgebirgshang zu erfassen. Weiter wurden Beziehungen zu den in der vorherigen Messreihe bestimmten Referenzwerten der ungestörten Horizonte hergeleitet, also ob sich der auf der bewirtschafteten Hangoberfläche austreichende Horizont deutlich anders verhält als der Referenzwert aus dem Leitprofil. Zuletzt sollte auch der Unterschied zwischen gestörten und ungestörten Proben beurteilt werden.

Für alle Probenahmepunkte wurden Korngrößenverteilung, Wassergehalt, Karbonatgehalt und Aggregatstabilität bestimmt. Die Lagerungsdichte (Probe) und, wo relevant, der Wassergehalt wurden für jede JET-Probe individuell bestimmt.

Vierte Messreihe - Zeitliche Variabilität auf der Oberfläche

Ergänzend zu der dritten Messreihe wurden in der letzten Messreihe die gewählten Probenahmepunkte auf der Oberfläche erneut im nächsten Bewirtschaftungsjahr zu gleichen Zeitpunkten innerhalb des Bewirtschaftungszyklus beprobt. In dieser Messreihe sollten vor allem die zeitlichen Unterschiede an identischen Punkten zwischen den beiden Untersuchungsjahren bestimmt werden. Weiter wurden im Zuge dieser Kampagne für einige Probenahmepunkte Zwillingpunkte festgelegt, bei welchen in sehr kurzer Distanz zu dem bekannten Probenahmepunkt eine weitere Probe genommen wurde, um weitere Fragen zur kleinräumigen Variabilität zu betrachten.

Für alle Probenahmepunkte wurden Korngrößenverteilung, Wassergehalt, Karbonatgehalt, Aggregatstabilität und die Zustandsgrenzen nach Atterberg bestimmt. Für Böden aus den ersten drei Messreihen, für welche noch ausreichend Bodenmaterial vorlag, wurden die Zustandsgrenzen nach Atterberg nachträglich bestimmt. Die Lagerungsdichte (Probe) und, wo relevant, der Wassergehalt wurden für jede JET-Probe individuell bestimmt.

Von der Testhangoberfläche wurden in der dritten und vierten Messreihe insgesamt 31 Proben getestet. Hiervon waren 15 Proben ungestörte Stechzylinderproben; 13 Proben waren gestörte Mischproben und 3 Proben waren aufbereitete Laborproben.

Es wird eine Gesamtzahl von 63 JET-Versuchen für diese Untersuchung ausgewertet. Diese 63 Versuche verteilen sich zeitlich auf 2 Messkampagnen. Die erste Messkampagne von Juli 2017 bis Februar 2018 mit 33 JET-Versuchen umfasst die Messreihen eins bis drei. Von Dezember 2018 bis März 2019 wurden in der zweiten Messkampagne mit 30 JET-Versuchen die Messreihe vier sowie verschiedene Wiederholungs- und Vergleichsmessungen zur ersten Messkampagne durchgeführt.

5.2.2. Feldmethoden

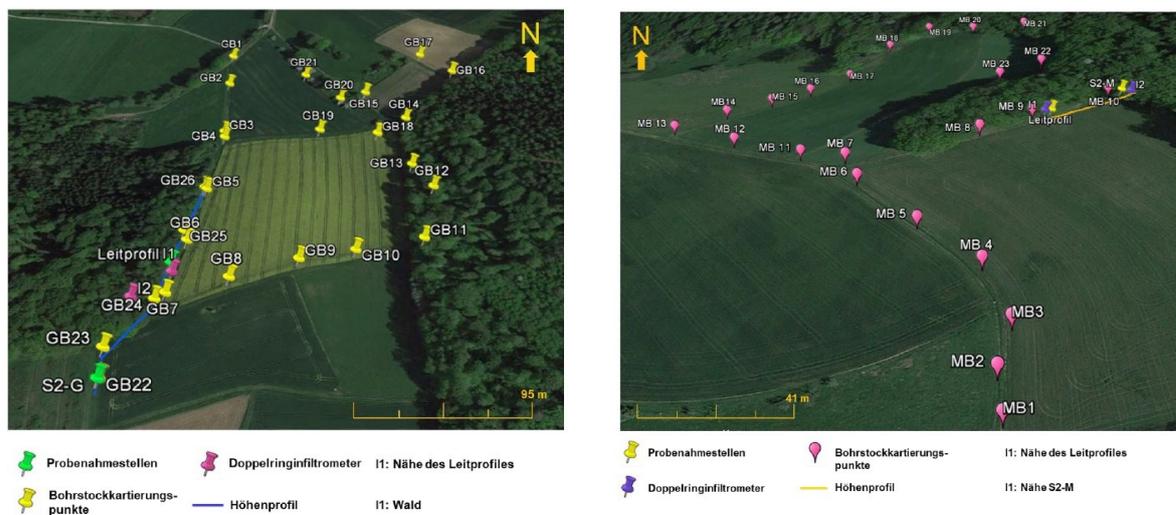


Abbildung 5-9: Ansatzpunkte der Bohrstockkartierungen und Lage der Leitprofile auf dem Testhang (links) und auf dem Vergleichshang (rechts) (Ngassam 2018)

Bohrstockkartierung

Zur Auswahl des Testhangs und des Vergleichshangs fanden am 25.11.2016 und am 26.01.2017 Ortsbegehungen mit stichprobenhafter Bodenansprache mit dem Bohrstock statt. Diese dienten dazu, die Eignung der vorausgewählten Standorte im Feld zu überprüfen. Abbildung 5-9 zeigt die Bohrstockkartierungspunkte exemplarisch für den späteren Testhang. Für den Testhang sollte ein typischer Lössboden, feinkörnig, tief, kalkhaltig und für den Vergleichshang ein grobkörniger, kalkfreier Boden sichergestellt werden.

Nach der Auswahl der beiden Hänge fanden umfangreiche Aufnahmen mit dem Bohrstock am 12.12.2016 und 28.03.2017 für den Testhang sowie am 28.03.2017 und 19.04.2017 für den Vergleichshang statt, jeweils mit einer (vereinfachten) Bodenansprache nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (Sponagel 2005). Einen Überblick über die Lage der Bohrstockkartierungspunkte an den beiden Hängen vermittelt Abbildung 5-9. Ziel der Bohrstockkartierungen war, einen Eindruck von der Veränderung (Verlagerung und Reduzierung) der Bodenprofile im Hangverlauf aufzunehmen, (u.a.) um geeignete Standorte für die Leitprofile und die Probenahmestellen für Oberflächenproben festzulegen.

Alle Bohrstockkartierungen wurden mit einem 1 m Hohlmeißelbohrer vom Typ Pürckhauer durchgeführt (Abbildung 5-10). Die gewonnenen Bodenproben wurden durch Befühlen und

Begutachten charakterisiert. Die Untersuchung erfolgte durch optische Abgrenzung der Horizonte mit Abmessung ihrer Mächtigkeit und Bewertung jedes Horizonts optisch sowie durch Fingerprobe und ggf. Kalkbeprobung (siehe Kapitel 5.2.4.) in Bezug auf Farbe, Bodenart, Hydromorphie sowie Humus- und Kalkgehalt. Details zu Bohrstockuntersuchung finden sich außerdem in Ngassam (2018) und Borm (2017).



Abbildung 5-10: Beispielaufnahme Bohrstockkartierung (links) und Leitprofil (rechts)

Leitprofile

Ausgehend von den Ergebnissen der Bohrstockkartierungen wurden an beiden Hängen die Standorte für die Aufnahme der Leitprofile festgelegt. Dabei wurde eine Lage abseits des Ackers und von Wegen gewählt, mit dem Ziel, das Leitprofil in natürlich gewachsenem Boden mit vollständiger und ungestörter Horizontfolge zu erstellen. Abbildung 5-9 veranschaulicht die Lage der Leitprofile an den beiden Hängen. Ein Stück hangaufwärts des Leitprofils wurden ergänzende Bodenproben des Oberbodens zum Vergleich entnommen. Die Erstellung der Leitprofile und Entnahme der Bodenproben erfolgten am 17.03.2017 (Testhang / Lössstandort) und am 22.05.2017 (Vergleichshang / Grusstandort).

Zum Aufbau der Leitprofile wurde jeweils eine Schürfgrube bis zum C/Cv-Horizont ausgehoben (Abbildung 5-10). Im Lössprofil wurde der C-Horizont über eine Karbonatprobe festgestellt.

An den Leitprofilen wurde entsprechend der Bodenkundlichen Kartieranleitung eine vollständige Bodenkundliche Profilaufnahme durchgeführt. Hierzu wurden für den Standort des Leitprofils Klima, Vegetation, Relief und Nutzung und für die jeweiligen Horizonte Mächtigkeit, Farbe und Bodenart bzw. Korngrößenverteilung sowie weitere physikalische und chemische Charakteristika dokumentiert. Letztere Informationen wurden nachträglich im Labor bestimmt (siehe Kapitel 4.5.4.). Die gesammelten Daten wurden auf einem Formblatt zusammengefasst (Sponagel 2005) (siehe Borm 2017 und Ngassam 2018).

Es wurden jeweils gestörte und ungestörte (Erhalt des Bodengefüges) Proben genommen. Die ungestörten Proben wurden mit dem Stechzylinder genommen, der hierfür mithilfe einer Schlagplatte waagrecht in die jeweilige Schicht / den jeweiligen Horizont getrieben und anschließend mit dem Handspaten ausgegraben wurde. Die Stirnflächen wurden zunächst mit Folie und anschließend mit dem Zylinderdeckel verschlossen. In diesen Proben bleiben Struktur und Lagerung der Bodenpartikel erhalten. Die gestörten Proben wurden mithilfe eines Spatens entnommen und in Eimer verpackt.

Alle aufgenommenen Daten wurden von Borm (2017) mit Hilfe des Konformitätsschlüssels KA5 der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) geprüft.

Oberflächenproben

Ausgehend von den Ergebnissen der Bohrstockkartierungen, der Leitprofile und des DGM1 wurden am Testhang 6 charakteristische Punkte der Hangoberfläche ausgewählt und beprobt – zwei Punkte am Hangfuß / in lokalen Senken (L1 und L6), ein Punkt am Kamm nahe der Wasserscheide (L4), ein Punkt auf der Hangfläche mit Steigung (L5), ein Punkt hinter der Abrisskante, an der reiner Löss auf der Oberfläche ausstreicht (L3), und ein lokaler Hochpunkt auf der Hangoberfläche (L2). Die Lage der Probenahmepunkte veranschaulicht Abbildung 5-11. Zu allen Probenahmen an den sechs Punkten wurden Feldprotokolle geführt.

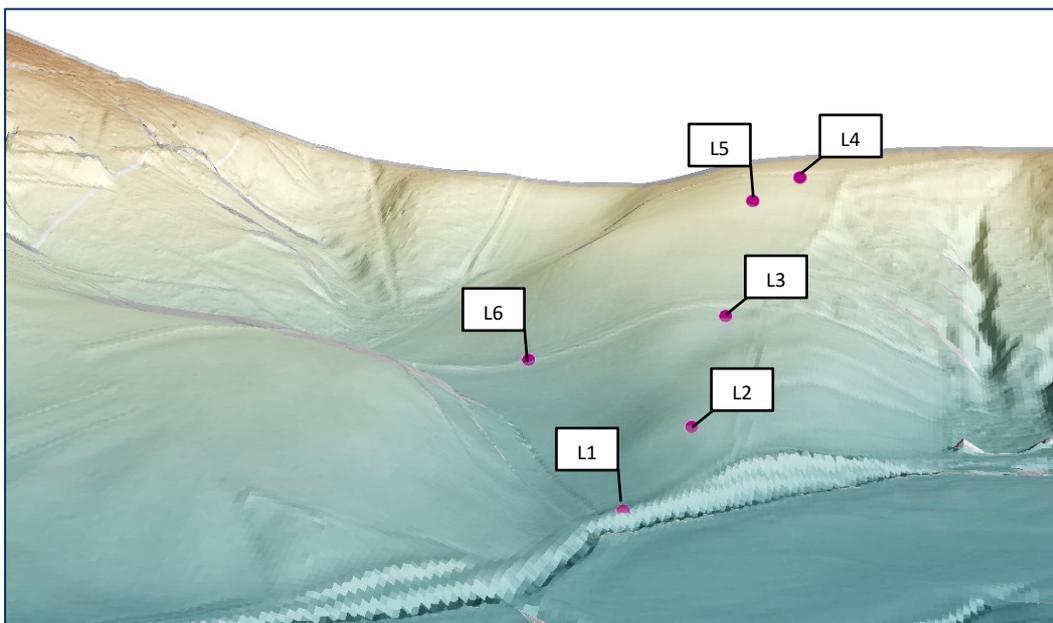


Abbildung 5-11: Probenahmepunkte für Oberflächenproben auf dem Testhang

Die erste Kampagne zur Entnahme von Oberflächenproben fand am 07.09.2017 statt. An jedem der 6 Messpunkte wurde eine Stechzylinderprobe von der Oberfläche genommen. Dafür wurde die Oberfläche zunächst grob von Steinen und Bewuchsresten befreit und grob geglättet und anschließend eine vertikale Probe entnommen (Abbildung 5-12). Das den Stechzylinder umgebende Material wurde als gestörte Mischprobe genommen (ca. 4 kg). Hierdurch sollte sichergestellt werden, dass beide Proben einen identischen Wassergehalt haben. Alle Proben wurden verpackt und entsprechend einer konsistenten Nomenklatur (siehe Kapitel 5.3) beschriftet.



Abbildung 5-12: Entnahme einer Oberflächenprobe auf dem Testhang

Die zweite Kampagne zur Entnahme von Oberflächenproben am Testhang wurde am 15.08.2018 durchgeführt. Von den in der ersten Kampagne definierten Punkten wurden fünf in der zweiten Kampagne erneut beprobt. Der Punkt L5 wurde ausgelassen, da die bewirtschaftete Fläche hier zum Zeitpunkt der Probenahme bereits neu eingesät war. An jedem der fünf Messpunkte wurden eine Stechzylinderprobe (wie vor) und eine Mischprobe von der Oberfläche genommen. An den Standorten L1, L2, L4 und L6 wurde jeweils eine weitere Stechzylinderprobe und / oder eine weitere Mischprobe als Vergleich genommen. Diese Punkte wurden in einem Abstand vom Originalpunkt von 1 m – 40 m genommen und jeweils mit -2 gekennzeichnet. Neben der getrennten Auswertung der Vergleichspunkte wurden auch Ähnlichkeiten und Unterschiede der Probenahme im Feld notiert.

Ergänzende Probenahme

Am 16.04.2018 wurde erneut eine Mischprobe am Standort des Leitprofils des Testhangs aus dem B-Horizont entnommen. Diese diente zur Vergrößerung des Probenbestands und zur Durchführung einer zweiten Bodenfeuchtebestimmung.

Im Rahmen von Ngassam (2018) wurden an beiden Standorten Infiltrationsversuche mit dem Doppelringinfiltrimeter durchgeführt (zur Lage der Standorte siehe Abbildung 5-9). Diese werden im Kontext der vorliegenden Untersuchung nicht weiter verwendet und es erfolgt an dieser Stelle lediglich der Hinweis auf die entsprechende Veröffentlichung.

5.2.3. Methoden in der Wasserbauhalle

Wassergehalt

Von jeder Mischprobe wurde der Wassergehalt in Gewichtsprozent bestimmt. Dafür wurde eine Menge von einigen hundert Gramm Bodenmaterial über 24 h bei 105 °C getrocknet (DIN EN ISO 17892-1:2015-03). Der so ermittelte Wassergehalt entspricht somit dem Porenwasser, das durch die Wasserbewegung in der ungesättigten Bodenzone bedingt ist. Die Probe wurde vor und nach der Ofentrocknung gewogen. Der ermittelte Wassergehalt bezieht sich dann auf das Gewicht des Wassers im Vergleich zum Gewicht der Trockenmasse. Da die Mischproben aus dem umgebenden Bodenmaterial der Stechzylinderproben genommen wurden, wird davon ausgegangen, dass der Wassergehalt der Stechzylinderprobe identisch zum Wassergehalt der korrespondierenden Mischprobe ist.

Lagerungsdichte (Proben)

Die Lagerungsdichte der Proben (Zur besseren Abgrenzung im Folgenden auch als Probendichte bezeichnet) wurde bestimmt, indem der Zylinder mit der Bodenprobe vor dem Versuch und der leere Zylinder nach dem Versuch gewogen wurde. Das ermittelte Gewicht der Probe wurde auf das Volumen bezogen und so die Lagerungsdichte ermittelt. Eventuell fehlende Volumina durch nicht vollständig gefüllte Zylinder wurden optisch abgeschätzt, notiert und bei der Volumenermittlung berücksichtigt. Bei den ungestörten Stechzylinderproben entspricht die ermittelte Lagerungsdichte in guter Näherung der tatsächlichen Lagerungsdichte im Feld.



Abbildung 5-13: Vorbereitung von Mischproben zur Bestimmung der Lagerungsdichte

Für die Mischproben wurden verschiedene Methoden zur Probenaufbereitung untersucht. Bewährt hat sich eine im Rahmen der Möglichkeiten standardisierte Aufbereitung (Abbildung 5-13). Hierzu wurde das Probenmaterial bei Feldproben weitgehend von Grobboden und organischem Material befreit. Aggregate wurden mit dem Stampfer aufgebrochen und dann die Bodenprobe gut durchmischt, so dass eine möglichst homogene Probe entstand. Der leere Stechzylinder wurde auf einer stabilen Unterlage platziert und ca. 1 cm hoch mit der Mischprobe befüllt. Mit ca. 20 – 25 Schlägen mit dem Stampfer wurde das eingefüllte Bodenmaterial verdichtet. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die Oberfläche gleichmäßig verdichtet wurde. Die Routine zur Herstellung der Mischproben wurde in den Vorversuchen mit der Standardprobe (siehe Kapitel 4.3.5) erarbeitet und hat sich in der folgenden Auswertung der Feldversuche als tauglich erwiesen.

JET-Versuch

Für die Durchführung des JET-Versuchs erfolgt zunächst eine Prüfung der Dichtung in der Lagerung des Stechzylinders. Hierfür wird ein leerer Stechzylinder in die Lagerung gesetzt und der umgebende Behälter einige Zentimeter mit Wasser gefüllt. Wenn das Innere des Stechzylinders auch nach einigen Minuten trocken bleibt, wird die Dichtung als funktionsfähig bewertet. Ansonsten wird die Dichtung vor Versuchsbeginn ausgetauscht.

Für den Versuch wird der Stechzylinder mit Probe in den Behälter gesetzt und der Behälter auf einer geeigneten Höhe (Betriebszustand) platziert. Die Auswahl der Höhe/ des Betriebszustands muss aus der Erfahrung erfolgen, wobei eine Probe bei der geringer Erosionswiderstand erwartet wird, auf einer großen Standhöhe und eine Probe bei der hoher Erosionswiderstand erwartet wird, auf einer niedrigen Standhöhe getestet wird.

Ist eine geeignete Standhöhe gewählt, werden die Zu- und Abläufe so an der Trägerkonstruktion befestigt, dass keine Einengungen des Abflussquerschnitts auftreten und keine Zug- oder Druckkräfte auf die Anschlüsse am JET wirken. Ist dies gegeben, kann der Behälter vorgefüllt werden, bis sich die Probe vollständig unter Wasser befindet. Dieser Arbeitsschritt ist für den Versuch nicht zwingend erforderlich, reduziert aber das Risiko einer Erosion bei der Behälterfüllung über den Zufluss des JET. Dennoch ist sicherzustellen, dass die Abdeckplatte die Probe vollständig bedeckt.

Es wird empfohlen, eine 0-Messung (also eine Tiefenmessung vor Versuchsbeginn) durchzuführen, da hierdurch der Fehler durch Subjektivität beim Ablesen der Messskala reduziert wird.

Anschließend kann die vollständige Füllung des JET bis zur Einstellung eines stationären Fließzustands bei geschlossener Abdeckplatte über den Zulauf erfolgen.

Um sicherzustellen, dass alle für die Versuchsauswertung notwendigen Kennwerte des Versuchs vor Versuchsbeginn erfasst werden, wurde ein standardisiertes Versuchsprotokoll aus den Erfahrungen der ersten Messkampagne entworfen und ab der zweiten Messkampagne verwendet (siehe Anhang 5-2). Vor Start des Versuchs ist sicherzustellen, dass alle Daten des Protokolls ausgefüllt sind.

Während des Versuchs wird mit einer Stoppuhr die Zeit gemessen, in welcher der JET bei geöffneter Abdeckplatte läuft und damit eine Erosion der Bodenprobe stattfindet. Nach einem Zeitintervall wird die Abdeckplatte geschlossen und eine Tiefenmessung mit dem Messstab durchgeführt. Zeit und korrespondierende Tiefe werden im Versuchsprotokoll dokumentiert. Die Anzahl und Länge der Messzeiträume hängt von der Erodibilität der Probe sowie dem gewählten Betriebszustand des JET ab. Allgemein wird jedoch mit kurzen Abschnitten von ca. 10 s – 30 s begonnen und die Abschnitte auf mehrere Minuten verlängert. Für einen Versuch sollten idealerweise 10 oder mehr Tiefenmessungen durchgeführt werden.

Um den Erosionsprozess der Probe auch qualitativ beurteilen zu können, werden die Probe vor und nach dem Versuch sowie der Versuchslauf mit Fotos dokumentiert.

5.2.4. Methoden im Bodенlabor

Die Bestimmung der Bodenkennwerte erfolgt im Rahmen von Hannappel (2017), Borm (2017), Schäfer (2018), Ngassam (2018) und Atioda Agokeng (2019) im Bodенlabor des Fachbereichs Material- und Geowissenschaften der TU Darmstadt. An dieser Stelle wird ein kurzer Überblick über die verwendeten Methoden gegeben. Weitergehende Informationen können den entsprechenden Veröffentlichungen entnommen werden.

Korngrößenverteilung

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung erfolgte entsprechend DIN 18123:2011-04 durch eine kombinierte Nasssiebung und Sedimentationsanalyse. Dieses Vorgehen entspricht dem technischen Standard für Böden, welche sowohl Grob- als auch Feinbodenanteile aufweisen.

In der Nasssiebung wird eine Abtrennung unterschiedlicher Kornfraktionen größer 0,063 mm (Feinsand und gröberes Material) in einer Siebmaschine unter Zuhilfenahme von Wasser durchgeführt. Es werden sieben Analysesiebe mit den folgenden Maschenweiten verwendet: 0,063 mm, 0,125 mm, 0,5 mm, 1,0 mm, 2,0 mm, 4,0 mm. Die Siebrückstände werden im Trockenschrank bei 105 °C getrocknet und gewogen. Der Siebdurchgang wird für die folgende Sedimentation verwendet.

Die Kornfraktionen kleiner 0,063 mm werden nach DIN 18123:2011-04 über eine Sedimentations- oder Schlämmanalyse ermittelt. Für die vorliegende Untersuchung wurde das Aräometer-Verfahren verwendet. Der Siebdurchgang wird mit destilliertem Wasser gereinigt und mit einem Dispergierungsmittel (Natriumpyrophosphat) suspendiert. Letzteres dient dazu, die Koagulation von Teilchen zu verhindern. Die Suspension wird mit destilliertem Wasser auf ein standardisiertes Volumen aufgefüllt und die Veränderung der Dichte der Suspension durch Sedimentation in festgesetzten Zeitabschnitten über die Eintauchtiefe des Aräometers gemessen. Für Proben mit hohem Anteil Feinmaterial wurde der Versuch bis zu 48 Stunden durchgeführt, um nach Möglichkeit den Korndurchmesser d_{10} bestimmen zu können.

Die Ergebnisse aus Nasssiebung und Sedimentation wurden mit der Software GGU-Sieve (GGU Software) ausgewertet, um die Korngrößenverteilungen zu ermitteln.

Lagerungsdichte (Labor)

Die Lagerungsdichte (Verhältnis des getrockneten Bodenkörpers zum Volumen) wird über das Ausstechzylinderverfahren nach DIN 18125-2:2020-11 bestimmt. Hierzu werden ungestörte, mit dem Stechzylinder entnommene Bodenproben benötigt. Die Masse des im Zylinder bei 105 °C getrockneten Bodenkörpers wird unter Abzug des Zylindergewichts auf das Zylindervolumen bezogen. Die Lagerungsdichte wird auch als Trockendichte bezeichnet und unterscheidet sich von z.B. der Korndichte, der Dichte einer getrockneten, gestörten Bodenprobe und insbesondere der Lagerungsdichte der Proben unter Kapitel 5.2.3, indem sie als einziges Maß die reine Bodendichte im gewachsenen Boden angibt.

Korndichte und Porosität

Die Korndichte beschreibt nach DIN 18124:2019-02 die Rohdichte einzelner Körner des Bodenkörpers und steht in Zusammenhang mit dessen mineralogischer Zusammensetzung. Sie wurde in der vorliegenden Untersuchung aus einer Bestimmung über das Helium-Pyknometer AccuPyc 1330 (Micromeritics) ermittelt. Je Probe wurden fünf Messungen durchgeführt und

der Mittelwert daraus verwendet. Die Korndichte wird insbesondere benötigt, um aus dem Verhältnis zur Lagerungsdichte die Porosität der Bodenprobe zu ermitteln.

Kohlenstoffgehalt

Die drei Kennwerte des Kohlenstoffgehalts: organischer Kohlenstoff (TOC), anorganischer Kohlenstoff (TIC) und elementarer Kohlenstoff (EC) wurden mit dem Messgerät liquiTOC II (Elementar) bestimmt. Die Proben wurden durch eine Trocknung über 48h bei 40 °C, Siebung und Homogenisierung durch eine Schwingmühle für die Messung aufbereitet (Probenaufbereitung nach DIN EN 16179:2012-11). Der Versuch selbst erfolgt durch kontinuierliche Erhitzung der Bodenprobe und Messung des freigesetzten CO₂ durch einen Infrarotdetektor. Die Peaks der CO₂-Freisetzung, deren Fläche die freigesetzte Kohlenstoffmenge und deren Lage die Bindungsform des Kohlenstoffs angibt, werden ausgegeben. TOC wird bei 450 °C, TIC und EC bei 950 °C freigesetzt.

Glühverlust

Die Bestimmung des Anteils organischer Kohlenstoff (TOC) kann auch durch die Bestimmung des Glühverlusts nach DIN 18128:2002-12 erfolgen. Dies wurde für die Böden der zweiten Messkampagne angewendet. Für den Versuch wurden vorgetrocknete Bodenproben (24 h bei 105 °C) verwendet, so dass der Wassergehalt die Ergebnisse nicht verfälscht. Die Bestimmung des Glühverlustes erfolgte durch Erhitzen im Ofen bei Temperaturen von 550 °C über 24 h (sogenannter Muffelofen) und die anschließende Ermittlung der Gewichts Differenz. Eine Einteilung der Böden kann nach DIN EN ISO 14688-2:2018-05 vorgenommen werden in schwach organische Böden (2-6 % organischer Anteil), mittlere Böden (6-20 % organischer Anteil) und stark organische Böden mit > 20 % organischem Anteil.

Karbonatgehalt

Eine Vorbestimmung des Karbonatgehalts erfolgte durch eine Beprobung mit 10-%iger Salzsäure (HCl) bereits im Gelände. Das Auftreten einer Reaktion zeugt von Karbonat in der Probe, die Stärke der Reaktion kann einen Hinweis auf die Konzentration geben (Sponagel 2005). Eine genaue Bestimmung des Karbonatgehalts kann im Bodenlabor angeschlossen werden. Für den Versuch wurden Proben verwendet, welche, wie unter Kohlenstoffgehalt beschrieben, aufbereitet wurden. Die Reaktion von Kalk mit Salzsäure setzt CO₂ in Gasform frei. Die Messung des Volumens des freigesetzten CO₂ kann zur Bestimmung des Karbonatgehalts verwendet werden, wobei 1 mol freigesetztes CO₂ 1 mol Karbonat in der Bodenprobe entspricht. In der vorliegenden Untersuchung wurde ein Scheibler-Gerät genutzt. Hierbei erfolgt die Reaktion von Bodenprobe und Salzsäure in einem mit Wasser vorbefüllten Rohrsystem. Die Änderung des Wasserstands kann direkt in das freigesetzte CO₂ Volumen umgerechnet werden. Nach einer Korrektur für beim Versuch herrschende Druck- und Temperatur-Verhältnisse sowie der Berücksichtigung der molaren Massen von Kalk und Kohlenstoffdioxid kann die Masse des Kalks in der untersuchten Probe bzw. bezogen auf die Probenmasse der Karbonatgehalt in der Probe ermittelt werden. Der Ansatz entspricht dem Vorgehen nach DIN 18129:2011-07.

Aggregatstabilität

Die Aggregatstabilität gegenüber Wasser wurde über ein Verschlammungsbild (Sekera & Brunner 1943) bestimmt. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass keine aufwendige

Probenvorbereitung erforderlich ist und nur ein geringes Probenvolumen benötigt wird. Für den Test werden 10 „Krümel“ einer vollständig getrockneten Bodenprobe (Massenstabilität im Trockenschrank bei 105 °C) in destilliertes Wasser gesetzt. Nach 10 min wird das Gefäß leicht geschüttelt und das resultierende Verschlämmungsbild fotografiert (Sicherstellung einer Momentaufnahme nach 10 min). Die Auswertung erfolgt auf einer Skala von 1 (sehr stabile Aggregate) bis 6 (sehr zerbrechliche Aggregate).

Konsistenz / Zustandsgrenzen nach Atterberg

Für alle Mischproben der zweiten Kampagne wurden Zustandsgrenzen der Konsistenz nach Atterberg bestimmt. Atterberg-Grenzen sind zur Beurteilung von Böden in der Geotechnik verbreitet, finden jedoch kaum Anwendung in der Erosionsforschung (siehe z.B. Bryan 2000).

Für bindige Böden hat der Wassergehalt einen großen Einfluss auf die Zustandsform (Verformbarkeit). Es wird allgemein zwischen flüssiger, breiiger, weicher, steifer, halbfester und fester Konsistenz unterschieden (DIN 18122-1:1997-07). Zur Quantifizierung werden die Zustandsgrenzen Fließgrenze (Übergang flüssig zu breiig), Ausrollgrenze (Übergang steif zu halbfest) und Schrumpfgrenze (Übergang von halbfest zu fest) jeweils über den Wassergehalt bei Erreichen der Zustandsgrenze sowie einige Kennzahlen der Verhältnisse zwischen den Zustandsgrenzen, z.B. die Plastizitätszahl, definiert. Die Plastizitätszahl bestimmt sich als Differenz von Fließgrenze und Ausrollgrenze und dient zur Beurteilung, ob nach bodenmechanischer Definition Schluff oder Ton vorliegt.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden die Zustandsgrenzen nach DIN 18122-1:1997-07 bestimmt. Zur Bestimmung der Fließgrenze wird ein Fließgrenzengerät nach Casagrande genutzt. Hierfür wird in die Bodenpaste (Bodenprobe mit eingestelltem Wassergehalt) in einem Probenbehälter eine Furche gezogen und der Probenbehälter über einen Mitnehmer angehoben und aus fester Höhe wieder fallen gelassen (Umdrehung). Dieser Versuch wurde als Vierpunktversuch mit vier unterschiedlichen Wassergehalten je Boden durchgeführt und die Anzahl der Umdrehungen gegen den Wassergehalt geplottet. In einer linearen Beziehung zwischen Wassergehalt und logarithmierter Anzahl der Umdrehungen kann die Fließgrenze bei 25 Umdrehungen abgelesen werden.

Zur Bestimmung der Ausrollgrenze wird dieselbe Probe auf wasserabsorbierendem Papier gerollt, bis ein Durchmesser von 3 mm erreicht ist. Ist der Durchmesser erreicht, wird die Probe wieder verknetet und erneut bis auf den Durchmesser von 3 mm ausgerollt. Der Vorgang wird wiederholt, bis die Probe bei dem Zieldurchmesser zu bröckeln beginnt. Für diesen Zustand wird der Wassergehalt über Ofentrocknung bestimmt. Der Versuch wurde je Bodenprobe mindestens 3 mal wiederholt, wobei die Unterschiede nicht mehr als 2 Prozentpunkte des Wassergehalts betragen sollen.

Weitere Auswertungen

Im Rahmen von Borm (2017) wurden mit den gewonnenen Bodenproben weitere Untersuchungen im Bodenlabor durchgeführt. Diese werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht verwendet, so dass an dieser Stelle lediglich auf die Originalarbeit verwiesen wird. Die Untersuchungen umfassten den pH-Wert, die spezifische elektrische Leitfähigkeit, die effektive Kationenaustauschkapazität und Basensättigung sowie eine Röntgendiffraktometrie.

5.2.5. Methoden zur Ergebnisauswertung

Auswertung der Boden-Eigenschaften

Alle entsprechend Kapitel 5.2.4. bestimmten Bodeneigenschaften werden für jede genommene und untersuchte Bodenprobe tabellarisch erfasst. Hierbei wird unterschieden, ob die Bodeneigenschaft direkt aus der Probe bestimmt oder von einer anderen Probe übertragen wurde. Insbesondere ist es nicht möglich, Eigenschaften wie die Korngrößenverteilung oder den Wassergehalt für eine ungestörte Stechzylinderprobe zu bestimmen. Die entsprechenden Eigenschaften werden daher für die umgebende gestörte Probe bestimmt und der ungestörten Probe mit dem entsprechenden Vermerk zugeordnet.

Für die Korngrößenverteilungen werden die Prozentsätze an verschiedenen Korngrößengrenzen ausgewertet (z.B. % Ton, % Schluff), wobei neben den Hauptbodenarten auch typischerweise für den Pedotransfer von Erosionsparametern verwendete Unterarten, insb. % Feinsand, verwendet werden.

Alle weiteren Bodeneigenschaften werden entsprechend der in Kapitel 5.2.4 vorgestellten Methoden ausgewertet.

Auswertung der JET-Versuche

Zur Auswertung der JET-Versuche werden zunächst alle Laborprotokolle in ein Arbeitsblatt in MS Excel übertragen.

Die Auswertung der JET-Versuche erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst werden Wassergehalt und Lagerungsdichte über die Laborprotokolle ausgewertet und in der Übersicht notiert. Die verwendeten Arbeitshöhen sind ebenfalls im Laborprotokoll vermerkt. Dies umfasst die Standhöhe des JET, die Höhe im Speicherbecken und die sich einstellende Höhe im JET-Körper. Bei allen Wasserstandsmessungen wird darauf geachtet, dass diese in einem stationären Abflusszustand aufgenommen werden. Aus diesen Aufzeichnungen wird der resultierende Durchfluss über die vorhandene Pumpenkennlinie (siehe Kapitel 4.3.3.) ermittelt.

Die gemessenen Zeitschritte und Tiefen werden in das Auswertungsblatt übertragen. Dort werden die Zeitschritte in eine kumulative Zeit (s) umgerechnet und die Messtiefen mit dem Messstab in Abtragstiefen von 0 cm bis zu maximal 12 cm umgerechnet.

Anhand der aufgenommenen Abtragszeitreihe kann eine Vorauswertung des Versuchs durchgeführt werden, die eine gute Grundlage für die später angewendete Auswertungsroutine darstellt. Hierfür wird die Abtragstiefe gegen die kumulative Zeit aufgetragen. Mit der gemessenen Abtragszeitreihe kann bereits qualitativ überprüft werden, ob der Versuch nah an einer theoretischen Abtragskurve liegt und damit eine belastbare Auswertung zulässt. Der Verlauf der Messungen über die Zeit sollte optisch in etwa einem Abschnitt aus der theoretischen Funktion nach Blaisdell entsprechen (siehe Beispiel in Abbildung 4-5 und Abbildung 4-11). Abbildung 5-14 zeigt dagegen Beispiele für Versuche, die von dem theoretischen Verlauf sichtbar abweichen.

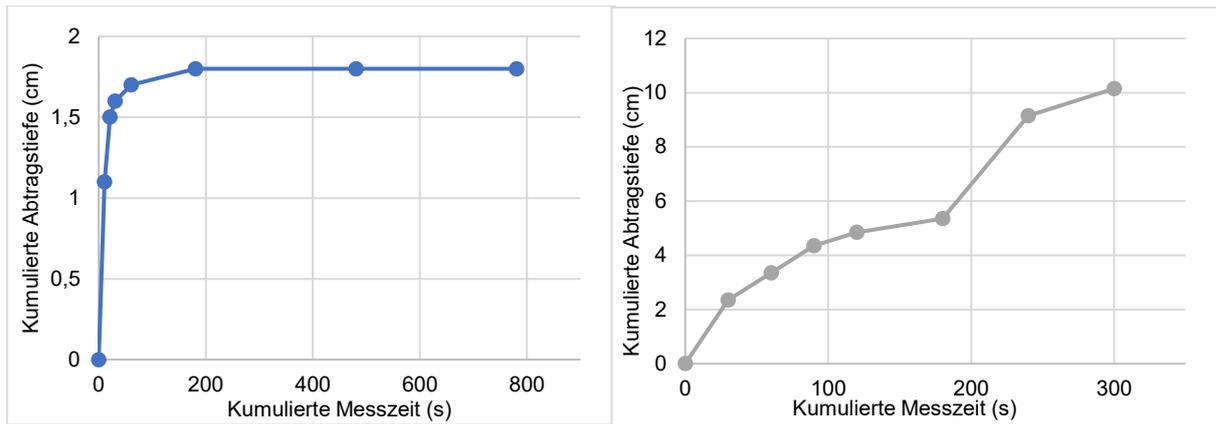


Abbildung 5-14: Beispiel für gemessene Abtragskurven im JET-Versuch

Beispielsweise führt eine inhomogene Probe zur Abweichung vom theoretischen Abtragsverlauf. Da diese über die Tiefe unterschiedlich erodibel ist, ändert sich die Abtragsrate zum Teil schlagartig (Abbildung 5-14, rechts). Dies betrifft insbesondere ungestörte Proben, die durch die fehlenden Aufbereitungsschritte immer mäßig inhomogen sind. Auch eine ungleichmäßige Verdichtung bei der Aufbereitung einer Laborprobe führt zu einer inhomogenen Probe. Für diese Proben wurde, wo möglich, eine mittlere Abtragsrate ermittelt.

Ein zu hoher Anteil Grobboden in einem erodiblen Boden zeigt sich in einer zu Beginn hohen Abtragsrate, so lange das Feinmaterial der obersten Zentimeter zwischen dem Grobmaterial ausgespült wird. Hat sich auf der Bodenoberfläche so viel Grobboden akkumuliert, dass er sie geschlossen bedeckt, hört der Abtrag schlagartig auf (siehe Beispiel Abbildung 5-14, links).

Auch Fehler in der Messung können zu ungewöhnlichen Abtragsverläufen führen. Wird bei einer weichen Bodenoberfläche der Tiefenmesser zu weit in den Boden geführt, entsteht lokal ein Fehler in der Kurve des Abtrags.

Da es sich bei der vorliegenden Untersuchung um eine exemplarische und primär qualitative Analyse zur Veränderlichkeit der Erodibilität handelt, werden alle durchgeführten Versuche für die Auswertung verwendet.

Entsprechend den Erkenntnissen aus Kapitel 4.3.5 wird zur Auswertung der JET-Versuche die Blaisdell-Routine verwendet.

Auswertung von Beziehungen

Alle ermittelten Kennwerte (Erodibilität aus dem JET-Versuch sowie alle direkt oder indirekt ermittelten Bodeneigenschaften) werden in einer Versuchsübersicht zusammengefasst. Hier werden auch die Versuchsrandbedingungen, wie z.B. Standhöhe, Versuchsdauer oder durchführende Person, notiert.

Aus der so erzeugten Datenbasis werden primär zwei Betrachtungen abgeleitet. Zum einen werden direkte Korrelationen zwischen einer potentiell erklärenden Variablen, wie z. B. % Feinsand, und den Erosionsparametern global für alle untersuchten Proben ausgewertet. Für alle Korrelationen werden die jeweiligen Korrelationskoeffizienten R^2 bestimmt. Zum anderen werden die Erosionsparameter kritische Schubspannung und Erodibilität gegeneinander geplottet und Beziehungen verschiedener Gruppen innerhalb dieser Plots untersucht, z.B. zwischen gestörten und ungestörten Proben.

Beide Ansätze werden genutzt, um gezielt die Fragen, welche in Kapitel 1.2 sowie in Kapitel 5.2.1. aufgezeigt wurden, zu beantworten. Hierfür werden vereinzelt auch Untergruppen der vollständigen Datenbasis ausgewertet, um bestimmte Abhängigkeiten isoliert zu untersuchen.

Alle Korrelationen werden mit linearen Beziehungen zwischen der zu bewertenden Eigenschaft und den logarithmierten Erosionsparametern gebildet.

Es ist explizit nicht das Ziel dieser Untersuchung, aufgrund der erhobenen Daten eine weitere Pedotransferfunktion zu dem bereits bestehenden Satz von Pedotransferfunktionen hinzuzufügen. Stattdessen soll herausgearbeitet werden, welche konstanten und variablen Eigenschaften des Bodens sich qualitativ entscheidend für den Erosionswiderstand zeigen.

5.3. Ergebnisse

Die Auswertung aller durchgeführten Versuche ist ausführlich im Anhang dokumentiert. Anhang 5-3 gibt einen Überblick über alle vorhandenen Bodenproben und alle bestimmten Parameter. Anhang 5-4 enthält für alle durchgeführten JET-Versuche jeweils ein Protokoll der Messtiefen und die ermittelten Erosionsparameter. Um alle Bodenproben zwischen den unterschiedlichen Schritten der Auswertung und den Versuchsprotokollen einwandfrei identifizieren und nachverfolgen zu können, wird in Anhang 5-5 eine Probenkodierung erstellt. Mit dieser ist jede individuelle verwendete Probe ansprechbar. Hierfür wird ein Abkürzungsschlüssel über alle relevanten Eigenschaften eingeführt, welche zusammengesetzt die individuelle Probenkodierung bilden. Die Probenkodierung wird über alle Auswertungen in dieser Arbeit und im Anhang hinweg verwendet, um kurze, verwechslungsfreie Darstellungen zu ermöglichen.

Folgende Punkte beschreiben den individuellen Schlüssel einer Probe

- Zugehörigkeit zur ersten oder zweiten Messkampagne (gibt Auskunft über den Fortschritt in der Entwicklung der Methoden und die durchgeführten Untersuchungen im Bodenzentrum)
- Bodenart (Standard / Grus / Löss)
- Datum der Probenahme (bezeichnet eindeutig, zu welcher Feldkampagne eine Probe gehört)
- Art der Probenahme (Standard / Vergleichsprobe / Leitprofil / Oberfläche)
- Art der Probe (gestört / ungestört / Laborprobe)
- Nummer zur näheren Bezeichnung (z.B. fortlaufende Versuchsnummer, Entnahmestelle auf dem Hang)
- Zweck der Probe (regulärer Versuch oder bei Vergleichsproben Art der Fragestellung)

Im folgenden Kapitel werden zunächst die ermittelten Leitprofile vorgestellt und damit die Genese der verwendeten Böden bewertet (Kapitel 5.3.1). In Kapitel 5.3.2 wird ein Kurzüberblick über die Ergebnisse der Versuche im Bodenzentrum gegeben. Die Auswertung der JET-Versuche gliedert sich in eine statistische Auswertung der durchgeführten Versuche (Kapitel 5.3.3), eine Bestimmung allgemeiner Korrelationen (Kapitel 5.3.4) und die gezielte Auswertung der in Kapitel 5.2.1 formulierten Fragestellungen (Kapitel 5.3.5 – spezielle Aspekte). Eine Zusammenfassung der Ergebnisse inkl. Diskussion und Literaturvergleich folgt anschließend in Kapitel 5.4.

5.3.1. Ergebnisse der Feldarbeiten

Einordnung der Leitprofile

Abbildung 5-15 zeigt die Ansprache von Horizonten in den Leitprofilen von Löss- und Grushang. Für beide Hänge wurden Stechzylinderproben aus den abgegrenzten Horizonten genommen. Tabelle 5-2 gibt die Entnahmetiefen der Proben im Lösshang zusammen mit einem Überblick über die wichtigsten ermittelten Bodeneigenschaften der Horizonte an. Die detaillierten Ergebnisse sind bei Borm (2017) und Ngassam (2018) zusammengestellt.

Tabelle 5-2: Horizonte im Leitprofil Lösshang

| | Entnahmetiefe (m) | Bodenart | Kies (%) | Schluff (%) | Ton (%) | Kalk (%) | Organik (%) |
|-------|-------------------|-----------|----------|-------------|---------|----------|-------------|
| Ah2 | 0,2 | Ut2 | < 1 | 72,9 | 9,9 | 0 | 2,6 |
| Ah1 | 0,3 | Ut2 | < 1 | 73,7 | 11,2 | 0 | 2,1 |
| Bs | 0,6 | Ut4 | < 1 | 70,2 | 18 | 0 | 0,2 |
| Bs/Cv | 0,95 | Ut4 | < 1 | 69,6 | 18,1 | 0 | 0,1 |
| Cv | 1,3 | Ut3 / Ut2 | < 1 | 73,7 | 12,9 | 0 | 0,1 |
| C | 1,6 | Uu / Us | 1,2 | 71,6 | 6,7 | 0,5 | 0,1 |

Für den Lösshang ist zu sehen, dass der C-Horizont, welcher als reiner Löss bewertet wurde, bei einer Tiefe von ca. 1,6 m erreicht wurde. Markant für einen über Löss entwickelten Boden ist die eng gestufte Korngrößenverteilung mit hohen Anteilen Schluff in allen Horizonten. Der Tongehalt variiert mit dem höchsten Tongehalt von 18 % im B-Horizont. Ein nachweisbarer Kalkgehalt, mit jedoch lediglich 0,5 %, tritt erst im C-Horizont auf. Grobbodenanteile konnten im Profil nicht nachgewiesen werden. Die genannten Charakteristika passen zu der erwarteten Bodenbildung Parabraunerde über Löss.

Das entwickelte Bodenprofil wurde im Feld optisch abgegrenzt mit einer Ah/Bs/Cv/C Horizontfolge, wobei der Ah-/ Bs-Horizontwechsel durch die markante Färbung mit schwarzen und rötlichen Farbanteilen sowie einer klaren Änderung der Lagerungsstruktur abgegrenzt wurde. Der als Cv definierte Horizont gleicht in Farbe und Struktur bereits dem darunter anstehenden Löss, zeigt im Feld jedoch keine positive Salzsäurereaktion. Im C-Horizont konnte stattdessen eine Reaktion mit Salzsäure gesehen werden, die auch auf höhere Werte als die im Labor nachgewiesenen 0,5 % schließen lässt.

Die im Feld festgestellte Horizontfolge weicht gegenüber der typischen Ah/Al/Bt/C Horizontfolge einer Parabraunerde ab. Es bleibt offen, ob der Illuvialhorizont tatsächlich, wie vor Ort durch die Rotfärbung wahrgenommen, primär von Sesquioxidanreicherungen anstelle von Tonanreicherung geprägt ist und der klar abgegrenzte Eluvialhorizont bzw. lessivierte Horizont innerhalb des A-Horizonts fehlt. Amelung et al. (2018) geben für die Tonanreicherung im Bt Horizont einer Parabraunerde eine Spanne von 3 bis 8 % gegenüber dem A-Horizont an, wobei die Tonverlagerung weiter das eindeutige Merkmal zur Abgrenzung einer Parabraunerde (Lessives) darstellt. Im Falle des Löss-Leitprofils liegt diese Tonanreicherung bei 7 - 8 %, so dass hier weiter von einer Parabraunerde als entwickeltem Boden ausgegangen wird. Hierauf deuten auch die Profile von pH-Wert und Kationenaustauschkapazität hin (siehe Borm 2017).

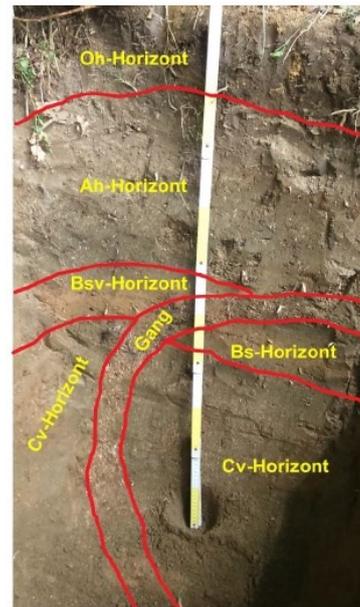
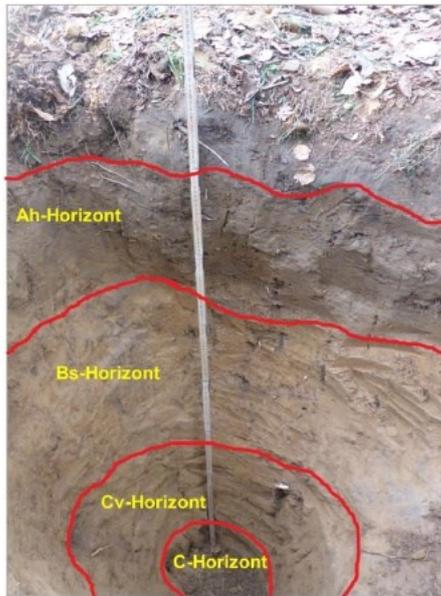


Abbildung 5-15: Aufnahmen der Leitprofile mit eingetragenen Horizonten (Borm (2017), Löss-Hang links, Grus-Hang rechts)

Das Leitprofil am Grushang (Abbildung 5-15, rechts) wurde bis in eine Tiefe von ca. 1,2 m aufgeschlossen, in welcher deutlich ein Cv-Horizont als sichtbare Vergrusungszone erkannt werden konnte. Bei geringer Mächtigkeit zeigt sich das Profil im Vergleich zum Lössprofil deutlich heterogener. Es wurde im Feld eine Oh/Ah/Bv/Cv Horizontfolge abgegrenzt, wobei Teile des B-Horizonts als Bsv eingeschätzt wurden (die Ausführungen zur Bildung eines Bs-Horizonts gelten hier analog zum Lössprofil). Weiter durchzieht ein klar durch deutlich höheren Grusanteil abgegrenzter Gang das Profil. Auch die Mächtigkeiten der Horizonte sind an der Profilwand heterogen. Tabelle 5-3 gibt einen Überblick über die Entnahmetiefen der Bodenproben sowie über deren wichtigste Eigenschaften.

Tabelle 5-3: Horizonte im Leitprofil Grushang

| | Entnahmetiefe (m) | Bodenart | Kies (%) | Schluff (%) | Ton (%) | Kalk (%) | Organik (%) |
|------|-------------------|----------|----------|-------------|---------|----------|-------------|
| Oh | 0,05 | Su4 | 8,3 | 43,6 | 2,0 | 0 | 4,5 |
| Ah1 | 0,26 | Su3 | 5,3 | 24,5 | 5,5 | 0 | 0,2 |
| Ah2 | 0,38 | Su2 | 10,1 | 12,5 | 3,2 | 0 | 0,2 |
| Bsv | 0,4 | Sl3 | 1,6 | 31,2 | 8,4 | 0 | 0,1 |
| Gang | 0,48 | Sl2 | 17,2 | 13,5 | 3,8 | 0,1 | 0,1 |
| Cv | 1,0 | Su3 | 4,0 | 25,4 | 4,3 | 0,1 | 0,1 |

Der Grobbodenanteil liegt im Profil zwischen 2 und 10 %. Im Gang liegt er mit 17 % deutlich höher. Ton wird mit Anteilen zwischen 2 und 8 % und mit höchstem Tongehalt im B-Horizont festgestellt, was zu der im Feld identifizierten Verlehmung im B-Horizont passt. Schluff und Sandanteile variieren, wobei der Sandanteil in allen Horizonten höher ist als der Schluffanteil. Weder in der Felduntersuchung noch im Labor konnte Karbonat in einem der Horizonte festgestellt werden.

Borm (2017) führt aus, dass die Mineralanalyse des Grus-Bodens vor allem Feldspate (Plagioklas) und Amphibole (Hornblende) zeigt. Quarz findet sich nur in sehr geringen Mengen und es liegt kein Biotit (Dunkelglimmer) vor, was einer Vergrusung über Biotitgranit widerspricht. Eine Umwandlung der vorliegenden Minerale in Tonminerale (Verlehmung) bietet keine plausible Erklärung für die vorgefundene Zusammensetzung, da Quarz deutlich verwitterungsstabiler als die vorgefundene Feldspate ist und sich außerdem die vorgefundene Tonminerale nicht aus Biotit entwickeln. Borm (2017) vermutet daher die Bildung einer Braunerde über einem Amphibolit. Da jedoch beide verwendeten geologischen Karten einen Amphibolitzug erst in mehr als 2 km Entfernung zeigen, wird dies als nicht wahrscheinlich angesehen. Vermutet wird vielmehr, dass der ca. 300 – 500 m hangab des Vergleichshangs innerhalb der Flasergranitoidzone verzeichnete Dioritzug auch im Bereich des Vergleichshangs ansteht.

5.3.2. Charakteristika der gewonnenen Bodenproben

Im Bodenlabor wurden drei unterschiedliche Referenzböden – Löss, Grus und Standardboden – untersucht, wobei für die beiden erstgenannten jeweils verschiedene Horizonte betrachtet wurden. Der Standardboden wurde vor Durchführung aller Versuche homogenisiert, so dass hier keine Horizontierung mehr vorlag. Die Untersuchungen wurden hier nach Boden respektive nach Horizont durchgeführt und gelten damit für alle JET-Proben aus dem jeweiligen Material.

Tabelle 5-4 gibt einen Überblick über die bestimmten Korngrößenverteilungen, Stabilitätseigenschaften (Aggregatstabilität, Atterberg-Grenzen) sowie Lagerungsdichte, Porosität und organische Anteile.

Tabelle 5-4: Überblick über die Bodenproben: Bodenart (Anteil Kies (%G), Anteil Sand (%S), Anteil Schluff (%U), Anteil Ton (%T), Anteil Feinsand (%VFS)) (Gewichts%), Aggregatstabilität (AS) (-), Fließgrenze (FG), Ausrollgrenze (AG) (Gewichts%-Wasser), Lagerungsdichte (ρ_b) (g/cm³), Porosität (n) (%), Anteil Organik (%OM) (Gewichts%)

| Boden | %G | %S | %U | %T | %VFS | AS | FG | AG | ρ_b | n | %OM |
|---------------------------------|-------|------|------|------|------|----|------|------|----------|-------|-----|
| Leitprofil – Löss | | | | | | | | | | | |
| Ah1 | 0,7 | 16,5 | 72,9 | 9,9 | - | 4 | - | - | 1,64 | 37,88 | 2,6 |
| Ah2 | 0,6 | 14,4 | 73,7 | 11,2 | 10 | 4 | - | - | 1,51 | 44,33 | 2,1 |
| Bs | 0,1 | 11,7 | 70,2 | 18 | 8 | 5 | - | - | 1,6 | 40,87 | 0,2 |
| Bs/Cv | 0,5 | 11,7 | 69,6 | 18,1 | - | 6 | - | - | 1,63 | 39,86 | 0,1 |
| Cv | 0,4 | 13 | 73,7 | 12,9 | - | 6 | - | - | 1,69 | 38,04 | 0,1 |
| C | 1,2 | 20,5 | 71,6 | 6,7 | 14 | 6 | - | - | - | - | 0,1 |
| Leitprofil – Grus | | | | | | | | | | | |
| Ah1 | 5,3 | 64,7 | 24,5 | 5,5 | 15 | 3 | - | - | 1,58 | 45,39 | 0,2 |
| Ah2 | 10,10 | 74,2 | 12,5 | 3,2 | - | 3 | - | - | 1,55 | 46,03 | 0,2 |
| Bsv | 1,6 | 58,8 | 31,2 | 8,40 | 18 | 3 | - | - | 1,59 | 42,36 | 0,1 |
| Cv1 | 4 | 66,3 | 25,4 | 4,3 | 17 | 4 | - | - | 1,42 | 49,98 | 0,1 |
| Cv2 | 8,1 | 71,7 | 18 | 2,2 | - | 4 | - | - | 1,46 | 48,34 | 0,1 |
| Standard | | | | | | | | | | | |
| S | 1 | 53,1 | 40,6 | 5,2 | 17,1 | - | - | - | - | - | - |
| Oberflächenproben – Löss | | | | | | | | | | | |
| 1-1 | 5 | 36,6 | 54,8 | 3,5 | 10,8 | - | - | - | - | - | - |
| 1-2 | 0,5 | 21,8 | 63,6 | 14,1 | 12,5 | - | - | - | - | - | - |
| 1-3 | 0,5 | 14,8 | 79,8 | 4,9 | 7,2 | - | - | - | - | - | - |
| 1-4 | 15 | 10,8 | 64,5 | 9,7 | 4,4 | - | - | - | - | - | - |
| 1-5 | 0,2 | 9,9 | 76 | 13,9 | 5,7 | - | - | - | - | - | - |
| 1-6 | 1,2 | 12 | 80,9 | 5,9 | 4,7 | - | - | - | - | - | - |
| 2-1-1 | 1,8 | 31,4 | 52,9 | 13,9 | 15,2 | 3 | 26,8 | 23,4 | - | - | 5,7 |
| 2-1-2 | 1,8 | 18,1 | 76,3 | 3,8 | 8,9 | 5 | 22,9 | 6,8 | - | - | 5,7 |
| 2-2-1 | 1,7 | 24,8 | 64,1 | 9,5 | 13,4 | 4 | 28,9 | 20,7 | - | - | 5,4 |
| 2-2-2 | 0,7 | 19 | 68,2 | 12,1 | 12,7 | 5 | 25,3 | 21,5 | - | - | 4,4 |
| 2-3 | 0,7 | 25,1 | 72,3 | 1,9 | 14,8 | 4 | 27,2 | 20,3 | - | - | 3,7 |
| 2-4 | 3,8 | 15,3 | 72,4 | 8,5 | 8,1 | 4 | 21,9 | 10,5 | - | - | 3,3 |
| 2-6-1 | 0,8 | 14,4 | 77,6 | 7,1 | 7,3 | 5 | 42,5 | 10,8 | - | - | 4,7 |
| 2-6-2 | 0,4 | 7,4 | 87,3 | 4,9 | 6 | 6 | 17,4 | 7,7 | - | - | 6,3 |

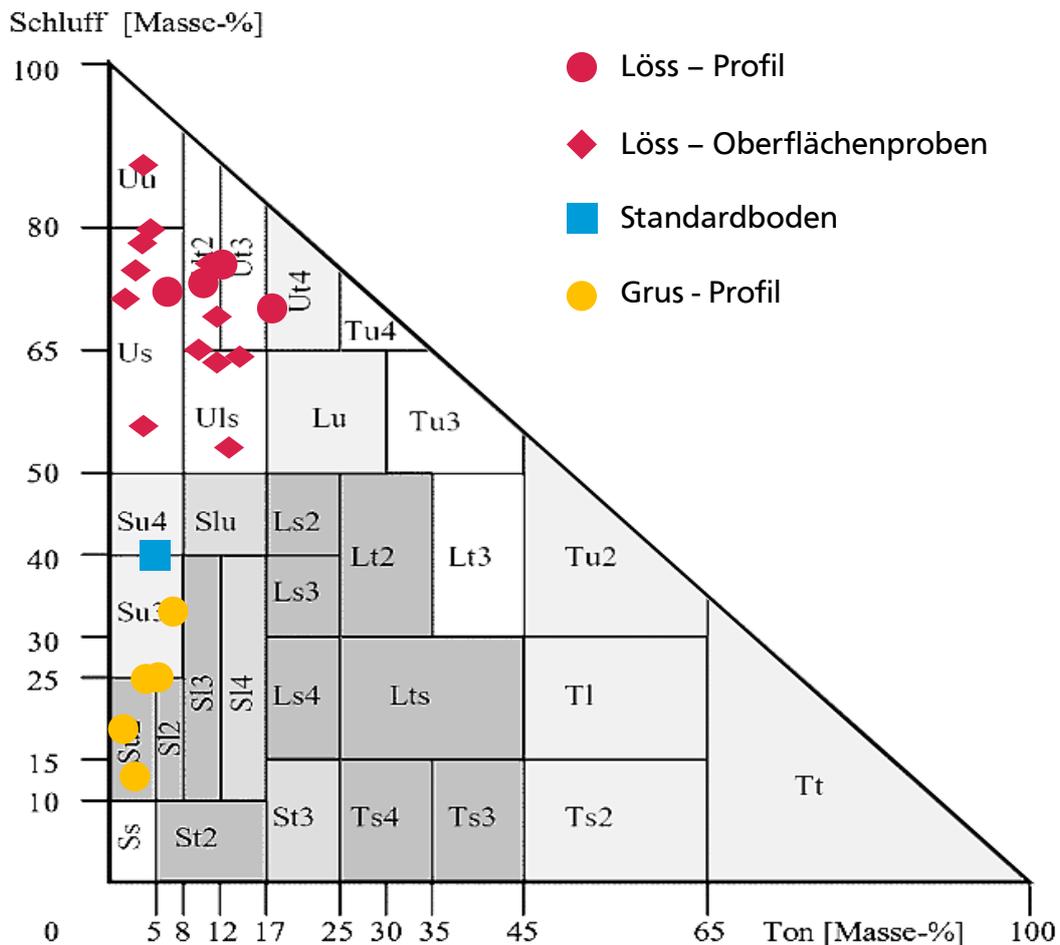


Abbildung 5-16: Einordnung der verwendeten Proben in ein Feinbodenartendiagramm (Sponagel 2005, verändert)

Abbildung 5-16 zeigt die ermittelten Korngrößen in der Zuordnung nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (Sponagel 2005). Es ist zu sehen, dass alle Horizonte des Löss-Leitprofils ebenso wie alle Oberflächenproben des Lösshangs als Schluff zu bewerten sind, während der Standardboden und alle Horizonte des Grushangs den Sanden zuzuordnen sind. Weiter ist festzustellen, dass sich Tonanteile der Böden im Vergleich zu Schluffanteilen kaum unterscheiden.

Der Standardboden ist in seiner Charakteristik dem Grushang näher als dem Lösshang, ist aber dennoch zwischen den beiden untersuchten Hängen einzuordnen.

Die Horizonte des Grushangs zeigen größere Unterschiede als die des Lösshangs, wobei die Unterschiede vor allem im Schluff- / Sandanteil liegen, während für den Lösshang vor allem der Tonanteil variiert.

Auffällig ist auch, dass die Oberflächenproben des Lösshangs ein deutlich größeres Spektrum aufspannen als die Horizonte, jedoch durchweg den Schluffen zuzuordnen sind. Die Horizonte können etwa in der Mitte der Oberflächenproben verortet werden, wobei die Oberflächenproben durchweg weniger Ton (und damit mehr Sand) aufweisen als die Horizonte. Dies deckt sich mit den Ausführungen von Ngassam (2018) zu reduzierten Horizonten auf der bewirtschafteten Oberfläche des Lösshangs. An diesem Vergleich fällt bereits auf, dass der ursprünglich geplante Ansatz, die Oberflächenproben über das Leitprofil zu charakterisieren, nicht realisierbar ist.

5.3.3. Ergebnisse der JET-Versuche

Tabelle 5-5 gibt einen Überblick über alle durchgeführten JET-Versuche mit den vorliegenden Randbedingungen und den ermittelten Erosionsparametern.

Die dargestellten Randbedingungen setzen sich zusammen aus den festen Eigenschaften der Bodenprobe, also der Zuordnung zu einem Boden (Standard/ Löss/ Grus) und der Zuordnung zu einer Probenart (Laborprobe/ Gestörte Probe/ Ungestörte Probe). Die Eigenschaften der Böden können Kapitel 5.3.2 entnommen werden und werden für einen bestimmten Bodenkörper als konstant angenommen. Fragen zur kleinräumigen Variabilität, also den Unterschieden der konstanten Bodeneigenschaften innerhalb eines Bodenkörpers, werden in Kapitel 5.3.5 gesondert betrachtet. Variable Eigenschaften der Bodenprobe sind dagegen der Wassergehalt und die Probendichte. Während der Wassergehalt grundsätzlich auch im Feld zeitlich variabel ist, ist die Probendichte eine im Rahmen der Versuche definierte Eigenschaft, die zumindest lose mit der Lagerungsdichte im Feld zusammenhängen sollte und damit indirekt ein variables Verhalten eines Bodens infolge z.B. Verdichtung durch Bearbeitung beschreiben kann.

Neben den konstanten und variablen Eigenschaften der Bodenproben, werden die veränderlichen Randbedingungen der Versuchsdurchführung dargestellt. Dies sind die Standhöhe des Messgeräts bzw. daraus abgeleitet die Anfangsschubspannung τ_0 im Versuch, die Versuchsdauer und die Anzahl der Messungen während eines Versuchs sowie die den Versuch durchführende Person.

Zuletzt sind die ermittelten Erosionsparameter der jeweiligen Bodenprobe τ_c und k_d angegeben, für die im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchen ist, ob diese eher als feste oder variable Eigenschaften eines Bodens zu bewerten sind. Die Größe T_{max} , also die insgesamt während des Versuchs erreichte Erosionstiefe in der Bodenprobe, ist sowohl von den Bodeneigenschaften als auch von den Randbedingungen des Versuchs abhängig.

Tabelle 5-5: Überblick über die durchgeführten JET-Versuche: Bodenart (Löss (L), Grus (G), Standard (S), Art der Probe (Ungestört (U), Gestört (G), Labor (L)), Wassergehalt (%W) (Gewichts%), Dichte (g/cm^3), Anfangsschubspannung τ_0 (Pa), Anzahl Messpunkte (-), Versuchsdauer (s), Abtragtiefe bei Versuchsende T_{max} (cm), durchführende Person, ermittelte Parameter τ_c (Pa) und k_d (cm^3/Ns)

| ID | Boden | Art der Probe | % W | Dichte | τ_0 | Anzahl | Dauer | T_{max} | Person | τ_c | k_d |
|----|-------|---------------|------|--------|----------|--------|-------|-----------|--------|----------|-------|
| 1 | L | U | 18,9 | 1,62 | 64,6 | 8 | 1.350 | 2 | AR+JS | 4,5 | 4 |
| 2 | L | U | 23,4 | 1,67 | 94,3 | 5 | 660 | 1,5 | JS | 5,3 | 3 |
| 3 | L | U | 13,4 | 1,30 | 41,8 | 2 | 600 | 12 | JS | 0,02 | 80 |
| 4 | L | U | 17,9 | 1,68 | 51 | 15 | 2.510 | 2,4 | AH | 3,7 | 9 |
| 5 | L | U | 21,3 | 1,49 | 64,9 | 9 | 2.040 | 5,6 | JS | 0,6 | 4 |
| 6 | L | U | 21,8 | 1,49 | 58,2 | 23 | 2.480 | 11,3 | AH | 0,5 | 15 |
| 7 | L | G | 18,9 | 1,83 | 64,9 | 9 | 1.860 | 3,8 | JS | 1,3 | 4 |
| 8 | L | G | 23,4 | 1,96 | 94,3 | 6 | 3.600 | 0,4 | JS | 15,4 | 4 |
| 9 | L | G | 13,4 | 1,72 | 64,9 | 11 | 1.800 | 11,9 | JS | 0,01 | 30 |
| 10 | L | G | 17,9 | 1,97 | 64,9 | 6 | 2.100 | 2,3 | JS | 0,8 | 1 |
| 11 | L | G | 21,3 | 1,87 | 94,3 | 7 | 3.000 | 1,5 | JS | 4,2 | 0,5 |
| 12 | L | G | 21,8 | 1,82 | 94,3 | 7 | 2.700 | 2,1 | JS | 1,2 | 0,5 |
| 13 | S | L | 5 | 1,63 | 27,3 | 6 | 690 | 11,3 | AR+AH | 0,012 | 220 |
| 14 | S | L | 10 | 1,79 | 27,3 | 8 | 295 | 10 | AR+AH | 0,031 | 200 |
| 15 | S | L | 15 | 2,10 | 27,3 | 10 | 1.330 | 5,3 | AR+AH | 0,45 | 16 |
| 16 | S | L | 15 | 2,02 | 27,3 | 9 | 1.380 | 5,3 | AR+AH | 0,45 | 16 |
| 17 | S | L | 15 | 2,13 | 18,3 | 17 | 5.500 | 8,7 | AR+AH | 0,3 | 14 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|------|------|-------|----|-------|------|-------|--------|-----|
| 18 | S | L | 15 | 2,17 | 18,3 | 14 | 1.780 | 4,5 | AH | 0,43 | 15 |
| 19 | S | L | 15 | 2,08 | 38,4 | 23 | 3.770 | 9,4 | AH | 0,36 | 10 |
| 20 | S | L | 15 | 2,04 | 38,4 | 19 | 2.320 | 6,6 | AH | 0,55 | 10 |
| 21 | S | L | 15 | 1,98 | 18,3 | 20 | 3.270 | 8,1 | AH | 0,2 | 20 |
| 22 | S | L | 20 | 1,97 | 51 | 3 | 1.260 | 4,6 | AR+JS | 1 | 10 |
| 23 | S | L | 12,1 | 1,94 | 22,4 | 10 | 840 | 4,3 | AR+JS | 0,2 | 18 |
| 24 | S | L | 6,2 | 1,66 | 22,4 | 9 | 630 | 3,9 | AR+JS | 0,16 | 24 |
| 25 | L | L | 21,7 | 2,17 | 41,8 | 5 | 4.340 | 0,47 | AR+PN | 7,4 | 8 |
| 26 | L | L | 11,1 | 2,16 | 41,8 | 6 | 4.640 | 0,2 | AR+PN | 8,2 | 0,6 |
| 27 | L | L | 9,3 | 2,16 | 41,8 | 6 | 4.040 | 2,85 | AR+PN | 2,1 | 2 |
| 28 | G | L | 11,9 | 2,26 | 28,7 | 7 | 4.340 | 4,5 | PN | 0,71 | 6,5 |
| 29 | G | L | 17,3 | 2,09 | 18,3 | 5 | 4.280 | 3 | PN | 1,3 | 3 |
| 30 | G | L | 15,3 | 2,06 | 18,5 | 7 | 780 | 1,8 | PN | 2,4 | 150 |
| 31 | L | G | 23 | 2,04 | 108,2 | 7 | 1.800 | 3,3 | JS | 2,7 | 1,5 |
| 32 | L | L | 23 | 1,92 | 108,2 | 7 | 1.800 | 2,1 | JS | 5,1 | 1 |
| 33 | L | L | 23 | 1,96 | 108,2 | 7 | 1.800 | 3,8 | JS | 2,3 | 2 |
| 34 | L | U | 7 | 1,58 | 64,9 | 6 | 2.210 | 2,4 | AR | 6,3 | 5 |
| 35 | L | U | 8,9 | 1,58 | 72 | 6 | 2.670 | 2,5 | AR | 5,5 | 4 |
| 36 | L | U | 4,1 | 1,54 | 72 | 6 | 453 | 11,4 | AR | 0,51 | 120 |
| 37 | L | U | 4,1 | 1,54 | 40 | 9 | 4.260 | 3,9 | AR | 1,6 | 2,5 |
| 38 | L | L | 12,3 | 2,08 | 72 | 7 | 1.800 | 4,4 | AR+SA | 2,5 | 2 |
| 39 | L | L | 12,3 | 2,14 | 72 | 6 | 1.950 | 0,5 | AR+SA | 11,7 | 1 |
| 40 | L | L | 12,3 | 2,05 | 72 | 6 | 870 | 10,1 | SA | 0,23 | 10 |
| 41 | S | L | 13,6 | 2,04 | 36,7 | 8 | 1.250 | 4,3 | AR+SA | 1,1 | 15 |
| 42 | S | L | 16,4 | 2,03 | 44,2 | 8 | 2.115 | 5,1 | AR+SA | 2,4 | 9 |
| 43 | S | L | 9 | 1,97 | 30,3 | 8 | 203 | 5,9 | SA | 0,12 | 100 |
| 44 | G | G | 12,5 | 2,06 | 30,3 | 7 | 165 | 5,9 | SA | 0,087 | 150 |
| 45 | G | G | 7,8 | 2,07 | 30,3 | 10 | 500 | 4,5 | SA | 0,34 | 40 |
| 46 | L | G | 27,2 | 1,99 | 51 | 8 | 3.460 | 1,5 | SA | 4,7 | 1 |
| 47 | L | G | 9,8 | 1,74 | 51 | 6 | 85 | 10,1 | SA | 0,01 | 250 |
| 48 | L | G | 4,1 | 1,74 | 41,8 | 8 | 121 | 5,8 | SA | 0,41 | 130 |
| 49 | L | G | 8,6 | 1,79 | 60,4 | 8 | 211 | 5,1 | SA | 0,67 | 50 |
| 50 | L | G | 7,6 | 1,80 | 33,1 | 8 | 310 | 3,9 | SA | 0,88 | 50 |
| 51 | L | G | 6,5 | 1,64 | 32,8 | 8 | 225 | 3,5 | SA | 0,89 | 60 |
| 52 | L | L | 23,4 | 2,10 | 60,4 | 9 | 4.360 | 2,7 | SA | 2,6 | 0,9 |
| 53 | L | G | 8,9 | 1,75 | 32,8 | 10 | 805 | 5,5 | SA | 0,37 | 30 |
| 54 | L | G | 7 | 1,64 | 32,8 | 11 | 890 | 6,2 | SA | 0,8 | 40 |
| 55 | L | L | 21,1 | 2,04 | 60,4 | 8 | 5.910 | 7,1 | SA | 0,93 | 3 |
| 56 | L | L | 5,5 | 1,87 | 46,1 | 7 | 130 | 6,9 | SA | 0,034 | 120 |
| 57 | L | L | 8,3 | 1,72 | 46,1 | 10 | 758 | 5,6 | SA | 0,68 | 30 |
| 58 | L | G | 7,8 | 1,87 | 21,4 | 9 | 265 | 5,8 | AR+SA | 0,36 | 150 |
| 59 | L | U | 6,5 | 1,64 | 43,9 | 9 | 2.730 | 2,4 | AR | 3,7 | 12 |
| 60 | L | U | 6,5 | 1,34 | 43,9 | 9 | 1.575 | 5,7 | AR | 0,58 | 12 |
| 61 | L | U | 8,6 | 1,72 | 43,9 | 8 | 1.740 | 3,2 | AR | 2,7 | 8 |
| 62 | L | U | 7,6 | 1,72 | 43,9 | 8 | 2.265 | 4,3 | AR | 2,8 | 9 |
| 63 | L | U | 7,8 | 1,68 | 43,9 | 7 | 300 | 10,2 | AR | 0,0085 | 90 |

Abbildung 5-17 zeigt alle quantitativen Größen in Form von Boxplots, um einen schnellen Überblick über das Spektrum der durchgeführten Versuche zu ermöglichen. Der Wassergehalt der verwendeten Proben lag größtenteils zwischen 8 und 17 %, was in etwa dem in Kapitel 4.3.5 festgestellten sinnvollen Bereich entspricht. Einzelne Proben zeigen einen kleineren Wassergehalt bis 4% und einen größeren Wassergehalt bis 27 %. Die Probedichte deckt primär

ein enges Spektrum zwischen ca. 1,7 und 2,1 g/cm³ ab, nur einzelne Proben liegen geringfügig darüber und darunter.

Für die Versuchsdurchführung wurde weitgehend eine Anfangsschubspannung (an der Düse) zwischen 30 Pa und 65 Pa genutzt, was einer Anfangsschubspannung auf der Probe von 7 Pa bis 15 Pa entspricht. Nur einzelne Versuche wurden mit höheren oder niedrigeren Anfangsschubspannungen durchgeführt. Aus dem kleinen Spektrum der Schubspannungen leitet sich das mit einem Wertebereich von ca. 200 s bis ca. 6.000 s deutlich größere Spektrum der Versuchsdauern ab, das benötigt wird, um für die unterschiedlichen Böden auswertbare Erosionstiefen T_{max} zu erhalten.

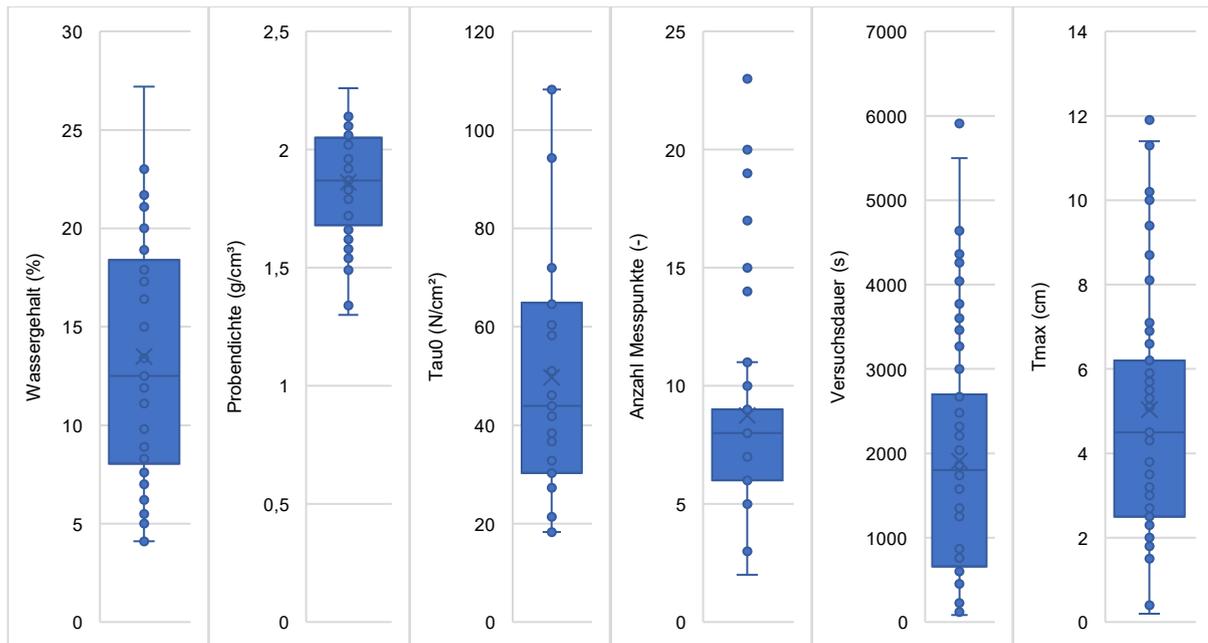


Abbildung 5-17: Übersicht über alle durchgeführten JET-Versuche – Boxplots: Variable Eigenschaften der Bodenprobe – Wassergehalt und Probendichte; Versuchsaufbau und Durchführung – Anfangsschubspannung, Anzahl Messungen und Versuchsdauer sowie T_{max}

Abbildung 5-18 zeigt die ermittelten Erosionsparameter für alle durchgeführten Versuche. Diese werden in der üblichen, von Hanson & Simon (2001) etablierten Darstellung mit τ_c auf der X-Achse (Pa) und k_d auf der Y-Achse (cm³/Ns) mit jeweils logarithmischen Achsen dargestellt. Hier ist das Spektrum der ermittelten Erosionsparameter mit τ_c zwischen 0,005 und ca. 20 Pa, sowie k_d zwischen 0,5 und 500 cm³/Ns. In der logarithmischen Darstellung ist eine signifikante negative lineare Korrelation zwischen den Erosionsparametern erkennbar.

Abbildung 5-19 zeigt die Messwerte erneut auf logarithmischen Achsen, wobei die von Hanson & Simon (2001) definierten charakteristischen Bereiche eingetragen sind und hierfür die Y-Achse nach unten verlängert wurde. Weiterhin wurde die Y-Achse im Vergleich zur Originaldarstellung nach oben bis auf einen Wert von 1.000 cm³/Ns verlängert. Es ist zu sehen, dass der Großteil der erzielten Messungen in den Bereich *very erodible* bis *erodible* fällt, einzelne Punkte liegen in dem Bereich *moderately resistant*. Die stabileren Kategorien wurden in durchgeführten Versuchen nicht erreicht.

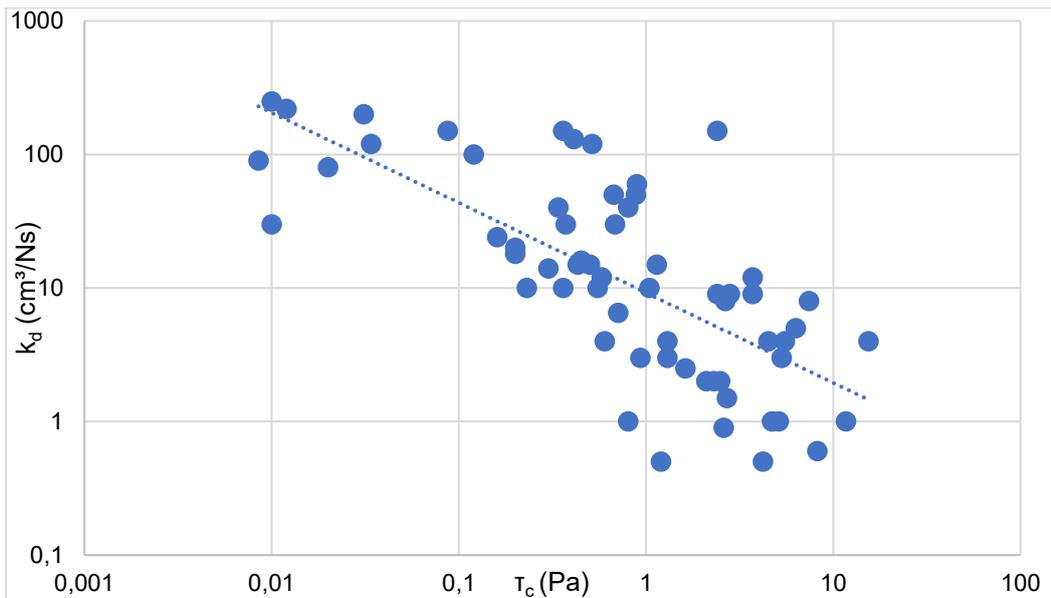


Abbildung 5-18: Aus den JET-Versuchen abgeleitete Erosionsparameter, Darstellung angelehnt an Hanson & Simon (2001); mit Regressionsgerade $R^2 = 0,38$

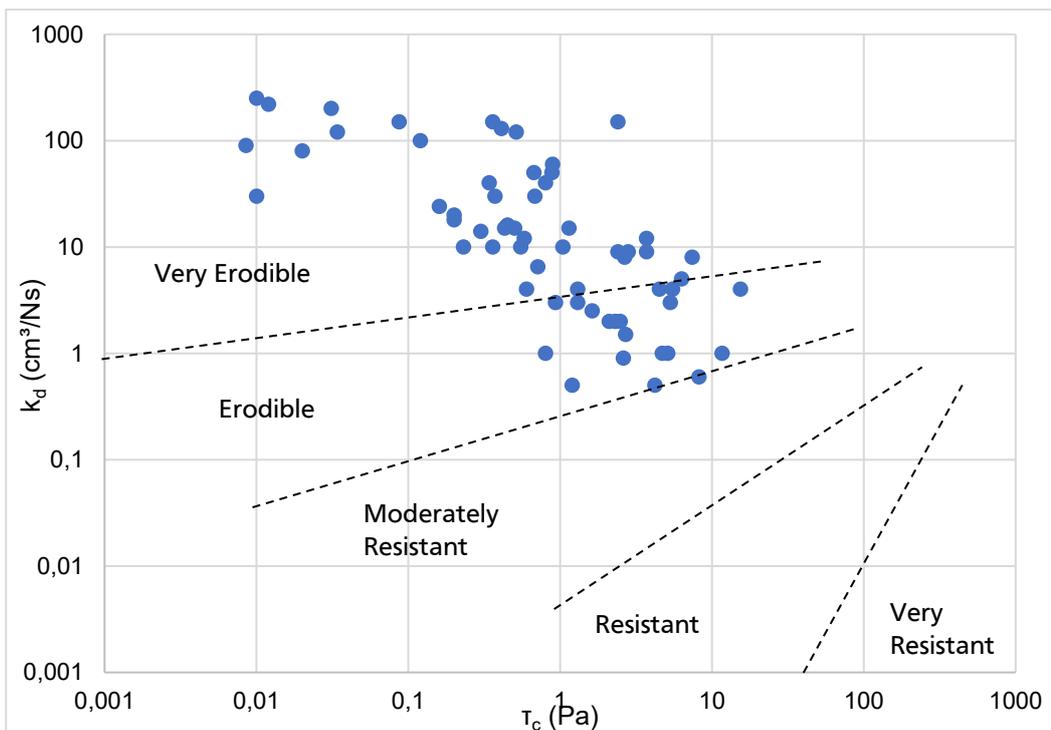


Abbildung 5-19: Erosionsparameter entsprechend Abbildung 5-18 in der Darstellung und Einordnung nach Hanson & Simon (2001)

Aus der Übersicht können bereits wichtige Erkenntnisse in Bezug auf die formulierten Fragestellungen gewonnen werden:

- Die ermittelten Erosionsparameter decken ein großes Spektrum von knapp vier Zehnerpotenzen für den Parameter τ_c und knapp drei Zehnerpotenzen für den Parameter k_d ab.
- Rund 20 % der Werte liegen bezüglich k_d oberhalb des von Hanson & Simon (2001) aufgezeigten Spektrums.

-
- Innerhalb des aufgespannten Wertebereichs sind die Datenpunkte frei verteilt, es ist keine Bildung von Clustern erkennbar.
 - Die beiden vorgenannten Punkte lassen es unwahrscheinlich erscheinen, dass allein die Zuordnung zu einem Boden (Standard, Löss, Grus) die Variabilität der ermittelten Erosionsparameter erklären kann.
 - Trotz der Spanne der Ergebnisse über mehrere Zehnerpotenzen liegen die ermittelten Erosionsparameter nur in drei der fünf nach Hanson & Simon (2001) definierten Bereiche.
 - Die Böden sind, obwohl bewusst 3 unterschiedliche Böden gewählt wurden, im Vergleich zum gesamten Spektrum der Bodentypen in ihrer Charakteristik noch relativ ähnlich. Dies betrifft besonders die vorgefundenen Bodenarten mit einem insgesamt hohen Anteil Schluff und Feinsand (siehe Kapitel 5.3.2).

5.3.4. Allgemeine Korrelationen

Zunächst wird die Gesamtheit aller durchgeführten Versuche ausgewertet und Korrelationen zwischen den ermittelten Boden- und Versuchseigenschaften und den ermittelten Erosionsparametern bestimmt. Entsprechend der Zusammenstellung in Kapitel 5.3.2 können nicht für jeden Eingangsparameter alle Versuche ausgewertet werden. Eigenschaften, die nur für einzelne Bodenproben bestimmt wurden, werden nicht in den allgemeinen Korrelationen, sondern in der Auswertung der speziellen Aspekte in Kapitel 5.3.5 diskutiert. Die Auswertung der Korrelationen erfolgt angelehnt an die Ausführungen in Kapitel 5.3.3 in drei Gruppen – konstante Bodeneigenschaften (Abbildung 5-20), variable Bodeneigenschaften (Abbildung 5-21) und Randbedingungen der Versuche (Abbildung 5-22).

Konstante Bodeneigenschaften, welche für alle JET-Versuche direkt oder indirekt bestimmt worden sind, sind lediglich die Korngrößenverteilungen der Böden. Da diese typischerweise die Basis für die Bestimmung des Erosionswiderstands aus Pedotransferfunktionen oder in Erosionsmodellen darstellen (siehe Kapitel 2.5 und Kapitel 4.1) eignet sich die Korngrößenverteilung auch besonders gut, um die Beziehung zwischen den konstanten Bodeneigenschaften und den ermittelten Erosionsparametern zu bewerten. Ausgewertet werden der Anteil in Gewichtsprozent für alle Korngrößenbereiche (Ton, Schluff, Sand) sowie für die häufig im Pedotransfer genutzte Gruppe Feinsand (*very fine sand*). Weiter wird der Anteil der bindigen Korngrößen (Ton + Schluff) sowie der Anteil der besonders erodiblen Korngrößen (Schluff + Feinsand) ausgewertet.

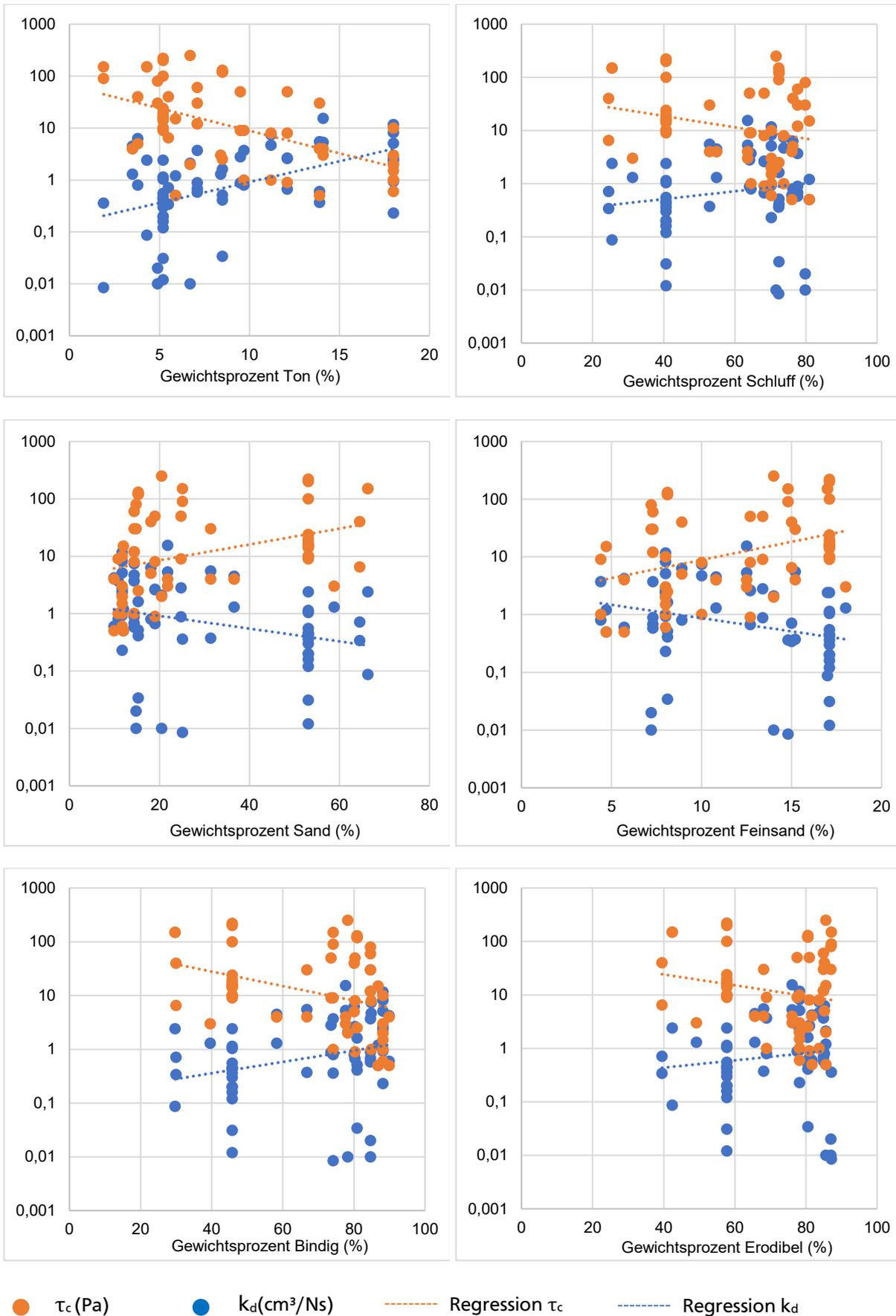


Abbildung 5-20: Erosionsparameter τ_c und k_d in Abhängigkeit der konstanten Bodeneigenschaften

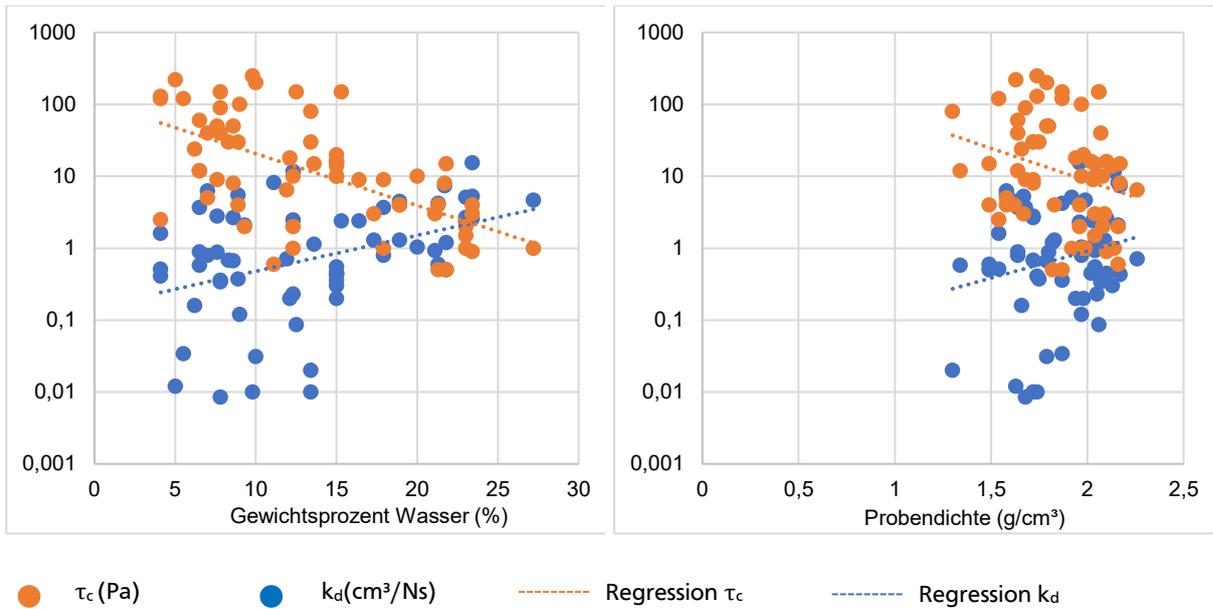


Abbildung 5-21: Erosionsparameter τ_c und k_d in Abhängigkeit der variablen Bodeneigenschaften

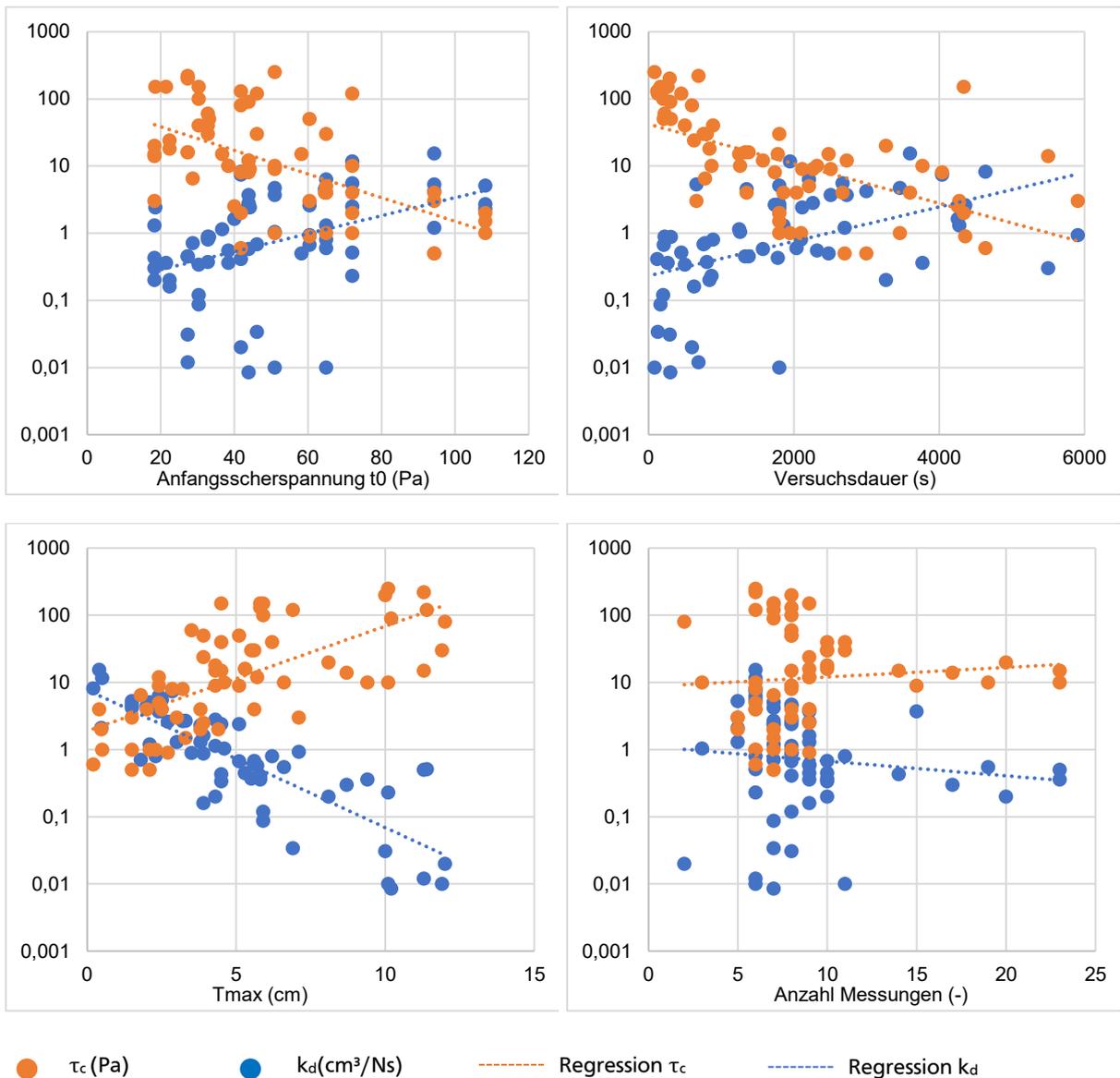


Abbildung 5-22: Erosionsparameter τ_c und k_d in Abhängigkeit der Versuchsrandbedingungen

Tabelle 5-6 gibt einen Überblick über die Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen und den ermittelten Erosionsparametern.

Tabelle 5-6: Korrelationskoeffizienten R^2 für alle untersuchten Beziehungen jeweils zu τ_c und k_d ; für den gesamten Datensatz (links) und für den reduzierten Datensatz (rechts)

| | $R^2 \tau_c$ (%) | $R^2 k_d$ (%) |
|---|---------------------|------------------|
| Konstante Bodeneigenschaften | | |
| Gewichtsprozent Ton (%) | 24 | 32 |
| Gewichtsprozent Schluff (%) | 3 | 6 |
| Gewichtsprozent Sand (%) | 7 | 13 |
| Gewichtsprozent Feinsand (%) | 7 | 14 |
| Gewichtsprozent Bindig (%) | 7 | 13 |
| Gewichtsprozent Erodibel (%) | 1 | 4 |
| Variable Bodeneigenschaften | | |
| Gewichtsprozent Wasser (%) | 16 | 37 |
| Probendichte (g/cm ³) | 5 | 8 |
| Randbedingungen der Versuche | | |
| Anfangsschubspannung τ_0 (Pa) | 17 | 33 |
| Versuchsdauer (s) | 21 | 44 |
| (Maximale Erosionstiefe T_{max} (cm)) | 69 | 39 |
| Anzahl Messungen (-) | 1 | 1 |

Die Tabelle zeigt, dass die Korrelationskoeffizienten und damit der prozentuale Erklärwert für die Variabilität der Erosionsparameter für die untersuchten Eingangsgrößen zwischen 0 % und 44 % variiert (die max. Erosionstiefe wird hierbei nicht berücksichtigt, da diese direkt mit den Erosionsparametern insb. τ_c zusammenhängt und damit auch eine hohe Korrelation zeigt).

Insgesamt sind über alle untersuchten Eingangsgrößen und Kategorien die Korrelationen zu k_d enger als zu τ_c (Eine Ausnahme bildet erneut T_{max}), wobei die Korrelationen zu τ_c zwischen 1 und 24 % und die zu k_d zwischen 1 und 37 % liegen. In der Kategorie der konstanten Bodeneigenschaften zeigt sich die engste Beziehung zum Tonanteil mit R^2 für $\tau_c = 24$ % und R^2 für $k_d = 32$ %. R^2 für alle anderen Anteile liegt durchweg deutlich niedriger. Besonders zu betonen ist, dass dies auch für den Anteil bindigen Materials gilt, der sowohl Ton- als auch Schluffanteile umfasst. Für die variablen Bodeneigenschaften ist die Korrelation zum Wassergehalt mit 16 % respektive 37 % deutlich enger als zu der Probendichte mit 5 - 8 %.

Die Korrelationen zu den Randbedingungen der Versuche sind, wie zu erwarten, hoch. Hier gilt ebenso, wie auch für die vorgenannten Beziehungen, dass dies zunächst nur eine Korrelation und nicht zwangsläufig eine Kausalität darstellt. Die Kenngrößen Anfangsschubspannung und Versuchsdauer variieren abhängig von den Erosionsparametern. So wird z.B. die Versuchsdauer für eine wenig erodible Probe länger sein als die Versuchsdauer für eine sehr erodible Probe, ohne dass hieraus eine Kausalität zwischen Versuchsdauer und Erosionsparametern folgt. Inwieweit sichergestellt ist, dass die aus einem JET-Versuch ermittelten Erosionsparameter unabhängig von den gewählten Versuchsrandbedingungen sind, wird daher mit anderen Methoden untersucht (Kapitel 5.3.5). Keine Korrelation besteht dagegen zu der Anzahl der Messpunkte während eines Versuchs.

5.3.5. Spezielle Aspekte

Auswertung der Versuche mit dem Standardboden

Zur Bewertung der Belastbarkeit der ermittelten Erosionsparameter, die über den JET-Versuch bestimmt werden, wurden zunächst Testreihen mit dem Standardboden durchgeführt (siehe Kapitel 4.3.5). Abbildung 5-23 zeigt die ermittelten Erosionsparameter aus diesen Testreihen im Vergleich zu allen im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten JET-Versuchen. Hierfür wurden 6 JET-Versuche mit dem Standardboden bei einem Wassergehalt von 15 % und identischer Aufbereitung jedoch unterschiedlichen Testrandbedingungen (Anfangsschubspannung, Versuchsdauer) durchgeführt. In der Abbildung sind diese in Orange zu sehen.

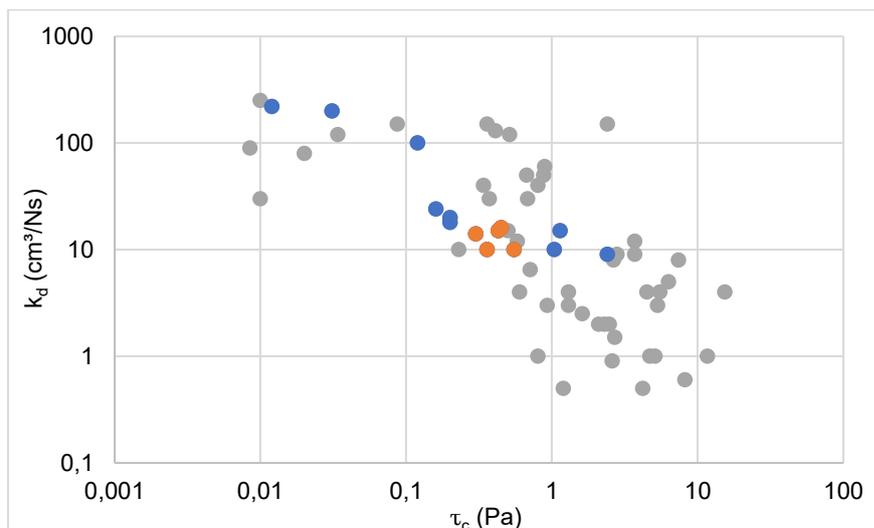


Abbildung 5-23: Ergebnisse der JET-Versuche für den Standard (orange), Vergleichsproben mit dem Standardboden (blau) und alle Versuche (grau)

Es ist zu sehen, dass die 6 Versuche ein verhältnismäßig kleines Spektrum von ca. 0,5 Zehnerpotenzen sowohl für τ_c als auch für k_d abdecken. Die 9 Vergleichsmessungen (blau) wurden mit variierendem Wassergehalt zwischen 5 und 20 % sowie mit unterschiedlicher Aufbereitung und daraus resultierend einer Lagerungsdichte der Probe zwischen 1,6 und 2,1 g/cm^3 durchgeführt. Diese Vergleichsproben zeigen ein Spektrum von 2,5 Zehnerpotenzen für τ_c und 2 Zehnerpotenzen für k_d . Anzumerken ist, dass die Lagerungsdichte der Probe auch für die Standardversuche zwischen 2,0 und 2,1 g/cm^3 variiert.

Auswertung unterschiedlicher Methoden bei der Einstellung des Wassergehalts

Ergänzend zu der Etablierung und Verifizierung einer Routine zur Aufbereitung von gestörten Proben und insb. Laborproben (Kapitel 4.3.5) wurde an einem Beispiel untersucht, ob die Vorgehensweise bei der Einstellung des Wassergehalts einer Laborprobe die Ergebnisse beeinflusst. Hierfür wurde eine Mischprobe aus dem B-Horizont des Lösshangs genutzt. Für diese wurde der Wassergehalt bestimmt (23 %) und eine JET-Probe entsprechend der etablierten Routine aufbereitet (Probe 1). Für zwei weitere JET-Proben wurde der Boden analog zu dem beschriebenen Vorgehen in Kapitel 4.3.5 zunächst homogenisiert und getrocknet und der gemessene Wassergehalt an der getrockneten Probe wieder eingestellt. Nach Vorbereitung der JET-Probe wurde mit einer Probe unmittelbar der JET-Versuch durchgeführt (Probe 2),

während für die andere Probe eine 24 h Wartezeit eingehalten wurde (Probe 3). Der JET-Versuch wurde für alle 3 Proben bei identischen Versuchsbedingungen durchgeführt.

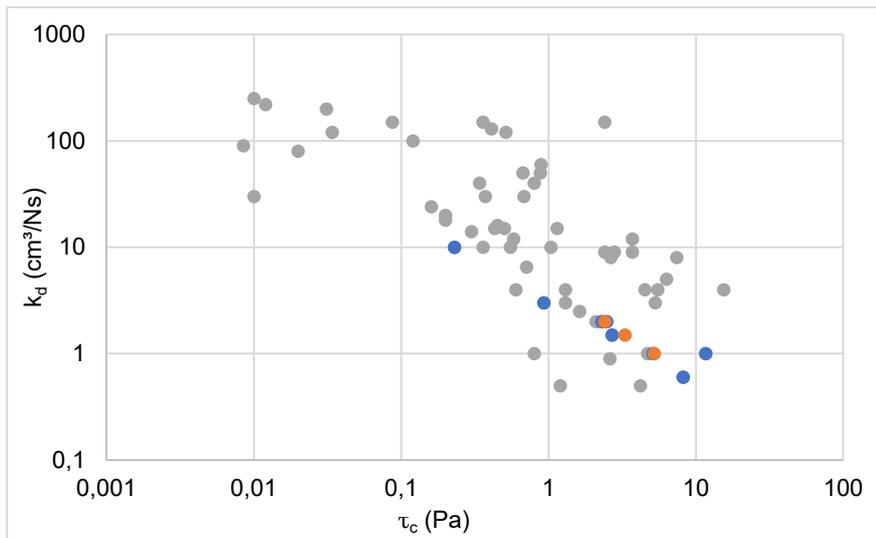


Abbildung 5-24: Ergebnisse der JET-Versuche für 3 Proben aus dem B-Horizont mit gleichem Wassergehalt (orange), alle Proben aus dem B-Horizont (blau) und alle Versuche (grau)

Es ist zu sehen, dass die 3 untersuchten Proben aus dem B-Horizont (orange) auch bei unterschiedlicher Einstellung des Wassergehalts vergleichbare Erosionsparameter ergeben. Für τ_c und k_d unterscheiden sich die erodiblstste und die am wenigsten erodible Probe jeweils um einen Faktor 2. Die Unterschiede zwischen den 3 Proben erscheinen jedoch im Unterschied zur vorangegangenen Betrachtung der Standardversuche nicht zufällig, sondern systematisch, da sie der generellen Beziehung zwischen τ_c und k_d folgen. Es kann also eine stabilste Probe (Probe 2) und eine erodiblstste Probe (Probe 3) abhängig von der Art der Einstellung des Wassergehalts ausgemacht werden (Die Beziehung ist qualitativ in gleicher Weise auch für die übrigen Versuche mit Proben aus dem B-Horizont (blau) sichtbar). Dies ist relevant für die Bewertung der ermittelten Beziehung zwischen Wassergehalt und Erosionsparametern.

Vergleich der Oberflächenproben zwischen der ersten und zweiten Feldkampagne

Es wurden in zwei aufeinanderfolgenden Jahren Proben von der Feldoberfläche des Lösshangs genommen. Hierbei wurden jeweils gestörte und ungestörte Proben an definierten Punkten auf dem Hang genommen (siehe Kapitel 5.2 für eine detaillierte Zusammenstellung). Zwischen beiden Kampagnen bestehen geringe Unterschiede bei Anzahl und Lage der Punkte, es konnten jedoch an 5 Punkten aus der ersten Kampagne sowohl gestörte als auch ungestörte Proben in der zweiten Kampagne wiederholt werden, so dass für insgesamt 10 Probenahmestellen ein direkter Vergleich zwischen beiden Kampagnen möglich ist. Abbildung 5-25 zeigt diese 10 Versuche für beide Feldkampagnen (erste Kampagne in Orange, zweite Kampagne in Blau). Abbildung 5-26 zeigt ergänzend alle Feldproben zugeordnet zu der ersten und zweiten Kampagne in der gleichen Farbgebung. Hier wurden jeweils alle verfügbaren Oberflächenproben mitbewertet, wobei Laborproben (eingestellter Wassergehalt) ausgeschlossen wurden.

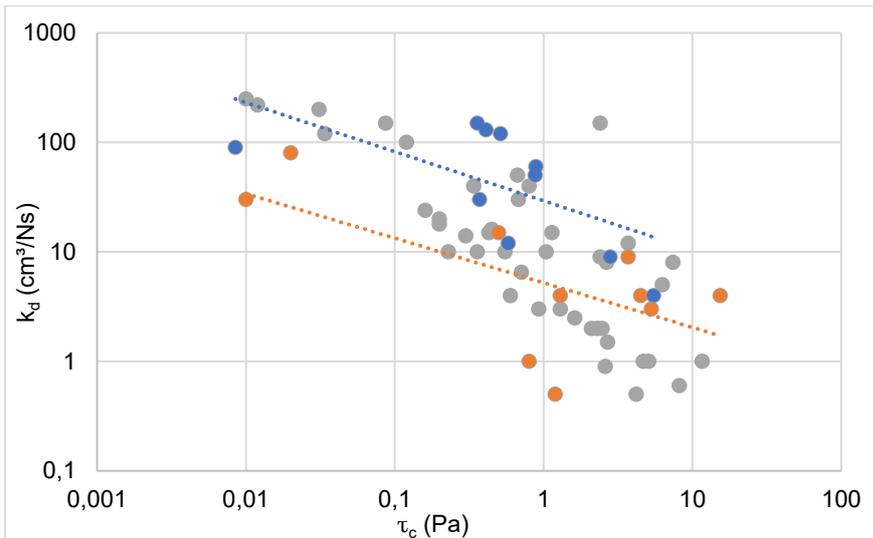


Abbildung 5-25: Ergebnisse der JET-Versuche für Oberflächenproben der ersten Feldkampagne (orange), Oberflächenproben der zweiten Feldkampagne (blau) (jeweils nur Wiederholungsproben) und alle Versuche (grau)

Es ist zu sehen, dass die Proben der ersten Kampagne insgesamt niedrigere Werte für k_d aufweisen und damit als weniger erodibel einzustufen sind. An dem Vergleich der Regressionsgeraden lässt sich erkennen, dass dieser Unterschied knapp eine Zehnerpotenz beträgt. Die Versuche der zweiten Kampagne liegen deutlich enger an der Regressionsgeraden und umfassen für k_d ca. 1,5 Zehnerpotenzen, während die Versuche der ersten Kampagne für k_d ca. 2,5 Zehnerpotenzen umfassen und damit deutlich weiter um die Regressionsgerade streuen. Der Wertebereich für τ_c ist für beide Kampagnen vergleichbar und umfasst ca. 3 Zehnerpotenzen, wobei der Großteil der Werte der ersten Kampagne zwischen 1 Pa und 10 Pa liegt, während der Großteil der Werte der zweiten Kampagne zwischen 0,1 und 1 Pa liegt. Vergleichbar zu k_d zeigt sich damit auch bei der Betrachtung von τ_c , dass die zweite Kampagne ca. um eine Zehnerpotenz erodibler einzuschätzen ist. Hier ist anzumerken, dass es sich um eine integrale Betrachtung der Ergebnisse handelt und nicht einzelne Proben verglichen werden.

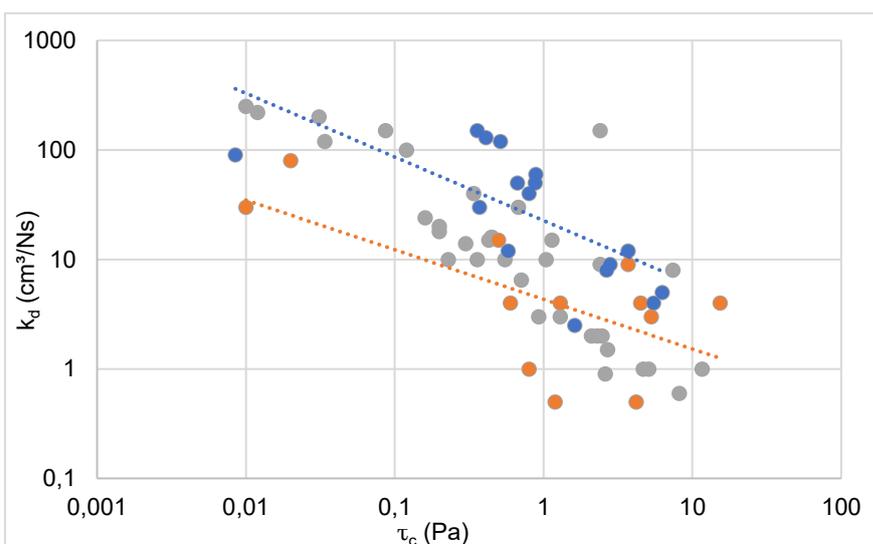


Abbildung 5-26: Ergebnisse der JET-Versuche für Oberflächenproben der ersten Feldkampagne (orange), Oberflächenproben der zweiten Feldkampagne (blau) und alle Versuche (grau)

Werden nicht nur die direkt vergleichbaren Feldpunkte ausgewertet, sondern alle Oberflächenproben je Kampagne, erhöht sich die Anzahl der Datenpunkte für die erste Kampagne von 10 auf 12 und für die zweite Kampagne von 10 auf 16. Die aufgezeigte Spanne der Werte für k_d und τ_c für die jeweilige Kampagne ändert sich hierdurch nicht. Für die erste Kampagne ändert sich auch die Regressionsgerade nur geringfügig. Die beiden zusätzlich ausgewerteten Proben entsprechen dem Hangstandort 5 und passen relativ gut zu der vorhandenen Regression. Für die zweite Kampagne sind 5 der 6 neu betrachteten Proben im weniger erodiblen Bereich der Wertespanne, so dass die Regressionsgerade steiler wird. Qualitativ sind beide Betrachtungen jedoch vergleichbar.

Die Veränderung in der Erodibilität der definierten Punkte auf dem Lösshang (L1, L2, L3, L4, L6) soll mit weiteren untersuchten Kenngrößen, hier der Korngrößenverteilung und dem Wassergehalt, an diesen Punkten in Beziehung gesetzt werden. Tabelle 5-7 gibt einen Überblick über die Veränderung dieser Kennwerte zwischen der ersten und zweiten Kampagne an den 5 untersuchten Punkten auf dem Lösshang.

Tabelle 5-7: Konstante und variable Bodenparameter an den 5 Wiederholungspunkten für Oberflächenproben auf dem Lösshang für die erste Feldkampagne (links) und die zweite Feldkampagne (rechts)

| Nr. | Erste Feldkampagne (09/2017) | | | | Zweite Feldkampagne (08/2018) | | | |
|-----|------------------------------|------|------|------|-------------------------------|------|------|-----|
| | %S | %U | %T | %W | %S | %U | %T | %W |
| L1 | 36,6 | 54,8 | 3,5 | 18,9 | 31,4 | 52,9 | 13,9 | 8,9 |
| L2 | 21,8 | 63,6 | 14,1 | 23,4 | 24,8 | 64,1 | 9,5 | 7,6 |
| L3 | 14,8 | 79,8 | 4,9 | 13,4 | 25,1 | 72,3 | 1,9 | 7,8 |
| L4 | 10,8 | 64,5 | 9,7 | 17,9 | 15,3 | 72,4 | 8,5 | 4,1 |
| L6 | 12 | 80,9 | 5,9 | 21,8 | 14,4 | 77,6 | 7,1 | 6,5 |

Tabelle 5-7 zeigt zum Teil deutliche Unterschiede in den Korngrößenverteilungen zwischen den untersuchten Punkten in der ersten und zweiten Kampagne. Besonders deutlich unterscheiden sich die Punkte L1, L3 und L4 mit bis zu 10 Prozentpunkten (%P) Veränderung innerhalb einer Korngröße, während die Veränderungen an den Punkten L2 und L6 weniger ausgeprägt sind. Insgesamt sind die Veränderungen der Korngrößenverteilungen jedoch nicht systematisch, d.h. die Ab- und Zunahme der Anteile unterscheiden sich zwischen allen Punkten. Beispielweise erhöht sich der Tonanteil an Punkt L1 um 10,4 %P und an Punkt L6 um 1,2 %P, während er sich an den drei anderen Punkten reduziert. Hierzu ist anzumerken, dass zeitlich zwischen der ersten Kampagne (09/2017) und der zweiten Kampagne (08/2018) am 23.04.2018 im Einzugsgebiet ein Starkregenereignis mit einer Dauer von ca. 1 h und einer Jährlichkeit von ca. 30 a stattgefunden hat (siehe hierfür z.B. David 2023). Dieses hat am Testhang zu deutlichen Abtragungs- und Umlagerungsprozessen geführt (siehe auch Auszüge aus der Fotodokumentation in Anhang 5-6). Es muss also festgehalten werden, dass die beobachteten Veränderungen in der Korngrößenverteilung eher als repräsentativ für die Veränderungen durch ein Starkregenereignis als für die Veränderungen zwischen zwei Jahren zu sehen sind.

Die aufgenommenen Daten zur Veränderung der Korngrößenverteilung entlang der Hangstruktur im Zuge eines Starkregenereignis können eine interessante Datenquelle für die qualitative Beschreibung von Erosionsprozessen darstellen. Dies liegt jedoch nicht im Rahmen der Fragestellungen der vorliegenden Untersuchung.

Anders ist die in Tabelle 5-7 gezeigte Veränderung des Wassergehaltes in den Oberflächenproben zwischen der ersten und zweiten Kampagne zu bewerten. Hier liegen die Anteile in der zweiten Kampagne durchweg deutlich niedriger, wobei die Veränderung von - 5,6 %P (Punkt L3) bis - 15,8 %P (Punkt L2) reicht mit einer mittleren Änderung von - 12,1 %P. Dies ist deutlich höher als die Variabilität der Bodenfeuchten innerhalb der jeweiligen Kampagnen, die bei 10 %P in der ersten und 4,8 %P in der zweiten Kampagne liegt. Im Unterschied zu den Veränderungen bei der Korngrößenverteilung kann hier also durchaus von einer systematischen Änderung gesprochen werden. Diese passt zu einer Bewertung der Vorregenereignisse vor der jeweiligen Feldkampagne. Für die erste Kampagne beträgt die Vorregensumme in einer Woche 23 mm und in vier Wochen 101 mm, während sie für die zweite Kampagne in einer Woche bei 12 mm und in vier Wochen bei 20 mm liegt.

Ein letzter zu beleuchtender Aspekt sind mögliche qualitative Veränderungen auf der Hangoberfläche zwischen den beiden Feldkampagnen durch die Bewirtschaftung. Die Termine für beide Kampagnen wurden so abgestimmt, dass sie in dem kurzen Zeitraum zwischen der Wintergetreideernte und der Neueinsaat von Wintergetreide liegen konnten. Im Jahr 2017 war dies Mitte September und im Jahr 2018 aufgrund der höheren Temperaturen bereits Mitte August der Fall. Da die Probenahme in beiden Jahren wenige Tage nach der Ernte stattgefunden hat, wobei die jeweils gleiche Frucht mit gleichem Gerät geerntet wurde, wird die Abweichung innerhalb des Kalenderjahres um ca. drei Wochen als weniger bedeutsam eingestuft. Für beide Kampagnen lag außerdem die Lagerungsdichte der ungestörten Oberflächenproben in einem vergleichbaren Bereich zwischen 1,3 und 1,7 g/cm³.

Vergleich zwischen gestörten und ungestörten Bodenproben

Im Rahmen der Feldkampagnen wurden an den verschiedenen definierten Probenahmepunkten auf der Hangoberfläche L1 - L6 jeweils gestörte Mischproben sowie ungestörte Stechzylinderproben genommen. Hiermit soll der Unterschied zwischen ungestörter und aufbereiteter (gestörter) Bodenprobe betrachtet werden. Bei vergleichbarem Wassergehalt und vergleichbarer Dichte kann dann davon ausgegangen werden, dass ein festzustellender Unterschied vor allem auf die Lagerungs- und die Oberflächeneigenschaften zurückzuführen ist. Abbildung 5-27 zeigt alle genommenen Oberflächenproben aus beiden durchgeführten Kampagnen. Hieraus lassen sich keine systematischen Unterschiede zwischen den gestörten und den ungestörten Proben erkennen. Die eingetragenen Regressionsgeraden zwischen τ_c und k_d sind für beide Gruppen fast identisch. Die gestörten Proben scheinen insgesamt etwas weiter von der Regressionsgeraden abzuweichen, als dies für die ungestörten Proben der Fall ist.

Ergänzend zu dieser mittleren Beziehung sollen auch die individuellen Probenahmepunkte L1 - L6 verglichen werden. Abbildung 5-28 zeigt dies für die erste Feldkampagne und Abbildung 5-29 für die zweite Feldkampagne. Die korrespondierenden Proben von einem Probenahmepunkt sind jeweils über eine Linie verbunden. Es ist zu sehen, dass sich die ermittelten Werte für τ_c und k_d zwischen gestörten und ungestörten Proben relativ stark unterscheiden. Während die gestörten Proben in der ersten Feldkampagne zum Teil erodibler und zum Teil weniger erodibel getestet wurden als die zugehörigen Stechzylinderproben, sind die gestörten Proben in der zweiten Kampagne nahezu durchweg deutlich erodibler als die ungestörten Proben. Weiter ist zu sehen, dass sich die mittlere Lage der ungestörten Proben zwischen erster und zweiter Kampagne kaum verändert, während sich die mittlere Lage der gestörten Proben in einen deutlich erodibleren Bereich verschiebt, wobei die Änderung für k_d stärker ausfällt als für τ_c .

Hierzu ist anzumerken, dass insbesondere die ungestörten Proben der zweiten Feldkampagne stark mit Wurzeln und Pflanzenresten durchsetzt waren.

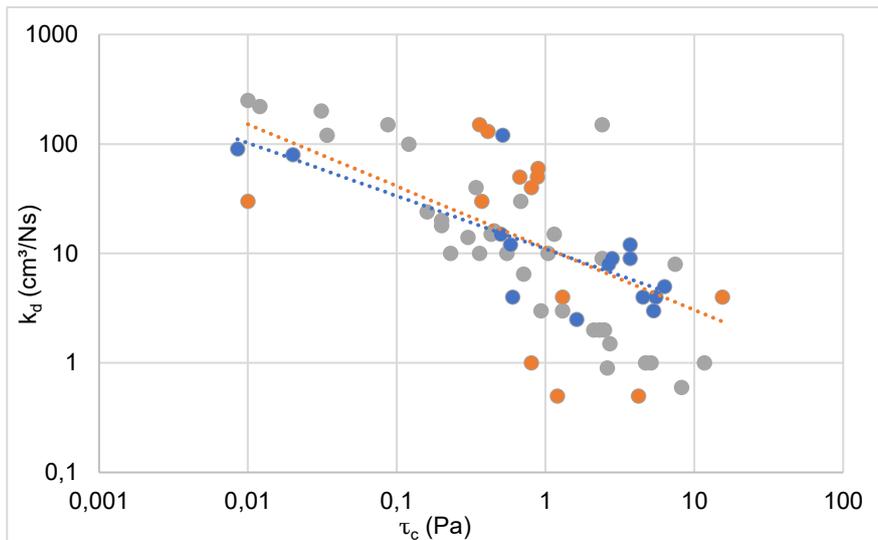


Abbildung 5-27: Ergebnisse der JET-Versuche für Oberflächenproben: gestörte Mischproben (orange), ungestörte Stechzylinderproben (blau); Alle Versuche (grau)

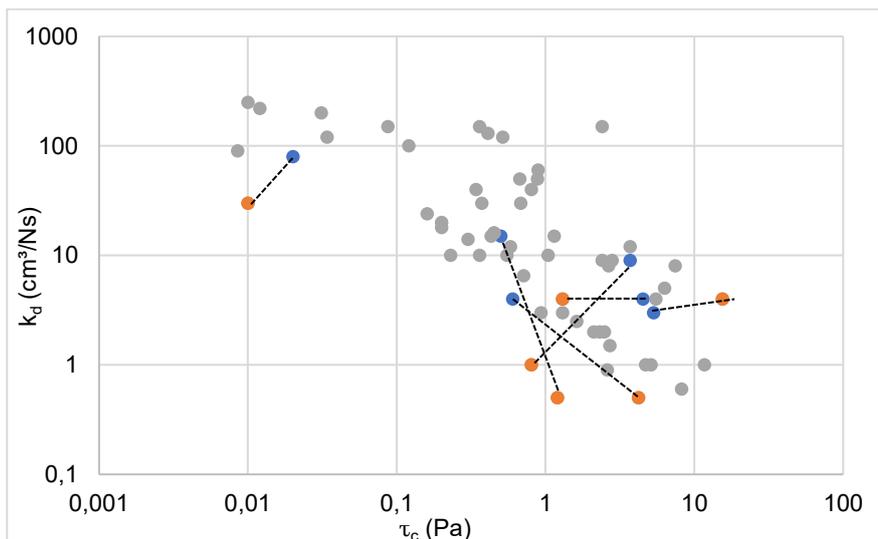


Abbildung 5-28: Ergebnisse der JET-Versuche für Oberflächenproben der ersten Feldkampagne: gestörte Mischproben (orange), ungestörte Stechzylinderproben (blau); Alle Versuche (grau)

Die Gefügestabilität sowie die Stabilisierung des Bodenkörpers durch Verwurzelung und Pflanzenreste scheint andere Effekte, welche die Erodibilität beeinflussen (z.B. der Wassergehalt), in den hier untersuchten Proben (nahezu vollständig) zu kompensieren. Die gestörten Mischproben scheinen daher zunächst keine gute Wiedergabe des Verhaltens des ungestörten Bodenkörpers zu ermöglichen. Ergänzend hierzu zeigt Abbildung 5-30 die Lagerungsdichte der untersuchten Proben sortiert nach Probenart. Hierbei fällt auf, dass die ungestörten Stechzylinderproben mit einer mittleren Probedichte von $1,6 \text{ g/cm}^3$ deutlich lockerer gelagert sind als die gestörten Mischproben mit einer mittleren Probedichte von ca. $1,8 \text{ g/cm}^3$. Dies bekräftigt die oben formulierte Vermutung, dass die Stabilität des ungestörten Bodenkörpers durch andere Effekte bewirkt wird als bei den gestörten Proben.

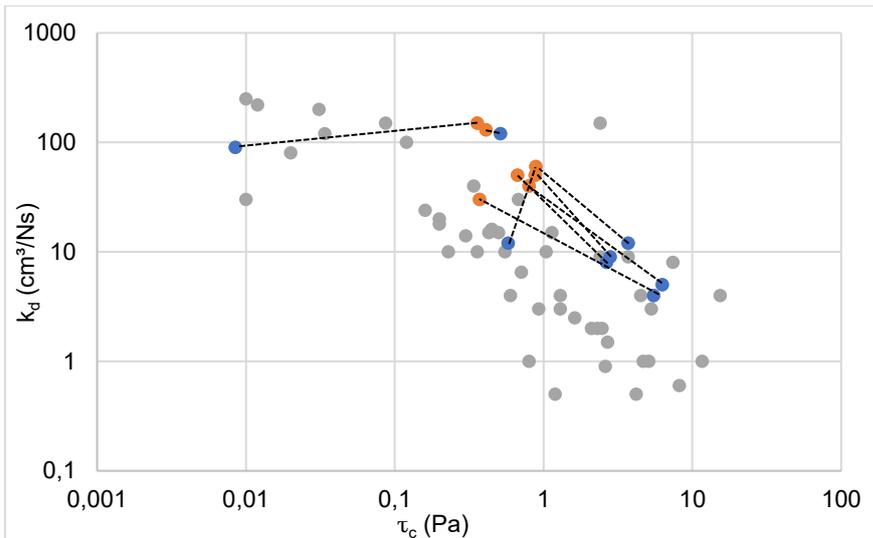


Abbildung 5-29: Ergebnisse der JET-Versuche für Oberflächenproben der zweiten Feldkampagne: gestörte Mischproben (orange), ungestörte Stechzylinderproben (blau); Alle Versuche (grau)

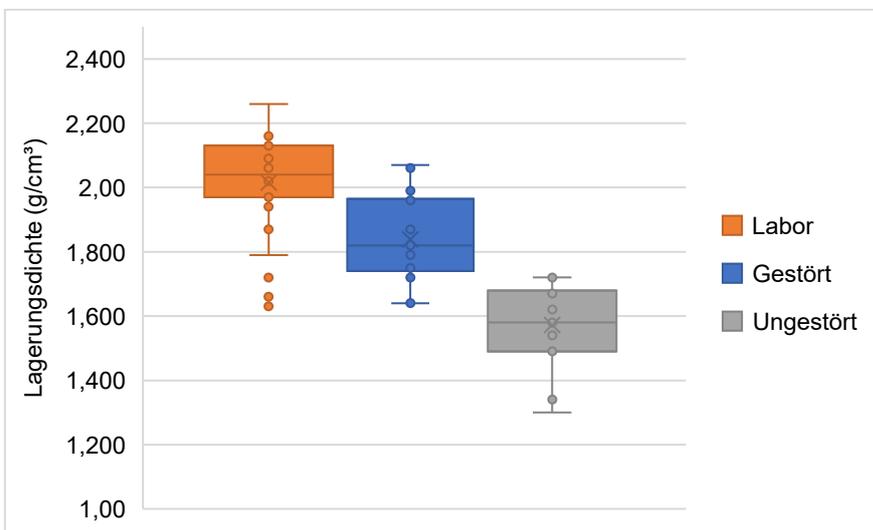


Abbildung 5-30: Statistik der Lagerungsdichten unterschieden nach Probenart

Kleinräumige Unterschiede auf der Oberfläche – Zweite Feldkampagne

Im Rahmen der zweiten Feldkampagne sollte neben den Unterschieden entlang des Hangs auch untersucht werden, ob sich auch kleinräumig Unterschiede in der Erodibilität des Bodens feststellen lassen. Hierfür wurde an den Probenahmestellen L1, L2, L4 und L6 ergänzend zu den regulären Proben eine Vergleichsprobe in geringem Abstand genommen. Während die Abstände zwischen den regulären Probenahmepunkten > 40 m liegen, wurden die Abstände zur Untersuchung der kleinräumigen Variabilität bei ca. 0,5 m (L2), ca. 1 m (L4), ca. 10 m (L1) und ca. 20 m (L6) gewählt. Für die Punkte L1 und L2 wurden sowohl gestörte als auch ungestörte Vergleichsproben genommen, für die Punkte L4 und L6 wurden jeweils nur eine ungestörte Vergleichsprobe genommen, wobei an Punkt L6 aufgrund des Abstands ausreichend Bodenmaterial an der Stelle der ungestörten Vergleichsprobe entnommen wurde, um die Analysen im Bodenlabor durchzuführen (siehe Kapitel 5.2.4).

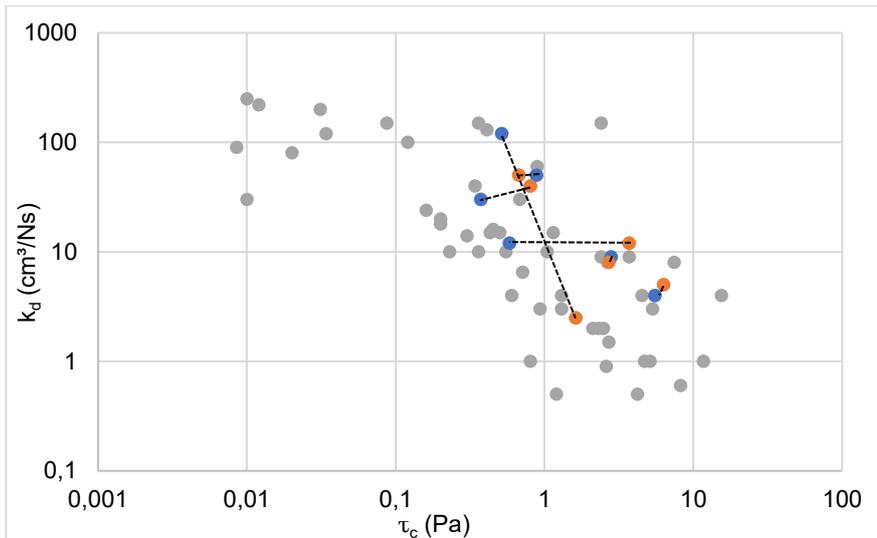


Abbildung 5-31: Ergebnisse der JET-Versuche für Oberflächenproben der zweiten Feldkampagne zur kleinräumigen Variabilität: Basispunkte (blau), Vergleichspunkte (orange); Alle Versuche (grau)

Den Vergleich zeigt Abbildung 5-31. Es fällt auf, dass die kleinräumige Variabilität für vier der sechs untersuchten Probenahmepunkte gering ist, d.h. sowohl für τ_c als auch für k_d bleibt der Unterschied zwischen den beiden Vergleichsproben \ll Faktor 2. Diese betrifft die Probenahmepunkte L1 und L2 jeweils für die gestörten und für die ungestörten Vergleichsproben. Für die ungestörten Vergleichsproben an Punkt L6 ändert sich τ_c um knapp eine Zehnerpotenz, während k_d nahezu unverändert bleibt. Die deutlichste Abweichung zeigt die ungestörte Vergleichsprobe an Punkt L4. Hier gibt es eine Abweichung in τ_c und eine Änderung von k_d um fast 2 Zehnerpotenzen.

Es kann also vermutet werden, dass die sehr kleinräumigen Abweichungen deutlich geringer ausfallen, als dies zwischen den Probenahmepunkten mit größeren räumlichen Abständen zu sehen war. Hierzu passt, dass insbesondere die Vergleiche an Punkt L2 mit sehr kleinem Abstand nahezu identische Erodibilität geliefert haben, während diese für Punkt L1 bereits weiter abweichen und für Punkt L6 bereits deutlich abweichen. Bei letztgenanntem liegt der Abstand zwischen den Vergleichsproben bereits in ähnlicher Größenordnung wie der Abstand zwischen den Probenahmepunkten insgesamt. Deutlich abweichend von diesem Muster zeigt sich die Probe an Punkt L4. Da hier nur ungestörte Proben getestet wurden, muss davon ausgegangen werden, dass die Stabilisierung durch Wurzeln hier in den lokalen Proben deutlich abweichend war. Die ungestörte Probe 4-1 weicht auch insgesamt von den ungestörten Proben der zweiten Kampagne erheblich ab (siehe Abbildung 5-29)

Bedeutung ergänzender Bodenparameter (Konsistenzgrenzen, Aggregatstabilität)

Für einzelne Probengruppen wurden exemplarisch im Bodenlabor Maßzahlen der Stabilität und der Kohäsion bestimmt, um zu prüfen, ob sich aus diesen auf den Widerstand gegenüber Oberflächenabfluss schließen lässt. Es wurde die Aggregatstabilität (siehe auch Kapitel 5.2.4 und Tabelle 5-4) für die Horizontproben der ersten Messkampagne sowie für die Oberflächenproben der zweiten Messkampagne bestimmt. Für die Oberflächenproben der zweiten Feldkampagne wurden zusätzlich die Parameter Fließgrenze und Ausrollgrenze sowie hierzu die Plastizitätszahl bestimmt.

Abbildung 5-32 zeigt exemplarisch die Korrelationen von τ_c und k_d zur Fließgrenze mit den jeweiligen Regressionslinien. Danach sieht die Regression keine Änderung der Erodibilität mit

der Fließgrenze des Bodens vor. Der Korrelationskoeffizient ist für beide Beziehungen bei $R^2 < 4 \%$. Ein vergleichbares Ergebnis zeigt sich für die Beziehung zur Ausrollgrenze und zur Plastizitätszahl. Ergänzend wurde eine identische Auswertung ausschließlich mit den gestörten Mischproben der zweiten Feldkampagne sowie den hieraus erzeugten Laborproben durchgeführt. Hier zeigen τ_c und k_d eine Korrelation zu der ermittelten Ausrollgrenze von 7 % respektive 12 %. τ_c zeigt außerdem ein R^2 von 9 % zur Fließgrenze.

Eine enge Beziehung für die gestörten Mischproben und Laborproben von $R^2 = 82 \%$ für k_d und $R^2 = 22 \%$ für τ_c lässt sich zu dem Quotienten aus Wassergehalt der untersuchten Probe zum Wassergehalt an der Fließgrenze finden (siehe Abbildung 5-33). Für die dargestellten Proben liegt jedoch die Korrelation direkt zum Wassergehalt der Probe bei $R^2 = 91 \%$ für k_d und $R^2 = 34 \%$ für τ_c . Es ist daher davon auszugehen, dass die enge Korrelation in Abbildung 5-33 die Korrelation zum Wassergehalt und nicht zur Konsistenzgrenze wiedergibt.

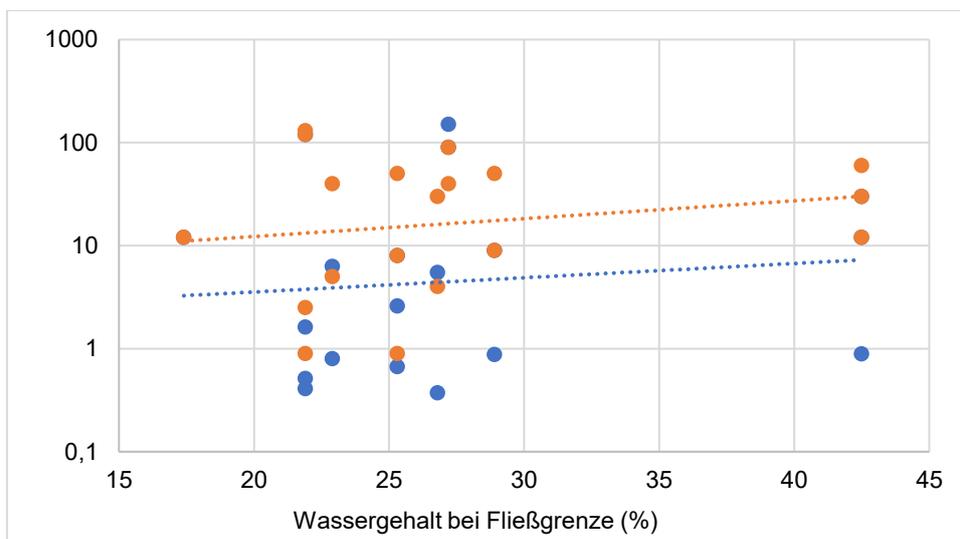


Abbildung 5-32: Zusammenhang zwischen der Fließgrenze und der Erodibilität für Oberflächenproben der zweiten Feldkampagne: τ_c (blau) (Pa), k_d (orange) (cm^3/Ns)

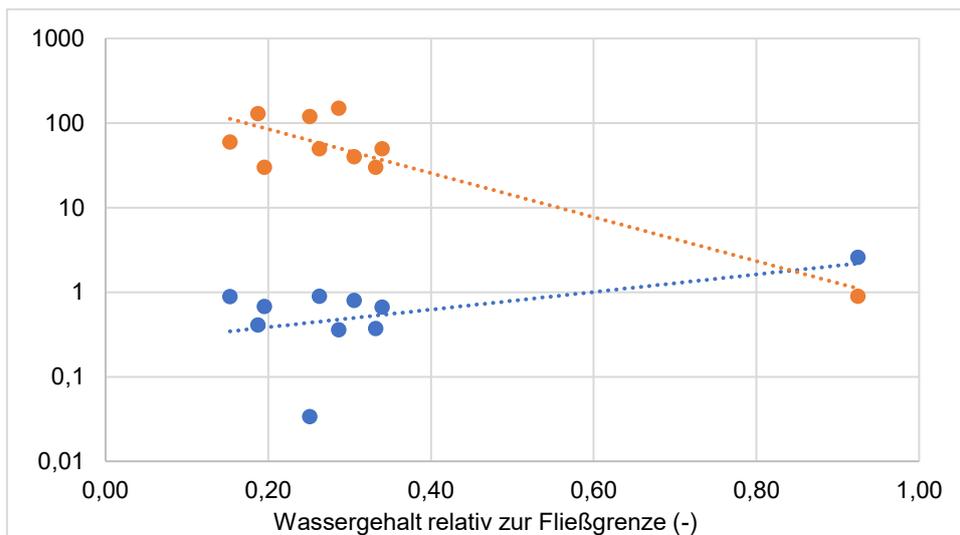


Abbildung 5-33: Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt relativ zur Fließgrenze und der Erodibilität für Misch- und Laborproben der zweiten Feldkampagne: τ_c (blau) (Pa), k_d (orange) (cm^3/Ns)

Da die Aggregatstabilität durch eine Einteilung in die Stabilitätsklassen 1 - 6 bestimmt wurde, kann hier lediglich ein Vergleich der Statistik zwischen den verschiedenen Gruppen erfolgen. Abbildung 5-34 zeigt die logarithmierten Erosionsparameter τ_c und k_d für alle untersuchten Proben sowie für die Klassen der Aggregatstabilität 3 - 6. Hier ist zu sehen, dass keine systematischen Unterschiede in Mittelwert und Variabilität zwischen den vier Klassen und im Vergleich zu allen untersuchten Proben gesehen werden können.

In den hier untersuchten Proben kann also keine Beziehung zwischen Maßzahlen zu Stabilität und Kohäsion und der Erodibilität nachgewiesen werden.

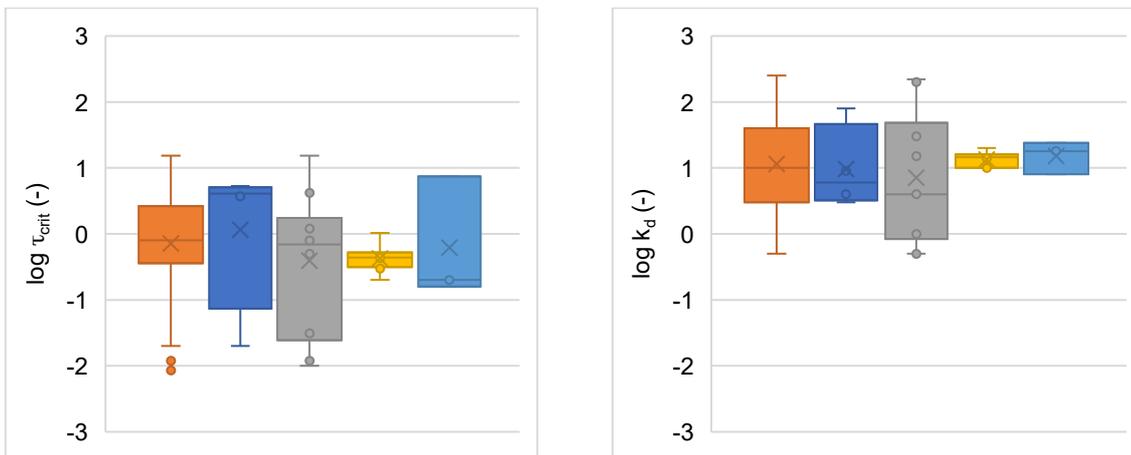


Abbildung 5-34: Erodibilitätskennwerte τ_c (links) und k_d (rechts) für alle untersuchten Proben (orange), für Proben der Aggregatstabilitätsklassen 3, 4, 5 und 6 (dunkelblau, grau, gelb und hellblau),

Variable Bodeneigenschaften unterschieden nach Bodenart und Probenart

Abschließend soll untersucht werden, ob sich die in Tabelle 5-6 gezeigten Korrelationen für die variablen Bodeneigenschaften Wassergehalt und Lagerungsdichte innerhalb von zusammengehörigen Gruppen der Bodenart und der Probenart anders verhalten als in der Gesamtmenge der untersuchten Proben. Einige oben vorgestellte Ergebnisse legen diese Vermutung nahe. Beispielsweise zeigt Abbildung 5-33 eine deutlich engere Beziehung zwischen dem Proben-Wassergehalt und den ermittelten Erosionsparametern für die gestörten Oberflächenproben der zweiten Feldkampagne als dies für die Gesamtmenge der Proben ermittelt wurde. Auch Abbildung 5-28 und Abbildung 5-29 legen nahe, dass die Änderungen des Bodenwasserhaushalts zwischen der ersten und der zweiten Feldkampagne das Erosionsverhalten der gestörten Mischproben deutlich stärker verändert hat, als dies für die ungestörten Stechzylinderproben der Fall ist.

Tabelle 5-8: Vergleich der Korrelationskoeffizienten für die variablen Bodeneigenschaften unterschieden nach Bodenart

| | Löss | | Standard | |
|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| | R ² τ_c (%) | R ² k_d (%) | R ² τ_c (%) | R ² k_d (%) |
| Gewichtsprozent Wasser (%) | 12 | 40 | 64 | 61 |
| Probendichte (g/cm ³) | 12 | 22 | 50 | 47 |

Tabelle 5-8 gibt einen Überblick, wie sich die Korrelationskoeffizienten R² für die variablen Bodenparameter Dichte und Wassergehalt unterschieden nach den Bodenarten Standard und Löss darstellen (auf eine Auswertung der Proben des Vergleichshangs mit der Bodenart Grus

wird an dieser Stelle verzichtet, da dieser Gruppe lediglich 5 Proben zugeordnet sind). Für den Wassergehalt zeigt sich die Enge dieser Beziehung insgesamt deutlicher als für die Gesamtmenge der Proben. Während die Abweichung für die Löss-Proben mit wenigen Prozent Abweichung eher gering ausfallen und nicht systematisch sind, erhöht sich die Korrelation für den Standardboden deutlich.

Anders zeigt sich dagegen die Auswertung der Lagerungsdichte. Hier zeigt sich für alle vier Kombinationen aus Bodenart und Erosionsparameter durchweg eine deutlich engere Beziehung innerhalb der Gruppe, als dies für die Gesamtmenge der Proben der Fall war. Die Änderung reicht von + 7 %P für die Beziehung von Dichte zur kritischen Schubspannung für die Bodenart Löss bis zu + 42 %P von Dichte zu Erodibilität für die Bodenart Standardboden. Insgesamt zeigen die Erosionsparameter für den Standardboden eine engere Beziehung zur Lagerungsdichte als für die Lössproben. Da lediglich für die Bodenart Löss ungestörte Stechzylinderproben genutzt wurden, lässt sich auch hier in Verbindung mit den vorherigen Ergebnissen die Vermutung äußern, dass die variablen Bodeneigenschaften gestörte Bodenproben anders beeinflussen als ungestörte.

Ergänzend zu der Unterscheidung nach Bodenarten soll daher auch eine Unterscheidung nach der Art der untersuchten Probe vorgenommen werden. Tabelle 5-9 gibt einen Überblick über die hier gewonnenen Ergebnisse.

Tabelle 5-9: Vergleich der Korrelationskoeffizienten für die variablen Bodeneigenschaften unterschieden nach Probenart

| | Ungestört | | Gestört + Labor | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | R ² τ _c (%) | R ² k _d (%) | R ² τ _c (%) | R ² k _d (%) |
| Gewichtsprozent Wasser (%) | 1 | 8 | 31 | 51 |
| Probendichte (g/cm ³) | 19 | 7 | 20 | 21 |

Für die Gruppe der gestörten Mischproben + Laborproben sind die Beziehungen zu den variablen Bodeneigenschaften jeweils enger als dies für die Gesamtmenge der Proben der Fall ist. Für die ungestörten Stechzylinderproben ist die Beziehung dagegen deutlich geringer bis nicht mehr vorhanden als für die Gruppe aller Proben. Eine Ausnahme hiervon stellt die Beziehung der Dichte zur kritischen Schubspannung dar, welche mit + 14 %P deutlich enger wird. Für die Kategorien der aufbereiteten Bodenproben werden die Beziehungen dagegen um bis zu + 21 %P enger. Exemplarisch wird dies für die gestörten Bodenproben mit den Auswertungen der Bodenart verbunden. Hier zeigt sich mit der Beschränkung auf die Bodenart Löss R² bis 80 % für die Beziehung zwischen dem Wassergehalt und k_d. Bei den hier zusammengestellten Auswertungen muss jedoch erneut beachtet werden, dass die Gruppe der ungestörten Bodenproben lediglich 15 Proben enthält. In Verbindung mit der unterstellten exponentiellen Beziehung zu den Erosionsparametern kommt hier dem individuellen Ergebnis ein großer Einfluss auf die Qualität der Beziehung zu.

5.4. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

In diesem letzten Arbeitsschritt wurden exemplarisch Messkampagnen mit Feldproben im JET durchgeführt, um zu untersuchen, welche Fragestellungen mit dem entwickelten Messgerät beantwortet werden können. Hierfür wurde ein Testhang innerhalb des ihwb Feldlabors Fischbach-Einzugsgebiet gewählt. Dieser wurde unter der Hypothese ausgesucht, dass er einen „typischen“ bewirtschafteten Hang im deutschen Mittelgebirge mit erodiblem / erosionsanfälligen Boden repräsentiert, vergleichbar in seinem Verhalten zu dem ausgewählten Hang in der Beispielmotellierung (siehe Kapitel 3). Auf dem Testhang wurden in vier Feldkampagnen Bodenproben an sieben verschiedenen Stellen zu zwei verschiedenen Zeitpunkten genommen, wobei der Schwerpunkt auf Proben von der Hangoberfläche lag. Diese wurden in zwei aufeinanderfolgenden Jahren jeweils zum Ende des Bewirtschaftungsjahres (zwischen Ernte und Saat) an 6 topographisch repräsentativen Punkten entlang der Hangflächen sowie aus einem Leitprofil sowohl als ungestörte Oberflächenproben als auch als gestörte Mischproben genommen. Die untersuchten Fragen beziehen sich durchweg auf den Aspekt der räumlichen und zeitlichen Variabilität des Erosionswiderstands sowie auf die definierbaren Einflussgrößen. Insgesamt wurden 63 JET-Versuche mit 3 unterschiedlichen Böden (Testhang, Vergleichshang, Standardboden) und 3 unterschiedlichen Aufbereitungstechniken durchgeführt. Die Bestimmung von verschiedenen Bodeneigenschaften erfolgte nach definierten Standardmethoden, die Bestimmung der Erodibilität mit dem am ihwb im Rahmen dieser Arbeit konstruierten JET Erosion Test (siehe Kapitel 4). Die Auswertung der JET-Versuche erfolgte nach einem zuvor durchgeführten Vergleich der Auswertemethoden (siehe Kapitel 4.3.5) mit der Blaisdell-Routine. Khanal et al. (2016) bezeichnen den JET als die sinnvollste Messmethode zur Bestimmung von Erosionsparametern und geben die Blaisdell-Routine als die gebräuchlichste Routine zur Auswertung der Versuche an. Für alle 63 Versuche wurde eine Datenbank mit den ermittelten konstanten und variablen Bodeneigenschaften für den jeweiligen Versuch sowie den Versuchsrandbedingungen angelegt.

Festzuhalten ist zunächst die große Variabilität der ermittelten Erosionsparameter mit einer Größenordnung von 4 Zehnerpotenzen für τ_c und 3 Zehnerpotenzen für k_d . Dieses Spektrum der ermittelten Parameter ist jedoch im Themenfeld der direkten Messung von Erosionsparametern als absolut üblich anzusehen. Bereits in Hanson & Simon (2001) werden Größenordnung von 6 Zehnerpotenzen für τ_c und 4 Zehnerpotenzen für k_d angegeben. Wird studienübergreifend verglichen, kann auch für k_d eine Variabilität bis zu 6 Zehnerpotenzen festgestellt werden (siehe z.B. Shugar et al. 2007, Thoman & Niezgodna 2008, Wahl 2010). Die ermittelten Kennwerte zeigen insgesamt erodiblere Böden als die Referenzstudie von Hanson & Simon (2001) definiert. Auch hier finden sich in der Literatur jedoch ausreichend Belege für vergleichbare Bewertungen (siehe z.B. Wahl 2010, Daly et al. 2015, Khanal & Fox 2017). Zu beachten ist hierbei, dass die Referenzstudie von Hanson & Simon (2001), ebenso wie die meisten der verfügbaren Studien zu JET-Versuchen, im Kontext künstlicher Entwässerung und Stabilität von Dammstrukturen entstanden ist. Die verwendeten Böden zeigen daher einen hohen Tongehalt, starke Verdichtung und volle Wassersättigung. Alle genannten Faktoren wurden in dieser und anderen Studien als wichtige Einflussfaktoren identifiziert. Vergleichbar zu anderen Studien ist dagegen die gefundene Korrelationen zwischen den beiden Erosionsparametern τ_c und k_d .

Ergänzend zu den Ausführungen in Kapitel 4.3.5 wurde noch einmal die Validität der Methode anhand der nun verfügbaren 63 Versuche geprüft. Innerhalb der Gesamtauswertung lassen sich

die 6 Standardversuche klar abgrenzen. Die hier verzeichneten Unterschiede zwischen den einzelnen Testläufen sind in der Gesamtmenge der Versuche kaum festzustellen. Wie auch bereits in Kapitel 4.3.5 festgehalten, lässt sich eine klare Beziehung von τ_c zu k_d auch über alle Versuche etablieren. Dies deckt sich mit den Ergebnissen anderer Studien zu JET-Versuchen. Gleiches lässt sich für das Maß der Variabilität feststellen.

Über den gesamten Satz der verfügbaren Versuche wurden zunächst allgemeine Korrelationen getestet. Hier zeigt sich, dass Korrelationen zwischen einer Bodeneigenschaft und dem Erosionswiderstand für k_d durchweg deutlich ausgeprägter sind als für τ_c . Dies passt zu den Ergebnissen in Kapitel 4, welche gezeigt haben, dass k_d deutlich stabiler zu bestimmen ist als τ_c . Über alle untersuchten Proben zeigen sich insgesamt (bis auf wenige Ausnahmen) nur schwach ausgeprägte Korrelationen (nur 6 von 24 untersuchten Korrelationen erreichen $R^2 > 25\%$). Für die konstanten Bodenarten besteht diese insbesondere zum Tongehalt ($R^2 = 32\%$ für k_d). Weitere häufig angegebene Beziehungen zu z.B. Schluff und / oder Feinsand können hier nicht bzw. nur mit sehr schwachen Korrelationen festgestellt werden. Für die untersuchten variablen Bodeneigenschaften Wassergehalt und Dichte kann über alle Bodenproben eine verhältnismäßig hohe Korrelation zum Wassergehalt ($R^2 = 37\%$ für k_d) gefunden werden, während die Korrelation zur Dichte nur schwach ausgeprägt ist. Die Beziehung zum Wassergehalt ist dabei so großskalig erkennbar, dass sie auch im übergeordneten Vergleich aller Bodenproben zwischen der ersten und zweiten Kampagne auffällt, wobei die beiden Kampagnen zu gleichen Zeitpunkten innerhalb des Bewirtschaftungsjahres aber bei deutlich abweichender Vorfeuchte durchgeführt wurden. Auch in anderen Studien wie z.B. von Mazurek et al. (2001), Ansari et al. (2003) oder Regazzoni et al. (2008) wird insbesondere die Beziehung zum Wassergehalt etabliert. Beispielsweise untersuchen Regazzoni et al. (2008) die Veränderung der Erodibilität für kompaktierte Proben bei wechselndem Wassergehalt und kommen zu dem Ergebnis, dass k_d für identischen Boden je nach Wassergehalt bei Verdichtung um bis zu 3 Zehnerpotenzen variiert, wobei ein optimaler Wassergehalt im Sinne einer besonders niedrigen Erodibilität gefunden wird und sich besonders die Proben auf der trockenen Seite dieses Optimums sehr erodibel zeigen. Vergleichbare Ergebnisse erzielen z.B. auch Hanson & Hunt (2007). Diese Studien sind besonders relevant, da ursprüngliche Studien mit dem JET, z.B. von Hanson (1990) und Stein & Nett (1997) durchweg mit voll gesättigten Bodenproben durchgeführt wurden.

Klar zu erkennen ist, dass von allen untersuchten Bodeneigenschaften lediglich zwei eine merkliche Korrelation aufweisen und es sich hierbei je um einen konstanten und einen variablen Bodenparameter handelt, dass also die Annahme, dass der Erosionswiderstand primär von den konstanten Bodeneigenschaften geprägt ist, so nicht bestätigt werden kann, sondern im Gegenteil eine Vergleichbarkeit zwischen den konstanten und den variablen Bodeneigenschaften gegeben ist. Werden diese Korrelationen innerhalb einer Bodenart gemacht, verschiebt sich dieses Verhältnis weiter und die Bedeutung der konstanten gegenüber den variablen Bodeneigenschaften nimmt zu. Insbesondere zeigt sich hier auch eine Beziehung zur Verdichtung.

Hier muss darauf hingewiesen werden, dass der als besonders relevant festgestellte konstante Bodenparameter Tongehalt im Rahmen dieser Studie nur wenig variiert hat. Der Vergleich für übergreifende Auswertungen über verschiedene Bodenarten und Untergruppen innerhalb einer Bodenart wird daher für ein breites Spektrum an Bodenarten vermutlich anders aussehen.

Als besonders zielführend für die Auswertung hat sich erwiesen, die Ergebnisse in einer Datenbank mit allen relevanten / zu prüfenden Eigenschaften festzuhalten. Hierdurch wird es möglich, Korrelationen zu allen Eigenschaften zu prüfen und diese Prüfung auch innerhalb von Untergruppen durchzuführen und damit Untergruppen zu vergleichen. Auf der anderen Seite zeigt sich durch dieses Vorgehen, dass die hier durchgeführten 63 Versuche lediglich ausreichend sind, um Tendenzen und Ansätze für weitere Forschungsfragen aufzuzeigen. Dies liegt insbesondere daran, dass Untergruppen von Bodenproben für spezifische Fragestellungen bereits so wenige Bodenproben umfassen, dass der Einfluss von Einzelergebnissen die Bewertung verzerren kann. Dieses Ergebnis ist besonders nennenswert, da 63 Einzelversuche für eine einzelne Studie im Rahmen der Sedimentbewegung bereits als eine große Studie anzusehen ist. Hilfreich wäre vor allem, wenn eine standardisierte Datenhaltung es ermöglichen würde, Ergebnisse verschiedener Studien zu vergleichen. Sollen umfassendere Erkenntnisse gewonnen bzw. Zusammenhänge verglichen werden, zeigt es sich derzeit auch noch als Problem, dass in vielen Studien nur die ermittelten Absolutwerte, nicht aber die Qualität der Anpassungen dargestellt sind.

Auf offene Fragen in Bezug auf Versuchsdurchführung und Auswertung wurde bereits in Kapitel 4 hingewiesen. Hier sei nur erneut festgehalten, dass das theoretische Gebäude des JET insgesamt sowie die Anwendung des JET im Kontext des Themas Bodenerosion durch Oberflächenabfluss noch nicht zufriedenstellend behandelt ist. Entsprechend wurde in diesem Kapitel auch thematisiert, wie stark die erzielten Ergebnisse von den Versuchsbedingungen abhängen. Die hier festgestellten Korrelationen für wirksame Schubspannung τ_0 , Versuchsdauer und max. Erosionstiefe sind in ihrer Ausprägung vergleichbar zu den zuvor aufgeführten Korrelationen. Nicht beantwortet werden kann jedoch, ob es sich hierbei auch um eine Kausalität handelt in der Form, dass die Versuchsbedingungen die ermittelten Erosionsparameter beeinflussen. Dies liegt daran, dass die Gestaltung der Versuchsdurchführung natürlich abhängig von der vermuteten Erodibilität der Probe ist. Dennoch kann eine Abhängigkeit der Versuchsergebnisse von den Versuchsbedingungen nicht ausgeschlossen werden. Beispielsweise vermuten auch Simon et al. (2010) eine Beziehung zwischen der ermittelten Gleichgewichtstiefe nach der Blaisdell-Routine und der Dauer des JET-Versuchs. Auch hieran lässt sich die Bedeutung eines standardisierten Messprotokolls und ergänzender Forschung zur Theorie des JET-Messgeräts erkennen.

Im direkten Vergleich zwischen der ersten und der zweiten Feldkampagne zeigt sich neben der erkennbaren Beziehung zur Vorfeuchte auch die Bedeutung eines Starkregenereignisses zwischen den beiden Feldkampagnen. Dieses hat zu deutlichen Umlagerungsprozessen auf dem Testhang geführt, welche sowohl in den Korngrößenverteilungen an den definierten Probenahmepunkten als auch großskalig in der Fotodokumentation klar zu erkennen sind.

Auffällig und besonders relevant für künftige Arbeiten in dem beschriebenen thematischen Kontext sind die Vergleiche zwischen ungestörten Stechzylinderproben, gestörten Mischproben und Laborproben. Zwischen den beiden letztgenannten Kategorien lassen sich kaum Unterschiede feststellen, sowohl in der statistischen Auswertung als auch in einem exemplarischen Versuch zur Einstellung des Wassergehalts bei Laborproben. Im Vergleich zwischen gestörten Proben und Laborproben auf der einen und ungestörten Proben auf der anderen Seite zeigen sich dagegen erhebliche Unterschiede in Bezug auf die Stärke der Korrelationen (auch wenn die Tendenzen die gleichen sind). Es kann also angenommen werden, dass die Gefügebildung der ungestörten Probe ein deutlich abweichendes Verhalten in Bezug auf den Erosionswiderstand zeigt und dieses mit künstlich verdichteten Proben nicht

direkt reproduziert werden kann. Neben der Bedeutung für die Durchführung von JET-Versuchen hat diese Erkenntnis auch potentiellen Einfluss auf die Bewertung von Bewirtschaftungsmaßnahmen, da die hier vermutete Bedeutung des Bodengefüges auch für unterschiedliche Bodenbearbeitungstechniken beachtet werden sollte. Potter et al. (2002) führen eine Studie mit räumlich benachbarten gepflügten und nicht-gepflügten Bodenoberflächen durch und identifizieren mit dem JET deutliche Unterschiede in der ermittelten Erodibilität. Gepflügte Böden zeigen sich in ihrer Studie um bis zu 2 Zehnerpotenzen erodibler, was auch hier mit dem Aufbrechen von Bodenaggregaten beim Pflügen bzw. mit dem gestörten Bodengefüge erklärt wird. Ergänzend weisen sie darauf hin, dass die Studie am Ende der Wachstumsphase durchgeführt wurde und davon ausgegangen wird, dass der identifizierte Effekt zu diesem Zeitpunkt am schwächsten ausgeprägt ist. In diesem Kontext auch die Bedeutung trocken verdichteter Böden als besonders erosionsgefährdet gesehen werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit dem konstruierten JET, den genommenen Bodenproben und den exemplarischen Untersuchungen bereits wesentliche Erkenntnisse zur Variabilität des Erosionswiderstands kohäsiver Böden gewonnen werden konnten. Einige dieser Erkenntnisse lassen sich aus dem Vergleich mit anderen Studien bestätigen, auch wenn diese in einem anderen fachlichen Kontext durchgeführt wurden. Andere Erkenntnisse eignen sich, um Thesen für weiterführende Forschungsarbeiten zu gewinnen. Insbesondere die etablierte Haltung aller Messdaten in Form einer Datenbank ist gut geeignet, um verschiedene Arten von Zusammenhängen zu prüfen.

Als besonders relevant zeigt sich die große Variabilität der ermittelten Erosionsparameter sowohl innerhalb einer Bodenart als auch zwischen den untersuchten Bodenarten. Wobei letzteres besonders relevant ist, da sich die untersuchten Böden im Tongehalt nur wenig unterscheiden und davon auszugehen ist, dass die Variabilität mit größeren Unterschieden im Tongehalt noch zunimmt. Diese hohe Variabilität kann schon grundsätzlich in den typischerweise verwendeten Pedotransferfunktionen nicht gefunden werden. Dies stellen zum Beispiel Hanson & Cook (2004) im Vergleich zum Pedotransfer nach Flanagan & Livingston (1995) oder Daly et al. (2015) im Vergleich zu verschiedenen gängigen Pedotransferfunktionen fest. Die festgestellte hohe Variabilität im Unterschied zu der geringen oder fehlenden Variabilität, die sich aus gängigem Pedotransfer ableiten lässt, bestätigt die Interpretation der Erosionsparameter aus diesem Pedotransfer als statistische Mittelwerte im Sinne eines K-Faktors.

Ein weiteres zentrales Ergebnis ist die festgestellte Beziehung zum Wassergehalt, welche sich anhand von Aussagen in der Literatur bestätigen lässt, aber auch die Beziehung zur Vorfeuchte, welche integral über alle Hangproben identifiziert werden konnte. Dies zeigt in Bezug auf die Modellierung insbesondere die Notwendigkeit, zeitlich (in Bezug auf Vorereignisse) variable Ansätze für den Erosionswiderstand zu integrieren.

Zuletzt wurde auch die besondere Bedeutung des Bodengefüges der ungestörten Bodenoberfläche herausgearbeitet. Dies zeigt die Bedeutung der Bodenbearbeitung für den Erosionswiderstand des Oberbodens (unabhängig von Aspekten wie beispielsweise Bodenbedeckung und Durchwurzelungsresten). Es ist auch zu sehen, dass die fehlende Fähigkeit der Modelle, die Variabilität der Erosionsparameter abzubilden, wichtige Aspekte der vergleichenden Bewertung von Bewirtschaftungsszenarien ausschließt.

6. Fazit und Ausblick

Bodenerosion meint im Kontext eines Umweltproblems die kulturbedingte Bodenerosion, welche typischerweise auf landwirtschaftlichen Flächen unter Nutzung stattfindet und sowohl On-Site durch Bodenverlust als auch Off-Site durch Material- und Schadstoffeintrag zu gravierenden Schäden führt. Somit ist es von Bedeutung, Erosionsprozesse von Ackerflächen durch geeignete modelltechnische Ansätze nachzubilden und einschätzen zu können. Der größte Schritt in der Entwicklung der Erosionsmodellierung war der Aufbau der Universal Soil Loss Equation (USLE) durch Wischmeier & Smith (1965). Diese ist bis heute der am häufigsten benutzte Ansatz zur Bewertung des Ausmaßes von Erosionsprozessen und liefert bekannterweise (innerhalb ihres Anwendungskontextes) stabile und belastbare Ergebnisse. Problematisch zeigt sich dagegen, dass die USLE ebenso, wie Ansätze die methodisch auf der USLE aufbauen, auch außerhalb dieses Kontextes und insbesondere zur Modellierung von Einzelereignissen genutzt werden. Dass die USLE für diesen Anwendungsfall explizit nicht geeignet ist, wurde bereits von Wischmeier (1976) klar dargelegt, indem er aufzeigt, dass die Faktoren der USLE als rein statistische Kenngrößen über lange Zeiträume zu verstehen sind. Dies bedeutet, dass insbesondere der K-Faktor als Erodibilitäts-Faktor nicht als invariante Eigenschaft des Bodens zu verstehen ist, sondern als statistischer Mittelwert über die betrachteten langen Zeiträume. Wird dies ignoriert, erfolgt eine Verzerrung in der Form, dass die Abweichungen individueller Ereignisse oder Zeiträume von diesem Mittelwert vernachlässigt werden, wobei schwer zu quantifizieren ist, wie groß diese Verzerrung im Einzelfall ist. Während die Topographiefaktoren L und S tatsächlich als zeitlich invariant anzusehen sind und für die Faktoren R und C bereits theoretisch valide Ansätze zur Abbildung von zeitlichen Dynamiken entwickelt sind, wird die Bodenerodibilität über den K-Faktor in (nahezu) allen Modellansätzen als zeitlich invariant angenommen.

Forschungsfrage 1:

Eignet sich die modelltechnische Abbildung der Prozesse des Bodenabtrags durch Oberflächenabfluss in gängigen Erosionsmodellen, um die real ablaufenden Erosionsprozesse nachzubilden und realistische Abtragungsschätzungen zu ermöglichen?

Die skizzierte Problematik betrifft nicht nur die USLE und direkte Derivate, sondern auch modelltechnisch gänzlich andere Ansätze, welche dennoch den grundsätzlichen Gedanken zur Abbildung der Erodibilität übernommen haben. Dies ist die Ableitung der Bodeneigenschaft Erodibilität aus konstanten Eigenschaften des anstehenden Bodens, welche exemplarisch durch Probenahme oder großskalig aus Bodenkarten bestimmt werden. Dominierend sind bei diesen Bodeneigenschaften Kenngrößen der Korngrößenverteilung, vereinzelt werden auch Eigenschaften genutzt, die direkter mit der Erosion verbunden, aber ebenfalls zeitlich invariabel sind, wie z.B. makroskopische Stabilität. Durch diesen zeitlich (und weitgehend auch räumlich) invarianten Erodibilitätsbegriff werden auch anders gedachte, z.B. physikalisch basierte Einzelereignis-Modelle, zu Modellen, welche lediglich statistische Mittel im Sinne eines K-Faktors bzw. im Sinne der USLE liefern können. Neben der modelltechnischen Entwicklung aus dem (statistischen und damit tatsächlich zeitlich invarianten) K-Faktor kann auch die Verbindung zu dem Themenfeld der Sedimenttransportmodellierung als prägend für diese Herangehensweise gesehen werden.

Insbesondere aufbauend auf den Arbeiten von Shields (1936) bzw. der Entwicklung des Shields-Diagramms hat sich ein Forschungsbereich etabliert, in dem der Widerstand einer

Gewässersohle auf einem Kennwert der Korngrößenverteilung, dem repräsentativen Durchmesser, aufbauend verstanden wird. Der Versuch, die in diesem Kontext etablierten und bewährten Gleichungs- und Modellansätze durch z.B. Korrekturfaktoren auf den Kontext der Bodenerosionsmodellierung zu übertragen, erklärt ebenso wie die Entwicklung des K-Faktors in der USLE, die Tendenz der Modellansätze den Erosionswiderstand als invarianten Parameter zu begreifen. Die Betrachtung des Sedimenttransports in Fließgewässern konzentriert sich jedoch auf Berechnungen für kohäsionslose Sedimente, auch wenn Fließgewässersohlen nicht tatsächlich in gleicher Weise auf kohäsionslose Sohlen beschränkt sind, in welchen der Erosionswiderstand ausschließlich oder nahezu ausschließlich aus der Gewichtskraft der Einzelpartikel resultiert. Hierdurch spielt das Gefüge für die Stabilität der Sohle keine oder nur eine untergeordnete Rolle und die Annahme von zeitlich konstanten Kennwerten des Bodens zum Erosionswiderstand erscheint plausibel. Im Unterschied hierzu wird bei kohäsiven Böden der Erosionswiderstand nahezu ausschließlich durch interpartikuläre Bindungen verursacht. Die Ausprägung dieser Bindungen ist jedoch durch eine Vielzahl von weiteren Bodeneigenschaften beeinflusst.

Auf der anderen Seite bedarf es auch Ansätzen zur Quantifizierung der durch den Oberflächenabfluss bewirkten erosiven Kräfte. Diese werden in der Regel durch die wirksame Schubspannung parametrisiert. Die zu deren Berechnung verwendeten Gleichungen wurden unter weitreichenden Annahmen und damit einhergehenden Vereinfachungen aus den hydrodynamischen Grundgleichungen abgeleitet. Diese betreffen vor allem die zeitliche und räumliche Veränderlichkeit des Abflussgeschehens. Es werden stationäre Verhältnisse angenommen und über die Wassertiefe und die Abflussbreite integrierte Gleichungen verwendet. Zur Beschreibung des kleinräumig veränderlichen Oberflächenabflusses sind die auf diesen Vereinfachungen beruhenden Ansätze nur bedingt oder gar nicht geeignet. So kann die mittlere wirkende Schubspannung (integriert) nur vereinfacht abgebildet werden, während turbulenzbedingte und durch kleinskalige Fließänderungen bedingte Fluktuationen der Schubspannung vernachlässigt werden, wobei klar ist, dass letztere einen entscheidenden Anteil am Erosionsphänomen haben. Hinzu kommt, dass keine belastbaren Ansätze bestehen, aus der berechneten Gesamtschubspannung die auf die Bodenoberfläche wirksame Schubspannung abzutrennen.

An einem Testhang aus dem umfangreichen Messdatensatz der FAM Versuchsstation Klostersgut Scheyern (Fiener et al. 2019) wurde exemplarisch die Bedeutung des oben skizzierten Sachverhalts zur Definition der Erodibilität in Erosionsmodellen gezeigt. Der Datensatz wurde für ein Testeinzugsgebiet innerhalb der Versuchsstation aufbereitet, welcher 8 Jahre Klima-, Abfluss- und Abtragsaufzeichnungen zusammen mit einer Bewirtschaftungsdokumentation enthält. Bereits eine Auswertung von Abfluss und Abtrag in Korrelation mit anderen dokumentierten Parametern hat gezeigt, dass die übliche lineare Beziehung des Schubspannungsüberschusses in Verbindung mit zeitlich invarianten Erosionsparametern keine zufriedenstellende Erklärung der Aufzeichnung liefern kann. Dies gelingt nur mit exponentiellen Beziehungen zwischen Größen des Abflusses und Größen des Abtrags und / oder mit zeitlich hochgradig veränderlichen Erosionsparametern. Auswertungen der aufgezeichneten Ganglinien legen hier jedoch nahe, dass die Variabilität des Erosionswiderstands in jedem Fall Teil der Erklärung sein muss. Ein singuläres Ereignis etwa in der Mitte des Messzeitraums führt zu einer signifikanten Veränderung des Systemverhaltens, hierzu gehört die Zunahme der Abflüsse aber auch die Zunahme der Erosion bei konstanten Abflüssen, d.h. die Sedimentliefermengen pro Abflusseinheit verändern sich, was zumindest ein

starkes Indiz für veränderte Erodibilität ist. Deutlicher wird dies bei dem Versuch die gemessenen Abträge im Modell nachzubilden. Hierzu wurden anhand einer theoretischen Modellanalyse 2 komplexe Bodenerosionsmodelle ausgewählt und in diesen insgesamt 3 unterschiedliche Modellansätze aufgebaut und ausgewertet. Keiner dieser Ansätze war unter Ansatz der Standardparameter in der Lage, den Erosionsprozess qualitativ und quantitativ korrekt nachzubilden. Dies gilt insbesondere für das singuläre Event. Neben dem Ereignis selbst kann auch dessen vorgestellter Einfluss auf das Einzugsgebiet nicht abgebildet werden. Lediglich die Einzelereignis-Modellierung im angewendeten Modell KINEROS2 kann vier ausgewählte Ereignisse zumindest in ihrem Umfang nachbilden. Hierzu sind jedoch deutliche Anpassungen der Erosionsparameter über mehrere Größenordnungen notwendig, während die vorgeschaltete Modellierung der gemessenen Abflüsse gut gelungen ist. Dies passt qualitativ auch zu der erwähnten statistischen Auswertung der Messreihen.

Die Auswertung der Messergebnisse für sich sowie der Vergleich mit den Modellierungsversuchen zeigt damit zumindest eine zeitlich hohe Veränderung der Erodibilität im Testgebiet. Im besonderen Ausmaß betrifft dies das singuläre Ereignis. Dies ist bereits wiederholt mit der unmittelbar vor dem Ereignis stattgefundenen Bodenbearbeitung verknüpft worden, so dass auch rein phänomenologisch postuliert werden kann, dass die Annahme einer konstanten Erodibilität mindestens solche Ausnahmeereignisse nicht nachbilden kann. Dies ist jedoch insofern problematisch, als die Modellierung von Ausnahmeereignissen typischerweise das Ziel einer Einzelereignis-Modellierung ist. Die beschriebene Änderung des Systemverhaltens im Anschluss an das singuläre Ereignis legt nahe, dass der Eingriff in das Bodengefüge durch die Bodenbearbeitung möglicherweise in Verbindung mit dem extremen Ereignis die Erodibilität auch langfristig verändert hat. Der Messdatensatz zeigt sich hier nach dem singulären Ereignis zeitlich nicht ausreichend, um sicher zu bewerten, ob und wann das System in einen Zustand vor dem singulären Ereignis zurückkehrt.

Aus den theoretischen Überlegungen sowie dem Mess- und Modellierungsbeispiel können mehrere Aspekte festgehalten werden. Im Zuge der theoretischen Modellanalyse wurden verschiedene Schwächen in der modelltechnischen Umsetzung des Erosionsprozesses identifiziert. Die Prozesse für die Erosion von kohäsiven Böden sind von beiden Seiten wenig detailliert erforscht. Sowohl in der Berechnung der angreifenden Kraft zeigen sich gleichermaßen Erkenntnis- als auch Umsetzungsdefizite als auch in der Beschreibung der Widerstandskraft des Bodens. Eine Theorie, die Abtrag (und in der Folge Transport) von kohäsiven Böden durch Oberflächenabfluss beschreibt, liegt aktuell nicht vor und kann auch aktuell nicht aufgestellt werden. Ebenso fehlt es an einer Theorie, wie die Widerstandskraft des Bodens in diesem Prozess sicher theoretisch bestimmt werden kann. Insbesondere fehlt es damit auch an einer Grundlage, die zeitliche und räumliche Variabilität dieses Erosionswiderstands zu beschreiben und damit in Modellen umzusetzen.

Die Auswertung der Messreihen und der Vergleich mit Modellierungsansätzen zeigt, dass selbst die in dieser Untersuchung verwendeten Messreihen noch zu großskalig sind, um die zeitliche und insbesondere räumliche Veränderung der Erosionsparameter zu isolieren. Es lässt sich hieraus nicht klar ableiten, welche der zuvor beschriebenen Defizite der Modellierungsergebnisse, welchen der modelltechnischen Schwächen zugeordnet ist. Klar erkennbar ist jedoch, dass die Zunahme der Einheits-Sedimentmengen nach dem singulären Ereignis in der Langzeitsimulation nicht verzeichnet wird. Dieser Effekt ist wahrscheinlich einem veränderten Verhalten des Bodens zuzuschreiben, welches das Modell nicht reproduzieren kann. Insbesondere in den Modellen zeigen sich zu viele modelltechnische

Ungenauigkeiten und offene Fragen, um klar abzugrenzen, welchen Einfluss die Veränderung der Erodibilität auf die Defizite der Modellierungsergebnisse hat. Die Untersuchungen zu dem Testeinzugsgebiet in Scheyern haben nahegelegt, dass weiterer Erkenntnisgewinn zur Veränderlichkeit des Erosionswiderstands kohäsiver Böden für eine aussagekräftige physikalisch basierte Erosionsmodellierung unverzichtbar ist. Es muss daher angestrebt werden, Messungen auf einer deutlich kleineren Skala durchzuführen, welche es erlaubt, die fraglichen Effekte im fraglichen Kontext zu isolieren. In dieser Arbeit ist dies die Abtragskomponente des Erosionsprozesses durch Oberflächenabfluss auf unbedecktem Boden.

Forschungsfrage 2:

Ist der JET Erosion Test ein geeignetes Messgerät, um räumliche und zeitliche Veränderungen der Erodibilität zu messen, zu analysieren und hieraus Empfehlungen zur Parametrisierung in Erosionsmodellen abzuleiten?

Um den Bodenerosionswiderstand in diesem Kontext zu bestimmen, existieren grundsätzlich verschiedene Ansätze, wobei nur wenige das Potential bieten, den genannten Prozess und die formulierten Fragen isoliert zu betrachten. Für kleinskalige Messungen steht im Wesentlichen der Versuch auf Plotebene oder der Rinnenversuch den Messapparaturen, insbesondere dem JET und HET Erosion Test, gegenüber. Der große Vorteil der Messapparaturen wird hier im geringeren Aufwand je Messung, der geringen Beeinflussung der Testflächen durch die Messung sowie der Möglichkeit, sowohl gestörte als auch ungestörte Proben zu bearbeiten, gesehen. Als besonders vielversprechend zeigt sich dabei das Konzept des JET Erosion Tests. Innerhalb der Gruppe der kleinskaligen Tests zeigt sich die Abbildung von angreifender und rückstellender Kraft für den JET relativ realitätsnah. Die versuchstechnische Ausbildung auf Basis des linearen Schubspannungsüberschusses deckt sich mit der modelltechnischen Abbildung des Bodenabtrags in vielen Erosionsmodellen, so dass ein hohes Maß an Übertragbarkeit der Ergebnisse der JET-Modellierung auf den Kontext der Bodenerosionsmodellierung unterstellt werden kann. Weiter ermöglicht der JET eine besondere Bandbreite der Versuchsgestaltung in Bezug auf untersuchte Böden und Geräteeinstellungen. Gleichzeitig konnte aus der Literatur an verschiedenen Studien gezeigt werden, dass mit dem JET erzielte Ergebnisse zumindest qualitativ vergleichbar sind mit Messungen aus anderen Techniken (besonders HET und Rinne), auch wenn die Ergebnisse quantitativ durchaus andere Größenordnungen zeigen können. Es ist daher wahrscheinlich, dass die hier formulierten Fragestellungen weitgehend unabhängig von der Art der Testapparatur beantwortet werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein eigener JET nach dem grundsätzlichen Aufbau von Hanson (1990) und Konstruktionsempfehlungen nach ASTM Standard D5852-00 (2007) und Hanson & Cook (2004) gebaut. Relevante konstruktive Randbedingungen sind im Rahmen der eigenen Fragestellung definiert. Als konstruktiv besonders problematisch erweist sich die Gestaltung des Tiefenmessers, da dieser eine besondere Relevanz für die erzielbare Qualität der Messungen hat. Für die Bewertung des konstruierten JETs, die Wahl einer geeigneten Auswerterroutine sowie zu Implementierung eines geeigneten Versuchsprotokolls werden zunächst Wiederholungsversuche mit einem aufbereiteten „Standardboden“ durchgeführt. Es zeigt sich, dass keine der getesteten Routinen uneingeschränkt empfehlenswert ist. Insbesondere besteht für alle getesteten Routinen ein Spannungsfeld zwischen einer (teil-)automatisierten und damit objektivierbaren Auswertung auf der einen und einer (subjektiven) Bewertung und Interpretation der verfügbaren Messungen auf der anderen Seite. Als Schwachpunkt des Geräts zeigt sich hier erneut der Tiefenmesser, der konstruktionsbedingt zu kleinen Messfehlern führen

kann, auf welche mit einer individuellen Auswertung besser reagiert werden kann als mit einer automatisierten Fitting-Routine.

Auf der theoretischen Seite nicht abschließend beschrieben ist die räumliche und zeitliche Verteilung der auf die Probenoberfläche wirkenden Schubspannung. Für dieses Problem wurde aufgezeigt, dass hochaufgelöste CFD-Simulationen das Potential haben, die Theorie hier weiter zu verbessern. Neben diesen Fragen, die spezifisch für das Konzept des JET-Versuchs sind, stellt sich im Kontext der Erosion kohäsiver Böden grundsätzlich die Frage, ob das in Messung und Modellierung verbreitete Konzept des linearen Schubspannungsüberschusses den Abtragsprozess korrekt repräsentiert. Bisher können Studien hier keine klare Antwort liefern. Am Beispiel der JET-Versuche stellt sich auch hier die Frage, in welchem Teil der Abtragskurve von Düse bis Gleichgewichtstiefe die durchgeführte Messung vermutet wird. Abhängig hiervon ändert sich die Bewertung der Abtragsgleichung.

Trotz dieser Einschränkungen kann klar herausgearbeitet werden, dass die JET-Ergebnisse und auch die hier durchgeführten Versuche qualitativ belastbar sind, was hier der Kern der formulierten Fragen war. Zum einen zeigt sich, dass die unterschiedlichen Auswertungsmethoden zwar absolut zu abweichenden Ergebnissen führen, die qualitativen Beziehungen (Vergleich der Erodibilität zwischen Proben) jedoch erhalten bleiben. Insbesondere bleibt auch die τ_c - k_d -Beziehung erhalten, d.h. ändert sich die kritische Schubspannung τ_c zwischen zwei Auswertemethoden um einen bestimmten Faktor, zeigt sich eine gegenläufige Änderung bei der Erodibilität k_d entsprechend der definierten Beziehung.

Nachdem die Validität der Methode gezeigt worden ist, werden exemplarische Fragestellungen formuliert, welche im Rahmen der Messung und Modellierung von Bodenerosion durch Oberflächenabfluss besondere Relevanz haben. Diese beziehen sich zum einen auf geeignete Probenahme für die JET-Versuche und zum anderen auf Fragen der räumlichen und zeitlichen Variabilität sowie auf generalisierte Fragen zu Einflussfaktoren auf den Erosionswiderstand. Die Bodenproben zur Beantwortung der Fragen werden auf einem Testhang genommen, welcher in seiner Charakteristik mit dem Modellierungs-Testhang vergleichbar ist und damit ebenfalls als repräsentativ für einen bewirtschafteten Hang im Deutschen Mittelgebirge gesehen wird. Ergänzend werden Proben von einem Vergleichshang genommen und Proben des Standardbodens verwendet. Insgesamt werden 63 JET-Versuche mit drei unterschiedlichen Böden und drei unterschiedlichen Aufbereitungstechniken durchgeführt.

Über alle Studien kann das hohe Maß an Variabilität der Bodenerosionsparameter über mehrere Zehnerpotenzen festgestellt werden, welches deutlich über die durch Pedotransfer suggerierte Variabilität hinausgeht. Weiter zeigen sich nur eingeschränkt Beziehungen zu typischerweise verwendeten Parametern des Pedotransfers, insbesondere zu Kennwerten der Korngrößenverteilung / Bodenart. Diese grundlegende Erkenntnis hat sich vergleichbar auch in den im Rahmen dieser Studie durchgeführten Untersuchungen bestätigt. Es zeigen sich sowohl zwischen den untersuchten Bodenarten als auch innerhalb einer untersuchten Bodenart Unterschiede von mehreren Zehnerpotenzen in beiden Parametern k_d und τ_c . Generelle Beziehungen konnten insbesondere zum Wassergehalt und dem Anteil der Tonfraktion gefunden werden, welche in ihrer Stärke vergleichbar sind.

Die hier durchgeführten Studien haben mehrere Aspekte aufgezeigt, welche Ansatzpunkte für weiterführende Studien zur sinnvollen Parametrisierung des Bodenerosionswiderstands bieten können. Räumlich konnte nur im direkten Nahbereich eines Probennahmepunktes

(Zwillingspunkte) eine Vergleichbarkeit des Erosionswiderstands gefunden werden. Auf der hier untersuchten Skala eines Hangs bzw. kleinen Einzugsgebiets zeigen sich bereits deutliche Unterschiede, welche in Teilen auch mit deutlichen Änderungen in der Korngrößenverteilung zusammenfallen. Auch im zeitlichen Vergleich zwischen den beiden Jahren wurden Unterschiede in der Erodibilität an identischen Probenahmepunkten gefunden. Diese fallen mit sowohl einer deutlich reduzierten Bodenfeuchte als auch mit deutlichen Umlagerungsprozessen (u.a.) infolge eines Starkregenereignisses im Frühjahr des zweiten Versuchsjahres zusammen.

Besonders interessant für potentielle Übertragungen auf die Modellierung von Erosionsprozessen ebenso wie für die Gestaltung weiterer Studien mit dem JET sind die deutlichen Unterschiede, welche zwischen den gestörten und ungestörten Proben gefunden worden sind. Während sich für die gestörten Proben sowie die Laborproben deutliche Beziehungen zu variablen Parametern wie Wassergehalt und Probendichte aber auch dem Tongehalt finden lassen (welche auch bei den Auswertungen über alle Proben durchaus erhalten bleiben), konnten diese für die ungestörten Proben nicht oder nur mit deutlichen schwächeren Korrelationen festgestellt werden. Es steht also zu vermuten, dass die Stabilität der ungestörten Bodenoberfläche wesentlich von Gefügeeigenschaften bestimmt wird, die die künstlich verdichteten Proben nicht in diesem Maße reproduzieren können. Dieser Aspekt ist auch deswegen besonders zu betonen, weil er sich nahtlos an die Ergebnisse aus Kapitel 3 anfügt. Das singuläre Abtragsevent wird möglich durch die Destabilisierung des Oberbodens bei der Kartoffelernte, d.h. die besondere Ausprägung dieses Events kann als Resultat auf die Veränderung des Bodengefüges verstanden werden. Nach dem aktuellen Stand der Literatur wird dieser Aspekt in der Messung der Erodibilität aber noch nicht diskutiert. Dies kann sicher auch mit dem Schwerpunkt der Forschung mit dem JET in der Dammsstabilität begründet werden, da die skizzierte Frage zur Bodenbearbeitung in diesem Themenfeld nicht existiert.

In diesem zweiten thematischen Schwerpunkt wurde untersucht, welche Rolle die Messtechnik in der Frage zur räumlichen und zeitlichen Variabilität des Erosionswiderstands einnehmen kann. Obwohl die Frage des Erosionswiderstands kohäsiver Böden bereits umfangreich untersucht worden ist, konnte sich kein standardisiertes Messverfahren etablieren. Dies betrifft sowohl die Messmethode als auch im Falle der gewählten Methode des JET die Versuchsgestaltung und Versuchsauswertung. Dieser Aspekt muss besonders betont werden, da er dazu führt, dass trotz der Vielzahl an bereits durchgeführten und publizierten Versuchen kaum generalisierte, studienübergreifende Aussagen getätigt werden können, da Studien untereinander zum Teil wenig Vergleichbarkeit aufweisen. Aus dem ersten thematischen Schwerpunkt konnte mitgenommen werden, dass die Beschreibung der Variabilität der Bodenerosionsparameter für die Modellierung von Bodenerosion durch Oberflächenabfluss unverzichtbar ist und dass hierfür kleinskalige Messtechnik benötigt wird. Hier hat sich gezeigt, dass der JET ein besonders geeignetes Werkzeug sein kann, um Fragen zur Erodibilität in diesem Kontext zu beantworten. Der verhältnismäßig geringe Arbeitsaufwand kann ermöglichen, eine große Datenbasis zu erzeugen. Dies setzt jedoch die beschriebene Vergleichbarkeit zwischen Versuchen voraus, die aktuell nicht gegeben ist. Es lässt sich daher festhalten, dass es besonders relevant ist Vergleichbarkeit zwischen Studien herzustellen, was im ersten Schritt z.B. beinhalten kann, den Versuchsaufbau, den Messaufbau und die tatsächlichen Ablesungen zu veröffentlichen und im zweiten Schritt bedeutet standardisierte Messprotokolle spezifisch für den Kontext zu entwickeln. In dieser Arbeit wurden hierzu Vorschläge entwickelt und die wesentlichen offenen Fragen zu Versuchsdurchführung mit potentiellen Forschungsansätzen skizziert. Weiter wurde besonders gezeigt, welche

thematischen Fragen mit dem JET untersucht werden können, die für den Kontext der Bodenerosionsmodellierung besonders relevant sind.

Die vorliegende Arbeit hat sich mit der Bedeutung der Veränderlichkeit der Erodibilität von kohäsiven Böden im Kontext der Bodenerosion durch Oberflächenabfluss beschäftigt. Diese Frage hat eine besondere Relevanz unter dem Gesichtspunkt der Parametrisierung von Bodenerosionsmodellen.

An einem Fallbeispiel wurde gezeigt, dass das tatsächliche Erosionsgeschehen in einem exemplarischen Einzugsgebiet unter Anwendung konstanter Erodibilität des Bodens nicht nachgebildet werden kann. Im Gegenteil suggerieren die vorhandenen Abtragsmessungen, dass die Werte der Erodibilität sich über den Messzeitraum um mehrere Zehnerpotenzen verändern. Weiter hat sich jedoch gezeigt, dass sich offene Fragen zu Kennwerten der Erodibilität und offene Fragen zur Abbildung von Abtrags- und Transportprozessen in Untersuchungen zu Messung und Modellierung auf Hängen oder Einzugsgebieten nicht sauber trennen lassen. Die Unsicherheit sowohl auf der Seite der angreifenden Kräfte als auch auf der Seite der rückstellenden Kräfte erlaubt es nicht, Detailfragen zu isolieren. Alternativ wurde daher das Konzept der kleinskaligen Messapparaturen herangezogen, das hier zumindest konzeptionell eine Lösung verspricht. Da hier lediglich der Prozess des Sedimentabtrags (nicht des Transports) nachgebildet wird und die hydraulische Seite des Systems (zumindest theoretisch) exakt beschrieben werden kann, wird die Bodeneigenschaft Erodibilität direkt messbar.

Der im Rahmen der Untersuchung entsprechend dem Konzept von Hanson (1990) konstruierte und getestete JET Erosion Test zeigt sich vielversprechend, diese theoretisch skizzierte Anwendung umsetzen zu können. Die Technik eignet sich insbesondere, um mit vertretbarem Aufwand eine große Datenbasis zu erzeugen und aufgrund der vielfältigen Anwendungsvarianten für die Untersuchung einer Vielzahl von Fragestellungen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die theoretische Basis des JET noch nicht ausreichend untersucht ist, um eine direkte Übertragung von JET-Messungen in die Modellierung empfehlen zu können. Für viele dieser offenen Fragen könnte die CFD-Simulation einen Ansatz bieten. Rein konstruktiv hat sich der Tiefenmesser als Schwachstelle gezeigt. Als besonders relevant hat sich das Fehlen eines standardisierten Messprotokolls sowie einer standardisierten Auswertungs-Routine und damit einer fehlenden Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Untersuchungen herausgestellt.

Trotz dieser noch unklaren Aspekte konnte gezeigt werden, dass sich der JET bereits mit dem jetzigen Kenntnisstand eignet, Fragen zur Veränderlichkeit der Erodibilität qualitativ und eingeschränkt auch quantitativ zu beantworten. Im Rahmen dieser Untersuchung konnte insbesondere die hohe Bandbreite der Erodibilität auch bei Böden mit ähnlicher Korngrößenverteilung nachgewiesen werden. Eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität kann in Teilen mit korrespondierenden Unterschieden in der Korngrößenverteilung entlang eines Hangs und infolge von Umlagerungsprozessen begründet werden. Auf der anderen Seite konnte auch der Einfluss zeitlich veränderlicher Parameter wie Wassergehalt / Vorfeuchte, Lagerungsdichte und Bodengefüge deutlich gemacht werden. Insbesondere der letzte Aspekt hat sich innerhalb der hier untersuchten Proben als ausschlaggebend gezeigt und korrespondiert mit den Erkenntnissen aus dem Fallbeispiel. Gleichzeitig ist dieser Aspekt zumindest im Kontext bisheriger JET-Untersuchungen nicht ausreichend beachtet worden. Er

kann auch eine Erklärung für die zum Teil sehr widersprüchlichen Ergebnisse zwischen unterschiedlichen JET-Studien liefern.

Durch die Möglichkeit, mit dem JET ungestörte Bodenproben zu testen, kann in folgenden Studien gezielt untersucht werden, wie verschiedene Techniken der Bodenbearbeitung die Erodibilität beeinflussen. Dies ist nicht nur für die Umsetzung in der Modellierung hilfreich, sondern kann auch neue Informationen für eine ressourcenschonende Landwirtschaft liefern. Bereits jetzt sind Empfehlungen zur Bewirtschaftung ein wesentlicher Eckpfeiler im Umgang mit der Problematik der kulturbedingten Bodenerosion. In Bezug auf die Erodibilität beschränken sich bekannte Verfahren hier bisher auf den Schutz der Bodenoberfläche durch Bewuchs. Erkenntnisse zum Einfluss auf die Erodibilität der Bodenoberfläche selbst in Abhängigkeit von Bearbeitungstechniken können die vorhandenen Bodenschutzmaßnahmen vervollständigen. Der JET hat sich hier als vielversprechendes Werkzeug gezeigt, um diese Erkenntnisse zu gewinnen.

Literaturverzeichnis

- Aberle, J.; Nikora, V.; Walters, R. (2002): In Situ Measurement of Cohesive Sediment Dynamics with a Straight Benthic Flume. In: T. L. Wahl, C. A. Pugh, K. A. Oberg und T. B. Vermeyen (Hg.): Hydraulic Measurements and Experimental Methods. Hydraulic Measurements and Experimental Methods Specialty Conference (HMEM) 2002. Estes Park, Colorado, United States, July 28-August 1, 2002. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, S. 1–10.
- Abrahams, A. D.; Li, G.; Krishnan, C.; Atkinson, J. F. (1998): Predicting sediment transport by interrill overland flow on rough surfaces. In: *Earth Surf. Process. Landforms* 23 (12), S. 1087–1099. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199812)23:12<1087::AID-ESP934>3.0.CO;2-4.
- Aksoy, H.; Kavvas, M. L. (2005): A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. In: *CATENA* 64 (2-3), S. 247–271. DOI: 10.1016/j.catena.2005.08.008.
- Albertson, M. L.; Dai, Y. B.; Jensen, R. A.; Rouse, H. (1950): Diffusion of Submerged Jets. In: *T. Am. Soc. Civ. Eng.* 115 (1), S. 639–664. DOI: 10.1061/TACEAT.0006302.
- Ali, M.; Seeger, M.; Sterk, G.; Moore, D. (2013): A unit stream power based sediment transport function for overland flow. In: *CATENA* 101 (4), S. 197–204. DOI: 10.1016/j.catena.2012.09.006.
- Al-Madhhachi, A.-S. T.; Hanson, G. J.; Fox, G.; Tyagi, A. K.; Bulut, R. (2013): Measuring Soil Erodibility Using a Laboratory “Mini” JET. In: *Trans.ASABE* (56), S. 901–910. DOI: 10.13031/trans.56.9742.
- Al-Mukhtar, M.; Dunger, V.; Merkel, B. (2014): Runoff and sediment yield modeling by means of WEPP in the Bautzen dam catchment, Germany. In: *Environ Earth Sci* 72 (6), S. 2051–2063. DOI: 10.1007/s12665-014-3113-0.
- Amelung, W.; Blume, H.-P.; Fleige, H.; Horn, R.; Kandeler, E.; Kögel-Knabner, I. et al. (2018): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. 17. Aufl. 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum (Springer eBook Collection).
- Ansari, S. A.; Kothyari, U. C.; Raju, K. G. R. (2003): Influence of Cohesion on Scour under Submerged Circular Vertical Jets. In: *J. Hydraul. Eng.* 129 (12), S. 1014–1019. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:12(1014).
- Arnold, J. G.; Srinivasan, R.; Muttiah, R. S.; Williams, J. R. (1998): Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. In: *J Am Water Resources Assoc* 34 (1), S. 73–89. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.
- Ascough, J. C.; Deer-Ascough, L. A.; Weesies, G. A. (1998): CPIDS: a plant parameter selection program for erosion prediction modeling. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 20 (3), S. 263–276. DOI: 10.1016/S0168-1699(98)00020-9.
- ASTM Standard D5852-00 (2007): Standard Test Method for Erodibility Determination of Soil in the Field or in the Laboratory by the Jet Index Method.

-
- Atioda Agokeng, St. J. (2019): Analyse von Bodenproben aus dem Fischbachtal zur Bestimmung von bodenphysikalischen Kennwerten und Bodenerosionsparametern. Masterthesis. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Auerswald, K. (1998): Bodenerosion durch Wasser. In: G. Richter (Hg.): Bodenerosion – Analyse und Bilanz eines Umweltproblems: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, S. 33–42.
- Auerswald, K.; Albrecht, H.; Kainz, M.; Pfadenhauer, J. (2000): Principles of sustainable land-use systems developed and evaluated by the Munich Research Alliance on Agro-Ecosystems (FAM). In: *Petermanns geographische Mitteilungen* 144, S. 16–25.
- Auerswald, K.; Fiener, P.; Martin, W.; Elhaus, D. (2014): Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: An alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. In: *CATENA* 118, S. 220–225. DOI: 10.1016/j.catena.2014.01.008.
- Bach, M.; Froehlich, F.; Heusch, St.; Hübner, Ch.; Muschalla, D.; Reußner, F.; Ostrowski, M. (2009): BlueM – a free software package for integrated river basin management. In: *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* (26.09), S. 109–115.
- Baffaut, C.; Nearing, M. A.; Govers, G. (1998): Statistical Distributions of Soil Loss from Runoff Plots and WEPP Model Simulations. In: *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62 (3), S. 756–763. DOI: 10.2136/sssaj1998.03615995006200030031x.
- Bagarello, V.; Ferro, V. (2012): Testing the “physical model concept” by soil loss data measured in Sicily. In: *CATENA* 95 (4), S. 1–5. DOI: 10.1016/j.catena.2012.02.017.
- Bahlburg, H.; Breitzkreuz, Ch. (2008): Grundlagen der Geologie. Mit 51 Tabellen. 3. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.
- Basile, P. A.; Riccardi, G. A.; Zimmermann, E. D.; Stenta, H. R. (2010): Simulation of erosion-deposition processes at basin scale by a physically-based mathematical model. In: *International Journal of Sediment Research* 25 (2), S. 91–109. DOI: 10.1016/S1001-6279(10)60030-3.
- BGR (2014). Unter Mitarbeit von K. Kruse und U. Stegger. Hg. v. BGR. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Ressourcenbewertung/Bodenerosion/Wasser/Karte_Erosionsgefahr_node.html, zuletzt geprüft am 02.06.2023.
- BGR (2017): Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 200 000 (GÜK200): Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Blaisdell, F. W.; Hebaus, G. G.; Anderson, C. L. (1981): Ultimate Dimensions of Local Scour. In: *J. Hydr. Div.* 107 (3), S. 327–337. DOI: 10.1061/JYCEAJ.0005630.
- Boardman, J. (1986): The context of soil erosion. In: *SEESOIL* 3, S. 2–13.
- Boardman, J. (2006): Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. In: *CATENA* 68 (2-3), S. 73–86. DOI: 10.1016/j.catena.2006.03.007.
- Borchardt, St. (2016): Experimente zum Bewegungsbeginn in laminarer und turbulenter Strömung. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Online verfügbar unter <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/5702/>.

-
- Borm, S. (2017): Boden-Wasser-Wechselwirkungen an zwei Standorten im Fischbachtal (Odenwald). Masterthesis. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Brazier, R. E. (2013): Hillslope Soil Erosion Modeling. In: *Treatise on Geomorphology*, Bd. 293: Elsevier, S. 135–146.
- Brazier, R. E.; Beven, K. J.; Freer, J.; Rowan, J. S. (2000): Equifinality and uncertainty in physically based soil erosion models: application of the GLUE methodology to WEPP-the Water Erosion Prediction Project-for sites in the UK and USA. In: *Earth Surf. Process. Landforms* 25 (8), S. 825–845. DOI: 10.1002/1096-9837(200008)25:8<825::AID-ESP101>3.0.CO;2-3.
- Browning, G. M.; Parish, C. L.; Glass, J. (1947): A Method for Determining the Use and Limitations of Rotation and Conservation Practices in the Control of Soil Erosion in Iowa 1. In: *Agronomy Journal* 39 (1), S. 65–73. DOI: 10.2134/agronj1947.00021962003900010008x.
- Bryan, R. B. (2000): Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. In: *Geomorphology* 32 (3-4), S. 385–415. DOI: 10.1016/S0169-555X(99)00105-1.
- Centeri, C.; Barta, K.; Jakab, G.; Szalai, Z.; Bíró, Z. (2009): Comparison of EUROSEM, WEPP, and MEDRUSH model calculations with measured runoff and soil-loss data from rainfall simulations in Hungary. In: *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 172 (6), S. 789–797. DOI: 10.1002/jpln.200900009.
- Cerdà, A.; Brazier, R.; Nearing, M.; Vente, J. de (2013): Scales and erosion. In: *CATENA* 102 (12), S. 1–2. DOI: 10.1016/j.catena.2011.09.006.
- Cosby, B. J.; Hornberger, G. M.; Clapp, R. B.; Ginn, T. R. (1984): A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils. In: *Water Resour. Res.* 20 (6), S. 682–690. DOI: 10.1029/WR020i006p00682.
- Cossette, D.; Mazurek, K. A.; Colin, R. D. (2012): Critical shear stress from varied method of analysis of a submerged circular turbulent impinging jet test for determining erosion resistance of cohesive soils. In: *Proc. 6th Intl. Conf. on Scour and Erosion (ICSE6)*.
- Costabile, P.; Costanzo, C.; Macchione, F. (2012): Comparative analysis of overland flow models using finite volume schemes. In: *Journal of Hydroinformatics* 14 (1), S. 122–135. DOI: 10.2166/hydro.2011.077.
- Daly, E. R.; Fox, G. A.; Al-Madhhachi, A.-S. T.; Storm, D. E. (2015): Variability of fluvial erodibility parameters for streambanks on a watershed scale. In: *Geomorphology* 231 (3), S. 281–291. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.12.016.
- Daly, E. R.; Fox, G. A.; Miller, R. B.; Al-Madhhachi, A.-S. T. (2013): A Scour Depth Approach for Deriving Erodibility Parameters from Jet Erosion Tests. In: *Trans.ASABE*, S. 1343–1351. DOI: 10.13031/trans.56.10350.
- David, A. G. (2023): Modeling of Rain-Related Inundation Areas in Small Rural Catchments Using the Direct Rainfall Method. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Online verfügbar unter <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/24374/>.

DIN 18122-1:1997-07: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) - Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze.

DIN 18123:2011-04: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung.

DIN 18124:2019-02: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben- Bestimmung der Korndichte- Weithalspyknometer.

DIN 18125-2:2020-11: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben- Bestimmung der Dichte des Bodens- Teil 2: Feldversuche.

DIN 18128:2002-12: Baugrund- Untersuchung von Bodenproben- Bestimmung des Glühverlustes.

DIN 18129:2011-07: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben- Kalkgehaltsbestimmung.

DIN 4022-1:1987-09: Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und im Fels.

DIN EN 16179:2012-11: Schlamm, behandelter Bioabfall und Boden - Anleitung zur Probenvorbehandlung; Deutsche Fassung EN 16179:2012.

DIN EN ISO 14688-2:2018-05: Geotechnische Erkundung und Untersuchung- Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden- Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen (ISO 14688-2:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14688-2:2018.

DIN EN ISO 17892-1:2015-03: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 1: Bestimmung des Wassergehalts (ISO 17892-1:2014); Deutsche Fassung EN ISO 17892-1:2014.

Du Boys, M. P. (1879): Étude du régime du Rhône et de l'action exercée par les eaux sur un lit à fond de graviers indéfiniment affouillable. vol. 18 of 5. In: Annales des Ponts et Chaussées.

DWD CDC (2017): Tägliche Stationsbeobachtungen(Temperatur, Druck, Niederschlag, Sonnenscheindauer, etc.) für Deutschland. Version v005: DWD Climate Data Center.

DWD CDC (2022): Vieljährige Mittelwerte an Klimastationen, Vieljährige Mittelwerte an Niederschlagsstationen. 1991 - 2020: DWD Climate Data Center.

DWD CDC (2023a): Raster der Wiederkehrintervalle für Starkregen (Bemessungsniederschläge) in Deutschland (KOSTRA-DWD). Version 2010R (Bezugszeitraum 1951-2010): DWD Climate Data Center.

DWD CDC (2023b): Vieljährige mittlere Raster der Lufttemperatur (2m) für Deutschland 1981-2010. Version v1.0.: DWD Climate Data Center.

DWD CDC (2023c): Vieljähriges Mittel der Raster der Niederschlagshöhe für Deutschland 1981-2010. Version v1.0.: DWD Climate Data Center.

Einstein, H. A. (1950): The bed-load function for sediment transportation in open channel flows USDA. Online verfügbar unter <https://handle.nal.usda.gov/10113/43419>.

-
- Engelund, F.; Hansen, E. (1967): A monograph on sediment transport in alluvial streams. In:
- Evans, R.; Brazier, R. (2005): Evaluation of modelled spatially distributed predictions of soil erosion by water versus field-based assessments. In: *Environmental Science & Policy* 8 (5), S. 493–501. DOI: 10.1016/j.envsci.2005.04.009.
- Everaert, W. (1991): Empirical relations for the sediment transport capacity of interrill flow. In: *Earth Surf. Process. Landforms* 16 (6), S. 513–532. DOI: 10.1002/esp.3290160604.
- Fiener, P.; Auerswald, K. (2003): Effectiveness of grassed waterways in reducing runoff and sediment delivery from agricultural watersheds. In: *Journal of environmental quality* 32 (3), S. 927–936. DOI: 10.2134/jeq2003.9270.
- Fiener, P.; Auerswald, K. (2007): Rotation Effects of Potato, Maize, and Winter Wheat on Soil Erosion by Water. In: *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71 (6), S. 1919–1925. DOI: 10.2136/sssaj2006.0355.
- Fiener, P.; Govers, G.; van Oost, K. (2008): Evaluation of a dynamic multi-class sediment transport model in a catchment under soil-conservation agriculture. In: *Earth Surf. Process. Landforms* 33 (11), S. 1639–1660. DOI: 10.1002/esp.1634.
- Fiener, P.; Wilken, F.; Auerswald, K. (2019): Filling the gap between plot and landscape scale – eight years of soil erosion monitoring in 14 adjacent watersheds under soil conservation at Scheyern, Southern Germany. In: *Adv. Geosci.* 48, S. 31–48. DOI: 10.5194/adgeo-48-31-2019.
- Finkner, S. C.; Hearing, M. A.; Foster, G. R.; Gilley, J. E. (1989): A Simplified Equation for Modeling Sediment Transport Capacity. In: *Transactions of the ASAE* 32 (5), S. 1545–1550. DOI: 10.13031/2013.31187.
- Flanagan, D. (2004): Pedotransfer functions for soil erosion models. In: *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology*, Bd. 30: Elsevier (Developments in Soil Science), S. 177–193.
- Flanagan, D. C.; Livingston, St. J. (1995): WEPP user summary, USDA-water erosion prediction project. Hg. v. D. C. Flanagan. National soil erosion research Laboratory (NSERL report, 11).
- Flanagan, D. C.; Nearing, M. A. (1995): USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. In: *Nserl Rep* 10, S. 1–123.
- Foster, G. R. (1982): Modeling the Erosion Process. In: *Hydrologic Modeling of Small Watersheds* (ASAE Monograph, 5), S. 297–380.
- Foster, G. R.; Meyer, L. D. (1972): A Closed-Form Soil Erosion Equation for Upland Areas. In: H. W. Shen (Hg.): *Proceeding of Sedimentation Symposium to Honor Prof. H. A. Einstein*. Fort Collins (12), S. 1–19.
- Frielinghaus, M. (1996): Erosionsformen. In: H.-P. Blume und P. Felix-Henningsen (Hg.): *Handbuch der Bodenkunde*. Grundwerk. Landsberg/Lech: Ecomed-Verl.
- Ghaneezad, S. M.; Atkinson, J. F.; Bennett, S. J. (2015): Effect of flow confinement on the hydrodynamics of circular impinging jets: implications for erosion assessment. In: *Environ Fluid Mech* 15 (1), S. 1–25. DOI: 10.1007/s10652-014-9354-3.

-
- Gilley, J. E.; Kottwitz, E. R.; Simanton, J. R. (1990): Hydraulic characteristics of rills. In: *Transactions of the ASAE* 33 (6), S. 1900–1906. DOI: 10.13031/2013.31556.
- Govers, G. (1985): Selectivity and transport capacity of thin flows in relation to rill erosion. In: *CATENA* 12 (1), S. 35–49. DOI: 10.1016/S0341-8162(85)80003-5.
- Govers, G.; Everaert, W.; Poesen, J.; Rauws, G.; Ploey, J. de; Lautridou, J. P. (1990): A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion. In: *Earth Surf. Process. Landforms* 15 (4), S. 313–328. DOI: 10.1002/esp.3290150403.
- Green, W. H.; Ampt, G. A. (1911): Studies on Soil Physics. In: *The Journal of Agricultural Science* 4 (1), S. 1–24.
- Guo, Y.; Yu, X. (2023): Insight on bulk shear strength parameters of clay using discrete element approach incorporating physics-based interparticle force model. In: *Soils and Foundations* 63 (1), S. 101250. DOI: 10.1016/j.sandf.2022.101250.
- Haas, J.; Schack-Kirchner, H.; Lang, F. (2018): Adjustment of a weather generator to represent actual rain erosivity in the northern Black Forest – Germany. In: *CATENA* 163 (4–5), S. 42–53. DOI: 10.1016/j.catena.2017.12.006.
- Halbfaß, St.; Grunewald, K. (2008): Ermittlung räumlich verteilter SDR-Faktoren zur Modellierung von Sedimenteinträgen in Fließgewässer im mittleren Maßstab. In: *Wasserwirtschaft* 3, S. 31–35.
- Hannappel, A. (2017): Analyse und Kalibrierung eines JET Erosion Tests zur Bestimmung kritischer Bodenerosionsparameter. Bachelorthesis. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Hanson, G. J. (1990): Surface Erodibility of earthen channels at high stresses part II - Developing an In Situ testing device. In: *Transactions of the ASAE* 33 (1), S. 132–137. DOI: 10.13031/2013.31306.
- Hanson, G. J.; Cook, K. R. (1997): Development of excess shear stress parameters for circular jet testing. In: *ASAE Paper* 972227.
- Hanson, G. J.; Cook, K. R. (2004): Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility In Situ. In: *Applied Engineering in Agriculture* 20 (4). DOI: 10.13031/2013.16492.
- Hanson, G. J.; Hunt, S. L. (2007): Lessons Learned using Laboratory JET Method to Measure Soil Erodibility of Compacted Soils. In: *Applied Engineering in Agriculture* 23 (3), S. 305–312. DOI: 10.13031/2013.22686.
- Hanson, G. J.; Simon, A. (2001): Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the midwestern USA. In: *Hydrol. Process.* 15 (1), S. 23–38. DOI: 10.1002/hyp.149.
- Hillebrand, G. (2008): Transportverhalten kohäsiver Sedimente in turbulenten Strömungen - Untersuchungen im offenen Kreisgerinne.
- HLNUG (2017a): Bodenflächendaten 1:50000 Hessen (BFD50): Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG).

-
- HLNUG (2017b): Digitale Geologische Karte von Hessen 1:25000 (GK25): Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG).
- Hudson, N. (1981): Soil Conservation. 2. Aufl.: Cornell University Press.
- HVBG (2017a): Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS®): Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation (HVBG).
- HVBG (2017b): Digitales Geländemodell (ATKIS® DGM) - Auflösung 1 m: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation (HVBG).
- IUSS Working Group WRB (2022): World Reference Base for Soil Resources (WRB). 4th edition.
- Janicki, G.; Rodzik, J.; Zgłobicki, W. (2002): Geomorphic effects of land use changes (a case of the Gutanów loess catchment, Poland). In: *Geografický časopis = Geograficheskiĭ zhurnal = Geographical review* 54, S. 39–57.
- Jetten, V.; Roo, A. de; Favis-Mortlock, D. (1999): Evaluation of field-scale and catchment-scale soil erosion models. In: *CATENA* 37 (3-4), S. 521–541. DOI: 10.1016/S0341-8162(99)00037-5.
- Julien, P. Y.; Simons, D. B. (1985): Sediment transport capacity of overland flow. In: *Transactions of the ASAE* 28 (3), S. 755–762.
- Kaiser, T. (2018): Modell- und Methodenvergleich zur Ereignisbasierten Erosionsmodellierung. Bachelorthesis. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Karamigolbaghi, M.; Ghaneeizad, S. M.; Atkinson, J. F.; Bennett, S. J.; Wells, R. R. (2017): Critical assessment of jet erosion test methodologies for cohesive soil and sediment. In: *Geomorphology* 295, S. 529–536. DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.08.005.
- Khanal, A.; Fox, G. A. (2017): Detachment characteristics of root-permeated soils from laboratory jet erosion tests. In: *Ecological Engineering* 100 (3), S. 335–343. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.10.081.
- Khanal, A.; Fox, G. A.; Al-Madhhachi, A. T. (2016): Variability of Erodibility Parameters from Laboratory Mini Jet Erosion Tests. In: *J. Hydrol. Eng.* 21 (10), S. 4016030. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001404.
- Kinnell, P. I. A. (2017): A comparison of the abilities of the USLE-M, RUSLE2 and WEPP to model event erosion from bare fallow areas. In: *The Science of the total environment* 596-597, S. 32–42. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.046.
- Kinnell, P.I.A. (2010): Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review. In: *Journal of Hydrology* 385 (1-4), S. 384–397. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.01.024.
- Knisel, W. G. (1980): CREAMS: A Field-Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. In: *USDA Conservation Research Report* (26).
- KOM (2002): Mitteilung der Kommission an den Rat, das europäische Parlament, den Wirtschafts- und Sozialausschuss sowie den Ausschuss der Regionen. Hin zu einer

spezifischen Bodenschutzstrategie. Hg. v. Kommission der Europäischen Gemeinschaft. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2002:0179:FIN:DE:PDF>, zuletzt geprüft am 18.12.2022.

Krier, H. (1987): Zum Langzeit-Erosionsverhalten kohäsiver Fließgewässersohlen. Darmstadt: Inst. für Wasserbau, Konstruktiver Wasserbau u. Wasserwirtschaft (Wasserbau-Mitteilungen, 27).

Laflen, J. M.; Elliot, W. J.; Simanton, J. R.; Holzhey, C. S.; Kohl, K. D. (1991): WEPP: Soil erodibility experiments for rangeland and cropland soils. In: *Journal of Soil and Water Conservation* 46 (1), S. 39–44.

Laflen, J. M.; Flanagan, D. C. (2013): The development of U. S. soil erosion prediction and modeling. In: *International Soil and Water Conservation Research* 1 (2), S. 1–11. DOI: 10.1016/S2095-6339(15)30034-4.

Lighthill, M. J.; Whitham, G. B. (1955): On kinematic waves I. Flood movement in long rivers. In: *Proc. R. Soc. Lond. A* 229 (1178), S. 281–316. DOI: 10.1098/rspa.1955.0088.

Marot, D.; Regazzoni, P.-L.; Wahl, T. (2011): Energy-Based Method for Providing Soil Surface Erodibility Rankings. In: *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 137 (12), S. 1290–1293. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000538.

Mazurek, K. A.; Rajaratnam, N.; Sego, D. C. (2001): Scour of Cohesive Soil by Submerged Circular Turbulent Impinging Jets. In: *J. Hydraul. Eng.* 127 (7), S. 598–606. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:7(598).

Meier, St. (2010): Bodenerosionsmodellierung in verschiedenen Skalen : Modellvergleiche und Praxistauglichkeit am Beispiel von zwei Einzugsgebieten im Baselbieter Tafeljura (Kanton Basel-Landschaft/Schweiz).

Mein, R. G.; Larson, C. L. (1973): Modeling infiltration during a steady rain. In: *Water Resour. Res.* 9 (2), S. 384–394. DOI: 10.1029/WR009i002p00384.

Merritt, E. (1984): The identification of four stages during micro-rill development. In: *Earth Surf. Process. Landforms* 9 (5), S. 493–496. DOI: 10.1002/esp.3290090510.

Merritt, W. S.; Letcher, R. A.; Jakeman, A. J. (2003): A review of erosion and sediment transport models. In: *Environmental Modelling & Software* 18 (8-9), S. 761–799. DOI: 10.1016/S1364-8152(03)00078-1.

Meyer, L. D.; Wischmeier, Walter H. (1969): Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. In: *Transactions of the ASAE* 12 (6), S. 754–758.

Meyer-Peter, E.; Müller, R. (1948): Formulas for Bed Load Transport. In: *Proceedings of 2nd meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research*, S. 39–64.

Misra, R. K.; Rose, C. W. (1996): Application and sensitivity analysis of process-based erosion model GUEST. In: *European Journal of Soil Science* 47 (4), S. 593–604. DOI: 10.1111/J.1365-2389.1996.TB01858.X.

-
- Morgan, R. P. C. (2006): Soil erosion and conservation. 3. ed., [Nachdr.]. Malden, Mass.: Blackwell.
- Morgan, R. P. C.; Quinton, J. N.; Smith, R. E.; Govers, G.; Poesen, J. W. A.; Auerswald, K. et al. (1998): The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. In: *Earth Surf. Process. Landforms* 23 (6), S. 527–544. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199806)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5.
- Morgan, R.P.C (2001): A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan–Morgan–Finney model. In: *CATENA* 44 (4), S. 305–322. DOI: 10.1016/S0341-8162(00)00171-5.
- Mullan, D.; Favis-Mortlock, D.; Fealy, R. (2012): Addressing key limitations associated with modelling soil erosion under the impacts of future climate change. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 156 (2), S. 18–30. DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.12.004.
- Nearing, M. A. (1998): Why soil erosion models over-predict small soil losses and under-predict large soil losses. In: *CATENA* 32 (1), S. 15–22. DOI: 10.1016/S0341-8162(97)00052-0.
- Nearing, M. A. (2000): Evaluating soil erosion models using measured plot data: accounting for variability in the data. In: *Earth Surf. Process. Landforms* 25 (9), S. 1035–1043. DOI: 10.1002/1096-9837(200008)25:9<1035::AID-ESP121>3.0.CO;2-B.
- Nearing, M. A.; Norton, L. D.; Bulgakov, D. A.; Larionov, G. A.; West, L. T.; Dontsova, K. M. (1997): Hydraulics and erosion in eroding rills. In: *Water Resour. Res.* 33 (4), S. 865–876. DOI: 10.1029/97WR00013.
- Neitsch, S. L.; Arnold, J. G.; Kiniry, J. R.; Williams, J. R. (2011): SWAT: Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. USDA-ARS (TR-406). Online verfügbar unter <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>.
- Ngassam, P. (2018): Physikalische Charakterisierung von Böden im Fischbachtal (Odenwald). Masterthesis. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Nguyen, V.-N.; Courivaud, J.-R.; Pinettes, P.; Souli, H.; Fleureau, J.-M. (2017): Using an Improved Jet-Erosion Test to Study the Influence of Soil Parameters on the Erosion of a Silty Soil. In: *J. Hydraul. Eng.* 143 (8), S. 4017018. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001305.
- Nicks, A. D.; Lane, L. J.; Gander, G. A. (1995): Weather Generator. In: D. C. Flanagan und M. A. Nearing (Hg.): USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. West Lafayette, IN.
- Paaswell, R. E. (1973): Causes and mechanisms of cohesive soil erosion: the state of the art. In: *Highway Research Board Special Report* (135), S. 52–76.
- Pinettes, P.; Courivaud, J.-R.; Fry, J.-J.; Mercier, F.; Bonelli, St. (2011): First introduction of Greg Hanson's « JET Erosion Test » in Europe : return on experience after 2 years of testing. In: 31st USSD Annual Meeting and Conference, 21st Century Dam Design - Advances and Adaptations. San Diego, California.

-
- Ploey, J. de; Savat, J.; Moeyersons, J. (1976): The differential impact of some soil loss factors on flow, runoff creep and rainwash. In: *Earth Surf. Process.* 1 (2), S. 151–161. DOI: 10.1002/esp.3290010205.
- Poesen, J.; Nachtergaele, J.; Verstraeten, G.; Valentin, C. (2003): Gully erosion and environmental change: importance and research needs. In: *CATENA* 50 (2-4), S. 91–133. DOI: 10.1016/S0341-8162(02)00143-1.
- Potter, K. N.; Velázquez-García, J. D. J.; Torbert, H. (2002): Use of a submerged jet device to determine channel erodibility coefficients of selected soils of Mexico. In: *Journal of Soil and Water Conservation* 57, S. 272–277.
- Press, H.; Schröder, R. (1966): *Hydromechanik Im Wasserbau*, Von Heinrich Press und Ralph Schröder.
- Prosser, I. P.; Rustomji, P. (2000): Sediment transport capacity relations for overland flow. In: *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 24 (2), S. 179–193. DOI: 10.1177/030913330002400202.
- Raclot, D.; Albergel, J. (2006): Runoff and water erosion modelling using WEPP on a Mediterranean cultivated catchment. In: *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 31 (17), S. 1038–1047. DOI: 10.1016/j.pce.2006.07.002.
- Rajaratnam, N. (1976): *Turbulent jets*. Amsterdam: Elsevier Scientific Pub. Co (Developments in water science, 5).
- Rebscher, A.; Schmalz, B. (2018): How to generate input for small-scale modeling - Example of soil erosion. In: 17th Biennial Conference ERB2018 (Euromediterranean Network of Experimental and Representative Basins). Darmstadt. Online verfügbar unter <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/112913/>.
- Regazzoni, P.-L.; Hanson, G.; Wahl, T.; Marot, D.; Courivaud, J.-R.; Fry, J.-J. (2008): The Influence of some Engineering Parameters on the Erosion of Soils. In: H. Sekiguchi (Hg.): *Proceedings 4th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-4)*. November 5-7, 2008, Tokyo, Japan. Tokyo: The Japanese Geotechnical Society, S. 442. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/100157>.
- Renard, K. G.; Foster, G. R.; Weesies, G. A.; McCool, D. K.; Yoder, D. C. (1997): Predicting soil erosion by water : a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). In: *Agricultural Handbook* (703).
- Renard, K. G.; Foster, G. R.; Weesies, G. A.; Porter, P. A. (1991): RUSLE: Revised universal soil loss equation. In: *Journal of Soil and Water Conservation* 46 (1), S. 30–33.
- Renger, M.; Bohne, K.; Facklam, M.; Harrach, T.; Riek, W.; Schäfer, W. et al. (2008): *Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe "Kennwerte des Bodengefüges" zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte*.
- Renschler, Ch. S.; Harbor, J. (2002): Soil erosion assessment tools from point to regional scales—the role of geomorphologists in land management research and implementation. In: *Geomorphology* 47 (2-4), S. 189–209. DOI: 10.1016/S0169-555X(02)00082-X.

-
- Richter, G. (Hg.) (1998): Bodenerosion – Analyse und Bilanz eines Umweltproblems: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Roo, A. P. J. de; Wesseling, C. G.; Jetten, V. G.; Ritsema, C. (1996): LISEM: A physically-based hydrological and soil erosion model incorporated in a GIS. In: *In: K. Kovar & H.P. Nachtnebel (eds.), Application of geographic information systems in hydrology and water resources management. Wallingford (UK), IAHS, 1996. IAHS Publ. 235, pp. 395-403.*
- Ruiz-Rodriguez, E.; Guthörl, N. (2021): Hinweise zur Berechnung und Erstellung von Starkregengefahrenkarten. in Hessen. Unter Mitarbeit von Arbeitsgruppe "Starkregen und Sturzfluten" am Wasserbaulaboratorium. Hochschule RheinMain, Fachbereich Architektur und Bauingenieurwesen. Online verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/klimprax/starkregen/Ausschreibungshilfe_Starkregen-Gefahrenkarten_Juni-2021.pdf, zuletzt geprüft am 17.02.2023.
- Schäfer, J. (2018): Untersuchung geeigneter Probenahmetechniken zur Bestimmung kritischer Bodenerosionsparameter mit einem JET Erosion Test. Bachelorthesis. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Scherer, U.; Zehe, E.; Träbing, K.; Gerlinger, K. (2012): Prediction of soil detachment in agricultural loess catchments: Model development and parameterisation. In: *CATENA 90 (1)*, S. 63–75. DOI: 10.1016/j.catena.2011.11.003.
- Schindewolf, M.; Schmidt, W. (2010): EROSION 3D Sachsen. Flächendeckende Abbildung der Bodenerosion durch Wasser für Sachsen unter Anwendung des Modells Erosion 3D. Hg. v. Freistaat Sachsen, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft, Geologie.
- Schmalz, B.; Kruse, M. (2019): Impact of Land Use on Stream Water Quality in the German Low Mountain Range Basin Gersprenz. In: *LO 72*, S. 1–17. DOI: 10.3097/LO.201972.
- Schmidt, J. (1996): Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulationsmodells für die Erosion geneigter landwirtschaftlicher Nutzflächen. Unter Mitarbeit von FID GEO: Selbstverl. des Inst. für Geograph. Wiss., Berlin.
- Schröder, R. C. M. (1990): Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten. Unter Mitarbeit von Stefan Wallisch. Hamburg: Parey.
- Schröder, R. C. M.; Zanke, U. C. E. (2003): Technische Hydraulik. Kompendium für den Wasserbau. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering).
- Schuster, M. (1995): Transportkritische Schubspannungen bei verschiedenen Sohlenzuständen, insbesondere unter Einzelwellenbelastung bei stationärer Grundströmung. Darmstadt: Inst. für Wasserbau (Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik, 50).
- Schwertmann, U.; Vogl, W.; Kainz, M. (1987): Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage d. Abtrags u. Bewertung von Gegenmaßnahmen. Stuttgart: Ulmer.
- Schwob, A. (2016): Analyse der Abbildung von Bodenabtragsprozessen in einem physikalisch-basierten Erosionsmodell. Bachelorthesis. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.

Sekera, F.; Brunner, A. (1943): Beiträge zur Methodik der Greforschung. In: *Bodenk., Pflanzenernaehr.* 29 (1), S. 169–212. DOI: 10.1002/jpln.19430290117.

Sharpley, A. N.; Williams, J. R. (1990): EPIC Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. In: *USA Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1768*.

Shields, A. (1936): Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung: Eigenverl. der Preußischen Versuchsanst. für Wasserbau und Schiff (Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin). Online verfügbar unter <http://resolver.tudelft.nl/uuid:61a19716-a994-4942-9906-f680eb9952d6>.

Shugar, D.; Kostaschuk, R.; Ashmore, P.; Desloges, J.; Burge, L. (2007): In situ jet-testing of the erosional resistance of cohesive streambeds. In: *Can. J. Civ. Eng.* 34 (9), S. 1192–1195. DOI: 10.1139/107-024.

Simon, A.; Thomas, R.; Klimetz, L. (2010): Comparison and experiences with field techniques to measure critical shear stress and erodibility of cohesive deposits. In: U.S. Geological Survey (Hg.): Proc. 2nd Joint Federal Interagency Conf. on Sedimentation and Hydrologic Modeling. Reston, VA.

Sinowski, W.; Auerswald, K. (1999): Using relief parameters in a discriminant analysis to stratify geological areas with different spatial variability of soil properties. In: *Geoderma* 89 (1-2), S. 113–128. DOI: 10.1016/S0016-7061(98)00127-X.

Smith, R. E.; Goodrich, D.; Quinton, J. N. (1995): Dynamic, distributed simulation of watershed erosion: the KINEROS2 and EUROSEM models. In: *Journal of Soil and Water Conservation* (50(5)), S. 517–520.

Smith, R. E.; Parlange, J.-Y. (1978): A parameter-efficient hydrologic infiltration model. In: *Water Resour. Res.* 14 (3), S. 533–538. DOI: 10.1029/WR014i003p00533.

Sponagel, H. (Hg.) (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Mit 41 Abbildungen, 103 Tabellen und 31 Listen. Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. 5., verbesserte und erweiterte Auflage. Stuttgart, Hannover: In Kommission E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller); Bundesanst. für Geowiss. und Rohstoffe.

Stein, O. R.; Nett, D. D. (1997): Impinging JET calibration of excess shear sediment detachment parameters. In: *Transactions of the ASAE* 40 (6), S. 1573–1580. DOI: 10.13031/2013.21421.

Thoman, R. W.; Niezgoda, S. L. (2008): Determining Erodibility, Critical Shear Stress, and Allowable Discharge Estimates for Cohesive Channels: Case Study in the Powder River Basin of Wyoming. In: *J. Hydraul. Eng.* 134 (12), S. 1677–1687. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1677).

USACE (2023): HEC-RAS Documentation. USACE Hydrologic Engineering Center. Online verfügbar unter <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs>, zuletzt aktualisiert am 04.06.2023.

USDA (2022): Keys to Soil Taxonomy. 13th edition. Unter Mitarbeit von Soil Survey Staff. USDA Natural Resources Conservation Service.

USDA (2023): KINEROS2 A Kinematic Runoff and Erosion Model. United States. Agricultural Research Service. Online verfügbar unter <https://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/>, zuletzt geprüft am 12.08.2023.

Van Asch, Th. W. J. (1983): Water Erosion on Slopes in Some Land Units in a Mediterranean Area. In: *Catena Supplement* (4).

Van Looy, K.; Bouma, J.; Herbst, M.; Koestel, J.; Minasny, B.; Mishra, U. et al. (2017): Pedotransfer Functions in Earth System Science: Challenges and Perspectives. In: *Rev. Geophys.* 55 (4), S. 1199–1256. DOI: 10.1002/2017rg000581.

Wahl, T. L. (2010): A Comparison of the Hole Erosion Test and Jet Erosion Test. In: Joint Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling. Las Vegas.

Williams, J. R. (1995): The EPIC model, Chapter 25. In: V. P. Singh (Hg.): *Computer Models of Watershed Hydrology*. Highlands Ranch, CO.

Wirtz, St.; Seeger, M.; Remke, A.; Wengel, R.; Wagner, J.-F.; Ries, J. B. (2013): Do deterministic sediment detachment and transport equations adequately represent the process-interactions in eroding rills? An experimental field study. In: *CATENA* 101 (12), S. 61–78. DOI: 10.1016/j.catena.2012.10.003.

Wischmeier, W. H. (1976): Use and misuse of the universal soil loss equation. In: *Journal of Soil and Water Conservation* (31), S. 5–9.

Wischmeier, W. H.; Johnson, C. B.; Cross, B. V. (1971): A Soil Erodibility Nomograph for Farmland and Construction Sites. In: *Journal of Soil and Water Conservation* (26), S. 189–193.

Wischmeier, W. H.; Mannering, J. V. (1969): Relation of Soil Properties to its Erodibility. In: *Soil Sci. Soc. Am. J.* 33 (1), S. 131–137. DOI: 10.2136/sssaj1969.03615995003300010035x.

Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. (1965): Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: guide for selection of practices for soil and water conservation USDA, iii, 47 : charts, maps ; 26 cm. Online verfügbar unter <https://handle.nal.usda.gov/10113/CAT87208342>.

Wischmeier, W. H.; Smith, D. D.; United States; Science and Education Administration; Purdue University; Agricultural Experiment Station (1978): Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning USDA, 58 : ill., maps ; 26 cm. --. Online verfügbar unter <https://handle.nal.usda.gov/10113/CAT79706928>.

Woolhiser, D. A.; Smith, R. E.; Goodrich, D. C.; United States. Agricultural Research Service (1989): KINEROS: A Kinematic Runoff and Erosion Model : Documentation and User Manual: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service (1 disc with report)).

Yalin, M. S. (1963): An Expression for Bed-Load Transportation. In: *J. Hydr. Div.* 89 (3), S. 221–250. DOI: 10.1061/JYCEAJ.0000874.

Yao, C.; Lei, T.; Elliot, W. J.; McCool, D. K.; Zhao, J.; Chen, S. (2008): Critical Conditions for Rill Initiation. In: *Trans.ASABE* 51 (1), S. 107–114. DOI: 10.13031/2013.24231.

-
- Zachar, D. (1982): Soil erosion. Amsterdam: Elsevier (Developments in Soil Science, 10).
- Zanke, U. (1982): Grundlagen der Sedimentbewegung. Berlin, Heidelberg: Springer (Hochschultext).
- Zanke, U. (2003): On the influence of turbulence on the initiation of sediment motion. In: *International Journal of Sediment Research* 18.
- Zimbone, S. M.; Vickers, A.; Morgan, R. P. C.; Vella, P. (1996): Field investigations of different techniques for measuring surface soil shear strength. In: *Soil Technology* 9 (1-2), S. 101–111. DOI: 10.1016/0933-3630(96)00002-5.
- Zimmermann, E. (1992): Phänomenologische Untersuchung bei der Erosion einer kohäsiven Fließgewässersohle. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Zingg, A. W. (1940): Degree and length of land slope as it affects soil loss in run-off. In: *Agric. Engng.* 21, S. 59–64.



Verzeichnis der Anhänge

(Die Nummerierung der Anhänge bezieht sich auf die Nummerierung der zugehörigen Kapitel.)

Anhang 3-1: Aufbereitete Messdaten TEZG03 Scheyern

Anhang 3-2: Aufstellung der abgegrenzten Einzelevents TEZG03 Scheyern

Anhang 4-1: Konstruktionszeichnung des am ihwb im Rahmen dieser Dissertation entwickelten JETs

Anhang 5-1: Definierte Böden im Fischbach-Einzugsgebiet

Anhang 5-2: Standardisiertes Versuchsprotokoll

Anhang 5-3: Überblick über alle durchgeführten JET-Versuche

Anhang 5-4: Dokumentation der JET-Versuche

Anhang 5-5: Schlüssel zur Probenkodierung

Anhang 5-6: Fotodokumentation Starkregenereignis vom 23.04.2018



Anhang 3-1: Aufbereitete Messdaten TEZG 03 Scheyern

Für die Datenquellen des Original-Messdatensatzes siehe Fiener et al. (2019);
zur Aufbereitung der Messdaten siehe Kapitel 3.2.1

Inhalte Tabelle

| Spalte | Inhalt | Einheit |
|---------------|-------------------|-------------------|
| Datum | Datum | - |
| Precip | Niederschlagshöhe | mm |
| Disch | Abflussvolumen | m ³ /d |
| Sed | Sedimentmasse | kg |
| Bedeck | Bedeckungsgrad | % |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|-----|--------|------------|--------|-------|-------|--------|
| 01.01.1994 | 6,6 | 1,9 | 0,0 | 73,4 | 16.03.1994 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 43,3 |
| 02.01.1994 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | 73,0 | 17.03.1994 | 8,4 | 0,0 | 0,0 | 42,8 |
| 03.01.1994 | 5,2 | 7,8 | 0,0 | 72,6 | 18.03.1994 | 0,2 | 0,3 | 0,0 | 42,4 |
| 04.01.1994 | 3,8 | 13,3 | 0,0 | 72,2 | 19.03.1994 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 42,0 |
| 05.01.1994 | 0,6 | 59,4 | 2,0 | 71,8 | 20.03.1994 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 41,6 |
| 06.01.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 71,4 | 21.03.1994 | 18,0 | 1,3 | 0,0 | 41,2 |
| 07.01.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 71,0 | 22.03.1994 | 0,6 | 1,9 | 0,0 | 40,8 |
| 08.01.1994 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 70,6 | 23.03.1994 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 40,4 |
| 09.01.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 70,2 | 24.03.1994 | 0,6 | 2,1 | 0,0 | 40,0 |
| 10.01.1994 | 0,0 | 31,1 | 1,0 | 69,8 | 25.03.1994 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 39,6 |
| 11.01.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69,4 | 26.03.1994 | 21,6 | 0,0 | 0,0 | 39,2 |
| 12.01.1994 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 69,0 | 27.03.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,7 |
| 13.01.1994 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 68,6 | 28.03.1994 | 1,2 | 4,8 | 1,7 | 38,3 |
| 14.01.1994 | 10,4 | 1,3 | 0,0 | 68,2 | 29.03.1994 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 37,9 |
| 15.01.1994 | 6,0 | 3,9 | 0,0 | 67,8 | 30.03.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,5 |
| 16.01.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 67,3 | 31.03.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 37,1 |
| 17.01.1994 | 0,0 | 5,1 | 0,0 | 66,9 | 01.04.1994 | 4,8 | 0,0 | 0,0 | 37,5 |
| 18.01.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 66,5 | 02.04.1994 | 0,8 | 2,2 | 0,0 | 37,9 |
| 19.01.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 66,1 | 03.04.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 38,3 |
| 20.01.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,7 | 04.04.1994 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 38,7 |
| 21.01.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,3 | 05.04.1994 | 0,0 | 2,4 | 0,0 | 39,1 |
| 22.01.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,9 | 06.04.1994 | 0,0 | 2,4 | 0,0 | 39,5 |
| 23.01.1994 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 64,5 | 07.04.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 39,9 |
| 24.01.1994 | 4,2 | 0,0 | 0,0 | 64,1 | 08.04.1994 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 40,3 |
| 25.01.1994 | 5,6 | 0,5 | 0,0 | 63,7 | 09.04.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 40,7 |
| 26.01.1994 | 11,8 | 0,6 | 0,0 | 63,3 | 10.04.1994 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 41,1 |
| 27.01.1994 | 0,0 | 5,1 | 0,0 | 62,9 | 11.04.1994 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 41,5 |
| 28.01.1994 | 4,4 | 0,0 | 0,0 | 62,5 | 12.04.1994 | 23,8 | 0,0 | 0,0 | 41,8 |
| 29.01.1994 | 0,0 | 2,2 | 0,0 | 62,1 | 13.04.1994 | 34,4 | 192,5 | 130,2 | 42,2 |
| 30.01.1994 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 61,6 | 14.04.1994 | 0,6 | 800,0 | 541,0 | 42,6 |
| 31.01.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 61,2 | 15.04.1994 | 0,0 | 117,9 | 12,7 | 43,0 |
| 01.02.1994 | 0,0 | 2,4 | 0,0 | 60,8 | 16.04.1994 | 0,0 | 28,2 | 3,0 | 43,4 |
| 02.02.1994 | 12,4 | 0,0 | 0,0 | 60,4 | 17.04.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 43,8 |
| 03.02.1994 | 0,0 | 1,3 | 0,0 | 60,0 | 18.04.1994 | 1,6 | 36,3 | 2,2 | 44,2 |
| 04.02.1994 | 0,0 | 1,4 | 0,0 | 59,6 | 19.04.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,6 |
| 05.02.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,2 | 20.04.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 42,6 |
| 06.02.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,8 | 21.04.1994 | 0,2 | 0,5 | 0,0 | 40,6 |
| 07.02.1994 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 58,4 | 22.04.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,6 |
| 08.02.1994 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 58,0 | 23.04.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,5 |
| 09.02.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,6 | 24.04.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 34,5 |
| 10.02.1994 | 2,4 | 0,3 | 0,0 | 57,2 | 25.04.1994 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 32,5 |
| 11.02.1994 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 56,8 | 26.04.1994 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 30,5 |
| 12.02.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 56,3 | 27.04.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 28,4 |
| 13.02.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,9 | 28.04.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 26,4 |
| 14.02.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,5 | 29.04.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 24,4 |
| 15.02.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,1 | 30.04.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 22,4 |
| 16.02.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,7 | 01.05.1994 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 20,4 |
| 17.02.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,3 | 02.05.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 18,3 |
| 18.02.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,9 | 03.05.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 16,3 |
| 19.02.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,5 | 04.05.1994 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 14,3 |
| 20.02.1994 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 53,1 | 05.05.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 12,3 |
| 21.02.1994 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 52,7 | 06.05.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,2 |
| 22.02.1994 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 52,3 | 07.05.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 8,2 |
| 23.02.1994 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 51,9 | 08.05.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,2 |
| 24.02.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 51,4 | 09.05.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 4,2 |
| 25.02.1994 | 7,6 | 0,0 | 0,0 | 51,0 | 10.05.1994 | 8,8 | 0,0 | 0,0 | 4,7 |
| 26.02.1994 | 0,0 | 1,3 | 0,0 | 50,6 | 11.05.1994 | 0,0 | 0,3 | 0,0 | 5,2 |
| 27.02.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,2 | 12.05.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 5,7 |
| 28.02.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,8 | 13.05.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,3 |
| 01.03.1994 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 49,4 | 14.05.1994 | 4,6 | 0,0 | 0,0 | 6,8 |
| 02.03.1994 | 4,6 | 0,0 | 0,0 | 49,0 | 15.05.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 7,3 |
| 03.03.1994 | 6,4 | 0,0 | 0,0 | 48,6 | 16.05.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 7,8 |
| 04.03.1994 | 2,4 | 1,3 | 0,0 | 48,2 | 17.05.1994 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 8,3 |
| 05.03.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,8 | 18.05.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 8,3 |
| 06.03.1994 | 4,2 | 0,0 | 0,0 | 47,3 | 19.05.1994 | 11,8 | 0,0 | 0,0 | 8,3 |
| 07.03.1994 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 46,9 | 20.05.1994 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 8,3 |
| 08.03.1994 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 46,5 | 21.05.1994 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 8,3 |
| 09.03.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,1 | 22.05.1994 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 8,2 |
| 10.03.1994 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 45,7 | 23.05.1994 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 8,2 |
| 11.03.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,3 | 24.05.1994 | 6,4 | 0,0 | 0,0 | 8,2 |
| 12.03.1994 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 44,9 | 25.05.1994 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 8,2 |
| 13.03.1994 | 7,2 | 0,0 | 0,0 | 44,5 | 26.05.1994 | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 8,2 |
| 14.03.1994 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 44,1 | 27.05.1994 | 7,4 | 0,0 | 0,0 | 7,8 |
| 15.03.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 43,7 | 28.05.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 7,5 |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|-----|--------|------------|--------|-------|-----|--------|
| 29.05.1994 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 7,2 | 11.08.1994 | 1,2 | 1,8 | 0,0 | 81,5 |
| 30.05.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,9 | 12.08.1994 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 82,1 |
| 31.05.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,5 | 13.08.1994 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 82,6 |
| 01.06.1994 | 0,0 | 0,8 | 0,0 | 6,2 | 14.08.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,1 |
| 02.06.1994 | 6,2 | 0,0 | 0,0 | 9,5 | 15.08.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,7 |
| 03.06.1994 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 12,7 | 16.08.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 84,2 |
| 04.06.1994 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 16,0 | 17.08.1994 | 7,6 | 0,0 | 0,0 | 84,7 |
| 05.06.1994 | 10,6 | 0,0 | 0,0 | 19,2 | 18.08.1994 | 2,6 | 0,1 | 0,0 | 85,2 |
| 06.06.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 22,5 | 19.08.1994 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 84,7 |
| 07.06.1994 | 0,4 | 0,2 | 0,0 | 25,8 | 20.08.1994 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 84,2 |
| 08.06.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 29,0 | 21.08.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,7 |
| 09.06.1994 | 5,8 | 0,0 | 0,0 | 29,7 | 22.08.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,2 |
| 10.06.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 30,4 | 23.08.1994 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 82,7 |
| 11.06.1994 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 31,1 | 24.08.1994 | 4,6 | 0,0 | 0,0 | 82,3 |
| 12.06.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 31,8 | 25.08.1994 | 11,2 | 0,0 | 0,0 | 81,8 |
| 13.06.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 32,4 | 26.08.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 81,3 |
| 14.06.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 33,1 | 27.08.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 80,8 |
| 15.06.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 33,8 | 28.08.1994 | 4,2 | 0,0 | 0,0 | 80,3 |
| 16.06.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,2 | 29.08.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 79,8 |
| 17.06.1994 | 6,2 | 0,0 | 0,0 | 38,7 | 30.08.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 77,9 |
| 18.06.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 41,1 | 31.08.1994 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 76,0 |
| 19.06.1994 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 43,5 | 01.09.1994 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 74,1 |
| 20.06.1994 | 9,8 | 0,0 | 0,0 | 46,0 | 02.09.1994 | 14,0 | 0,0 | 0,0 | 72,2 |
| 21.06.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,4 | 03.09.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 70,3 |
| 22.06.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,8 | 04.09.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,4 |
| 23.06.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,3 | 05.09.1994 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 66,5 |
| 24.06.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,9 | 06.09.1994 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 64,7 |
| 25.06.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,4 | 07.09.1994 | 11,0 | 0,0 | 0,0 | 62,8 |
| 26.06.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,9 | 08.09.1994 | 8,8 | 0,0 | 0,0 | 60,9 |
| 27.06.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,4 | 09.09.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,0 |
| 28.06.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,0 | 10.09.1994 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 57,1 |
| 29.06.1994 | 29,8 | 0,0 | 0,0 | 61,5 | 11.09.1994 | 11,2 | 0,0 | 0,0 | 55,2 |
| 30.06.1994 | 0,0 | 5,9 | 5,9 | 63,0 | 12.09.1994 | 4,4 | 0,5 | 0,0 | 53,3 |
| 01.07.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,6 | 13.09.1994 | 8,2 | 0,0 | 0,0 | 51,4 |
| 02.07.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 66,1 | 14.09.1994 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 49,5 |
| 03.07.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 67,6 | 15.09.1994 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 47,7 |
| 04.07.1994 | 9,6 | 0,0 | 0,0 | 69,1 | 16.09.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,8 |
| 05.07.1994 | 15,8 | 0,8 | 0,0 | 70,6 | 17.09.1994 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 43,9 |
| 06.07.1994 | 8,2 | 0,0 | 0,0 | 72,1 | 18.09.1994 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 42,0 |
| 07.07.1994 | 11,4 | 0,8 | 0,0 | 73,6 | 19.09.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 40,1 |
| 08.07.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 75,0 | 20.09.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,2 |
| 09.07.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 76,5 | 21.09.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,3 |
| 10.07.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 78,0 | 22.09.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 34,4 |
| 11.07.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 79,5 | 23.09.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 32,6 |
| 12.07.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 80,9 | 24.09.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 30,7 |
| 13.07.1994 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 82,4 | 25.09.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 28,8 |
| 14.07.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,3 | 26.09.1994 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 26,9 |
| 15.07.1994 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 84,1 | 27.09.1994 | 6,2 | 0,0 | 0,0 | 25,0 |
| 16.07.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 85,0 | 28.09.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 23,7 |
| 17.07.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 85,8 | 29.09.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 22,3 |
| 18.07.1994 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 86,7 | 30.09.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 21,0 |
| 19.07.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 87,5 | 01.10.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 19,6 |
| 20.07.1994 | 17,4 | 0,0 | 0,0 | 88,4 | 02.10.1994 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 18,3 |
| 21.07.1994 | 0,0 | 1,1 | 0,0 | 89,2 | 03.10.1994 | 6,4 | 0,0 | 0,0 | 17,0 |
| 22.07.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,1 | 04.10.1994 | 0,0 | 0,8 | 0,0 | 15,6 |
| 23.07.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,9 | 05.10.1994 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 14,3 |
| 24.07.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 91,8 | 06.10.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 12,9 |
| 25.07.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 92,6 | 07.10.1994 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 11,6 |
| 26.07.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 93,5 | 08.10.1994 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 10,3 |
| 27.07.1994 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 92,7 | 09.10.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 8,9 |
| 28.07.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 91,8 | 10.10.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 7,6 |
| 29.07.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 91,0 | 11.10.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,2 |
| 30.07.1994 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 90,2 | 12.10.1994 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 4,9 |
| 31.07.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 89,3 | 13.10.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 3,6 |
| 01.08.1994 | 19,4 | 0,0 | 0,0 | 88,5 | 14.10.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,2 |
| 02.08.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 87,7 | 15.10.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,2 |
| 03.08.1994 | 0,0 | 1,3 | 0,0 | 86,8 | 16.10.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 2,2 |
| 04.08.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 86,0 | 17.10.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,2 |
| 05.08.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 85,2 | 18.10.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,2 |
| 06.08.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 84,3 | 19.10.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,2 |
| 07.08.1994 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 83,5 | 20.10.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,3 |
| 08.08.1994 | 6,4 | 0,0 | 0,0 | 82,7 | 21.10.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 2,3 |
| 09.08.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 81,8 | 22.10.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,3 |
| 10.08.1994 | 19,6 | 0,0 | 0,0 | 81,0 | 23.10.1994 | 7,6 | 0,0 | 0,0 | 2,3 |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|-----|--------|------------|--------|-------|------|--------|
| 24.10.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,3 | 06.01.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 14,9 |
| 25.10.1994 | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 2,3 | 07.01.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 15,0 |
| 26.10.1994 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 2,3 | 08.01.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 15,1 |
| 27.10.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 2,3 | 09.01.1995 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 15,2 |
| 28.10.1994 | 4,6 | 0,0 | 0,0 | 2,3 | 10.01.1995 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 15,3 |
| 29.10.1994 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 2,3 | 11.01.1995 | 7,2 | 0,0 | 0,0 | 15,3 |
| 30.10.1994 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 2,3 | 12.01.1995 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 15,4 |
| 31.10.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,4 | 13.01.1995 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 15,5 |
| 01.11.1994 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 2,4 | 14.01.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 15,6 |
| 02.11.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 2,4 | 15.01.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 15,7 |
| 03.11.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,3 | 16.01.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 15,8 |
| 04.11.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,3 | 17.01.1995 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 15,9 |
| 05.11.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,6 | 18.01.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 16,0 |
| 06.11.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,8 | 19.01.1995 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 16,1 |
| 07.11.1994 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 3,1 | 20.01.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 16,2 |
| 08.11.1994 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 3,4 | 21.01.1995 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 16,2 |
| 09.11.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 3,6 | 22.01.1995 | 4,8 | 0,0 | 0,0 | 16,3 |
| 10.11.1994 | 14,2 | 0,0 | 0,0 | 3,9 | 23.01.1995 | 7,2 | 12,8 | 1,9 | 16,4 |
| 11.11.1994 | 9,8 | 0,0 | 0,0 | 4,2 | 24.01.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 16,5 |
| 12.11.1994 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 4,5 | 25.01.1995 | 10,4 | 81,4 | 28,7 | 16,6 |
| 13.11.1994 | 1,2 | 1,9 | 0,0 | 4,7 | 26.01.1995 | 1,8 | 73,0 | 18,7 | 16,7 |
| 14.11.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 5,0 | 27.01.1995 | 3,6 | 17,5 | 4,8 | 18,2 |
| 15.11.1994 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 5,3 | 28.01.1995 | 7,8 | 0,0 | 0,0 | 19,8 |
| 16.11.1994 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 5,6 | 29.01.1995 | 1,4 | 128,7 | 41,1 | 21,3 |
| 17.11.1994 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 6,0 | 30.01.1995 | 6,4 | 0,0 | 0,0 | 22,9 |
| 18.11.1994 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 6,4 | 31.01.1995 | 0,0 | 87,4 | 24,3 | 24,4 |
| 19.11.1994 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 6,8 | 01.02.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 25,9 |
| 20.11.1994 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 7,2 | 02.02.1995 | 0,6 | 10,0 | 2,3 | 27,5 |
| 21.11.1994 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 7,5 | 03.02.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 29,0 |
| 22.11.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 7,9 | 04.02.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 30,6 |
| 23.11.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 8,3 | 05.02.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 32,1 |
| 24.11.1994 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 8,6 | 06.02.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 33,6 |
| 25.11.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 8,9 | 07.02.1995 | 0,0 | 0,5 | 0,0 | 35,2 |
| 26.11.1994 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 9,1 | 08.02.1995 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 36,7 |
| 27.11.1994 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 9,4 | 09.02.1995 | 8,4 | 0,0 | 0,0 | 38,3 |
| 28.11.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 9,7 | 10.02.1995 | 0,0 | 0,7 | 0,0 | 39,8 |
| 29.11.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,0 | 11.02.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 41,3 |
| 30.11.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,3 | 12.02.1995 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 42,9 |
| 01.12.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,5 | 13.02.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,4 |
| 02.12.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,8 | 14.02.1995 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 45,9 |
| 03.12.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 11,1 | 15.02.1995 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 47,5 |
| 04.12.1994 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 11,4 | 16.02.1995 | 7,2 | 0,0 | 0,0 | 49,0 |
| 05.12.1994 | 15,0 | 0,0 | 0,0 | 11,6 | 17.02.1995 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 50,6 |
| 06.12.1994 | 2,0 | 1,4 | 0,0 | 11,9 | 18.02.1995 | 7,2 | 0,0 | 0,0 | 52,1 |
| 07.12.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 12,2 | 19.02.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 53,6 |
| 08.12.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 12,3 | 20.02.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,2 |
| 09.12.1994 | 8,4 | 0,0 | 0,0 | 12,4 | 21.02.1995 | 0,0 | 0,8 | 0,0 | 56,7 |
| 10.12.1994 | 7,8 | 0,0 | 0,0 | 12,5 | 22.02.1995 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 58,3 |
| 11.12.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 12,6 | 23.02.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 59,8 |
| 12.12.1994 | 0,0 | 1,6 | 0,0 | 12,6 | 24.02.1995 | 6,0 | 0,0 | 0,0 | 61,3 |
| 13.12.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 12,7 | 25.02.1995 | 10,6 | 0,0 | 0,0 | 62,9 |
| 14.12.1994 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 12,8 | 26.02.1995 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 64,4 |
| 15.12.1994 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 12,9 | 27.02.1995 | 0,8 | 1,9 | 0,0 | 66,0 |
| 16.12.1994 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 13,0 | 28.02.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 67,5 |
| 17.12.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 13,1 | 01.03.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,1 |
| 18.12.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 13,2 | 02.03.1995 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 38,4 |
| 19.12.1994 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 13,3 | 03.03.1995 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 38,8 |
| 20.12.1994 | 13,2 | 0,0 | 0,0 | 13,4 | 04.03.1995 | 11,8 | 0,0 | 0,0 | 39,1 |
| 21.12.1994 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 13,5 | 05.03.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 39,5 |
| 22.12.1994 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 13,5 | 06.03.1995 | 2,8 | 0,6 | 0,0 | 39,8 |
| 23.12.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 13,6 | 07.03.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 40,1 |
| 24.12.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 13,7 | 08.03.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 40,5 |
| 25.12.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 13,8 | 09.03.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 40,8 |
| 26.12.1994 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 13,9 | 10.03.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 41,2 |
| 27.12.1994 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 14,0 | 11.03.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 41,5 |
| 28.12.1994 | 5,4 | 0,0 | 0,0 | 14,1 | 12.03.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 41,9 |
| 29.12.1994 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 14,2 | 13.03.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 42,2 |
| 30.12.1994 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 14,3 | 14.03.1995 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 42,6 |
| 31.12.1994 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 14,4 | 15.03.1995 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 42,9 |
| 01.01.1995 | 4,2 | 0,0 | 0,0 | 14,4 | 16.03.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 43,3 |
| 02.01.1995 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 14,5 | 17.03.1995 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 43,6 |
| 03.01.1995 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 14,6 | 18.03.1995 | 12,4 | 0,0 | 0,0 | 44,0 |
| 04.01.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 14,7 | 19.03.1995 | 16,6 | 0,0 | 0,0 | 44,3 |
| 05.01.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 14,8 | 20.03.1995 | 4,8 | 0,0 | 0,0 | 44,7 |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|-----|--------|------------|--------|-------|------|--------|
| 21.03.1995 | 1,8 | 42,6 | 7,5 | 45,0 | 03.06.1995 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 73,4 |
| 22.03.1995 | 0,0 | 1,8 | 0,4 | 45,4 | 04.06.1995 | 0,8 | 55,9 | 15,4 | 71,7 |
| 23.03.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,7 | 05.06.1995 | 9,4 | 0,0 | 0,0 | 70,0 |
| 24.03.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,1 | 06.06.1995 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 68,3 |
| 25.03.1995 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 47,7 | 07.06.1995 | 0,6 | 16,7 | 3,6 | 66,5 |
| 26.03.1995 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 49,3 | 08.06.1995 | 5,6 | 0,9 | 0,2 | 64,8 |
| 27.03.1995 | 7,8 | 0,0 | 0,0 | 51,0 | 09.06.1995 | 13,4 | 0,0 | 0,0 | 63,1 |
| 28.03.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 52,6 | 10.06.1995 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 61,3 |
| 29.03.1995 | 8,4 | 0,0 | 0,0 | 54,2 | 11.06.1995 | 6,0 | 0,0 | 0,0 | 59,6 |
| 30.03.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,9 | 12.06.1995 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 57,8 |
| 31.03.1995 | 1,4 | 1,9 | 0,3 | 57,5 | 13.06.1995 | 0,0 | 121,8 | 18,9 | 56,1 |
| 01.04.1995 | 8,8 | 0,0 | 0,0 | 59,1 | 14.06.1995 | 16,2 | 0,0 | 0,0 | 60,1 |
| 02.04.1995 | 1,0 | 52,3 | 9,9 | 60,8 | 15.06.1995 | 1,8 | 179,1 | 18,5 | 64,1 |
| 03.04.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,4 | 16.06.1995 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 68,1 |
| 04.04.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,0 | 17.06.1995 | 0,6 | 0,3 | 0,1 | 72,0 |
| 05.04.1995 | 0,0 | 15,9 | 3,9 | 65,7 | 18.06.1995 | 7,6 | 0,0 | 0,0 | 76,0 |
| 06.04.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 67,3 | 19.06.1995 | 1,0 | 20,8 | 0,0 | 80,0 |
| 07.04.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 66,8 | 20.06.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 80,4 |
| 08.04.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 66,2 | 21.06.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 80,7 |
| 09.04.1995 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 65,7 | 22.06.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 81,0 |
| 10.04.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,1 | 23.06.1995 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 81,4 |
| 11.04.1995 | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 64,6 | 24.06.1995 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 81,7 |
| 12.04.1995 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 64,0 | 25.06.1995 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 82,0 |
| 13.04.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 63,5 | 26.06.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,4 |
| 14.04.1995 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | 63,0 | 27.06.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,7 |
| 15.04.1995 | 16,4 | 0,0 | 0,0 | 62,4 | 28.06.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,0 |
| 16.04.1995 | 0,4 | 8,9 | 2,3 | 61,9 | 29.06.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,4 |
| 17.04.1995 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 61,3 | 30.06.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,7 |
| 18.04.1995 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 60,8 | 01.07.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 84,0 |
| 19.04.1995 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 60,2 | 02.07.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 84,4 |
| 20.04.1995 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 60,2 | 03.07.1995 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 84,7 |
| 21.04.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,2 | 04.07.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 85,0 |
| 22.04.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,1 | 05.07.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 85,3 |
| 23.04.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,1 | 06.07.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 85,7 |
| 24.04.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,1 | 07.07.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 86,0 |
| 25.04.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,0 | 08.07.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 86,3 |
| 26.04.1995 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 60,0 | 09.07.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 86,6 |
| 27.04.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,0 | 10.07.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 87,0 |
| 28.04.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,9 | 11.07.1995 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 86,0 |
| 29.04.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,9 | 12.07.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 85,0 |
| 30.04.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 59,9 | 13.07.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 84,0 |
| 01.05.1995 | 11,6 | 0,0 | 0,0 | 59,8 | 14.07.1995 | 12,0 | 0,0 | 0,0 | 83,0 |
| 02.05.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,8 | 15.07.1995 | 6,0 | 0,0 | 0,0 | 82,0 |
| 03.05.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,5 | 16.07.1995 | 12,8 | 0,0 | 0,0 | 81,0 |
| 04.05.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,1 | 17.07.1995 | 0,2 | 0,5 | 0,0 | 80,0 |
| 05.05.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,8 | 18.07.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 79,0 |
| 06.05.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,5 | 19.07.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 78,0 |
| 07.05.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 63,1 | 20.07.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 77,0 |
| 08.05.1995 | 7,6 | 0,0 | 0,0 | 63,8 | 21.07.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,0 |
| 09.05.1995 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 64,5 | 22.07.1995 | 4,8 | 0,0 | 0,0 | 75,0 |
| 10.05.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,1 | 23.07.1995 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 74,0 |
| 11.05.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,8 | 24.07.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 73,0 |
| 12.05.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 66,4 | 25.07.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 71,9 |
| 13.05.1995 | 48,0 | 3,3 | 0,5 | 67,1 | 26.07.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 70,8 |
| 14.05.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 67,8 | 27.07.1995 | 25,4 | 0,0 | 0,0 | 69,6 |
| 15.05.1995 | 0,0 | 12,2 | 1,8 | 68,4 | 28.07.1995 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 68,5 |
| 16.05.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 69,1 | 29.07.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 67,4 |
| 17.05.1995 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 69,9 | 30.07.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 66,3 |
| 18.05.1995 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 70,7 | 31.07.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,2 |
| 19.05.1995 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 71,5 | 01.08.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,1 |
| 20.05.1995 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 72,3 | 02.08.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,9 |
| 21.05.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 73,1 | 03.08.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,8 |
| 22.05.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 73,9 | 04.08.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,7 |
| 23.05.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 74,7 | 05.08.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,6 |
| 24.05.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,5 | 06.08.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,5 |
| 25.05.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,3 | 07.08.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,3 |
| 26.05.1995 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 77,1 | 08.08.1995 | 11,0 | 0,0 | 0,0 | 56,2 |
| 27.05.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 78,0 | 09.08.1995 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 55,1 |
| 28.05.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 78,8 | 10.08.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 54,0 |
| 29.05.1995 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 79,6 | 11.08.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 52,9 |
| 30.05.1995 | 10,6 | 0,5 | 0,0 | 80,4 | 12.08.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,8 |
| 31.05.1995 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 78,6 | 13.08.1995 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 50,6 |
| 01.06.1995 | 20,8 | 0,0 | 0,0 | 76,9 | 14.08.1995 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 49,5 |
| 02.06.1995 | 26,2 | 57,5 | 8,9 | 75,2 | 15.08.1995 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 48,4 |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|-----|--------|------------|--------|-------|-----|--------|
| 16.08.1995 | 9,4 | 0,0 | 0,0 | 47,3 | 29.10.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 84,0 |
| 17.08.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,2 | 30.10.1995 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 83,5 |
| 18.08.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,0 | 31.10.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,0 |
| 19.08.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 43,9 | 01.11.1995 | 12,2 | 0,0 | 0,0 | 82,4 |
| 20.08.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 42,8 | 02.11.1995 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 81,9 |
| 21.08.1995 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 41,7 | 03.11.1995 | 8,0 | 0,0 | 0,0 | 81,4 |
| 22.08.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 40,6 | 04.11.1995 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 80,8 |
| 23.08.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 41,4 | 05.11.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 80,3 |
| 24.08.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 42,2 | 06.11.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 79,8 |
| 25.08.1995 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 43,0 | 07.11.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 79,2 |
| 26.08.1995 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 43,8 | 08.11.1995 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 78,7 |
| 27.08.1995 | 10,2 | 0,0 | 0,0 | 44,6 | 09.11.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 78,2 |
| 28.08.1995 | 23,6 | 2,0 | 1,1 | 45,4 | 10.11.1995 | 0,0 | 0,4 | 0,0 | 77,7 |
| 29.08.1995 | 10,2 | 0,0 | 0,0 | 46,2 | 11.11.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 77,1 |
| 30.08.1995 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 47,0 | 12.11.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,6 |
| 31.08.1995 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 47,8 | 13.11.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,1 |
| 01.09.1995 | 23,4 | 0,0 | 0,0 | 48,6 | 14.11.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,5 |
| 02.09.1995 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 49,4 | 15.11.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,0 |
| 03.09.1995 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 50,2 | 16.11.1995 | 23,8 | 0,0 | 0,0 | 75,1 |
| 04.09.1995 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 51,0 | 17.11.1995 | 5,4 | 0,0 | 0,0 | 75,2 |
| 05.09.1995 | 0,0 | 1,0 | 0,0 | 51,8 | 18.11.1995 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 75,3 |
| 06.09.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,6 | 19.11.1995 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 75,3 |
| 07.09.1995 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 53,4 | 20.11.1995 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 75,4 |
| 08.09.1995 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 54,3 | 21.11.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,5 |
| 09.09.1995 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 55,1 | 22.11.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,6 |
| 10.09.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,9 | 23.11.1995 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 75,7 |
| 11.09.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,7 | 24.11.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,8 |
| 12.09.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,9 | 25.11.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,9 |
| 13.09.1995 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 61,1 | 26.11.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,0 |
| 14.09.1995 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 63,4 | 27.11.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,0 |
| 15.09.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 65,6 | 28.11.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 76,1 |
| 16.09.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 67,9 | 29.11.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,2 |
| 17.09.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 70,1 | 30.11.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,3 |
| 18.09.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 72,3 | 01.12.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,1 |
| 19.09.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 74,6 | 02.12.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 75,8 |
| 20.09.1995 | 11,4 | 0,0 | 0,0 | 76,8 | 03.12.1995 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 75,6 |
| 21.09.1995 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 79,1 | 04.12.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 75,4 |
| 22.09.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 81,3 | 05.12.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,1 |
| 23.09.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 83,5 | 06.12.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 74,9 |
| 24.09.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 85,8 | 07.12.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 74,7 |
| 25.09.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 88,0 | 08.12.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 74,5 |
| 26.09.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,3 | 09.12.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 74,2 |
| 27.09.1995 | 6,0 | 0,0 | 0,0 | 92,5 | 10.12.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 74,0 |
| 28.09.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 91,6 | 11.12.1995 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 73,8 |
| 29.09.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,8 | 12.12.1995 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 73,5 |
| 30.09.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 89,9 | 13.12.1995 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 73,3 |
| 01.10.1995 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 89,1 | 14.12.1995 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 73,1 |
| 02.10.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 88,2 | 15.12.1995 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 72,8 |
| 03.10.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 87,4 | 16.12.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 72,6 |
| 04.10.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 86,5 | 17.12.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 72,4 |
| 05.10.1995 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 85,7 | 18.12.1995 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | 72,1 |
| 06.10.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 84,8 | 19.12.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 71,9 |
| 07.10.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 84,0 | 20.12.1995 | 9,4 | 0,0 | 0,0 | 71,7 |
| 08.10.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,1 | 21.12.1995 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 71,5 |
| 09.10.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 82,3 | 22.12.1995 | 2,4 | 1,6 | 0,0 | 71,2 |
| 10.10.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 81,4 | 23.12.1995 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 71,0 |
| 11.10.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 81,6 | 24.12.1995 | 11,4 | 0,1 | 0,0 | 70,8 |
| 12.10.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 81,8 | 25.12.1995 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 70,5 |
| 13.10.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 82,0 | 26.12.1995 | 2,8 | 0,7 | 0,0 | 70,3 |
| 14.10.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,3 | 27.12.1995 | 1,6 | 0,7 | 0,0 | 70,1 |
| 15.10.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,5 | 28.12.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69,8 |
| 16.10.1995 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 82,7 | 29.12.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69,6 |
| 17.10.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,9 | 30.12.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69,4 |
| 18.10.1995 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 83,1 | 31.12.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69,1 |
| 19.10.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 83,3 | 01.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,9 |
| 20.10.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,6 | 02.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,7 |
| 21.10.1995 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 83,8 | 03.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,5 |
| 22.10.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 84,0 | 04.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,2 |
| 23.10.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 84,2 | 05.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,0 |
| 24.10.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 84,4 | 06.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 67,8 |
| 25.10.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 84,7 | 07.01.1996 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 67,5 |
| 26.10.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 84,9 | 08.01.1996 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 67,3 |
| 27.10.1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 85,1 | 09.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 67,1 |
| 28.10.1995 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 84,6 | 10.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 66,9 |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|-----|--------|------------|--------|-------|-----|--------|
| 11.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 66,6 | 25.03.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,8 |
| 12.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 66,4 | 26.03.1996 | 7,0 | 0,0 | 0,0 | 49,5 |
| 13.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 66,2 | 27.03.1996 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 49,3 |
| 14.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,9 | 28.03.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,1 |
| 15.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,7 | 29.03.1996 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 48,9 |
| 16.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,5 | 30.03.1996 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 48,6 |
| 17.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,2 | 31.03.1996 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 48,4 |
| 18.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,0 | 01.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,2 |
| 19.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,8 | 02.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,0 |
| 20.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,6 | 03.04.1996 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 47,7 |
| 21.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,3 | 04.04.1996 | 9,0 | 0,0 | 0,0 | 47,5 |
| 22.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,1 | 05.04.1996 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 47,3 |
| 23.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 63,9 | 06.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,1 |
| 24.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 63,6 | 07.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,8 |
| 25.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 63,4 | 08.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,6 |
| 26.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 63,2 | 09.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,4 |
| 27.01.1996 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 63,0 | 10.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,2 |
| 28.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,7 | 11.04.1996 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 45,9 |
| 29.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,5 | 12.04.1996 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 45,7 |
| 30.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,3 | 13.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,5 |
| 31.01.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,0 | 14.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,3 |
| 01.02.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,8 | 15.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,0 |
| 02.02.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,6 | 16.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,8 |
| 03.02.1996 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 61,4 | 17.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,6 |
| 04.02.1996 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 61,1 | 18.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,4 |
| 05.02.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,9 | 19.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,1 |
| 06.02.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,7 | 20.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 43,9 |
| 07.02.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,4 | 21.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 43,7 |
| 08.02.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,2 | 22.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 43,5 |
| 09.02.1996 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 60,0 | 23.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 43,2 |
| 10.02.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,8 | 24.04.1996 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 42,7 |
| 11.02.1996 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 59,5 | 25.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 42,1 |
| 12.02.1996 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 59,3 | 26.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 41,6 |
| 13.02.1996 | 6,0 | 0,0 | 0,0 | 59,1 | 27.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 41,0 |
| 14.02.1996 | 8,4 | 0,0 | 0,0 | 58,8 | 28.04.1996 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 40,4 |
| 15.02.1996 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 58,6 | 29.04.1996 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 39,9 |
| 16.02.1996 | 7,6 | 0,0 | 0,0 | 58,4 | 30.04.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 39,3 |
| 17.02.1996 | 10,8 | 0,0 | 0,0 | 58,2 | 01.05.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,8 |
| 18.02.1996 | 12,4 | 0,8 | 0,0 | 57,9 | 02.05.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,2 |
| 19.02.1996 | 0,8 | 15,3 | 1,0 | 57,7 | 03.05.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,7 |
| 20.02.1996 | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 57,5 | 04.05.1996 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 37,1 |
| 21.02.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,3 | 05.05.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,5 |
| 22.02.1996 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 57,0 | 06.05.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,0 |
| 23.02.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,8 | 07.05.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 35,4 |
| 24.02.1996 | 0,0 | 3,6 | 0,0 | 56,6 | 08.05.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 34,9 |
| 25.02.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,3 | 09.05.1996 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 34,3 |
| 26.02.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,1 | 10.05.1996 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 33,8 |
| 27.02.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,9 | 11.05.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 33,9 |
| 28.02.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,7 | 12.05.1996 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 34,1 |
| 29.02.1996 | 0,0 | 0,6 | 0,0 | 55,4 | 13.05.1996 | 27,2 | 0,0 | 0,0 | 34,3 |
| 01.03.1996 | 0,4 | 2,2 | 0,0 | 55,2 | 14.05.1996 | 14,2 | 1,6 | 0,0 | 34,5 |
| 02.03.1996 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 55,0 | 15.05.1996 | 0,0 | 2,6 | 0,0 | 34,7 |
| 03.03.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,8 | 16.05.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 34,9 |
| 04.03.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,5 | 17.05.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 35,1 |
| 05.03.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,3 | 18.05.1996 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 35,3 |
| 06.03.1996 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 54,1 | 19.05.1996 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 35,5 |
| 07.03.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,8 | 20.05.1996 | 10,8 | 0,0 | 0,0 | 35,7 |
| 08.03.1996 | 0,0 | 1,0 | 0,0 | 53,6 | 21.05.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 35,9 |
| 09.03.1996 | 0,0 | 1,3 | 0,0 | 53,4 | 22.05.1996 | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 36,0 |
| 10.03.1996 | 0,0 | 1,3 | 0,0 | 53,2 | 23.05.1996 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 36,2 |
| 11.03.1996 | 1,0 | 1,3 | 0,0 | 52,9 | 24.05.1996 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 36,4 |
| 12.03.1996 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 52,7 | 25.05.1996 | 9,0 | 0,0 | 0,0 | 36,6 |
| 13.03.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,5 | 26.05.1996 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 36,8 |
| 14.03.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,3 | 27.05.1996 | 10,2 | 0,0 | 0,0 | 37,0 |
| 15.03.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,0 | 28.05.1996 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 37,2 |
| 16.03.1996 | 0,0 | 1,0 | 0,0 | 51,8 | 29.05.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,4 |
| 17.03.1996 | 0,0 | 1,4 | 0,0 | 51,6 | 30.05.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,6 |
| 18.03.1996 | 0,0 | 1,4 | 0,0 | 51,4 | 31.05.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,8 |
| 19.03.1996 | 0,0 | 1,4 | 0,0 | 51,1 | 01.06.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,9 |
| 20.03.1996 | 0,0 | 1,4 | 0,0 | 50,9 | 02.06.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,1 |
| 21.03.1996 | 0,8 | 1,4 | 0,0 | 50,7 | 03.06.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,3 |
| 22.03.1996 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 50,5 | 04.06.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,5 |
| 23.03.1996 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 50,2 | 05.06.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,7 |
| 24.03.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,0 | 06.06.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,9 |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|-------|--------|------------|--------|-------|-----|--------|
| 07.06.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 39,1 | 20.08.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 88,4 |
| 08.06.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 39,3 | 21.08.1996 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 88,4 |
| 09.06.1996 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 39,5 | 22.08.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 88,5 |
| 10.06.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 39,7 | 23.08.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 88,6 |
| 11.06.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 39,4 | 24.08.1996 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 88,6 |
| 12.06.1996 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 39,2 | 25.08.1996 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 88,7 |
| 13.06.1996 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 39,0 | 26.08.1996 | 27,6 | 0,0 | 0,0 | 88,8 |
| 14.06.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,8 | 27.08.1996 | 1,0 | 1,8 | 1,7 | 88,9 |
| 15.06.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,6 | 28.08.1996 | 29,4 | 14,2 | 2,6 | 88,9 |
| 16.06.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,4 | 29.08.1996 | 0,0 | 13,3 | 2,4 | 89,0 |
| 17.06.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,1 | 30.08.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 89,1 |
| 18.06.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,9 | 31.08.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 89,1 |
| 19.06.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,7 | 01.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 89,2 |
| 20.06.1996 | 6,2 | 0,0 | 0,0 | 37,5 | 02.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 89,3 |
| 21.06.1996 | 12,4 | 0,0 | 0,0 | 37,3 | 03.09.1996 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 89,3 |
| 22.06.1996 | 12,0 | 0,0 | 0,0 | 37,0 | 04.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 89,4 |
| 23.06.1996 | 4,8 | 0,0 | 0,0 | 36,8 | 05.09.1996 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 89,5 |
| 24.06.1996 | 0,4 | 0,6 | 0,0 | 36,6 | 06.09.1996 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 89,5 |
| 25.06.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,4 | 07.09.1996 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 89,6 |
| 26.06.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,2 | 08.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 89,7 |
| 27.06.1996 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 35,9 | 09.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 89,7 |
| 28.06.1996 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 35,7 | 10.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 89,8 |
| 29.06.1996 | 5,4 | 0,0 | 0,0 | 35,5 | 11.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 89,9 |
| 30.06.1996 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 35,3 | 12.09.1996 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 89,9 |
| 01.07.1996 | 9,4 | 0,0 | 0,0 | 35,1 | 13.09.1996 | 11,4 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 02.07.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 34,9 | 14.09.1996 | 19,4 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 03.07.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 34,6 | 15.09.1996 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 04.07.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 34,4 | 16.09.1996 | 0,0 | 1,3 | 1,3 | 90,0 |
| 05.07.1996 | 18,8 | 0,0 | 0,0 | 36,0 | 17.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 06.07.1996 | 7,2 | 0,0 | 0,0 | 37,5 | 18.09.1996 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 07.07.1996 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 39,1 | 19.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 08.07.1996 | 44,4 | 0,0 | 0,0 | 40,7 | 20.09.1996 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 09.07.1996 | 5,0 | 31,0 | 12,6 | 42,2 | 21.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 10.07.1996 | 22,6 | 180,4 | 73,5 | 43,8 | 22.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 11.07.1996 | 1,0 | 375,5 | 161,8 | 45,3 | 23.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 12.07.1996 | 1,4 | 26,8 | 10,7 | 46,9 | 24.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 13.07.1996 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 48,5 | 25.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 14.07.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,0 | 26.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 15.07.1996 | 0,0 | 43,0 | 17,5 | 51,6 | 27.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 16.07.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,2 | 28.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 17.07.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,7 | 29.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 18.07.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,3 | 30.09.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 19.07.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,8 | 01.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 20.07.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,4 | 02.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 21.07.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,0 | 03.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 22.07.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,5 | 04.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 23.07.1996 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 64,1 | 05.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 24.07.1996 | 6,4 | 0,0 | 0,0 | 65,6 | 06.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 25.07.1996 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 67,2 | 07.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 26.07.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,8 | 08.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 27.07.1996 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 70,3 | 09.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 28.07.1996 | 15,2 | 0,0 | 0,0 | 71,9 | 10.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 29.07.1996 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 73,4 | 11.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 30.07.1996 | 11,8 | 0,0 | 0,0 | 75,0 | 12.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 31.07.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,6 | 13.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 01.08.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 78,1 | 14.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 02.08.1996 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 79,7 | 15.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 03.08.1996 | 11,4 | 0,0 | 0,0 | 81,3 | 16.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 04.08.1996 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 82,8 | 17.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 05.08.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 84,4 | 18.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 06.08.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 85,9 | 19.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 07.08.1996 | 10,2 | 0,0 | 0,0 | 87,5 | 20.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 08.08.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 87,6 | 21.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 09.08.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 87,6 | 22.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 10.08.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 87,7 | 23.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 11.08.1996 | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 87,8 | 24.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 12.08.1996 | 29,2 | 1,3 | 0,3 | 87,8 | 25.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 13.08.1996 | 0,8 | 2,1 | 0,5 | 87,9 | 26.10.1996 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 14.08.1996 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 88,0 | 27.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 15.08.1996 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 88,0 | 28.10.1996 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 16.08.1996 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 88,1 | 29.10.1996 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 17.08.1996 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 88,2 | 30.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 18.08.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 88,2 | 31.10.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |
| 19.08.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 88,3 | 01.11.1996 | 4,4 | 0,0 | 0,0 | 90,0 |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|------|--------|------------|--------|-------|------|--------|
| 02.11.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 | 15.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,2 |
| 03.11.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 | 16.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,3 |
| 04.11.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 | 17.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,3 |
| 05.11.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 | 18.01.1997 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 48,4 |
| 06.11.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 | 19.01.1997 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 48,5 |
| 07.11.1996 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | 90,0 | 20.01.1997 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 48,6 |
| 08.11.1996 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 | 21.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,7 |
| 09.11.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 | 22.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,8 |
| 10.11.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 | 23.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,9 |
| 11.11.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 90,0 | 24.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,9 |
| 12.11.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 21,5 | 25.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,0 |
| 13.11.1996 | 6,4 | 0,0 | 0,0 | 21,3 | 26.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,1 |
| 14.11.1996 | 23,6 | 0,0 | 0,0 | 21,2 | 27.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,2 |
| 15.11.1996 | 0,6 | 2,2 | 0,4 | 21,0 | 28.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,3 |
| 16.11.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 20,9 | 29.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,4 |
| 17.11.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 20,7 | 30.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,5 |
| 18.11.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 20,6 | 31.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,5 |
| 19.11.1996 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 20,4 | 01.02.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,6 |
| 20.11.1996 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 20,3 | 02.02.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,7 |
| 21.11.1996 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 20,1 | 03.02.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,8 |
| 22.11.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 19,9 | 04.02.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,9 |
| 23.11.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 19,8 | 05.02.1997 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 50,0 |
| 24.11.1996 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 19,6 | 06.02.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,1 |
| 25.11.1996 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 19,5 | 07.02.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,1 |
| 26.11.1996 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 19,3 | 08.02.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,2 |
| 27.11.1996 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 19,2 | 09.02.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,3 |
| 28.11.1996 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 19,0 | 10.02.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,4 |
| 29.11.1996 | 9,4 | 0,0 | 0,0 | 18,9 | 11.02.1997 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 50,5 |
| 30.11.1996 | 5,4 | 0,0 | 0,0 | 18,7 | 12.02.1997 | 9,0 | 0,4 | 0,0 | 50,6 |
| 01.12.1996 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 18,6 | 13.02.1997 | 3,8 | 0,5 | 0,0 | 50,7 |
| 02.12.1996 | 5,2 | 2,8 | 0,7 | 18,4 | 14.02.1997 | 10,0 | 0,0 | 0,0 | 50,7 |
| 03.12.1996 | 0,0 | 44,3 | 11,2 | 18,3 | 15.02.1997 | 5,8 | 0,0 | 0,0 | 50,8 |
| 04.12.1996 | 0,0 | 48,6 | 12,3 | 18,1 | 16.02.1997 | 0,2 | 116,6 | 29,5 | 50,9 |
| 05.12.1996 | 0,0 | 74,8 | 19,0 | 18,0 | 17.02.1997 | 0,0 | 132,4 | 33,5 | 51,0 |
| 06.12.1996 | 0,0 | 74,8 | 19,0 | 17,8 | 18.02.1997 | 5,2 | 2,6 | 0,7 | 51,1 |
| 07.12.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 17,7 | 19.02.1997 | 1,0 | 9,3 | 2,5 | 51,2 |
| 08.12.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 17,5 | 20.02.1997 | 0,0 | 22,9 | 6,1 | 51,3 |
| 09.12.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 17,4 | 21.02.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,4 |
| 10.12.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 17,2 | 22.02.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,5 |
| 11.12.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 17,1 | 23.02.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,6 |
| 12.12.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 16,9 | 24.02.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,7 |
| 13.12.1996 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 16,7 | 25.02.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,8 |
| 14.12.1996 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 16,6 | 26.02.1997 | 8,6 | 0,0 | 0,0 | 51,9 |
| 15.12.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 16,4 | 27.02.1997 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 52,0 |
| 16.12.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 16,3 | 28.02.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,1 |
| 17.12.1996 | 4,4 | 0,0 | 0,0 | 16,1 | 01.03.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,2 |
| 18.12.1996 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 16,0 | 02.03.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,3 |
| 19.12.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 15,8 | 03.03.1997 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 52,4 |
| 20.12.1996 | 9,0 | 0,7 | 0,0 | 15,7 | 04.03.1997 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 52,5 |
| 21.12.1996 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 15,5 | 05.03.1997 | 9,8 | 0,0 | 0,0 | 52,5 |
| 22.12.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 15,4 | 06.03.1997 | 3,6 | 0,5 | 0,0 | 52,6 |
| 23.12.1996 | 1,2 | 7,2 | 0,0 | 15,2 | 07.03.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,7 |
| 24.12.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 15,1 | 08.03.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,8 |
| 25.12.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 14,9 | 09.03.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,9 |
| 26.12.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 14,8 | 10.03.1997 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 53,0 |
| 27.12.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 14,6 | 11.03.1997 | 0,0 | 0,5 | 0,0 | 53,1 |
| 28.12.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 14,5 | 12.03.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,2 |
| 29.12.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 14,3 | 13.03.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,3 |
| 30.12.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 14,2 | 14.03.1997 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 53,4 |
| 31.12.1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 14,0 | 15.03.1997 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 53,5 |
| 01.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 16,3 | 16.03.1997 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 53,8 |
| 02.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 18,6 | 17.03.1997 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 54,1 |
| 03.01.1997 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 20,8 | 18.03.1997 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 54,4 |
| 04.01.1997 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 23,1 | 19.03.1997 | 4,8 | 0,0 | 0,0 | 54,7 |
| 05.01.1997 | 4,6 | 0,0 | 0,0 | 25,4 | 20.03.1997 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 55,0 |
| 06.01.1997 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 27,7 | 21.03.1997 | 4,2 | 0,0 | 0,0 | 55,2 |
| 07.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 29,9 | 22.03.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,5 |
| 08.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 32,2 | 23.03.1997 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 55,8 |
| 09.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 34,5 | 24.03.1997 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 56,1 |
| 10.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,8 | 25.03.1997 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 56,4 |
| 11.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 39,1 | 26.03.1997 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 56,7 |
| 12.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 41,3 | 27.03.1997 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 57,0 |
| 13.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 43,6 | 28.03.1997 | 8,4 | 0,0 | 0,0 | 57,3 |
| 14.01.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,9 | 29.03.1997 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 57,6 |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|-----|--------|------------|--------|-------|-----|--------|
| 30.03.1997 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 57,9 | 12.06.1997 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 58,3 |
| 31.03.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,1 | 13.06.1997 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 58,9 |
| 01.04.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,4 | 14.06.1997 | 11,4 | 0,0 | 0,0 | 59,4 |
| 02.04.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,7 | 15.06.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,9 |
| 03.04.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,0 | 16.06.1997 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 60,1 |
| 04.04.1997 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 59,3 | 17.06.1997 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 60,4 |
| 05.04.1997 | 6,0 | 0,0 | 0,0 | 59,6 | 18.06.1997 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 60,6 |
| 06.04.1997 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 59,9 | 19.06.1997 | 12,0 | 0,0 | 0,0 | 60,8 |
| 07.04.1997 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 60,2 | 20.06.1997 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 61,0 |
| 08.04.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,5 | 21.06.1997 | 10,8 | 0,0 | 0,0 | 61,2 |
| 09.04.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,8 | 22.06.1997 | 9,0 | 0,0 | 0,0 | 61,5 |
| 10.04.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,0 | 23.06.1997 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 61,7 |
| 11.04.1997 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 61,3 | 24.06.1997 | 5,8 | 0,0 | 0,0 | 61,9 |
| 12.04.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,6 | 25.06.1997 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 62,1 |
| 13.04.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,9 | 26.06.1997 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 62,3 |
| 14.04.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,2 | 27.06.1997 | 9,4 | 0,0 | 0,0 | 62,5 |
| 15.04.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,5 | 28.06.1997 | 6,2 | 0,0 | 0,0 | 62,8 |
| 16.04.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,9 | 29.06.1997 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 63,0 |
| 17.04.1997 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 61,2 | 30.06.1997 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 63,2 |
| 18.04.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,6 | 01.07.1997 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 63,4 |
| 19.04.1997 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 60,0 | 02.07.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 63,6 |
| 20.04.1997 | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 59,3 | 03.07.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 63,9 |
| 21.04.1997 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 58,7 | 04.07.1997 | 7,0 | 0,0 | 0,0 | 64,1 |
| 22.04.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,1 | 05.07.1997 | 9,2 | 0,0 | 0,0 | 64,3 |
| 23.04.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,4 | 06.07.1997 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 64,5 |
| 24.04.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,8 | 07.07.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,7 |
| 25.04.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,2 | 08.07.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,0 |
| 26.04.1997 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 55,5 | 09.07.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,2 |
| 27.04.1997 | 7,4 | 0,0 | 0,0 | 54,9 | 10.07.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,4 |
| 28.04.1997 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 54,3 | 11.07.1997 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 65,6 |
| 29.04.1997 | 7,2 | 0,0 | 0,0 | 53,6 | 12.07.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,8 |
| 30.04.1997 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 53,0 | 13.07.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 66,1 |
| 01.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,4 | 14.07.1997 | 6,2 | 0,0 | 0,0 | 66,3 |
| 02.05.1997 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 51,7 | 15.07.1997 | 9,8 | 0,0 | 0,0 | 66,5 |
| 03.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,1 | 16.07.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 67,1 |
| 04.05.1997 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 50,5 | 17.07.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 67,6 |
| 05.05.1997 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 49,8 | 18.07.1997 | 25,0 | 0,3 | 0,3 | 68,2 |
| 06.05.1997 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 49,2 | 19.07.1997 | 53,4 | 7,7 | 1,6 | 68,8 |
| 07.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,6 | 20.07.1997 | 5,0 | 17,3 | 3,7 | 69,4 |
| 08.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,9 | 21.07.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69,9 |
| 09.05.1997 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 47,3 | 22.07.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 70,5 |
| 10.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,7 | 23.07.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 71,1 |
| 11.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,0 | 24.07.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 71,7 |
| 12.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,4 | 25.07.1997 | 13,0 | 0,1 | 0,0 | 72,2 |
| 13.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,8 | 26.07.1997 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 72,8 |
| 14.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,1 | 27.07.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 73,4 |
| 15.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 43,5 | 28.07.1997 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 73,9 |
| 16.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,0 | 29.07.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 74,5 |
| 17.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,6 | 30.07.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,1 |
| 18.05.1997 | 8,8 | 0,0 | 0,0 | 45,1 | 31.07.1997 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 75,7 |
| 19.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,6 | 01.08.1997 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 76,2 |
| 20.05.1997 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 46,1 | 02.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,8 |
| 21.05.1997 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 46,7 | 03.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 77,4 |
| 22.05.1997 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 47,2 | 04.08.1997 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 78,0 |
| 23.05.1997 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 47,7 | 05.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 78,5 |
| 24.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,3 | 06.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 79,1 |
| 25.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,8 | 07.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 79,7 |
| 26.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,3 | 08.08.1997 | 7,2 | 0,0 | 0,0 | 80,2 |
| 27.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,9 | 09.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 80,8 |
| 28.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,4 | 10.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 81,4 |
| 29.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,9 | 11.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,0 |
| 30.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,4 | 12.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,5 |
| 31.05.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,0 | 13.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,1 |
| 01.06.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,5 | 14.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,7 |
| 02.06.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,0 | 15.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 84,3 |
| 03.06.1997 | 5,4 | 0,0 | 0,0 | 53,6 | 16.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,8 |
| 04.06.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,1 | 17.08.1997 | 9,4 | 0,0 | 0,0 | 83,3 |
| 05.06.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,6 | 18.08.1997 | 8,0 | 0,0 | 0,0 | 82,8 |
| 06.06.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,2 | 19.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,3 |
| 07.06.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,7 | 20.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 81,8 |
| 08.06.1997 | 11,6 | 0,0 | 0,0 | 56,2 | 21.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 81,3 |
| 09.06.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,7 | 22.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 80,8 |
| 10.06.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,3 | 23.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 80,3 |
| 11.06.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,8 | 24.08.1997 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 79,8 |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|-----|--------|------------|--------|-------|-----|--------|
| 25.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 79,3 | 07.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,2 |
| 26.08.1997 | 18,0 | 0,0 | 0,0 | 78,8 | 08.11.1997 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 48,4 |
| 27.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 78,3 | 09.11.1997 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 48,5 |
| 28.08.1997 | 9,0 | 0,2 | 0,0 | 77,9 | 10.11.1997 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 48,7 |
| 29.08.1997 | 7,0 | 0,0 | 0,0 | 77,4 | 11.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,9 |
| 30.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,9 | 12.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,0 |
| 31.08.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,4 | 13.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,2 |
| 01.09.1997 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 75,9 | 14.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,3 |
| 02.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,4 | 15.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,5 |
| 03.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 74,9 | 16.11.1997 | 8,8 | 0,0 | 0,0 | 49,4 |
| 04.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 74,4 | 17.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,2 |
| 05.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 73,9 | 18.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,1 |
| 06.09.1997 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 73,4 | 19.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,0 |
| 07.09.1997 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 72,9 | 20.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,8 |
| 08.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 72,4 | 21.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,7 |
| 09.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 72,0 | 22.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,6 |
| 10.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 71,5 | 23.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,4 |
| 11.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 71,0 | 24.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,3 |
| 12.09.1997 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 70,5 | 25.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,2 |
| 13.09.1997 | 8,0 | 0,0 | 0,0 | 70,0 | 26.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,0 |
| 14.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69,5 | 27.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,9 |
| 15.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69,0 | 28.11.1997 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 47,8 |
| 16.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,2 | 29.11.1997 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 47,6 |
| 17.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 67,4 | 30.11.1997 | 4,2 | 0,0 | 0,0 | 47,5 |
| 18.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 66,5 | 01.12.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,4 |
| 19.09.1997 | 7,0 | 0,0 | 0,0 | 65,7 | 02.12.1997 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 47,2 |
| 20.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,9 | 03.12.1997 | 5,8 | 0,0 | 0,0 | 47,1 |
| 21.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,1 | 04.12.1997 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | 47,0 |
| 22.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 63,3 | 05.12.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,8 |
| 23.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,5 | 06.12.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,7 |
| 24.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,6 | 07.12.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,6 |
| 25.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,8 | 08.12.1997 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 46,4 |
| 26.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,0 | 09.12.1997 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 46,3 |
| 27.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,2 | 10.12.1997 | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 46,2 |
| 28.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,4 | 11.12.1997 | 9,2 | 0,0 | 0,0 | 46,0 |
| 29.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,6 | 12.12.1997 | 14,4 | 0,0 | 0,0 | 45,9 |
| 30.09.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,7 | 13.12.1997 | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 45,8 |
| 01.10.1997 | 18,0 | 0,0 | 0,0 | 55,9 | 14.12.1997 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 45,6 |
| 02.10.1997 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 55,1 | 15.12.1997 | 0,0 | 1,2 | 0,5 | 45,5 |
| 03.10.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,3 | 16.12.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,6 |
| 04.10.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,5 | 17.12.1997 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 45,6 |
| 05.10.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,7 | 18.12.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,7 |
| 06.10.1997 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 51,8 | 19.12.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,7 |
| 07.10.1997 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 51,0 | 20.12.1997 | 7,0 | 0,0 | 0,0 | 45,8 |
| 08.10.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,2 | 21.12.1997 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 45,9 |
| 09.10.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,4 | 22.12.1997 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 45,9 |
| 10.10.1997 | 11,2 | 0,0 | 0,0 | 48,6 | 23.12.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,0 |
| 11.10.1997 | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 47,8 | 24.12.1997 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 46,1 |
| 12.10.1997 | 14,8 | 0,0 | 0,0 | 46,9 | 25.12.1997 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 46,1 |
| 13.10.1997 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 46,1 | 26.12.1997 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 46,2 |
| 14.10.1997 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | 45,3 | 27.12.1997 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 46,3 |
| 15.10.1997 | 6,4 | 0,0 | 0,0 | 44,5 | 28.12.1997 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 46,3 |
| 16.10.1997 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 44,7 | 29.12.1997 | 1,0 | 0,6 | 0,0 | 46,4 |
| 17.10.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,8 | 30.12.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,4 |
| 18.10.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,0 | 31.12.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,5 |
| 19.10.1997 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 45,1 | 01.01.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,6 |
| 20.10.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,3 | 02.01.1998 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 46,6 |
| 21.10.1997 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 45,5 | 03.01.1998 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 46,7 |
| 22.10.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,6 | 04.01.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 46,8 |
| 23.10.1997 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 45,8 | 05.01.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,8 |
| 24.10.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,0 | 06.01.1998 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 46,9 |
| 25.10.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,1 | 07.01.1998 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 46,9 |
| 26.10.1997 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 46,3 | 08.01.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,0 |
| 27.10.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,4 | 09.01.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,1 |
| 28.10.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,6 | 10.01.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,1 |
| 29.10.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,8 | 11.01.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,2 |
| 30.10.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,9 | 12.01.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,3 |
| 31.10.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,1 | 13.01.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,3 |
| 01.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,2 | 14.01.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,4 |
| 02.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,4 | 15.01.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,4 |
| 03.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,6 | 16.01.1998 | 5,4 | 0,0 | 0,0 | 47,5 |
| 04.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,7 | 17.01.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,6 |
| 05.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,9 | 18.01.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,6 |
| 06.11.1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,0 | 19.01.1998 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 47,7 |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|-----|--------|------------|--------|-------|-----|--------|
| 20.01.1998 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 47,8 | 04.04.1998 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 42,7 |
| 21.01.1998 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 47,8 | 05.04.1998 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 42,3 |
| 22.01.1998 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 47,9 | 06.04.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 41,9 |
| 23.01.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,9 | 07.04.1998 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 41,4 |
| 24.01.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 48,0 | 08.04.1998 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 41,0 |
| 25.01.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,1 | 09.04.1998 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 40,6 |
| 26.01.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,1 | 10.04.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 40,2 |
| 27.01.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,2 | 11.04.1998 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 39,7 |
| 28.01.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,3 | 12.04.1998 | 5,8 | 0,0 | 0,0 | 39,3 |
| 29.01.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 48,3 | 13.04.1998 | 7,4 | 0,0 | 0,0 | 38,9 |
| 30.01.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,4 | 14.04.1998 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 38,4 |
| 31.01.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 48,4 | 15.04.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,0 |
| 01.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,5 | 16.04.1998 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 37,7 |
| 02.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,6 | 17.04.1998 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 37,4 |
| 03.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,6 | 18.04.1998 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 37,1 |
| 04.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,7 | 19.04.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 36,8 |
| 05.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,8 | 20.04.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,5 |
| 06.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,8 | 21.04.1998 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 36,2 |
| 07.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,9 | 22.04.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 35,9 |
| 08.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,9 | 23.04.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 35,6 |
| 09.02.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 49,0 | 24.04.1998 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 35,2 |
| 10.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,1 | 25.04.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 34,9 |
| 11.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,1 | 26.04.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 34,6 |
| 12.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,2 | 27.04.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 34,3 |
| 13.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,3 | 28.04.1998 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 34,0 |
| 14.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,3 | 29.04.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 33,7 |
| 15.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,4 | 30.04.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 33,4 |
| 16.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,5 | 01.05.1998 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 33,1 |
| 17.02.1998 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 49,5 | 02.05.1998 | 13,0 | 0,0 | 0,0 | 32,8 |
| 18.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,6 | 03.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 32,5 |
| 19.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,7 | 04.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 32,2 |
| 20.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,7 | 05.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 31,9 |
| 21.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,8 | 06.05.1998 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 31,6 |
| 22.02.1998 | 10,6 | 0,0 | 0,0 | 49,9 | 07.05.1998 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 31,3 |
| 23.02.1998 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 49,9 | 08.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 31,0 |
| 24.02.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 50,0 | 09.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 30,7 |
| 25.02.1998 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 50,1 | 10.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 30,4 |
| 26.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,2 | 11.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 30,1 |
| 27.02.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,2 | 12.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 29,7 |
| 28.02.1998 | 8,0 | 0,0 | 0,0 | 50,3 | 13.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 29,4 |
| 01.03.1998 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 50,4 | 14.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 29,1 |
| 02.03.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,4 | 15.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 28,8 |
| 03.03.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,5 | 16.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 29,6 |
| 04.03.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,6 | 17.05.1998 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 30,4 |
| 05.03.1998 | 11,4 | 0,0 | 0,0 | 50,6 | 18.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 31,3 |
| 06.03.1998 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 50,7 | 19.05.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 32,1 |
| 07.03.1998 | 7,2 | 0,0 | 0,0 | 50,8 | 20.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 32,9 |
| 08.03.1998 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | 50,8 | 21.05.1998 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 33,7 |
| 09.03.1998 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 50,9 | 22.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 34,5 |
| 10.03.1998 | 0,0 | 1,2 | 0,3 | 51,0 | 23.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 35,3 |
| 11.03.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,1 | 24.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,1 |
| 12.03.1998 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 51,1 | 25.05.1998 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 36,9 |
| 13.03.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 51,2 | 26.05.1998 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 37,7 |
| 14.03.1998 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 51,3 | 27.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,5 |
| 15.03.1998 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 51,3 | 28.05.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 39,3 |
| 16.03.1998 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 50,9 | 29.05.1998 | 12,6 | 0,0 | 0,0 | 40,1 |
| 17.03.1998 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 50,5 | 30.05.1998 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 41,0 |
| 18.03.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,0 | 31.05.1998 | 12,4 | 0,0 | 0,0 | 41,8 |
| 19.03.1998 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 49,6 | 01.06.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 42,6 |
| 20.03.1998 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 49,2 | 02.06.1998 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 43,4 |
| 21.03.1998 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 48,8 | 03.06.1998 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 44,2 |
| 22.03.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,3 | 04.06.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,0 |
| 23.03.1998 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 47,9 | 05.06.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,8 |
| 24.03.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,5 | 06.06.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,6 |
| 25.03.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,0 | 07.06.1998 | 22,8 | 0,0 | 0,0 | 47,4 |
| 26.03.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,6 | 08.06.1998 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 48,2 |
| 27.03.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,2 | 09.06.1998 | 0,0 | 0,6 | 0,0 | 49,0 |
| 28.03.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,7 | 10.06.1998 | 12,0 | 0,0 | 0,0 | 49,8 |
| 29.03.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,3 | 11.06.1998 | 9,6 | 0,0 | 0,0 | 50,7 |
| 30.03.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,9 | 12.06.1998 | 49,0 | 0,0 | 0,0 | 51,5 |
| 31.03.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,5 | 13.06.1998 | 1,2 | 6,5 | 1,8 | 52,3 |
| 01.04.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,0 | 14.06.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,1 |
| 02.04.1998 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 43,6 | 15.06.1998 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 53,9 |
| 03.04.1998 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 43,2 | 16.06.1998 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 54,6 |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|-----|--------|------------|--------|-------|--------|--------|
| 17.06.1998 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 55,3 | 30.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,9 |
| 18.06.1998 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 56,0 | 31.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,4 |
| 19.06.1998 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 56,7 | 01.09.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 74,9 |
| 20.06.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,4 | 02.09.1998 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 74,3 |
| 21.06.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,2 | 03.09.1998 | 7,6 | 0,0 | 0,0 | 73,8 |
| 22.06.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 58,9 | 04.09.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 73,3 |
| 23.06.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,6 | 05.09.1998 | 23,6 | 0,0 | 0,0 | 72,8 |
| 24.06.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 60,3 | 06.09.1998 | 6,2 | 0,0 | 0,0 | 72,3 |
| 25.06.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,0 | 07.09.1998 | 0,2 | 0,6 | 0,2 | 71,8 |
| 26.06.1998 | 11,0 | 0,0 | 0,0 | 61,7 | 08.09.1998 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 71,3 |
| 27.06.1998 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 62,4 | 09.09.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 70,7 |
| 28.06.1998 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 63,1 | 10.09.1998 | 8,2 | 0,0 | 0,0 | 70,2 |
| 29.06.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 63,9 | 11.09.1998 | 23,0 | 0,0 | 0,0 | 69,7 |
| 30.06.1998 | 2,0 | 0,9 | 0,0 | 64,6 | 12.09.1998 | 25,6 | 20,5 | 3,7 | 69,2 |
| 01.07.1998 | 10,4 | 0,0 | 0,0 | 65,3 | 13.09.1998 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 68,7 |
| 02.07.1998 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 66,0 | 14.09.1998 | 1,4 | 7,9 | 1,4 | 68,2 |
| 03.07.1998 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 66,7 | 15.09.1998 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | 67,7 |
| 04.07.1998 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 67,4 | 16.09.1998 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 67,1 |
| 05.07.1998 | 7,6 | 0,1 | 0,0 | 68,1 | 17.09.1998 | 8,4 | 0,0 | 0,0 | 66,4 |
| 06.07.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,8 | 18.09.1998 | 1,4 | 0,1 | 0,0 | 65,8 |
| 07.07.1998 | 9,2 | 0,0 | 0,0 | 69,6 | 19.09.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,2 |
| 08.07.1998 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | 70,3 | 20.09.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,6 |
| 09.07.1998 | 0,6 | 0,3 | 0,0 | 71,0 | 21.09.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,0 |
| 10.07.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 71,7 | 22.09.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 63,4 |
| 11.07.1998 | 6,0 | 0,0 | 0,0 | 72,4 | 23.09.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,7 |
| 12.07.1998 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 73,1 | 24.09.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,1 |
| 13.07.1998 | 7,2 | 0,0 | 0,0 | 73,8 | 25.09.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 61,5 |
| 14.07.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 74,5 | 26.09.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,9 |
| 15.07.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,3 | 27.09.1998 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 60,3 |
| 16.07.1998 | 4,4 | 0,0 | 0,0 | 75,5 | 28.09.1998 | 6,2 | 0,0 | 0,0 | 59,7 |
| 17.07.1998 | 4,6 | 0,0 | 0,0 | 75,8 | 29.09.1998 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 59,0 |
| 18.07.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 76,1 | 30.09.1998 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 58,4 |
| 19.07.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,3 | 01.10.1998 | 15,2 | 0,0 | 0,0 | 57,8 |
| 20.07.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,6 | 02.10.1998 | 23,0 | 129,7 | 187,6 | 57,2 |
| 21.07.1998 | 7,6 | 0,0 | 0,0 | 76,9 | 03.10.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,6 |
| 22.07.1998 | 1,2 | 0,2 | 0,0 | 77,1 | 04.10.1998 | 4,8 | 0,1 | 0,1 | 56,0 |
| 23.07.1998 | 9,4 | 0,0 | 0,0 | 77,4 | 05.10.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,4 |
| 24.07.1998 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 77,7 | 06.10.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,7 |
| 25.07.1998 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 77,9 | 07.10.1998 | 19,2 | 0,0 | 0,0 | 54,1 |
| 26.07.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 78,2 | 08.10.1998 | 0,4 | 5,8 | 2,8 | 53,5 |
| 27.07.1998 | 7,0 | 0,6 | 0,0 | 78,5 | 09.10.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,9 |
| 28.07.1998 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 78,7 | 10.10.1998 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 52,3 |
| 29.07.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 79,0 | 11.10.1998 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 51,7 |
| 30.07.1998 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 79,3 | 12.10.1998 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 51,0 |
| 31.07.1998 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 79,6 | 13.10.1998 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 50,4 |
| 01.08.1998 | 7,2 | 0,0 | 0,0 | 79,8 | 14.10.1998 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 49,8 |
| 02.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 80,1 | 15.10.1998 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 49,2 |
| 03.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 80,4 | 16.10.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,8 |
| 04.08.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 80,6 | 17.10.1998 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 48,5 |
| 05.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 80,9 | 18.10.1998 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 48,1 |
| 06.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 81,2 | 19.10.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,7 |
| 07.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 81,4 | 20.10.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,3 |
| 08.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 81,7 | 21.10.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 47,0 |
| 09.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,0 | 22.10.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,6 |
| 10.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,2 | 23.10.1998 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 46,2 |
| 11.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,5 | 24.10.1998 | 14,8 | 0,0 | 0,0 | 45,9 |
| 12.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,8 | 25.10.1998 | 16,8 | 0,0 | 0,0 | 45,5 |
| 13.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,0 | 26.10.1998 | 4,6 | 1,4 | 0,1 | 45,1 |
| 14.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,3 | 27.10.1998 | 4,4 | 0,0 | 0,0 | 44,7 |
| 15.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,6 | 28.10.1998 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 44,4 |
| 16.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,1 | 29.10.1998 | 29,8 | 487,6 | 5754,5 | 44,0 |
| 17.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,6 | 30.10.1998 | 14,8 | 100,0 | 68,0 | 43,6 |
| 18.08.1998 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 82,0 | 31.10.1998 | 3,0 | 300,3 | 1062,5 | 43,2 |
| 19.08.1998 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 81,5 | 01.11.1998 | 11,8 | 329,8 | 189,2 | 42,9 |
| 20.08.1998 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 81,0 | 02.11.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 42,5 |
| 21.08.1998 | 7,4 | 0,0 | 0,0 | 80,5 | 03.11.1998 | 14,2 | 68,5 | 39,3 | 42,1 |
| 22.08.1998 | 13,2 | 0,0 | 0,0 | 80,0 | 04.11.1998 | 14,2 | 379,3 | 103,0 | 41,8 |
| 23.08.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 79,5 | 05.11.1998 | 0,0 | 66,0 | 17,9 | 41,4 |
| 24.08.1998 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 79,0 | 06.11.1998 | 0,0 | 45,1 | 10,8 | 41,0 |
| 25.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 78,4 | 07.11.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 40,6 |
| 26.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 77,9 | 08.11.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 40,3 |
| 27.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 77,4 | 09.11.1998 | 21,2 | 177,3 | 575,9 | 39,9 |
| 28.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,9 | 10.11.1998 | 12,6 | 171,8 | 608,4 | 39,5 |
| 29.08.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,4 | 11.11.1998 | 1,6 | 140,1 | 778,6 | 39,2 |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|-------|--------|------------|--------|-------|-------|--------|
| 12.11.1998 | 0,0 | 40,8 | 11,9 | 38,8 | 25.01.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,0 |
| 13.11.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,4 | 26.01.1999 | 8,0 | 0,0 | 0,0 | 44,2 |
| 14.11.1998 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 38,0 | 27.01.1999 | 5,8 | 0,0 | 0,0 | 44,4 |
| 15.11.1998 | 8,6 | 0,0 | 0,0 | 37,7 | 28.01.1999 | 9,2 | 0,0 | 0,0 | 44,7 |
| 16.11.1998 | 4,8 | 166,3 | 163,9 | 37,6 | 29.01.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 44,9 |
| 17.11.1998 | 1,8 | 114,1 | 50,7 | 37,5 | 30.01.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,1 |
| 18.11.1998 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 37,4 | 31.01.1999 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 45,3 |
| 19.11.1998 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 37,3 | 01.02.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,6 |
| 20.11.1998 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 37,2 | 02.02.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 45,8 |
| 21.11.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 37,1 | 03.02.1999 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 46,0 |
| 22.11.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,0 | 04.02.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,2 |
| 23.11.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,9 | 05.02.1999 | 9,0 | 0,0 | 0,0 | 46,5 |
| 24.11.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,8 | 06.02.1999 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 46,7 |
| 25.11.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,7 | 07.02.1999 | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 46,9 |
| 26.11.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,6 | 08.02.1999 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 47,1 |
| 27.11.1998 | 11,0 | 0,0 | 0,0 | 36,5 | 09.02.1999 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 47,4 |
| 28.11.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,4 | 10.02.1999 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 47,6 |
| 29.11.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,3 | 11.02.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 47,8 |
| 30.11.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,2 | 12.02.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,0 |
| 01.12.1998 | 0,0 | 53,4 | 23,7 | 36,1 | 13.02.1999 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 48,3 |
| 02.12.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,0 | 14.02.1999 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 48,5 |
| 03.12.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 35,9 | 15.02.1999 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 48,7 |
| 04.12.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 35,8 | 16.02.1999 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 49,0 |
| 05.12.1998 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 35,7 | 17.02.1999 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 49,2 |
| 06.12.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 35,6 | 18.02.1999 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 49,4 |
| 07.12.1998 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 35,5 | 19.02.1999 | 9,0 | 0,0 | 0,0 | 49,7 |
| 08.12.1998 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 35,5 | 20.02.1999 | 21,0 | 240,4 | 80,0 | 49,9 |
| 09.12.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 35,4 | 21.02.1999 | 2,0 | 240,4 | 416,6 | 50,2 |
| 10.12.1998 | 4,8 | 0,0 | 0,0 | 35,3 | 22.02.1999 | 4,2 | 185,8 | 127,9 | 50,4 |
| 11.12.1998 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 35,2 | 23.02.1999 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 50,7 |
| 12.12.1998 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 35,1 | 24.02.1999 | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 50,9 |
| 13.12.1998 | 1,0 | 166,3 | 57,4 | 35,0 | 25.02.1999 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 51,2 |
| 14.12.1998 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 34,9 | 26.02.1999 | 0,0 | 69,2 | 17,9 | 51,4 |
| 15.12.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 34,8 | 27.02.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,7 |
| 16.12.1998 | 0,2 | 45,0 | 43,0 | 35,0 | 28.02.1999 | 0,0 | 117,3 | 24,2 | 51,9 |
| 17.12.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 35,2 | 01.03.1999 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 52,2 |
| 18.12.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 35,5 | 02.03.1999 | 3,6 | 91,5 | 103,1 | 52,4 |
| 19.12.1998 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 35,7 | 03.03.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,7 |
| 20.12.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 35,9 | 04.03.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,9 |
| 21.12.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 36,1 | 05.03.1999 | 5,4 | 119,3 | 21,5 | 53,2 |
| 22.12.1998 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 36,4 | 06.03.1999 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 53,4 |
| 23.12.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,6 | 07.03.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,7 |
| 24.12.1998 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 36,8 | 08.03.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,9 |
| 25.12.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,0 | 09.03.1999 | 23,8 | 139,4 | 447,3 | 54,2 |
| 26.12.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,2 | 10.03.1999 | 4,2 | 0,0 | 0,0 | 54,4 |
| 27.12.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,5 | 11.03.1999 | 0,2 | 95,2 | 53,4 | 54,7 |
| 28.12.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,7 | 12.03.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,9 |
| 29.12.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,9 | 13.03.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,2 |
| 30.12.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,1 | 14.03.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,4 |
| 31.12.1998 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,4 | 15.03.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,7 |
| 01.01.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,6 | 16.03.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,3 |
| 02.01.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,8 | 17.03.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,0 |
| 03.01.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 39,0 | 18.03.1999 | 0,0 | 58,9 | 1,4 | 54,6 |
| 04.01.1999 | 0,0 | 4,5 | 4,8 | 39,3 | 19.03.1999 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 54,3 |
| 05.01.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 39,5 | 20.03.1999 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 53,9 |
| 06.01.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 39,7 | 21.03.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 53,6 |
| 07.01.1999 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 39,9 | 22.03.1999 | 9,6 | 0,0 | 0,0 | 53,3 |
| 08.01.1999 | 13,8 | 0,0 | 0,0 | 40,2 | 23.03.1999 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 52,9 |
| 09.01.1999 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 40,4 | 24.03.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,6 |
| 10.01.1999 | 0,0 | 88,1 | 64,3 | 40,6 | 25.03.1999 | 0,0 | 1,3 | 0,7 | 52,2 |
| 11.01.1999 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 40,8 | 26.03.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,9 |
| 12.01.1999 | 0,0 | 9,5 | 1,8 | 41,1 | 27.03.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 31,4 |
| 13.01.1999 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 41,3 | 28.03.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 31,1 |
| 14.01.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 41,5 | 29.03.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 30,8 |
| 15.01.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 41,7 | 30.03.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 30,4 |
| 16.01.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 42,0 | 31.03.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 30,1 |
| 17.01.1999 | 0,0 | 2,4 | 1,0 | 42,2 | 01.04.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 29,7 |
| 18.01.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 42,4 | 02.04.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 29,4 |
| 19.01.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 42,6 | 03.04.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 29,1 |
| 20.01.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 42,9 | 04.04.1999 | 13,8 | 0,0 | 0,0 | 28,7 |
| 21.01.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 43,1 | 05.04.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 28,4 |
| 22.01.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 43,3 | 06.04.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 28,0 |
| 23.01.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 43,5 | 07.04.1999 | 19,4 | 3,4 | 1,2 | 27,7 |
| 24.01.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 43,8 | 08.04.1999 | 0,8 | 2,8 | 1,0 | 27,4 |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|-------|--------|------------|--------|-------|-----|--------|
| 09.04.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 27,0 | 22.06.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 69,2 |
| 10.04.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 26,7 | 23.06.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69,1 |
| 11.04.1999 | 5,4 | 0,0 | 0,0 | 26,4 | 24.06.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69,0 |
| 12.04.1999 | 0,0 | 0,5 | 0,6 | 26,0 | 25.06.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,9 |
| 13.04.1999 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 25,7 | 26.06.1999 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 68,7 |
| 14.04.1999 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 25,3 | 27.06.1999 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 68,6 |
| 15.04.1999 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 25,0 | 28.06.1999 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 68,5 |
| 16.04.1999 | 14,2 | 0,0 | 0,0 | 25,2 | 29.06.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 68,4 |
| 17.04.1999 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 25,4 | 30.06.1999 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 68,3 |
| 18.04.1999 | 5,4 | 0,0 | 0,0 | 25,6 | 01.07.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 68,1 |
| 19.04.1999 | 3,0 | 20,0 | 6,6 | 25,8 | 02.07.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,0 |
| 20.04.1999 | 0,0 | 2,4 | 1,9 | 26,0 | 03.07.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 67,9 |
| 21.04.1999 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 26,2 | 04.07.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 67,8 |
| 22.04.1999 | 0,0 | 3,7 | 2,5 | 26,4 | 05.07.1999 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 67,7 |
| 23.04.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 26,5 | 06.07.1999 | 4,6 | 0,0 | 0,0 | 67,6 |
| 24.04.1999 | 4,6 | 0,0 | 0,0 | 26,7 | 07.07.1999 | 7,8 | 0,0 | 0,0 | 67,4 |
| 25.04.1999 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 26,9 | 08.07.1999 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 67,3 |
| 26.04.1999 | 0,0 | 1,8 | 1,0 | 28,1 | 09.07.1999 | 19,0 | 0,0 | 0,0 | 67,2 |
| 27.04.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 29,3 | 10.07.1999 | 17,6 | 0,0 | 0,0 | 67,1 |
| 28.04.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 30,5 | 11.07.1999 | 13,0 | 4,8 | 1,0 | 67,0 |
| 29.04.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 31,7 | 12.07.1999 | 18,0 | 0,0 | 0,0 | 66,9 |
| 30.04.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 32,9 | 13.07.1999 | 1,2 | 10,4 | 1,8 | 66,7 |
| 01.05.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 34,1 | 14.07.1999 | 4,8 | 0,0 | 0,0 | 66,6 |
| 02.05.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 35,3 | 15.07.1999 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 66,5 |
| 03.05.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,5 | 16.07.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 66,9 |
| 04.05.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,7 | 17.07.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 67,3 |
| 05.05.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,9 | 18.07.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 67,7 |
| 06.05.1999 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 40,1 | 19.07.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,1 |
| 07.05.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 41,3 | 20.07.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,5 |
| 08.05.1999 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 42,4 | 21.07.1999 | 7,4 | 0,0 | 0,0 | 68,9 |
| 09.05.1999 | 0,0 | 2,4 | 1,3 | 43,6 | 22.07.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69,3 |
| 10.05.1999 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 44,8 | 23.07.1999 | 7,8 | 0,0 | 0,0 | 69,7 |
| 11.05.1999 | 12,0 | 0,0 | 0,0 | 46,0 | 24.07.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 70,1 |
| 12.05.1999 | 12,2 | 0,0 | 0,0 | 47,2 | 25.07.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 70,5 |
| 13.05.1999 | 9,8 | 0,0 | 0,0 | 48,4 | 26.07.1999 | 0,0 | 0,6 | 0,7 | 70,9 |
| 14.05.1999 | 15,6 | 10,5 | 2,6 | 49,6 | 27.07.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 71,3 |
| 15.05.1999 | 0,2 | 12,2 | 5,0 | 50,8 | 28.07.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 71,7 |
| 16.05.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,5 | 29.07.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 72,1 |
| 17.05.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,2 | 30.07.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 72,5 |
| 18.05.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,9 | 31.07.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 72,8 |
| 19.05.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,6 | 01.08.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 73,2 |
| 20.05.1999 | 7,2 | 0,0 | 0,0 | 54,3 | 02.08.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 73,6 |
| 21.05.1999 | 53,0 | 240,4 | 46,9 | 55,0 | 03.08.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 74,0 |
| 22.05.1999 | 15,0 | 263,5 | 174,8 | 56,1 | 04.08.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 74,4 |
| 23.05.1999 | 1,4 | 151,8 | 36,9 | 56,7 | 05.08.1999 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 74,8 |
| 24.05.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,2 | 06.08.1999 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 75,2 |
| 25.05.1999 | 0,0 | 77,1 | 12,3 | 57,8 | 07.08.1999 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 75,6 |
| 26.05.1999 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 58,4 | 08.08.1999 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 76,0 |
| 27.05.1999 | 0,0 | 8,3 | 1,7 | 59,0 | 09.08.1999 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 76,4 |
| 28.05.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,6 | 10.08.1999 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 76,8 |
| 29.05.1999 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 60,1 | 11.08.1999 | 8,2 | 0,0 | 0,0 | 77,2 |
| 30.05.1999 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 60,7 | 12.08.1999 | 3,4 | 0,4 | 0,3 | 77,6 |
| 31.05.1999 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 61,3 | 13.08.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 78,0 |
| 01.06.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,9 | 14.08.1999 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 78,4 |
| 02.06.1999 | 25,6 | 0,0 | 0,0 | 62,5 | 15.08.1999 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 78,8 |
| 03.06.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 63,1 | 16.08.1999 | 7,4 | 0,0 | 0,0 | 78,0 |
| 04.06.1999 | 9,4 | 6,7 | 15,7 | 63,6 | 17.08.1999 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 77,2 |
| 05.06.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,2 | 18.08.1999 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 76,4 |
| 06.06.1999 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 64,8 | 19.08.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,5 |
| 07.06.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 65,4 | 20.08.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 74,7 |
| 08.06.1999 | 5,4 | 0,0 | 0,0 | 66,0 | 21.08.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 73,9 |
| 09.06.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 66,5 | 22.08.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 73,1 |
| 10.06.1999 | 6,0 | 0,0 | 0,0 | 67,1 | 23.08.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 72,3 |
| 11.06.1999 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 67,7 | 24.08.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 71,5 |
| 12.06.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,3 | 25.08.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 70,7 |
| 13.06.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,9 | 26.08.1999 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 69,9 |
| 14.06.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69,5 | 27.08.1999 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 69,0 |
| 15.06.1999 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 70,0 | 28.08.1999 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 68,2 |
| 16.06.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 69,9 | 29.08.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 67,4 |
| 17.06.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69,8 | 30.08.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 66,6 |
| 18.06.1999 | 10,8 | 0,8 | 0,3 | 69,7 | 31.08.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,8 |
| 19.06.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69,6 | 01.09.1999 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 65,0 |
| 20.06.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69,4 | 02.09.1999 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 64,2 |
| 21.06.1999 | 7,8 | 0,1 | 0,0 | 69,3 | 03.09.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 63,4 |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|-----|--------|------------|--------|-------|-----|--------|
| 04.09.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,5 | 17.11.1999 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 61,0 |
| 05.09.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 61,7 | 18.11.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 60,8 |
| 06.09.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,9 | 19.11.1999 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 60,7 |
| 07.09.1999 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 60,1 | 20.11.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,5 |
| 08.09.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,3 | 21.11.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,3 |
| 09.09.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,5 | 22.11.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,2 |
| 10.09.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,7 | 23.11.1999 | 14,6 | 0,0 | 0,0 | 60,0 |
| 11.09.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,9 | 24.11.1999 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 59,8 |
| 12.09.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,0 | 25.11.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,7 |
| 13.09.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,2 | 26.11.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,5 |
| 14.09.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,4 | 27.11.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,3 |
| 15.09.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,6 | 28.11.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,2 |
| 16.09.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,8 | 29.11.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,0 |
| 17.09.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,9 | 30.11.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,8 |
| 18.09.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,1 | 01.12.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,7 |
| 19.09.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,3 | 02.12.1999 | 5,8 | 0,0 | 0,0 | 58,5 |
| 20.09.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,4 | 03.12.1999 | 2,4 | 1,0 | 0,4 | 58,3 |
| 21.09.1999 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 54,6 | 04.12.1999 | 16,8 | 0,0 | 0,0 | 58,2 |
| 22.09.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 54,8 | 05.12.1999 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 58,0 |
| 23.09.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,0 | 06.12.1999 | 0,0 | 0,6 | 0,1 | 57,8 |
| 24.09.1999 | 6,2 | 0,0 | 0,0 | 55,1 | 07.12.1999 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 57,7 |
| 25.09.1999 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 55,3 | 08.12.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,5 |
| 26.09.1999 | 13,6 | 0,0 | 0,0 | 55,5 | 09.12.1999 | 0,0 | 1,2 | 0,1 | 57,3 |
| 27.09.1999 | 0,2 | 0,2 | 0,0 | 55,6 | 10.12.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,2 |
| 28.09.1999 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 55,8 | 11.12.1999 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 57,0 |
| 29.09.1999 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 56,0 | 12.12.1999 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 56,8 |
| 30.09.1999 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 56,1 | 13.12.1999 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 56,7 |
| 01.10.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 56,3 | 14.12.1999 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 56,5 |
| 02.10.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,5 | 15.12.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,3 |
| 03.10.1999 | 9,0 | 0,0 | 0,0 | 56,6 | 16.12.1999 | 0,0 | 2,3 | 1,2 | 56,3 |
| 04.10.1999 | 6,8 | 0,5 | 0,0 | 56,8 | 17.12.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,3 |
| 05.10.1999 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 57,0 | 18.12.1999 | 15,8 | 0,0 | 0,0 | 56,2 |
| 06.10.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,1 | 19.12.1999 | 10,8 | 0,0 | 0,0 | 56,2 |
| 07.10.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,3 | 20.12.1999 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 56,2 |
| 08.10.1999 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 57,5 | 21.12.1999 | 1,0 | 6,9 | 1,0 | 56,1 |
| 09.10.1999 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 57,7 | 22.12.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,1 |
| 10.10.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,8 | 23.12.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,1 |
| 11.10.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,0 | 24.12.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 56,1 |
| 12.10.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,2 | 25.12.1999 | 9,6 | 0,0 | 0,0 | 56,0 |
| 13.10.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,3 | 26.12.1999 | 6,2 | 0,0 | 0,0 | 56,0 |
| 14.10.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,5 | 27.12.1999 | 1,8 | 32,9 | 6,1 | 56,0 |
| 15.10.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,7 | 28.12.1999 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 55,9 |
| 16.10.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 58,8 | 29.12.1999 | 4,4 | 0,0 | 0,0 | 55,9 |
| 17.10.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 58,8 | 30.12.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 55,9 |
| 18.10.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,9 | 31.12.1999 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 55,8 |
| 19.10.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,0 | 01.01.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,8 |
| 20.10.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,1 | 02.01.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,8 |
| 21.10.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,2 | 03.01.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,8 |
| 22.10.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,3 | 04.01.2000 | 0,4 | 8,3 | 2,0 | 55,7 |
| 23.10.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 59,4 | 05.01.2000 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 55,7 |
| 24.10.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,4 | 06.01.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,7 |
| 25.10.1999 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 59,5 | 07.01.2000 | 0,0 | 1,9 | 0,4 | 55,6 |
| 26.10.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,6 | 08.01.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,6 |
| 27.10.1999 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 59,7 | 09.01.2000 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 55,6 |
| 28.10.1999 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 59,8 | 10.01.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,5 |
| 29.10.1999 | 17,0 | 2,3 | 0,2 | 59,9 | 11.01.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,5 |
| 30.10.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,0 | 12.01.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,5 |
| 31.10.1999 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 60,0 | 13.01.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,4 |
| 01.11.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,1 | 14.01.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,4 |
| 02.11.1999 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 60,2 | 15.01.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,4 |
| 03.11.1999 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 60,3 | 16.01.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,4 |
| 04.11.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,4 | 17.01.2000 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 55,3 |
| 05.11.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,5 | 18.01.2000 | 13,4 | 0,0 | 0,0 | 55,3 |
| 06.11.1999 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 60,6 | 19.01.2000 | 0,8 | 4,9 | 1,6 | 55,3 |
| 07.11.1999 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 60,6 | 20.01.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,2 |
| 08.11.1999 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 60,7 | 21.01.2000 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 55,2 |
| 09.11.1999 | 11,0 | 0,0 | 0,0 | 60,8 | 22.01.2000 | 6,2 | 0,0 | 0,0 | 55,2 |
| 10.11.1999 | 19,2 | 0,0 | 0,0 | 60,9 | 23.01.2000 | 4,4 | 0,0 | 0,0 | 55,1 |
| 11.11.1999 | 0,4 | 2,3 | 0,2 | 61,0 | 24.01.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,1 |
| 12.11.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,1 | 25.01.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,1 |
| 13.11.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,2 | 26.01.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,1 |
| 14.11.1999 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 61,2 | 27.01.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,0 |
| 15.11.1999 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 61,3 | 28.01.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,0 |
| 16.11.1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,2 | 29.01.2000 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 55,0 |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|------|--------|------------|--------|-------|-----|--------|
| 30.01.2000 | 14,2 | 6,1 | 0,4 | 54,9 | 13.04.2000 | 4,6 | 0,0 | 0,0 | 40,6 |
| 31.01.2000 | 0,2 | 92,2 | 6,5 | 54,9 | 14.04.2000 | 0,2 | 26,2 | 1,6 | 40,2 |
| 01.02.2000 | 0,0 | 64,8 | 4,6 | 54,9 | 15.04.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 39,8 |
| 02.02.2000 | 1,8 | 36,0 | 10,2 | 54,8 | 16.04.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 39,7 |
| 03.02.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 54,8 | 17.04.2000 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 39,6 |
| 04.02.2000 | 0,2 | 47,3 | 12,8 | 54,8 | 18.04.2000 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 39,5 |
| 05.02.2000 | 3,2 | 0,7 | 0,2 | 54,7 | 19.04.2000 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 39,4 |
| 06.02.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,7 | 20.04.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 39,4 |
| 07.02.2000 | 0,2 | 6,4 | 0,0 | 54,7 | 21.04.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 39,3 |
| 08.02.2000 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 54,7 | 22.04.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 39,2 |
| 09.02.2000 | 1,8 | 0,8 | 0,0 | 54,6 | 23.04.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 39,1 |
| 10.02.2000 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 54,6 | 24.04.2000 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 39,1 |
| 11.02.2000 | 4,2 | 1,7 | 0,0 | 54,6 | 25.04.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 39,0 |
| 12.02.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 54,5 | 26.04.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,9 |
| 13.02.2000 | 4,6 | 0,0 | 0,0 | 54,5 | 27.04.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,8 |
| 14.02.2000 | 0,0 | 0,6 | 0,0 | 54,5 | 28.04.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,8 |
| 15.02.2000 | 6,4 | 1,2 | 0,2 | 54,4 | 29.04.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,7 |
| 16.02.2000 | 4,0 | 4,3 | 2,2 | 54,4 | 30.04.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,6 |
| 17.02.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 54,4 | 01.05.2000 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 38,5 |
| 18.02.2000 | 5,4 | 0,0 | 0,0 | 54,3 | 02.05.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,5 |
| 19.02.2000 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 54,3 | 03.05.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,4 |
| 20.02.2000 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 54,3 | 04.05.2000 | 4,4 | 0,0 | 0,0 | 38,3 |
| 21.02.2000 | 0,8 | 8,1 | 0,8 | 54,2 | 05.05.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 38,2 |
| 22.02.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,2 | 06.05.2000 | 4,6 | 0,0 | 0,0 | 38,2 |
| 23.02.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,2 | 07.05.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 38,1 |
| 24.02.2000 | 7,6 | 0,0 | 0,0 | 54,2 | 08.05.2000 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 38,0 |
| 25.02.2000 | 2,4 | 7,2 | 0,9 | 54,1 | 09.05.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,9 |
| 26.02.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,1 | 10.05.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,9 |
| 27.02.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,1 | 11.05.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,8 |
| 28.02.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,0 | 12.05.2000 | 31,2 | 0,0 | 0,0 | 37,7 |
| 29.02.2000 | 1,0 | 3,3 | 0,0 | 54,0 | 13.05.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 37,6 |
| 01.03.2000 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 54,0 | 14.05.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 37,6 |
| 02.03.2000 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 53,9 | 15.05.2000 | 0,0 | 4,2 | 1,4 | 37,5 |
| 03.03.2000 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 53,9 | 16.05.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 38,2 |
| 04.03.2000 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 53,9 | 17.05.2000 | 14,0 | 0,0 | 0,0 | 39,0 |
| 05.03.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,8 | 18.05.2000 | 8,6 | 0,0 | 0,0 | 39,7 |
| 06.03.2000 | 0,0 | 1,9 | 0,0 | 53,8 | 19.05.2000 | 1,8 | 2,1 | 0,3 | 40,5 |
| 07.03.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,8 | 20.05.2000 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 41,2 |
| 08.03.2000 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 53,7 | 21.05.2000 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 42,0 |
| 09.03.2000 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 53,7 | 22.05.2000 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 42,7 |
| 10.03.2000 | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 53,7 | 23.05.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 43,5 |
| 11.03.2000 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 53,6 | 24.05.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,2 |
| 12.03.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,6 | 25.05.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,0 |
| 13.03.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,6 | 26.05.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,7 |
| 14.03.2000 | 7,6 | 0,0 | 0,0 | 53,5 | 27.05.2000 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 46,5 |
| 15.03.2000 | 0,8 | 1,8 | 0,6 | 53,5 | 28.05.2000 | 5,8 | 0,0 | 0,0 | 47,2 |
| 16.03.2000 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 53,1 | 29.05.2000 | 9,6 | 0,0 | 0,0 | 48,0 |
| 17.03.2000 | 15,2 | 0,0 | 0,0 | 52,6 | 30.05.2000 | 11,0 | 0,0 | 0,0 | 48,7 |
| 18.03.2000 | 4,6 | 13,0 | 0,4 | 52,2 | 31.05.2000 | 11,0 | 5,7 | 0,8 | 49,5 |
| 19.03.2000 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 51,7 | 01.06.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,2 |
| 20.03.2000 | 0,0 | 44,4 | 8,6 | 51,3 | 02.06.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,0 |
| 21.03.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,8 | 03.06.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,7 |
| 22.03.2000 | 0,0 | 34,0 | 2,3 | 50,4 | 04.06.2000 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 52,5 |
| 23.03.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,0 | 05.06.2000 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 53,2 |
| 24.03.2000 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 49,5 | 06.06.2000 | 9,0 | 0,0 | 0,0 | 54,0 |
| 25.03.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,1 | 07.06.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 54,7 |
| 26.03.2000 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 48,6 | 08.06.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,5 |
| 27.03.2000 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | 48,2 | 09.06.2000 | 0,0 | 0,8 | 0,1 | 56,2 |
| 28.03.2000 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 47,7 | 10.06.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,0 |
| 29.03.2000 | 1,4 | 13,6 | 2,3 | 47,3 | 11.06.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,7 |
| 30.03.2000 | 37,4 | 0,0 | 0,0 | 46,8 | 12.06.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,5 |
| 31.03.2000 | 0,8 | 120,8 | 27,9 | 46,4 | 13.06.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,2 |
| 01.04.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,0 | 14.06.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 60,0 |
| 02.04.2000 | 0,0 | 98,3 | 20,5 | 45,5 | 15.06.2000 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 60,7 |
| 03.04.2000 | 0,0 | 42,7 | 6,3 | 45,1 | 16.06.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,1 |
| 04.04.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 44,6 | 17.06.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,5 |
| 05.04.2000 | 39,2 | 15,9 | 2,6 | 44,2 | 18.06.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,0 |
| 06.04.2000 | 0,0 | 151,5 | 82,8 | 43,7 | 19.06.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,4 |
| 07.04.2000 | 0,0 | 76,8 | 7,0 | 43,3 | 20.06.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,8 |
| 08.04.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 42,9 | 21.06.2000 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 63,2 |
| 09.04.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 42,4 | 22.06.2000 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 63,6 |
| 10.04.2000 | 0,0 | 57,1 | 2,3 | 42,0 | 23.06.2000 | 14,2 | 0,0 | 0,0 | 64,1 |
| 11.04.2000 | 0,4 | 5,8 | 0,8 | 41,5 | 24.06.2000 | 7,8 | 0,0 | 0,0 | 64,5 |
| 12.04.2000 | 9,0 | 0,0 | 0,0 | 41,1 | 25.06.2000 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 64,9 |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|------|--------|------------|--------|-------|------|--------|
| 26.06.2000 | 0,0 | 0,3 | 0,1 | 65,3 | 08.09.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,6 |
| 27.06.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,7 | 09.09.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,0 |
| 28.06.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 66,1 | 10.09.2000 | 0,0 | 2,3 | 0,3 | 67,4 |
| 29.06.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 66,6 | 11.09.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 66,9 |
| 30.06.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 67,0 | 12.09.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 66,3 |
| 01.07.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 67,4 | 13.09.2000 | 9,6 | 0,0 | 0,0 | 65,7 |
| 02.07.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 67,8 | 14.09.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,1 |
| 03.07.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,2 | 15.09.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,5 |
| 04.07.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,7 | 16.09.2000 | 6,4 | 0,0 | 0,0 | 64,2 |
| 05.07.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69,1 | 17.09.2000 | 4,8 | 0,0 | 0,0 | 63,9 |
| 06.07.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69,5 | 18.09.2000 | 0,0 | 2,0 | 0,6 | 63,6 |
| 07.07.2000 | 39,4 | 0,0 | 0,0 | 69,9 | 19.09.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 63,3 |
| 08.07.2000 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 70,3 | 20.09.2000 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 63,0 |
| 09.07.2000 | 5,8 | 0,0 | 0,0 | 70,7 | 21.09.2000 | 61,2 | 5,9 | 0,8 | 62,7 |
| 10.07.2000 | 4,4 | 0,0 | 0,0 | 71,2 | 22.09.2000 | 4,8 | 67,7 | 13,4 | 62,4 |
| 11.07.2000 | 0,6 | 7,1 | 19,7 | 71,6 | 23.09.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,1 |
| 12.07.2000 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 72,0 | 24.09.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,8 |
| 13.07.2000 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 72,4 | 25.09.2000 | 0,6 | 16,4 | 5,6 | 61,5 |
| 14.07.2000 | 10,0 | 0,0 | 0,0 | 72,8 | 26.09.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,2 |
| 15.07.2000 | 7,0 | 0,0 | 0,0 | 73,3 | 27.09.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 60,9 |
| 16.07.2000 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 73,6 | 28.09.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,6 |
| 17.07.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 73,9 | 29.09.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,3 |
| 18.07.2000 | 0,0 | 5,6 | 2,5 | 74,2 | 30.09.2000 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 60,0 |
| 19.07.2000 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 74,5 | 01.10.2000 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 59,7 |
| 20.07.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 74,8 | 02.10.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,4 |
| 21.07.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,1 | 03.10.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,1 |
| 22.07.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,4 | 04.10.2000 | 0,0 | 6,4 | 0,7 | 58,8 |
| 23.07.2000 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 75,7 | 05.10.2000 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 58,5 |
| 24.07.2000 | 6,4 | 0,0 | 0,0 | 76,0 | 06.10.2000 | 10,4 | 0,0 | 0,0 | 58,2 |
| 25.07.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,3 | 07.10.2000 | 19,4 | 10,5 | 0,7 | 57,9 |
| 26.07.2000 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 76,6 | 08.10.2000 | 0,2 | 42,3 | 10,5 | 57,6 |
| 27.07.2000 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 76,9 | 09.10.2000 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 57,3 |
| 28.07.2000 | 16,4 | 0,0 | 0,0 | 77,2 | 10.10.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 57,0 |
| 29.07.2000 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 77,5 | 11.10.2000 | 1,6 | 34,7 | 8,7 | 56,7 |
| 30.07.2000 | 16,4 | 0,0 | 0,0 | 77,8 | 12.10.2000 | 4,8 | 10,5 | 2,2 | 56,4 |
| 31.07.2000 | 0,0 | 6,4 | 21,0 | 78,2 | 13.10.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,1 |
| 01.08.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 78,5 | 14.10.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,8 |
| 02.08.2000 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 78,8 | 15.10.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,5 |
| 03.08.2000 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 79,1 | 16.10.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,3 |
| 04.08.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 79,4 | 17.10.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 55,1 |
| 05.08.2000 | 6,0 | 0,0 | 0,0 | 79,7 | 18.10.2000 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 54,9 |
| 06.08.2000 | 26,8 | 0,0 | 0,0 | 80,0 | 19.10.2000 | 6,0 | 0,3 | 0,0 | 54,7 |
| 07.08.2000 | 0,0 | 17,4 | 6,1 | 80,3 | 20.10.2000 | 0,0 | 1,2 | 4,7 | 54,5 |
| 08.08.2000 | 19,2 | 0,0 | 0,0 | 80,6 | 21.10.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 54,3 |
| 09.08.2000 | 0,2 | 6,7 | 3,4 | 80,9 | 22.10.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 54,1 |
| 10.08.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 81,2 | 23.10.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,0 |
| 11.08.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 81,5 | 24.10.2000 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 53,8 |
| 12.08.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 81,8 | 25.10.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,6 |
| 13.08.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,1 | 26.10.2000 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 53,4 |
| 14.08.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,4 | 27.10.2000 | 0,4 | 0,4 | 0,0 | 53,2 |
| 15.08.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,8 | 28.10.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,0 |
| 16.08.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,2 | 29.10.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,8 |
| 17.08.2000 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 81,6 | 30.10.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,6 |
| 18.08.2000 | 4,6 | 0,0 | 0,0 | 81,0 | 31.10.2000 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 52,4 |
| 19.08.2000 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 80,4 | 01.11.2000 | 0,0 | 2,3 | 2,8 | 52,2 |
| 20.08.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 79,8 | 02.11.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,0 |
| 21.08.2000 | 18,6 | 0,0 | 0,0 | 79,2 | 03.11.2000 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 51,8 |
| 22.08.2000 | 2,0 | 3,5 | 1,3 | 78,6 | 04.11.2000 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 51,6 |
| 23.08.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 78,0 | 05.11.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,4 |
| 24.08.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 77,5 | 06.11.2000 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 51,2 |
| 25.08.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,9 | 07.11.2000 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 51,0 |
| 26.08.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,3 | 08.11.2000 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 50,9 |
| 27.08.2000 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 75,7 | 09.11.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,7 |
| 28.08.2000 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 75,1 | 10.11.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,5 |
| 29.08.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 74,5 | 11.11.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,3 |
| 30.08.2000 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 73,9 | 12.11.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,1 |
| 31.08.2000 | 4,8 | 0,0 | 0,0 | 73,3 | 13.11.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,9 |
| 01.09.2000 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 72,7 | 14.11.2000 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 49,7 |
| 02.09.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 72,2 | 15.11.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 49,5 |
| 03.09.2000 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 71,6 | 16.11.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,4 |
| 04.09.2000 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 71,0 | 17.11.2000 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 49,2 |
| 05.09.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 70,4 | 18.11.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,1 |
| 06.09.2000 | 5,4 | 0,0 | 0,0 | 69,8 | 19.11.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,0 |
| 07.09.2000 | 13,4 | 0,0 | 0,0 | 69,2 | 20.11.2000 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 48,8 |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|------|--------|------------|--------|-------|-------|--------|
| 21.11.2000 | 4,8 | 0,0 | 0,0 | 48,7 | 03.02.2001 | 15,6 | 0,0 | 0,0 | 49,8 |
| 22.11.2000 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 48,6 | 04.02.2001 | 7,6 | 276,5 | 74,2 | 49,9 |
| 23.11.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,4 | 05.02.2001 | 1,4 | 34,0 | 14,9 | 50,0 |
| 24.11.2000 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 48,3 | 06.02.2001 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 50,1 |
| 25.11.2000 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 48,2 | 07.02.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,1 |
| 26.11.2000 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 48,0 | 08.02.2001 | 0,0 | 29,1 | 39,0 | 50,2 |
| 27.11.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,9 | 09.02.2001 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 50,3 |
| 28.11.2000 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 47,8 | 10.02.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,4 |
| 29.11.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,6 | 11.02.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,5 |
| 30.11.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,5 | 12.02.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,6 |
| 01.12.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,4 | 13.02.2001 | 0,8 | 4,7 | 1,6 | 50,7 |
| 02.12.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,2 | 14.02.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,7 |
| 03.12.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,1 | 15.02.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,8 |
| 04.12.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,0 | 16.02.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,9 |
| 05.12.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,8 | 17.02.2001 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 51,0 |
| 06.12.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,7 | 18.02.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,1 |
| 07.12.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,6 | 19.02.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,2 |
| 08.12.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,4 | 20.02.2001 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 51,3 |
| 09.12.2000 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 46,3 | 21.02.2001 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 51,4 |
| 10.12.2000 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 46,2 | 22.02.2001 | 5,8 | 0,0 | 0,0 | 51,5 |
| 11.12.2000 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 46,0 | 23.02.2001 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 51,6 |
| 12.12.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,9 | 24.02.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,7 |
| 13.12.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,8 | 25.02.2001 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 51,8 |
| 14.12.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,6 | 26.02.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,9 |
| 15.12.2000 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 45,5 | 27.02.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,0 |
| 16.12.2000 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 45,6 | 28.02.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,1 |
| 17.12.2000 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 45,7 | 01.03.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,2 |
| 18.12.2000 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 45,8 | 02.03.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,3 |
| 19.12.2000 | 11,6 | 0,0 | 0,0 | 45,8 | 03.03.2001 | 8,4 | 0,0 | 0,0 | 52,4 |
| 20.12.2000 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 45,9 | 04.03.2001 | 10,4 | 0,0 | 0,0 | 52,5 |
| 21.12.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,0 | 05.03.2001 | 7,8 | 0,0 | 0,0 | 52,5 |
| 22.12.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,1 | 06.03.2001 | 0,0 | 13,9 | 5,8 | 52,6 |
| 23.12.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,2 | 07.03.2001 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 52,7 |
| 24.12.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,3 | 08.03.2001 | 1,2 | 5,2 | 1,8 | 52,8 |
| 25.12.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,4 | 09.03.2001 | 11,6 | 0,0 | 0,0 | 52,9 |
| 26.12.2000 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 46,4 | 10.03.2001 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 53,0 |
| 27.12.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,5 | 11.03.2001 | 6,4 | 50,2 | 20,5 | 53,1 |
| 28.12.2000 | 4,2 | 0,0 | 0,0 | 46,6 | 12.03.2001 | 6,8 | 35,6 | 17,8 | 53,2 |
| 29.12.2000 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 46,7 | 13.03.2001 | 6,6 | 111,6 | 149,6 | 53,3 |
| 30.12.2000 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 46,8 | 14.03.2001 | 3,2 | 58,9 | 29,6 | 53,4 |
| 31.12.2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,9 | 15.03.2001 | 3,2 | 141,6 | 71,2 | 53,5 |
| 01.01.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,0 | 16.03.2001 | 0,0 | 25,6 | 12,9 | 53,8 |
| 02.01.2001 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 47,0 | 17.03.2001 | 4,8 | 27,0 | 13,6 | 54,1 |
| 03.01.2001 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 47,1 | 18.03.2001 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 54,4 |
| 04.01.2001 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 47,2 | 19.03.2001 | 5,2 | 35,7 | 18,0 | 54,7 |
| 05.01.2001 | 6,6 | 0,2 | 0,1 | 47,3 | 20.03.2001 | 7,2 | 13,0 | 6,5 | 55,0 |
| 06.01.2001 | 11,2 | 0,0 | 0,0 | 47,4 | 21.03.2001 | 14,4 | 240,8 | 266,3 | 55,2 |
| 07.01.2001 | 26,8 | 154,5 | 59,0 | 47,5 | 22.03.2001 | 7,6 | 101,5 | 106,8 | 55,5 |
| 08.01.2001 | 7,8 | 309,1 | 89,5 | 47,6 | 23.03.2001 | 7,8 | 113,3 | 63,5 | 55,8 |
| 09.01.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,6 | 24.03.2001 | 8,8 | 248,8 | 256,8 | 56,1 |
| 10.01.2001 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 47,7 | 25.03.2001 | 20,0 | 246,3 | 193,9 | 56,4 |
| 11.01.2001 | 4,4 | 66,0 | 18,0 | 47,8 | 26.03.2001 | 2,2 | 153,2 | 45,5 | 56,7 |
| 12.01.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,9 | 27.03.2001 | 0,0 | 53,0 | 9,7 | 57,0 |
| 13.01.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,0 | 28.03.2001 | 0,0 | 45,6 | 8,3 | 57,3 |
| 14.01.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,1 | 29.03.2001 | 4,6 | 0,0 | 0,0 | 57,6 |
| 15.01.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,2 | 30.03.2001 | 9,0 | 53,6 | 15,5 | 57,9 |
| 16.01.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,3 | 31.03.2001 | 0,0 | 39,4 | 26,2 | 58,1 |
| 17.01.2001 | 0,0 | 113,2 | 30,9 | 48,3 | 01.04.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,4 |
| 18.01.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,4 | 02.04.2001 | 0,0 | 30,8 | 7,3 | 58,7 |
| 19.01.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,5 | 03.04.2001 | 0,0 | 13,1 | 3,1 | 59,0 |
| 20.01.2001 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 48,6 | 04.04.2001 | 1,0 | 10,2 | 2,4 | 59,3 |
| 21.01.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,7 | 05.04.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,6 |
| 22.01.2001 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 48,8 | 06.04.2001 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 59,9 |
| 23.01.2001 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 48,9 | 07.04.2001 | 10,8 | 0,0 | 0,0 | 60,2 |
| 24.01.2001 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 48,9 | 08.04.2001 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 60,5 |
| 25.01.2001 | 3,8 | 0,0 | 0,0 | 49,0 | 09.04.2001 | 0,4 | 16,8 | 4,1 | 60,8 |
| 26.01.2001 | 1,0 | 47,2 | 66,1 | 49,1 | 10.04.2001 | 6,0 | 0,0 | 0,0 | 61,0 |
| 27.01.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,2 | 11.04.2001 | 0,2 | 3,3 | 0,7 | 61,3 |
| 28.01.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,3 | 12.04.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,6 |
| 29.01.2001 | 0,0 | 2,3 | 0,9 | 49,4 | 13.04.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,9 |
| 30.01.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,5 | 14.04.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,2 |
| 31.01.2001 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 49,5 | 15.04.2001 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 62,5 |
| 01.02.2001 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 49,6 | 16.04.2001 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 61,9 |
| 02.02.2001 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 49,7 | 17.04.2001 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 61,2 |

| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|-----|--------|------------|--------|-------|-----|--------|
| 18.04.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,6 | 01.07.2001 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 63,4 |
| 19.04.2001 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 60,0 | 02.07.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 63,6 |
| 20.04.2001 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 59,3 | 03.07.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 63,9 |
| 21.04.2001 | 8,8 | 0,0 | 0,0 | 58,7 | 04.07.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,1 |
| 22.04.2001 | 4,4 | 0,0 | 0,0 | 58,1 | 05.07.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,3 |
| 23.04.2001 | 0,0 | 0,4 | 0,1 | 57,4 | 06.07.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,5 |
| 24.04.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56,8 | 07.07.2001 | 18,6 | 0,0 | 0,0 | 64,7 |
| 25.04.2001 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 56,2 | 08.07.2001 | 6,4 | 0,0 | 0,0 | 65,0 |
| 26.04.2001 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 55,5 | 09.07.2001 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 65,2 |
| 27.04.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,9 | 10.07.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,4 |
| 28.04.2001 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 54,3 | 11.07.2001 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 65,6 |
| 29.04.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,6 | 12.07.2001 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 65,8 |
| 30.04.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 53,0 | 13.07.2001 | 4,4 | 0,0 | 0,0 | 66,1 |
| 01.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,4 | 14.07.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 66,3 |
| 02.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,7 | 15.07.2001 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 66,5 |
| 03.05.2001 | 20,0 | 0,0 | 0,0 | 51,1 | 16.07.2001 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 67,1 |
| 04.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,5 | 17.07.2001 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 67,6 |
| 05.05.2001 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 49,8 | 18.07.2001 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 68,2 |
| 06.05.2001 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 49,2 | 19.07.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 68,8 |
| 07.05.2001 | 0,0 | 1,2 | 0,0 | 48,6 | 20.07.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69,4 |
| 08.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,9 | 21.07.2001 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 69,9 |
| 09.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,3 | 22.07.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 70,5 |
| 10.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,7 | 23.07.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 71,1 |
| 11.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,0 | 24.07.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 71,7 |
| 12.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,4 | 25.07.2001 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 72,2 |
| 13.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,8 | 26.07.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 72,8 |
| 14.05.2001 | 11,4 | 0,0 | 0,0 | 44,1 | 27.07.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 73,4 |
| 15.05.2001 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 43,5 | 28.07.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 73,9 |
| 16.05.2001 | 11,2 | 0,0 | 0,0 | 44,0 | 29.07.2001 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 74,5 |
| 17.05.2001 | 5,8 | 0,0 | 0,0 | 44,6 | 30.07.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,1 |
| 18.05.2001 | 21,2 | 0,0 | 0,0 | 45,1 | 31.07.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,7 |
| 19.05.2001 | 0,0 | 5,8 | 3,5 | 45,6 | 01.08.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,2 |
| 20.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,1 | 02.08.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,8 |
| 21.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,7 | 03.08.2001 | 6,0 | 0,0 | 0,0 | 77,4 |
| 22.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,2 | 04.08.2001 | 18,2 | 0,0 | 0,0 | 78,0 |
| 23.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,7 | 05.08.2001 | 4,2 | 0,0 | 0,0 | 78,5 |
| 24.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,3 | 06.08.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 79,1 |
| 25.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,8 | 07.08.2001 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 79,7 |
| 26.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,3 | 08.08.2001 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 80,2 |
| 27.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,9 | 09.08.2001 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 80,8 |
| 28.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,4 | 10.08.2001 | 10,8 | 0,0 | 0,0 | 81,4 |
| 29.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 50,9 | 11.08.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,0 |
| 30.05.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,4 | 12.08.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,5 |
| 31.05.2001 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 52,0 | 13.08.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,1 |
| 01.06.2001 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 52,5 | 14.08.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 83,7 |
| 02.06.2001 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 53,0 | 15.08.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 84,3 |
| 03.06.2001 | 6,2 | 0,0 | 0,0 | 53,6 | 16.08.2001 | 5,8 | 0,0 | 0,0 | 83,8 |
| 04.06.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,1 | 17.08.2001 | 4,2 | 0,0 | 0,0 | 83,3 |
| 05.06.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,6 | 18.08.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,8 |
| 06.06.2001 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 55,2 | 19.08.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 82,3 |
| 07.06.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,7 | 20.08.2001 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 81,8 |
| 08.06.2001 | 11,4 | 0,0 | 0,0 | 56,2 | 21.08.2001 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 81,3 |
| 09.06.2001 | 9,8 | 0,0 | 0,0 | 56,7 | 22.08.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 80,8 |
| 10.06.2001 | 12,2 | 0,0 | 0,0 | 57,3 | 23.08.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 80,3 |
| 11.06.2001 | 10,4 | 0,0 | 0,0 | 57,8 | 24.08.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 79,8 |
| 12.06.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,3 | 25.08.2001 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 79,3 |
| 13.06.2001 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | 58,9 | 26.08.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 78,8 |
| 14.06.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,4 | 27.08.2001 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 78,3 |
| 15.06.2001 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | 59,9 | 28.08.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 77,9 |
| 16.06.2001 | 9,0 | 0,0 | 0,0 | 60,1 | 29.08.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 77,4 |
| 17.06.2001 | 9,8 | 0,0 | 0,0 | 60,4 | 30.08.2001 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 76,9 |
| 18.06.2001 | 9,2 | 0,0 | 0,0 | 60,6 | 31.08.2001 | 6,2 | 0,0 | 0,0 | 76,4 |
| 19.06.2001 | 7,6 | 0,0 | 0,0 | 60,8 | 01.09.2001 | 15,8 | 0,0 | 0,0 | 75,9 |
| 20.06.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,0 | 02.09.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 75,4 |
| 21.06.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,2 | 03.09.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 74,9 |
| 22.06.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,5 | 04.09.2001 | 7,2 | 0,0 | 0,0 | 74,4 |
| 23.06.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,7 | 05.09.2001 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 73,9 |
| 24.06.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 61,9 | 06.09.2001 | 0,8 | 0,0 | 0,0 | 73,4 |
| 25.06.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,1 | 07.09.2001 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 72,9 |
| 26.06.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 62,3 | 08.09.2001 | 39,2 | 0,0 | 0,0 | 72,4 |
| 27.06.2001 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 62,5 | 09.09.2001 | 3,8 | 0,2 | 0,0 | 72,0 |
| 28.06.2001 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 62,8 | 10.09.2001 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 71,5 |
| 29.06.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 63,0 | 11.09.2001 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 71,0 |
| 30.06.2001 | 4,8 | 0,0 | 0,0 | 63,2 | 12.09.2001 | 12,2 | 0,0 | 0,0 | 70,5 |

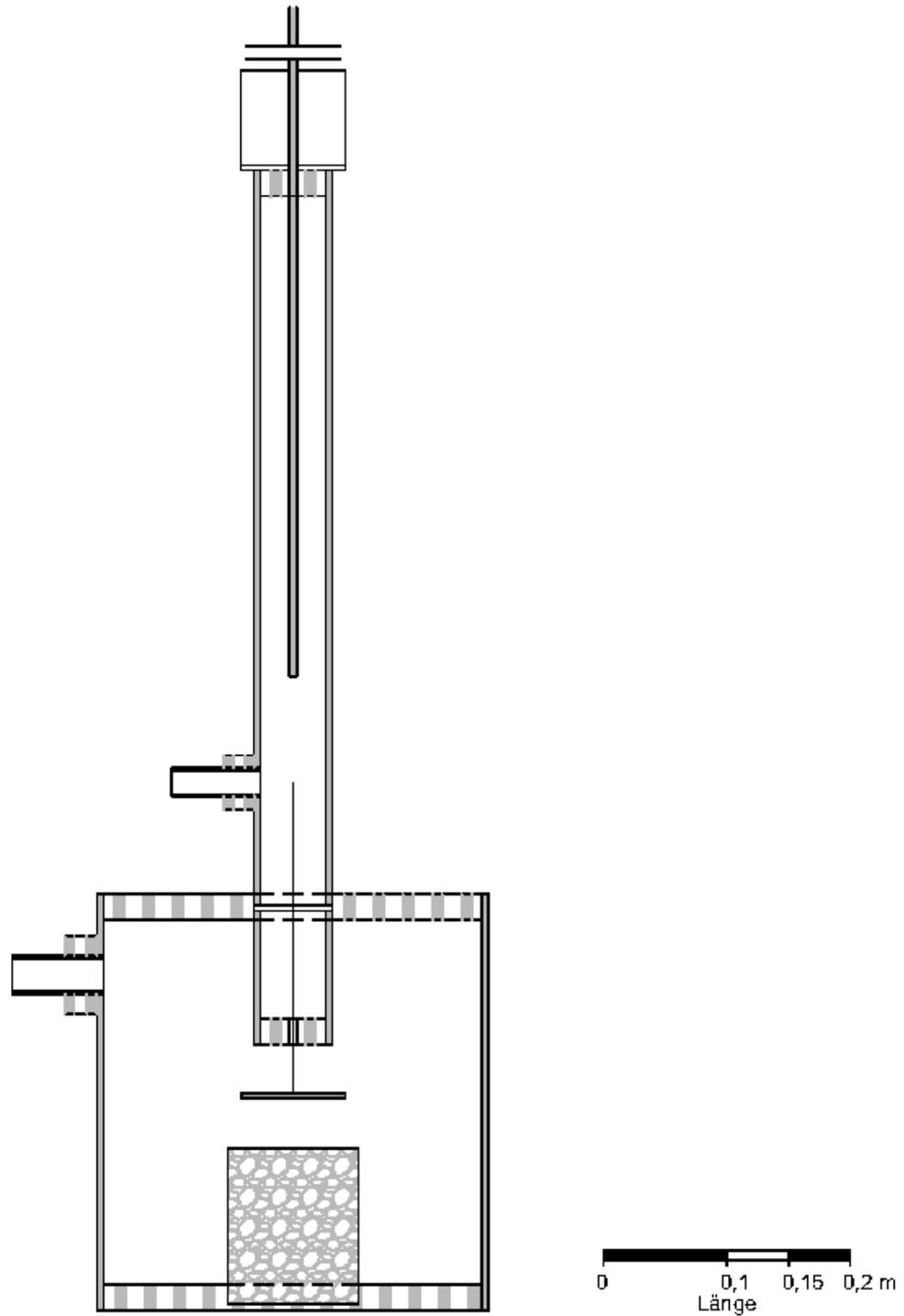
| Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck | Datum | Precip | Disch | Sed | Bedeck |
|------------|--------|-------|-----|--------|------------|--------|-------|------|--------|
| 13.09.2001 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 70,0 | 07.11.2001 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 48,2 |
| 14.09.2001 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 69,5 | 08.11.2001 | 14,6 | 0,0 | 0,0 | 48,4 |
| 15.09.2001 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 69,0 | 09.11.2001 | 0,2 | 0,2 | 0,0 | 48,5 |
| 16.09.2001 | 8,2 | 0,2 | 0,0 | 68,2 | 10.11.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,7 |
| 17.09.2001 | 2,8 | 0,0 | 0,0 | 67,4 | 11.11.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,9 |
| 18.09.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 66,5 | 12.11.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,0 |
| 19.09.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 65,7 | 13.11.2001 | 7,2 | 0,0 | 0,0 | 49,2 |
| 20.09.2001 | 7,4 | 0,0 | 0,0 | 64,9 | 14.11.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,3 |
| 21.09.2001 | 9,6 | 0,0 | 0,0 | 64,1 | 15.11.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,5 |
| 22.09.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 63,3 | 16.11.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,4 |
| 23.09.2001 | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 62,5 | 17.11.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,2 |
| 24.09.2001 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 61,6 | 18.11.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,1 |
| 25.09.2001 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 60,8 | 19.11.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 49,0 |
| 26.09.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,0 | 20.11.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,8 |
| 27.09.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 59,2 | 21.11.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,7 |
| 28.09.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,4 | 22.11.2001 | 9,6 | 0,0 | 0,0 | 48,6 |
| 29.09.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 57,6 | 23.11.2001 | 2,6 | 0,0 | 0,0 | 48,4 |
| 30.09.2001 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 56,7 | 24.11.2001 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 48,3 |
| 01.10.2001 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 55,9 | 25.11.2001 | 8,4 | 0,0 | 0,0 | 48,2 |
| 02.10.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 55,1 | 26.11.2001 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 48,0 |
| 03.10.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 54,3 | 27.11.2001 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 47,9 |
| 04.10.2001 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 53,5 | 28.11.2001 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | 47,8 |
| 05.10.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 52,7 | 29.11.2001 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 47,6 |
| 06.10.2001 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 51,8 | 30.11.2001 | 10,0 | 0,0 | 0,0 | 47,5 |
| 07.10.2001 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 51,0 | 01.12.2001 | 7,6 | 2,3 | 0,6 | 47,4 |
| 08.10.2001 | 2,4 | 0,0 | 0,0 | 50,2 | 02.12.2001 | 6,2 | 107,2 | 25,7 | 47,2 |
| 09.10.2001 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 49,4 | 03.12.2001 | 0,2 | 92,7 | 26,0 | 47,1 |
| 10.10.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,6 | 04.12.2001 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | 47,0 |
| 11.10.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,8 | 05.12.2001 | 3,0 | 52,5 | 10,2 | 46,8 |
| 12.10.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,9 | 06.12.2001 | 3,4 | 34,0 | 8,8 | 46,7 |
| 13.10.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,1 | 07.12.2001 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 46,6 |
| 14.10.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,3 | 08.12.2001 | 0,0 | 33,6 | 6,4 | 46,4 |
| 15.10.2001 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 44,5 | 09.12.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,3 |
| 16.10.2001 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 44,7 | 10.12.2001 | 0,0 | 6,4 | 1,2 | 46,2 |
| 17.10.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,8 | 11.12.2001 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 46,0 |
| 18.10.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,0 | 12.12.2001 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 45,9 |
| 19.10.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,1 | 13.12.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,8 |
| 20.10.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,3 | 14.12.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,6 |
| 21.10.2001 | 11,6 | 0,0 | 0,0 | 45,5 | 15.12.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,5 |
| 22.10.2001 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 45,6 | 16.12.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,5 |
| 23.10.2001 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 45,8 | 17.12.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,5 |
| 24.10.2001 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 46,0 | 18.12.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,5 |
| 25.10.2001 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | 46,1 | 19.12.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,5 |
| 26.10.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,3 | 20.12.2001 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 45,5 |
| 27.10.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,4 | 21.12.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,5 |
| 28.10.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,6 | 22.12.2001 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 45,5 |
| 29.10.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,8 | 23.12.2001 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 45,5 |
| 30.10.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 46,9 | 24.12.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,5 |
| 31.10.2001 | 8,6 | 0,0 | 0,0 | 47,1 | 25.12.2001 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 45,5 |
| 01.11.2001 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 47,2 | 26.12.2001 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 45,5 |
| 02.11.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,4 | 27.12.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 45,5 |
| 03.11.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,6 | 28.12.2001 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 45,5 |
| 04.11.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,7 | 29.12.2001 | 17,6 | 0,8 | 0,0 | 45,5 |
| 05.11.2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 47,9 | 30.12.2001 | 2,8 | 123,9 | 0,0 | 45,5 |
| 06.11.2001 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 48,0 | 31.12.2001 | 0,0 | 1,9 | 0,0 | 45,5 |

Anhang 3-2: Aufstellung der abgegrenzten Einzelevents TEZG 03 Scheyern

| Nr. | Datum von | Datum bis | Monat / Jahr | Eventdauer (d) | Abfluss Nr. von | Abfluss Nr. bis | Regen Nr. von | Regen Nr. bis | Niederschlag Höhe (mm) | Abfluss Volumen (m³) | Abfluss Höhe (mm) | Abfluss-beiwert (-) | Sediment Masse (kg) |
|-----|------------------|------------------|--------------|----------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|------------------------|----------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 11.04.1994 09:31 | 16.04.1994 16:45 | 04/1994 | 5.30 | 99 | 100 | 8 | 8 | 125.2 | 1 138.6 | 27.1 | 21.7% | 686.9 |
| 2 | 25.01.1995 05:41 | 26.01.1995 16:15 | 01/1995 | 1.44 | 126 | 127 | 164 | 164 | 10.4 | 154.4 | 3.7 | 35.3% | 47.4 |
| 3 | 28.01.1995 03:43 | 29.01.1995 16:45 | 01/1995 | 1.54 | 129 | 129 | 167 | 169 | 9.2 | 128.7 | 3.1 | 33.3% | 41.1 |
| 4 | 30.01.1995 03:37 | 31.01.1995 16:55 | 01/1995 | 1.55 | 130 | 130 | 170 | 170 | 6.6 | 87.4 | 2.1 | 31.5% | 24.3 |
| 5 | 18.03.1995 21:05 | 22.03.1995 17:31 | 03/1995 | 3.85 | 137 | 138 | 206 | 208 | 26.4 | 44.3 | 1.1 | 4.0% | 7.9 |
| 6 | 31.03.1995 18:39 | 02.04.1995 17:19 | 04/1995 | 1.94 | 141 | 141 | 214 | 214 | 11.4 | 52.3 | 1.2 | 10.9% | 9.9 |
| 7 | 01.06.1995 09:52 | 04.06.1995 09:55 | 06/1995 | 3.00 | 147 | 147 | 243 | 246 | 47.6 | 113.4 | 2.7 | 5.7% | 24.3 |
| 8 | 08.06.1995 19:15 | 13.06.1995 14:48 | 06/1995 | 4.81 | 149 | 149 | 251 | 253 | 29.2 | 121.8 | 2.9 | 9.9% | 18.9 |
| 9 | 14.06.1995 02:21 | 15.06.1995 16:30 | 06/1995 | 1.59 | 150 | 150 | 254 | 255 | 18 | 179.1 | 4.3 | 23.7% | 18.5 |
| 10 | 08.07.1996 04:18 | 11.07.1996 14:30 | 07/1996 | 3.42 | 175 | 175 | 435 | 436 | 72.2 | 587.0 | 14.0 | 19.4% | 248.0 |
| 11 | 11.07.1996 23:22 | 15.07.1996 08:00 | 07/1996 | 3.36 | 175 | 175 | 437 | 438 | 3 | 69.8 | 1.7 | 55.4% | 28.3 |
| 12 | 13.02.1997 13:40 | 18.02.1997 09:03 | 02/1997 | 4.81 | 189 | 189 | 524 | 526 | 19.8 | 251.6 | 6.0 | 30.3% | 63.7 |
| 13 | 30.09.1998 18:16 | 02.10.1998 09:15 | 10/1998 | 1.62 | 224 | 224 | 790 | 792 | 38.6 | 129.7 | 3.1 | 8.0% | 187.6 |
| 14 | 28.10.1998 22:25 | 29.10.1998 11:20 | 10/1998 | 0.54 | 228 | 228 | 815 | 815 | 27.4 | 487.6 | 11.6 | 42.4% | 5 754.5 |
| 15 | 29.10.1998 22:19 | 01.11.1998 11:20 | 10/1998 | 2.43 | 228 | 228 | 817 | 819 | 31 | 730.0 | 17.4 | 56.1% | 1 319.7 |
| 16 | 03.11.1998 00:34 | 06.11.1998 10:55 | 11/1998 | 3.43 | 228 | 228 | 820 | 820 | 28.4 | 558.8 | 13.3 | 46.8% | 171.1 |
| 17 | 08.11.1998 23:54 | 12.11.1998 12:10 | 11/1998 | 3.51 | 229 | 229 | 822 | 823 | 35.6 | 530.1 | 12.6 | 35.5% | 1 974.7 |
| 18 | 15.11.1998 00:40 | 17.11.1998 16:00 | 11/1998 | 2.64 | 230 | 230 | 825 | 827 | 15.4 | 280.5 | 6.7 | 43.4% | 214.6 |
| 19 | 27.11.1998 04:50 | 01.12.1998 13:50 | 11/1998 | 4.37 | 230 | 230 | 832 | 832 | 11 | 53.4 | 1.3 | 11.6% | 23.7 |
| 20 | 07.01.1999 19:13 | 12.01.1999 13:55 | 01/1999 | 4.78 | 233 | 233 | 848 | 850 | 22.2 | 97.6 | 2.3 | 10.5% | 66.1 |
| 21 | 01.03.1999 15:49 | 02.03.1999 14:50 | 03/1999 | 0.96 | 238 | 238 | 880 | 880 | 8.6 | 91.5 | 2.2 | 25.3% | 103.1 |
| 22 | 05.03.1999 01:41 | 05.03.1999 15:10 | 03/1999 | 0.56 | 238 | 238 | 881 | 881 | 5.2 | 119.3 | 2.8 | 54.6% | 21.5 |
| 23 | 09.03.1999 00:47 | 11.03.1999 14:50 | 03/1999 | 2.59 | 240 | 240 | 884 | 885 | 28.2 | 234.6 | 5.6 | 19.8% | 502.1 |
| 24 | 15.04.1999 21:00 | 20.04.1999 08:40 | 04/1999 | 4.49 | 247 | 247 | 899 | 904 | 26.6 | 22.5 | 0.5 | 2.0% | 8.5 |
| 25 | 20.05.1999 14:55 | 25.05.1999 08:00 | 05/1999 | 4.71 | 253 | 253 | 917 | 917 | 76.6 | 732.8 | 17.4 | 22.8% | 272.7 |
| 26 | 02.06.1999 19:51 | 04.06.1999 13:05 | 06/1999 | 1.72 | 254 | 255 | 923 | 924 | 35 | 6.7 | 0.2 | 0.5% | 15.7 |
| 27 | 16.03.2000 00:00 | 22.03.2000 16:00 | 03/2000 | 6.67 | 289 | 289 | 9999 | 9999 | 27 | 91.3 | 2.2 | 8.1% | 11.3 |
| 28 | 30.03.2000 00:00 | 05.04.2000 15:00 | 04/2000 | 6.63 | 291 | 291 | 9999 | 9999 | 37.4 | 277.8 | 6.6 | 17.7% | 60.3 |
| 29 | 05.04.2000 00:00 | 10.04.2000 04:08 | 04/2000 | 5.17 | 292 | 292 | 9999 | 9999 | 39.2 | 285.5 | 6.8 | 17.3% | 92.1 |
| 30 | 20.09.2000 19:35 | 25.09.2000 09:03 | 09/2000 | 4.56 | 308 | 309 | 1028 | 1028 | 69.8 | 90.0 | 2.1 | 3.1% | 19.8 |
| 31 | 05.10.2000 04:35 | 08.10.2000 15:00 | 10/2000 | 3.43 | 311 | 311 | 1033 | 1035 | 31 | 52.8 | 1.3 | 4.1% | 11.2 |
| 32 | 10.10.2000 13:39 | 12.10.2000 17:30 | 10/2000 | 2.16 | 311 | 312 | 1037 | 1038 | 6.2 | 45.2 | 1.1 | 17.3% | 10.9 |
| 33 | 03.02.2001 01:41 | 08.02.2001 08:41 | 02/2001 | 5.29 | 325 | 325 | 1092 | 1095 | 25 | 339.5 | 8.1 | 32.3% | 128.0 |
| 34 | 08.03.2001 22:27 | 12.03.2001 15:30 | 03/2001 | 3.71 | 329 | 329 | 1108 | 1111 | 21 | 85.8 | 2.0 | 9.7% | 38.3 |
| 35 | 12.03.2001 17:41 | 14.03.2001 11:10 | 03/2001 | 1.73 | 329 | 329 | 1112 | 1114 | 13.2 | 170.4 | 4.1 | 30.7% | 180.2 |
| 36 | 14.03.2001 16:23 | 16.03.2001 10:30 | 03/2001 | 1.75 | 329 | 329 | 1115 | 1115 | 5.8 | 167.2 | 4.0 | 68.6% | 83.1 |
| 37 | 17.03.2001 16:04 | 20.03.2001 15:15 | 03/2001 | 2.97 | 329 | 329 | 1116 | 1117 | 10.2 | 75.7 | 1.8 | 17.7% | 38.1 |
| 38 | 20.03.2001 15:55 | 22.03.2001 10:40 | 03/2001 | 1.78 | 331 | 331 | 1118 | 1119 | 26.2 | 342.3 | 8.1 | 31.1% | 373.1 |
| 39 | 22.03.2001 13:25 | 28.03.2001 15:00 | 03/2001 | 6.07 | 331 | 331 | 1120 | 1124 | 41.8 | 860.2 | 20.5 | 49.0% | 577.7 |
| 40 | 29.03.2001 20:32 | 03.04.2001 14:11 | 03/2001 | 4.74 | 332 | 332 | 1125 | 1126 | 13.6 | 137.0 | 3.3 | 24.0% | 52.1 |
| 41 | 01.12.2001 07:30 | 03.12.2001 11:00 | 12/2001 | 2.15 | 360 | 360 | 1246 | 1246 | 13.8 | 199.9 | 4.8 | 34.5% | 51.7 |
| 42 | 04.12.2001 17:48 | 06.12.2001 09:00 | 12/2001 | 1.63 | 360 | 360 | 1249 | 1251 | 8 | 120.0 | 2.9 | 35.7% | 19.0 |

| Nr. | Datum von | Datum bis | Niederschlag Dauer (sum) (24h) | Niederschlag Intensität (avg) (mm/h) | Niederschlag Intensität (15min-max) (mm/h) | Niederschlag Vorregen (5d) (mm) | Zeit seit letztem Erosionsereignis (d) | Zeit seit letzten starken Erosionsereignis (d) | Zeit seit letzter Bearbeitung (d) | Bedeckungsgrad |
|-----|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--|---------------------------------|--|--|-----------------------------------|----------------|
| 1 | 11.04.1994 09:31 | 16.04.1994 16:45 | 3.03 | 1.7 | 9.6 | 6.2 | 14 | 9999 | 231 | 41% |
| 2 | 25.01.1995 05:41 | 26.01.1995 16:15 | 0.21 | 2.1 | 5.6 | 12.8 | 2 | 285 | 104 | 17% |
| 3 | 28.01.1995 03:43 | 29.01.1995 16:45 | 0.34 | 1.1 | 2.4 | 23 | 2 | 3 | 107 | 18% |
| 4 | 30.01.1995 03:37 | 31.01.1995 16:55 | 0.56 | 0.5 | 3.2 | 25 | 2 | 2 | 109 | 21% |
| 5 | 18.03.1995 21:05 | 22.03.1995 17:31 | 2.04 | 0.5 | 3.2 | 13.6 | 47 | 49 | 156 | 44% |
| 6 | 31.03.1995 18:39 | 02.04.1995 17:19 | 1.41 | 0.3 | 3.2 | 17.2 | 2 | 12 | 169 | 56% |
| 7 | 01.06.1995 09:52 | 04.06.1995 09:55 | 1.05 | 1.9 | 5.6 | 18.2 | 18 | 61 | 231 | 76% |
| 8 | 08.06.1995 19:15 | 13.06.1995 14:48 | 1.58 | 0.8 | 5.6 | 17.4 | 6 | 9 | 238 | 65% |
| 9 | 14.06.1995 02:21 | 15.06.1995 16:30 | 0.71 | 1.1 | 8 | 29.2 | 2 | 2 | 244 | 60% |
| 10 | 08.07.1996 04:18 | 11.07.1996 14:30 | 2.29 | 1.3 | 14.4 | 27.2 | 141 | 390 | 74 | 41% |
| 11 | 11.07.1996 23:22 | 15.07.1996 08:00 | 0.32 | 0.4 | 1.6 | 73.4 | 1 | 1 | 77 | 45% |
| 12 | 13.02.1997 13:40 | 18.02.1997 09:03 | 0.69 | 1.2 | 5.6 | 9.2 | 72 | 72 | 71 | 38% |
| 13 | 30.09.1998 18:16 | 02.10.1998 09:15 | 0.99 | 1.6 | 7.2 | 10.6 | 18 | 592 | 1 | 2% |
| 14 | 28.10.1998 22:25 | 29.10.1998 11:20 | 0.31 | 3.7 | 11.2 | 41.4 | 3 | 27 | 7 | 5% |
| 15 | 29.10.1998 22:19 | 01.11.1998 11:20 | 1.24 | 1.0 | 10.4 | 64.4 | 1 | 1 | 8 | 5% |
| 16 | 03.11.1998 00:34 | 06.11.1998 10:55 | 1.43 | 0.8 | 4.8 | 64.6 | 2 | 2 | 13 | 8% |
| 17 | 08.11.1998 23:54 | 12.11.1998 12:10 | 2.25 | 0.7 | 4.8 | 14.8 | 3 | 3 | 18 | 10% |
| 18 | 15.11.1998 00:40 | 17.11.1998 16:00 | 2.02 | 0.3 | 4 | 16.2 | 4 | 4 | 25 | 14% |
| 19 | 27.11.1998 04:50 | 01.12.1998 13:50 | 0.48 | 1.0 | 2.4 | 0 | 14 | 14 | 37 | 14% |
| 20 | 07.01.1999 19:13 | 12.01.1999 13:55 | 0.95 | 1.0 | 4 | 0 | 6 | 24 | 78 | 24% |
| 21 | 01.03.1999 15:49 | 02.03.1999 14:50 | 0.94 | 0.4 | 5.6 | 0 | 2 | 2 | 131 | 48% |
| 22 | 05.03.1999 01:41 | 05.03.1999 15:10 | 0.43 | 0.5 | 1.6 | 8.6 | 3 | 3 | 135 | 50% |
| 23 | 09.03.1999 00:47 | 11.03.1999 14:50 | 1.15 | 1.0 | 4.8 | 6.6 | 4 | 4 | 139 | 52% |
| 24 | 15.04.1999 21:00 | 20.04.1999 08:40 | 2.11 | 0.5 | 4.8 | 9 | 38 | 39 | 19 | 59% |
| 25 | 20.05.1999 14:55 | 25.05.1999 08:00 | 2.57 | 1.2 | 8 | 0.2 | 6 | 31 | 54 | 90% |
| 26 | 02.06.1999 19:51 | 04.06.1999 13:05 | 0.37 | 3.9 | 33.6 | 3.6 | 8 | 8 | 67 | 89% |
| 27 | 16.03.2000 00:00 | 22.03.2000 16:00 | 1.75 | 0.6 | 1.6 | 8.8 | 3 | 43 | 203 | 70% |
| 28 | 30.03.2000 00:00 | 05.04.2000 15:00 | 1 | 1.6 | 2.6 | 10.8 | 2 | 4 | 217 | 62% |
| 29 | 05.04.2000 00:00 | 10.04.2000 04:08 | 0.33 | 4.9 | 12 | 1 | 1 | 4 | 223 | 58% |
| 30 | 20.09.2000 19:35 | 25.09.2000 09:03 | 1.64 | 1.8 | 10.4 | 11.2 | 2 | 53 | 138 | 64% |
| 31 | 05.10.2000 04:35 | 08.10.2000 15:00 | 2.24 | 0.6 | 4 | 1.4 | 1 | 16 | 153 | 59% |
| 32 | 10.10.2000 13:39 | 12.10.2000 17:30 | 0.5 | 0.5 | 2.4 | 34.2 | 3 | 3 | 158 | 57% |
| 33 | 03.02.2001 01:41 | 08.02.2001 08:41 | 1.37 | 0.8 | 4 | 1.4 | 5 | 8 | 95 | 33% |
| 34 | 08.03.2001 22:27 | 12.03.2001 15:30 | 1.49 | 0.6 | 3.2 | 18.4 | 3 | 31 | 128 | 47% |
| 35 | 12.03.2001 17:41 | 14.03.2001 11:10 | 0.52 | 1.1 | 3.2 | 21.2 | 1 | 1 | 132 | 51% |
| 36 | 14.03.2001 16:23 | 16.03.2001 10:30 | 0.56 | 0.4 | 5.6 | 21.4 | 1 | 1 | 134 | 54% |
| 37 | 17.03.2001 16:04 | 20.03.2001 15:15 | 0.8 | 0.5 | 4 | 19 | 1 | 1 | 137 | 59% |
| 38 | 20.03.2001 15:55 | 22.03.2001 10:40 | 1.18 | 0.9 | 5.6 | 10.2 | 1 | 1 | 140 | 63% |
| 39 | 22.03.2001 13:25 | 28.03.2001 15:00 | 2.24 | 0.8 | 5.6 | 36.4 | 1 | 1 | 142 | 65% |
| 40 | 29.03.2001 20:32 | 03.04.2001 14:11 | 0.44 | 1.3 | 6.4 | 22.8 | 2 | 2 | 149 | 75% |
| 41 | 01.12.2001 07:30 | 03.12.2001 11:00 | 1.05 | 0.5 | 2.4 | 20.8 | 1 | 246 | 109 | 48% |
| 42 | 04.12.2001 17:48 | 06.12.2001 09:00 | 0.38 | 0.9 | 2.4 | 26.4 | 2 | 2 | 112 | 48% |

Anhang 4-1: Konstruktionszeichnung des am ihwb im Rahmen dieser Dissertation entwickelten JETs



Anhang 5-1: Definierte Böden im Fischbach-Einzugsgebiet

Kategorie 1

Braunerden, grobboden-führende Kolluvisol (Braunerde- /Parabraunerde-derivate)

1a – Braunerde aus lössreichem, grusführendem Schluff über Sandgrus mit granitischem Plutoniten

1b – Braunerde aus lössarmen oder lössführenden, grusführendem Schluff über Lehmgrus oder Lehmschutt mit Plutoniten

1c – Braunerde aus lössführendem, grusführendem Schluff (Lehm) über Lehmschutt mit Metasedimentgestein (mit Vulkanit)

1d – Braunerde aus flachem lössführendem Grus- bzw. Schuttschluff über Schutt bzw. Lehmgrus mit Plutoniten

1e – Braunerde-Kolluvisol oder leicht vernässter Pseudogley-Kolluvisol aus lössreichem, grusführenden Kolluvialschluff über tiefem, lössreichen, grusführenden Schluff mit Plutoniten

1f – Parabraunerde oder Pseudogley-Parabraunerde aus lössreichem, grusführendem Schluff über lössreichem, grusführendem Lehm bzw. Schluff über Schuttlehm bzw. Lehmgrus

Kategorie 2

Löss, Lössderivate – Parabraunerde, Pararendzina, Kolluvisol / Kolluvialschluff aus Löss

2a – Parabraunerde (zum Teil erodiert) aus Löss (Pleistozän):

2b – Kolluvisol aus (carbonatführendem) Kolluvialschluff aus Löss:

2c- Pararendzina (Ah/C Boden) aus Löss

Kategorie 3

Gleye und Pseudogleye – vernässte Böden

3a - Auengleye aus Auenschluff zum Teil auch über Niedermoor oder über tiefem, kiesführendem Flusssand:

3b – Gleye aus grobbodenführendem Fluvial- oder Kolluvialschluff mit Plutoniten:

3c - Hanggleye aus grobbodenführendem Fluvialschluff mit Plutoniten:

3d - Pseudogleye oder Hangpseudogleye aus lössreichem, grusführendem Schluff über grusführendem Ton:

Anhang 5-2: Standardisiertes Versuchsprotokoll

Protokoll JET Messung

ihwb

1) Vorbereitung im Bodenlabor

| | |
|---|--------------------------|
| Datum _____ Uhrzeit _____ Durchführende Person _____ | |
| Probennummer oder Kodierung _____ Datum Probennahme _____ | |
| Foto des Labels wurde gemacht? <input type="checkbox"/> Foto der Probe vor Versuch Ober- / Unterseite wurden gemacht? <input type="checkbox"/> | |
| Ungestörte Feldprobe <input type="checkbox"/> ; Gestörte Feldprobe <input type="checkbox"/> ; Gestörte Laborprobe <input type="checkbox"/> | |
| Gewicht Probe + Zylinder (+ Deckel) _____ Gewicht Zylinder (+ Deckel) _____ Gewicht Bodenprobe _____ %-Wasser bezogen auf die Trockenmasse _____ %-Wasser bestimmt über: Ofentrocknung <input type="checkbox"/> ; Eingestellt <input type="checkbox"/> ; Vergleichsprobe <input type="checkbox"/> Nummer Vergleichsprobe _____ | Alle Probenarten |
| Bodenmasse + Schale für Trocknung _____ Datum, Uhrzeit Boden in Trockenschrank (Abluft bei 105°) _____ Bodenmasse trocken + Schale nach Trocknung _____ Datum, Uhrzeit Boden aus Trockenschrank _____ Gewicht Schale _____ Gewicht Wasser in der Probe _____ | Nur gestörte Feldproben |
| Trockenmasse Boden zur Mischung _____ Gewicht Wasser zur Mischung _____ (Flasche vor Mischung – Flasche nach Mischung) _____ | Nur gestörte Laborproben |
| Notizen zur Probe vor dem Versuch und zur Probeaufbereitung | |

Anhang 5-3: Überblick über alle durchgeführten JET-Versuche

| ID | Codierung | Bodenprobe | Datum | Boden | Art der Probe | W (%) | Dichte (kg/m³) | Höhe (cm) | Schub (Pa) | Anzahl (-) | Dauer (s) | T _{max} (cm) | Person (-) | T _c (Pa) | K _d (cm³/Ns) |
|----|-----------------------------|------------|------------|-------|---------------|-------|----------------|-----------|------------|------------|-----------|-----------------------|------------|---------------------|-------------------------|
| 1 | 1_Loe_070917_O_U_1_R | 1-1 | 18.01.2018 | L | U | 18,9 | 1,62 | 96 | 64,6 | 8 | 1350 | 2 | AR + JS | 4,5 | 4 |
| 2 | 1_Loe_070917_O_U_2_R | 1-2 | 17.01.2018 | L | U | 23,4 | 1,67 | 48 | 94,3 | 5 | 660 | 1,5 | JS | 5,3 | 3 |
| 3 | 1_Loe_070917_O_U_3_R | 1-3 | 18.01.2018 | L | U | 13,4 | 1,3 | 136 | 41,8 | 2 | 600 | 12 | JS | 0,02 | 80 |
| 4 | 1_Loe_070917_O_U_4_R | 1-4 | 03.11.2017 | L | U | 17,9 | 1,68 | 120 | 51 | 15 | 2510 | 2,4 | AH | 3,7 | 9 |
| 5 | 1_Loe_070917_O_U_5_R | 1-5 | 22.01.2018 | L | U | 21,3 | 1,49 | 96 | 64,9 | 9 | 2040 | 5,6 | JS | 0,6 | 4 |
| 6 | 1_Loe_070917_O_U_6_R | 1-6 | 20.10.2017 | L | U | 21,8 | 1,49 | 107 | 58,2 | 23 | 2480 | 11,3 | AH | 0,5 | 15 |
| 7 | 1_Loe_070917_O_G_1_R | 1-1 | 23.01.2018 | L | G | 18,9 | 1,83 | 96 | 64,9 | 9 | 1860 | 3,8 | JS | 1,3 | 4 |
| 8 | 1_Loe_070917_O_G_2_R | 1-2 | 25.01.2018 | L | G | 23,4 | 1,96 | 48 | 94,3 | 6 | 3600 | 0,4 | JS | 15,4 | 4 |
| 9 | 1_Loe_070917_O_G_3_R | 1-3 | 30.01.2018 | L | G | 13,4 | 1,72 | 96 | 64,9 | 11 | 1800 | 11,9 | JS | 0,01 | 30 |
| 10 | 1_Loe_070917_O_G_4_R | 1-4 | 30.01.2018 | L | G | 17,9 | 1,97 | 96 | 64,9 | 6 | 2100 | 2,3 | JS | 0,8 | 1 |
| 11 | 1_Loe_070917_O_G_5_R | 1-5 | 31.01.2018 | L | G | 21,3 | 1,87 | 48 | 94,3 | 7 | 3000 | 1,5 | JS | 4,2 | 0,5 |
| 12 | 1_Loe_070917_O_G_6_R | 1-6 | 31.01.2018 | L | G | 21,8 | 1,82 | 48 | 94,3 | 7 | 2700 | 2,1 | JS | 1,2 | 0,5 |
| 13 | 1_Sta_080817_V_L_1_Di_WgI05 | S | 08.08.2017 | S | L | 5 | 1,63 | 168 | 27,3 | 6 | 690 | 11,3 | AR + AH | 0,012 | 220 |
| 14 | 1_Sta_080817_V_L_2_Di_WgI10 | S | 09.08.2017 | S | L | 10 | 1,79 | 168 | 27,3 | 8 | 295 | 10 | AR + AH | 0,031 | 200 |
| 15 | 1_Sta_080817_S_L_3_R | S | 09.08.2017 | S | L | 15 | 2,1 | 168 | 27,3 | 10 | 1330 | 5,3 | AR + AH | 0,45 | 16 |
| 16 | 1_Sta_080817_S_L_4_Dr | S | 10.08.2017 | S | L | 15 | 2,02 | 168 | 27,3 | 9 | 1380 | 5,3 | AR + AH | 0,45 | 16 |
| 17 | 1_Sta_080817_S_L_5_Dr | S | 14.08.2017 | S | L | 15 | 2,13 | 183 | 18,3 | 17 | 5500 | 8,7 | AR + AH | 0,3 | 14 |
| 18 | 1_Sta_080817_S_L_6_Dr | S | 14.08.2017 | S | L | 15 | 2,17 | 183 | 18,3 | 14 | 1780 | 4,5 | AH | 0,43 | 15 |
| 19 | 1_Sta_080817_S_L_7_Dr | S | 15.08.2017 | S | L | 15 | 2,08 | 143 | 38,4 | 23 | 3770 | 9,4 | AH | 0,36 | 10 |
| 20 | 1_Sta_080817_S_L_8_Dr | S | 15.08.2017 | S | L | 15 | 2,04 | 143 | 38,4 | 19 | 2320 | 6,6 | AH | 0,55 | 10 |
| 21 | 1_Sta_080817_V_L_9_R | S | 02.11.2017 | S | L | 15 | 1,98 | 183 | 18,3 | 20 | 3270 | 8,1 | AH | 0,2 | 20 |
| 22 | 1_Sta_080817_V_L_10_WgI | S | 11.01.2018 | S | L | 20 | 1,97 | 120 | 51 | 3 | 1260 | 4,6 | AR + JS | 1,04 | 10 |
| 23 | 1_Sta_080817_V_L_11_WgI | S | 15.01.2018 | S | L | 12,1 | 1,94 | 172 | 22,4 | 10 | 840 | 4,3 | AR + JS | 0,2 | 18 |
| 24 | 1_Sta_080817_V_L_12_WgI | S | 15.01.2018 | S | L | 6,2 | 1,66 | 172 | 22,4 | 9 | 630 | 3,9 | AR + JS | 0,16 | 24 |
| 25 | 1_Loe_170317_L_L_Ah_R | Löss Ah2 | 18.08.2017 | L | L | 21,7 | 2,17 | 140 | 41,8 | 5 | 4340 | 0,47 | AR + PN | 7,4 | 8 |
| 26 | 1_Loe_170317_L_L_Bs_R | Löss Bs | 18.08.2017 | L | L | 11,1 | 2,16 | 140 | 41,8 | 6 | 4640 | 0,2 | AR + PN | 8,2 | 0,6 |
| 27 | 1_Loe_170317_L_L_C_R | Löss C | 18.08.2017 | L | L | 9,3 | 2,16 | 140 | 41,8 | 6 | 4040 | 2,85 | AR + PN | 2,1 | 2 |
| 28 | 1_Gru_220517_L_L_Ae_R | Grus Ah1 | 23.08.2017 | G | L | 11,9 | 2,26 | 163 | 28,7 | 7 | 4340 | 4,5 | PN | 0,71 | 6,5 |
| 29 | 1_Gru_220517_L_L_Bs_R | Grus Bsv | 23.08.2017 | G | L | 17,3 | 2,09 | 183 | 18,3 | 5 | 4280 | 3 | PN | 1,3 | 3 |
| 30 | 1_Gru_220517_L_L_Cv_R | Grus Cv1 | 23.08.2017 | G | L | 15,3 | 2,06 | 183 | 18,5 | 7 | 781 | 1,8 | PN | 2,4 | 150 |
| 31 | 1_Loe_160418_L_G_B_R | Löss Bs | 17.04.2018 | L | G | 23 | 2,04 | 23 | 108,2 | 7 | 1800 | 3,3 | JS | 2,7 | 1,5 |
| 32 | 1_Loe_160418_L_L_B_Au | Löss Bs | 17.04.2018 | L | L | 23 | 1,92 | 23 | 108,2 | 7 | 1800 | 2,1 | JS | 5,1 | 1 |
| 33 | 1_Loe_160418_L_L_B_Au | Löss Bs | 17.04.2018 | L | L | 23 | 1,96 | 23 | 108,2 | 7 | 1800 | 3,8 | JS | 2,3 | 2 |

| ID | Codierung | Bodenprobe | Datum | Boden | Art der Probe | W (%) | Dichte (kg/m³) | Höhe (cm) | Schub (Pa) | Anzahl (-) | Dauer (s) | T _{max} (cm) | Person (-) | τ _c (Pa) | k _d (cm²/N s) |
|----|--------------------------|------------|------------|-------|---------------|-------|----------------|-----------|------------|------------|-----------|-----------------------|------------|---------------------|--------------------------|
| 34 | 2_Loe_1-2_OU_1808_R | 2-1-2 | 13.12.2018 | L | U | 7 | 1,58 | 96 | 64,9 | 6 | 2210 | 2,4 | AR | 6,3 | 5 |
| 35 | 2_Loe_1-1_OU_1808_R | 2-1-1 | 14.12.2018 | L | U | 8,9 | 1,58 | 84 | 72 | 6 | 2670 | 2,5 | AR | 5,5 | 4 |
| 36 | 2_Loe_4-1_OU_1808_R | 2-4 | 17.12.2018 | L | U | 4,1 | 1,54 | 84 | 72 | 6 | 453 | 11,4 | AR | 0,514 | 120 |
| 37 | 2_Loe_4-2_OU_1808_R | 2-4 | 17.12.2018 | L | U | 4,1 | 1,54 | 140 | 40 | 9 | 4260 | 3,9 | AR | 1,62 | 2,5 |
| 38 | 2_Loe_B_LG_1804_Pr | Löss Bs | 18.12.2018 | L | L | 12,3 | 2,08 | 84 | 72 | 7 | 1800 | 4,4 | AR + SA | 2,48 | 2 |
| 39 | 2_Loe_B_LG_1804_W1 | Löss Bs | 18.12.2018 | L | L | 12,3 | 2,14 | 84 | 72 | 6 | 1950 | 0,5 | AR + SA | 11,67 | 1 |
| 40 | 2_Loe_B_LG_1804_W2 | Löss Bs | 19.12.2018 | L | L | 12,3 | 2,05 | 84 | 72 | 6 | 870 | 10,1 | SA | 0,23 | 10 |
| 41 | 2_Sta_1_V_1708_Wgl_10 | S | 20.12.2018 | S | L | 13,6 | 2,04 | 145 | 36,7 | 8 | 1250 | 4,3 | AR + SA | 1,14 | 15 |
| 42 | 2_Sta_2_V_1708_Wgl_15 | S | 21.01.2019 | S | L | 16,4 | 2,03 | 132 | 44,2 | 8 | 2115 | 5,1 | AR + SA | 2,4 | 9 |
| 43 | 2_Sta_3_V_1708_Wgl_5 | S | 22.01.2019 | S | L | 9 | 1,97 | 156 | 30,3 | 8 | 203 | 5,9 | SA | 0,12 | 100 |
| 44 | 2_Gru_Cv_LG_1705_Pr | Grus Cv1 | 22.01.2019 | G | G | 12,5 | 2,06 | 156 | 30,3 | 7 | 165 | 5,9 | SA | 0,087 | 150 |
| 45 | 2_Gru_A_LG_1705_Pr | Grus Ah1 | 23.01.2019 | G | G | 7,8 | 2,07 | 156 | 30,3 | 10 | 500 | 4,5 | SA | 0,34 | 40 |
| 46 | 2_Loe_A_LG_1703_Pr | Löss Ah2 | 23.01.2019 | L | G | 27,2 | 1,99 | 120 | 51 | 8 | 3460 | 1,5 | SA | 4,69 | 1 |
| 47 | 2_Loe_Cv_LG_1703_Pr | Löss C | 23.01.2019 | L | G | 9,8 | 1,74 | 120 | 51 | 6 | 85 | 10,1 | SA | 0,01 | 250 |
| 48 | 2_Loe_4_OG_1808_R | 2-4 | 24.01.2019 | L | G | 4,1 | 1,74 | 136 | 41,8 | 8 | 121 | 5,8 | SA | 0,41 | 130 |
| 49 | 2_Loe_2-2_OG_1808_R | 2-2-2 | 24.01.2019 | L | G | 8,6 | 1,79 | 104 | 60,4 | 8 | 211 | 5,1 | SA | 0,67 | 50 |
| 50 | 2_Loe_2-1_OG_1808_R | 2-2-1 | 25.01.2019 | L | G | 7,6 | 1,8 | 151 | 33,1 | 8 | 310 | 3,9 | SA | 0,88 | 50 |
| 51 | 2_Loe_6_OG_1808_R | 2-6-1 | 28.01.2019 | L | G | 6,5 | 1,64 | 152 | 32,8 | 8 | 225 | 3,5 | SA | 0,89 | 60 |
| 52 | 2_Loe_2-2_V_1808_Wgl_234 | 2-2-2 | 28.01.2019 | L | L | 23,4 | 2,1 | 104 | 60,4 | 9 | 4360 | 2,7 | SA | 2,6 | 0,9 |
| 53 | 2_Loe_1-1_OG_1808_R | 2-1-1 | 28.01.2019 | L | G | 8,9 | 1,75 | 152 | 32,8 | 10 | 805 | 5,5 | SA | 0,372 | 30 |
| 54 | 2_Loe_1-2_OG_1808_R | 2-1-2 | 29.01.2019 | L | G | 7 | 1,64 | 152 | 32,8 | 11 | 890 | 6,2 | SA | 0,8 | 40 |
| 55 | 2_Loe_B_V_1804_Wgl_226 | Löss Bs | 29.01.2019 | L | L | 21,1 | 2,04 | 104 | 60,4 | 8 | 5910 | 7,1 | SA | 0,93 | 3 |
| 56 | 2_Loe_4_V_1808_Wgl | 2-4 | 29.01.2019 | L | L | 5,5 | 1,87 | 129 | 46,1 | 7 | 130 | 6,9 | SA | 0,034 | 120 |
| 57 | 2_Loe_6_V_1808_Wgl | 2-6-1 | 30.01.2019 | L | L | 8,3 | 1,72 | 129 | 46,1 | 10 | 758 | 5,6 | SA | 0,68 | 30 |
| 58 | 2_Loe_3_OG_1808_R | 2-3 | 30.01.2019 | L | G | 7,8 | 1,87 | 172 | 21,4 | 9 | 265 | 5,8 | AR + SA | 0,36 | 150 |
| 59 | 2_Loe_6-2_OU_1808_R | 2-6-1 | 01.02.2019 | L | U | 6,5 | 1,64 | 132 | 43,9 | 9 | 2730 | 2,4 | AR | 3,7 | 12 |
| 60 | 2_Loe_6-1_OU_1808_R | 2-6-1 | 05.02.2019 | L | U | 6,5 | 1,34 | 132 | 43,9 | 9 | 1575 | 5,7 | AR | 0,58 | 12 |
| 61 | 2_Loe_2-2_OU_1808_R | 2-2-2 | 07.02.2019 | L | U | 8,6 | 1,72 | 132 | 43,9 | 8 | 1740 | 3,2 | AR | 2,65 | 8 |
| 62 | 2_Loe_2-1_OU_1808_R | 2-2-1 | 08.02.2019 | L | U | 7,6 | 1,72 | 132 | 43,9 | 8 | 2265 | 4,3 | AR | 2,8 | 9 |
| 63 | 2_Loe_3_OU_1808_R | 2-3 | 08.02.2019 | L | U | 7,8 | 1,68 | 132 | 43,9 | 7 | 300 | 10,2 | AR | 0,0085 | 90 |

Anhang 5-4: Dokumentation der JET-Versuche

Gemessener Abtrag

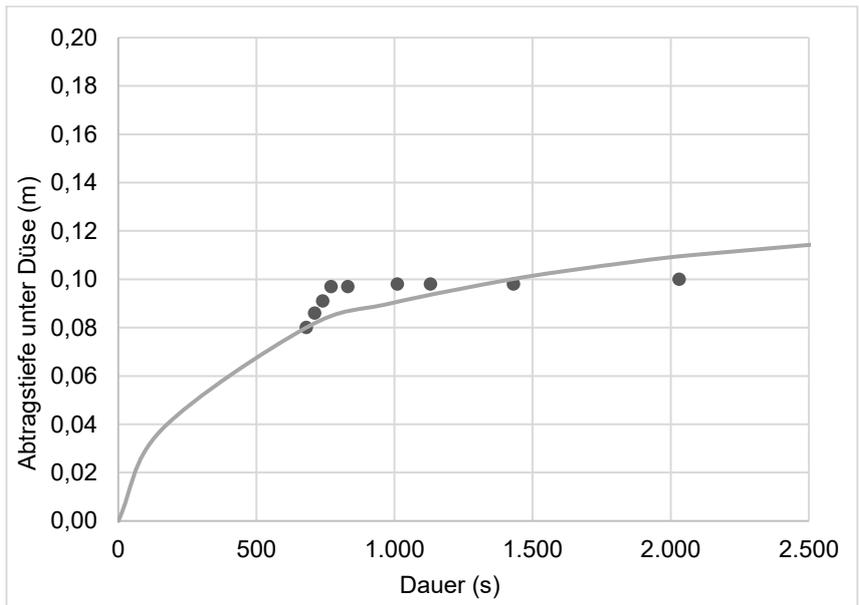
| | |
|-----------------------|--|
| t_{mess} (s) | Gemessene verstrichene Zeit ab Bodenoberfläche |
| t_{theo} (s) | Theoretisch verstrichene Zeit für Abtrag ab Düse |
| H (m) | Gemessene Tiefe ab Düse |

Diagramme zu JET-Versuch und Auswertung

| | |
|---|---|
| ● | Messpunkte zum gemessenen Abtrag mit Zeit t_{theo} (s) und H (m) ab Düse |
| — | Theoretischer Abtrag ab Düse mit den angepassten Kennwerten τ_c und k_d unter Ansatz der linearen Schubspannungsüberschuss-Gleichung |

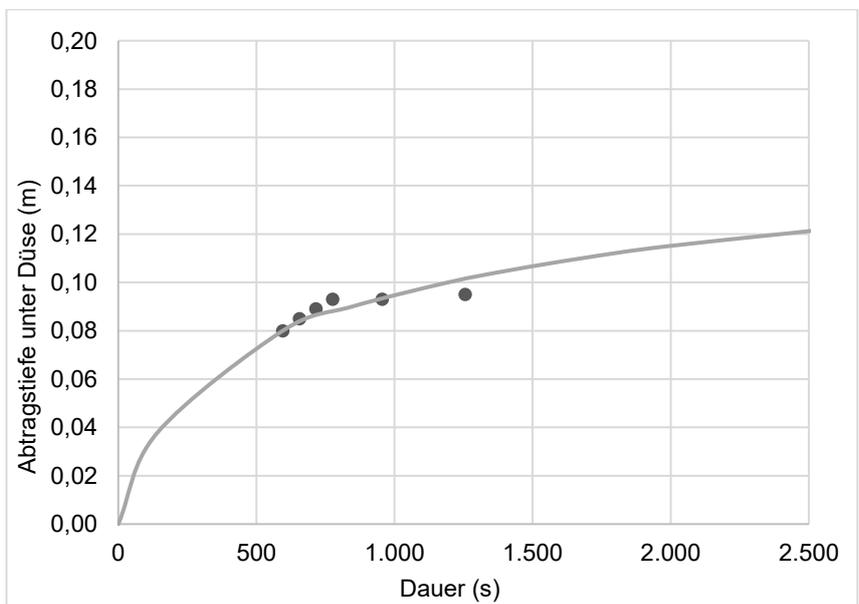
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 680,71 | 0,080 |
| 30 | 710,71 | 0,086 |
| 60 | 740,71 | 0,091 |
| 90 | 770,71 | 0,097 |
| 150 | 830,71 | 0,097 |
| 330 | 1.010,71 | 0,098 |
| 450 | 1.130,71 | 0,098 |
| 750 | 1.430,71 | 0,098 |
| 1.350 | 2.030,71 | 0,100 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 1 | Standhöhe JET (m) | 0,96 |
| Kodierung | 1_Loe_070917_O_U_1_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 64,6 |
| Datum | 18.01.2018 | Versuchsdauer (s) | 1.350 |
| Durchführung | AR+JS | Endtiefe (relativ) (m) | 0,02 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 4 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 4,5 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,143 |



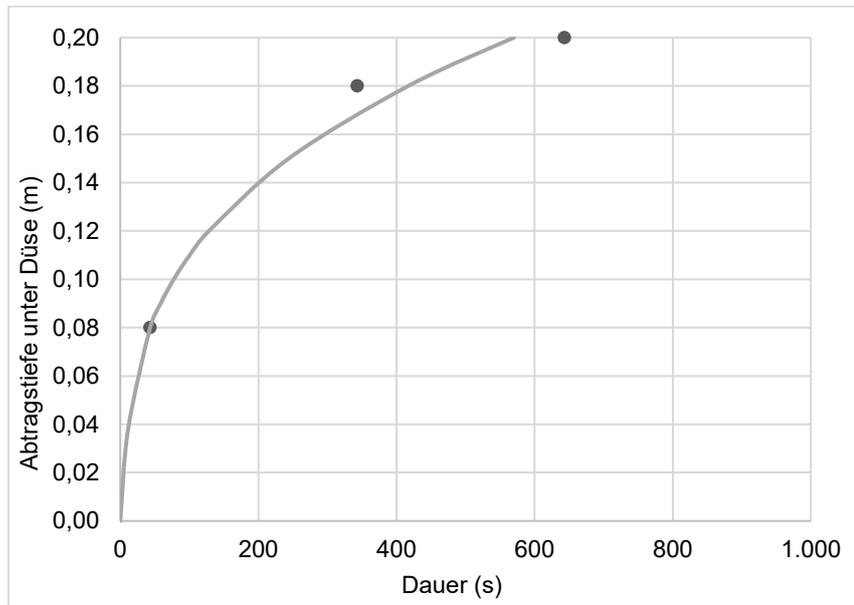
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 595,76 | 0,080 |
| 60 | 655,76 | 0,085 |
| 120 | 715,76 | 0,089 |
| 180 | 775,76 | 0,093 |
| 360 | 955,76 | 0,093 |
| 660 | 1.255,76 | 0,095 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 2 | Höhe JET (m) | 0,48 |
| Kodierung | 1_Loe_070917_O_U_2_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 94,3 |
| Datum | 17.01.2018 | Versuchsdauer (s) | 660 |
| Durchführung | JS | Endtiefe (relativ) (m) | 0,015 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 3 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 5,3 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,159 |



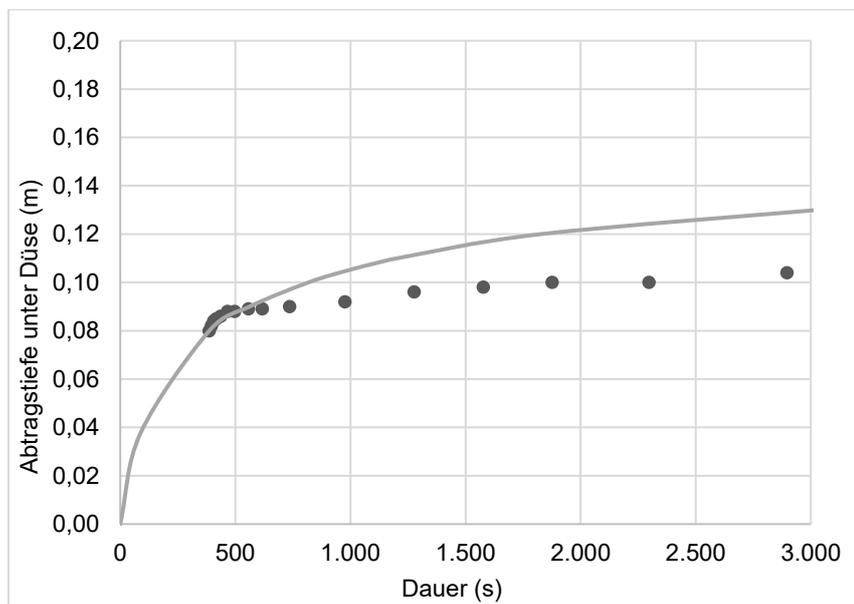
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 43,31 | 0,080 |
| 300 | 343,31 | 0,180 |
| 600 | 643,31 | 0,200 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|------|
| ID | 3 | Höhe JET (m) | 1,36 |
| Kodierung | 1_Loe_070917_O_U_3_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 41,8 |
| Datum | 18.01.2018 | Versuchsdauer (s) | 600 |
| Durchführung | JS | Endtiefe (relativ) (m) | 0,12 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 80 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,02 | Gleichgewichtstiefe (m) | 1,73 |



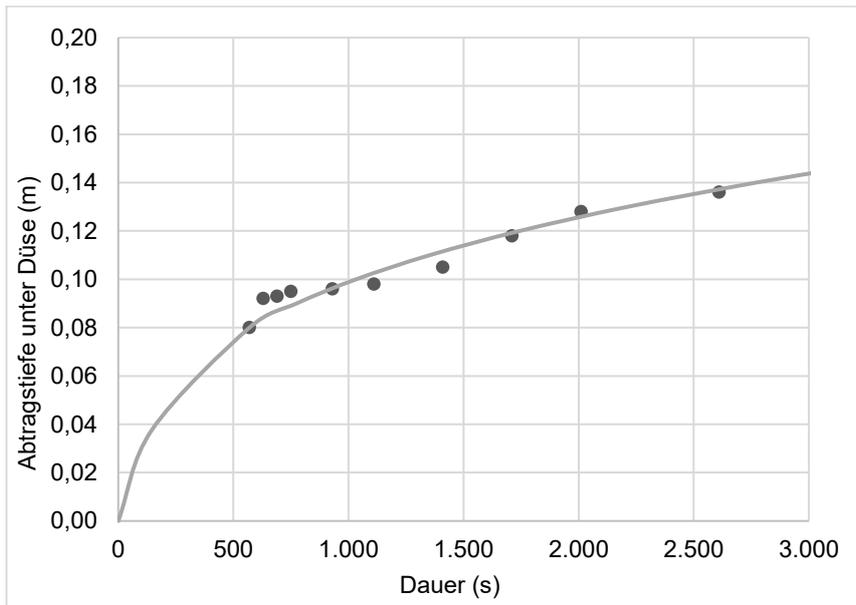
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 386,90 | 0,080 |
| 10 | 396,90 | 0,082 |
| 20 | 406,90 | 0,084 |
| 30 | 416,90 | 0,085 |
| 50 | 436,90 | 0,086 |
| 80 | 466,90 | 0,088 |
| 110 | 496,90 | 0,088 |
| 170 | 556,90 | 0,089 |
| 230 | 616,90 | 0,089 |
| 350 | 736,90 | 0,090 |
| 590 | 976,90 | 0,092 |
| 890 | 1.276,90 | 0,096 |
| 1.190 | 1.576,90 | 0,098 |
| 1.490 | 1.876,90 | 0,100 |
| 1.910 | 2.296,90 | 0,100 |
| 2.510 | 2.896,90 | 0,104 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 4 | Höhe JET (m) | 1,20 |
| Kodierung | 1_Loe_070917_O_U_4_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 51 |
| Datum | 03.11.2017 | Versuchsdauer (s) | 2.510 |
| Durchführung | AH | Endtiefe (relativ) (m) | 0,024 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 9 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 3,7 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,14 |



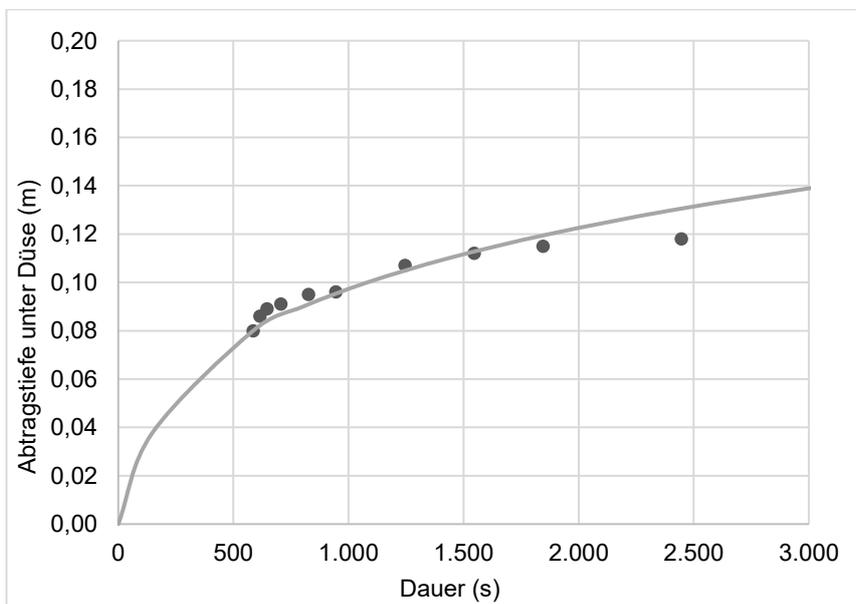
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 570,05 | 0,080 |
| 60 | 630,05 | 0,092 |
| 120 | 690,05 | 0,093 |
| 180 | 750,05 | 0,095 |
| 360 | 930,05 | 0,096 |
| 540 | 1.110,05 | 0,098 |
| 840 | 1.410,05 | 0,105 |
| 1.140 | 1.710,05 | 0,118 |
| 1.440 | 2.010,05 | 0,128 |
| 2.040 | 2.610,05 | 0,136 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 5 | Höhe JET (m) | 0,96 |
| Kodierung | 1_Loe_070917_O_U_5_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 64,9 |
| Datum | 22.01.2018 | Versuchsdauer (s) | 2.040 |
| Durchführung | JS | Endtiefe (relativ) (m) | 0,056 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 4 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,6 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,393 |



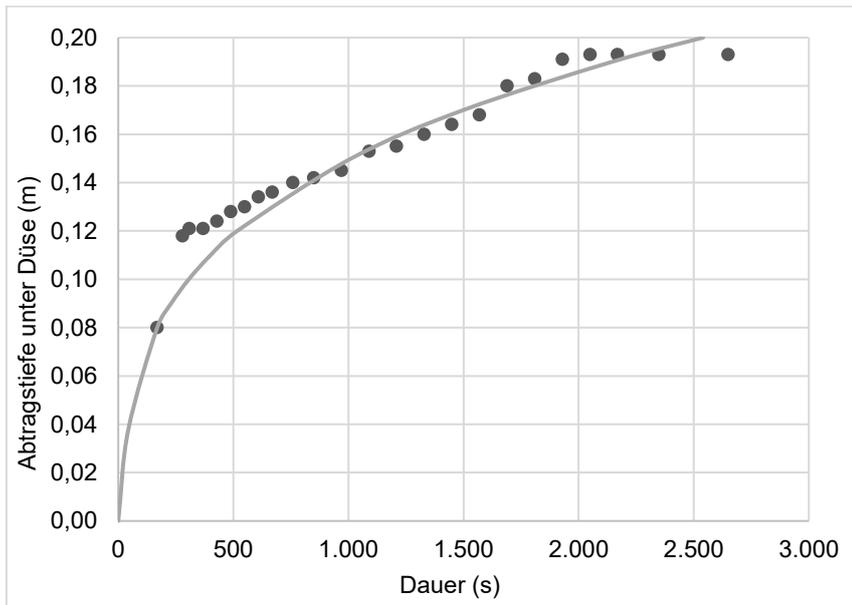
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 586,04 | 0,080 |
| 30 | 616,04 | 0,086 |
| 60 | 646,04 | 0,089 |
| 120 | 706,04 | 0,091 |
| 240 | 826,04 | 0,095 |
| 360 | 946,04 | 0,096 |
| 660 | 1.246,04 | 0,107 |
| 960 | 1.546,04 | 0,112 |
| 1.260 | 1.846,04 | 0,115 |
| 1.860 | 2.446,04 | 0,118 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 7 | Höhe JET (m) | 0,96 |
| Kodierung | 1_Loe_070917_O_G_1_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 64,9 |
| Datum | 23.01.2018 | Versuchsdauer (s) | 1.860 |
| Durchführung | JS | Endtiefe (relativ) (m) | 0,038 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 4 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 1,3 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,267 |



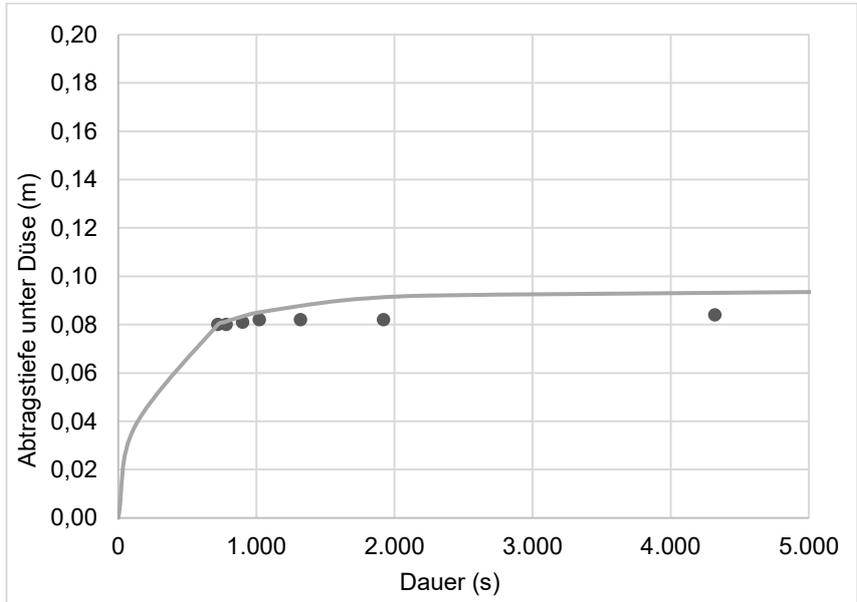
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 169,24 | 0,080 |
| 110 | 279,24 | 0,118 |
| 140 | 309,24 | 0,121 |
| 200 | 369,24 | 0,121 |
| 260 | 429,24 | 0,124 |
| 320 | 489,24 | 0,128 |
| 380 | 549,24 | 0,130 |
| 440 | 609,24 | 0,134 |
| 500 | 669,24 | 0,136 |
| 590 | 759,24 | 0,140 |
| 680 | 849,24 | 0,142 |
| 800 | 969,24 | 0,145 |
| 920 | 1.089,24 | 0,153 |
| 1.040 | 1.209,24 | 0,155 |
| 1.160 | 1.329,24 | 0,160 |
| 1.280 | 1.449,24 | 0,164 |
| 1.400 | 1.569,24 | 0,168 |
| 1.520 | 1.689,24 | 0,180 |
| 1.640 | 1.809,24 | 0,183 |
| 1.760 | 1.929,24 | 0,191 |
| 1.880 | 2.049,24 | 0,193 |
| 2.000 | 2.169,24 | 0,193 |
| 2.180 | 2.349,24 | 0,193 |
| 2.480 | 2.649,24 | 0,193 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 6 | Höhe JET (m) | 1,07 |
| Kodierung | 1_Loe_070917_O_U_6_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 58,2 |
| Datum | 20.10.2017 | Versuchsdauer (s) | 2480 |
| Durchführung | AH | Endtiefe (relativ) (m) | 0,113 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 15 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,5 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,408 |



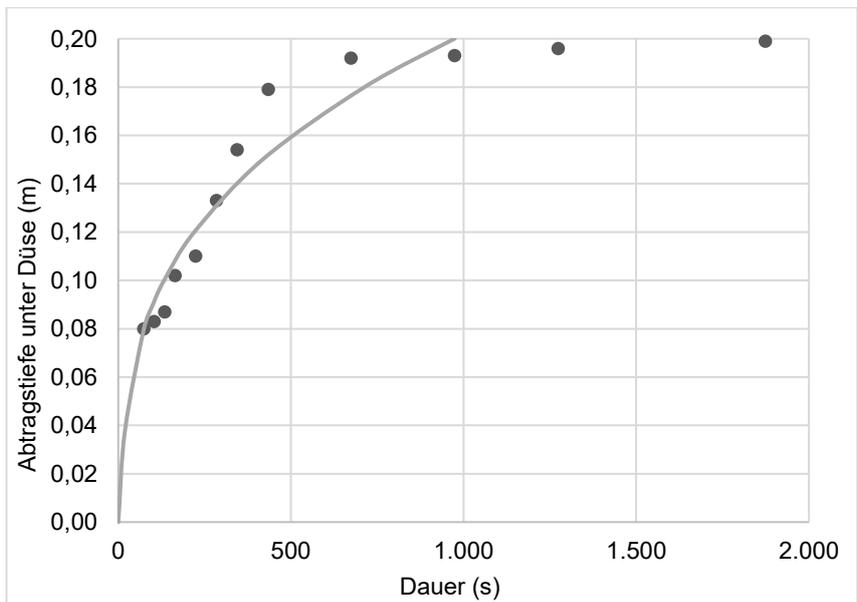
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 720,70 | 0,080 |
| 60 | 780,70 | 0,080 |
| 180 | 900,70 | 0,081 |
| 300 | 1.020,70 | 0,082 |
| 600 | 1.320,70 | 0,082 |
| 1.200 | 1.920,70 | 0,082 |
| 3.600 | 4.320,70 | 0,084 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 8 | Höhe JET (m) | 0,48 |
| Kodierung | 1_Loe_070917_O_G_2_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 94,3 |
| Datum | 25.01.2018 | Versuchsdauer (s) | 3.600 |
| Durchführung | JS | Endtiefe (relativ) (m) | 0,004 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 4 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 15,4 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,094 |



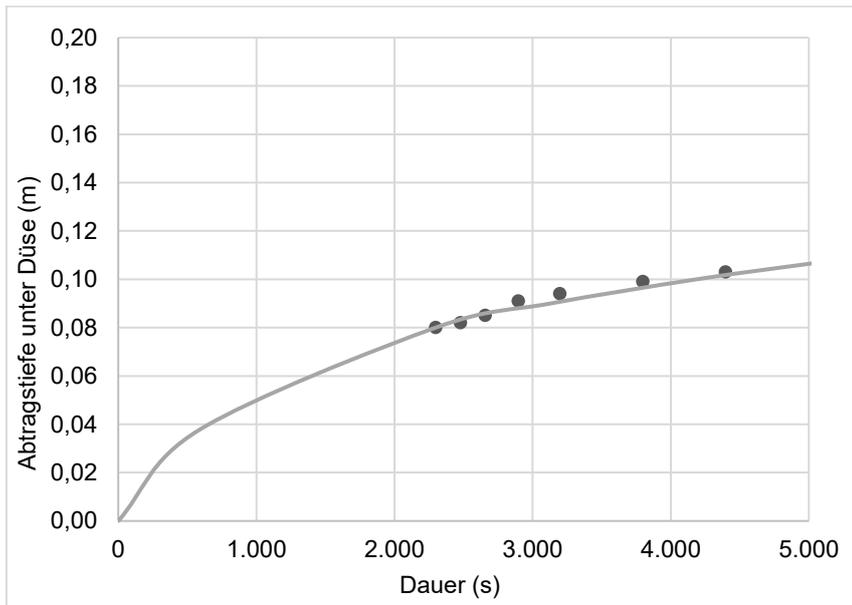
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 74,32 | 0,080 |
| 30 | 104,32 | 0,083 |
| 60 | 134,32 | 0,087 |
| 90 | 164,32 | 0,102 |
| 150 | 224,32 | 0,110 |
| 210 | 284,32 | 0,133 |
| 270 | 344,32 | 0,154 |
| 360 | 434,32 | 0,179 |
| 600 | 674,32 | 0,192 |
| 900 | 974,32 | 0,193 |
| 1.200 | 1.274,32 | 0,196 |
| 1.800 | 1.874,32 | 0,199 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 9 | Höhe JET (m) | 0,96 |
| Kodierung | 1_Loe_070917_O_G_3_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 64,9 |
| Datum | 30.01.2018 | Versuchsdauer (s) | 1.800 |
| Durchführung | JS | Endtiefe (relativ) (m) | 0,119 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 30 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,01 | Gleichgewichtstiefe (m) | 3,05 |



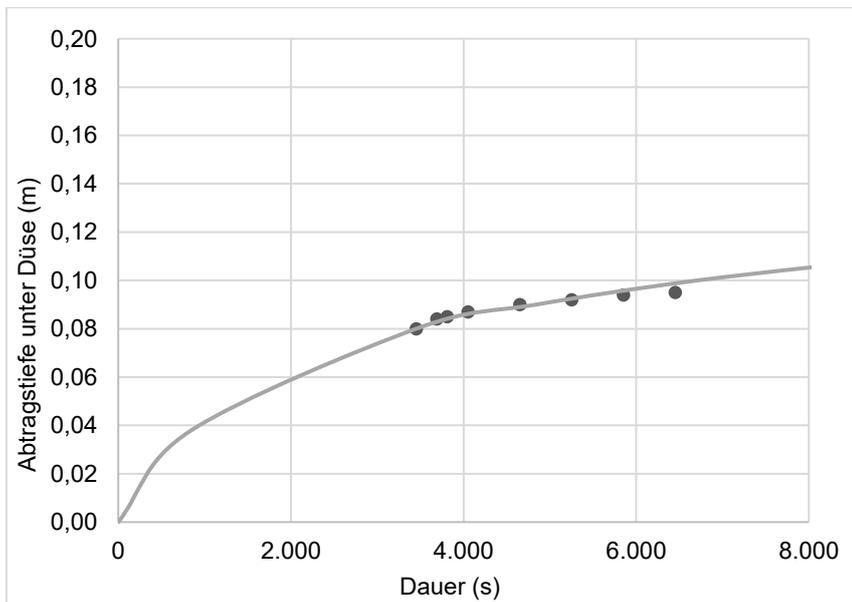
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 2.298,03 | 0,080 |
| 180 | 2.478,03 | 0,082 |
| 360 | 2.658,03 | 0,085 |
| 600 | 2.898,03 | 0,091 |
| 900 | 3.198,03 | 0,094 |
| 1.500 | 3.798,03 | 0,099 |
| 2.100 | 4.398,03 | 0,103 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 10 | Höhe JET (m) | 0,96 |
| Kodierung | 1_Loe_070917_O_G_4_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 64,9 |
| Datum | 30.01.2018 | Versuchsdauer (s) | 2.100 |
| Durchführung | JS | Endtiefe (relativ) (m) | 0,023 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 1,0 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,8 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,34 |



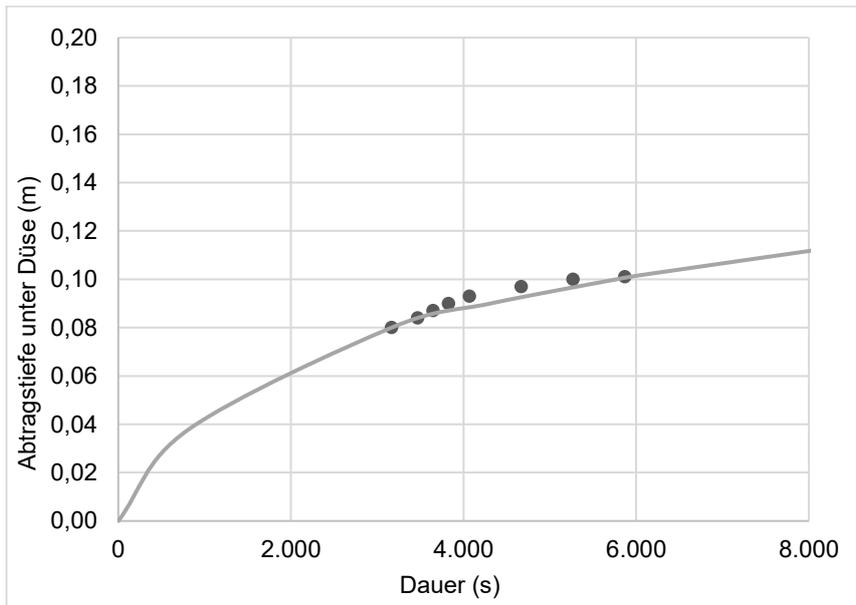
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 3.452,20 | 0,080 |
| 240 | 3.692,20 | 0,084 |
| 360 | 3.812,20 | 0,085 |
| 600 | 4.052,20 | 0,087 |
| 1.200 | 4.652,20 | 0,090 |
| 1.800 | 5.252,20 | 0,092 |
| 2.400 | 5.852,20 | 0,094 |
| 3.000 | 6.452,20 | 0,095 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 11 | Höhe JET (m) | 0,48 |
| Kodierung | 1_Loe_070917_O_G_5_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 94,3 |
| Datum | 31.01.2018 | Versuchsdauer (s) | 3.000 |
| Durchführung | JS | Endtiefe (relativ) (m) | 0,015 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 0,5 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 4,2 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,179 |



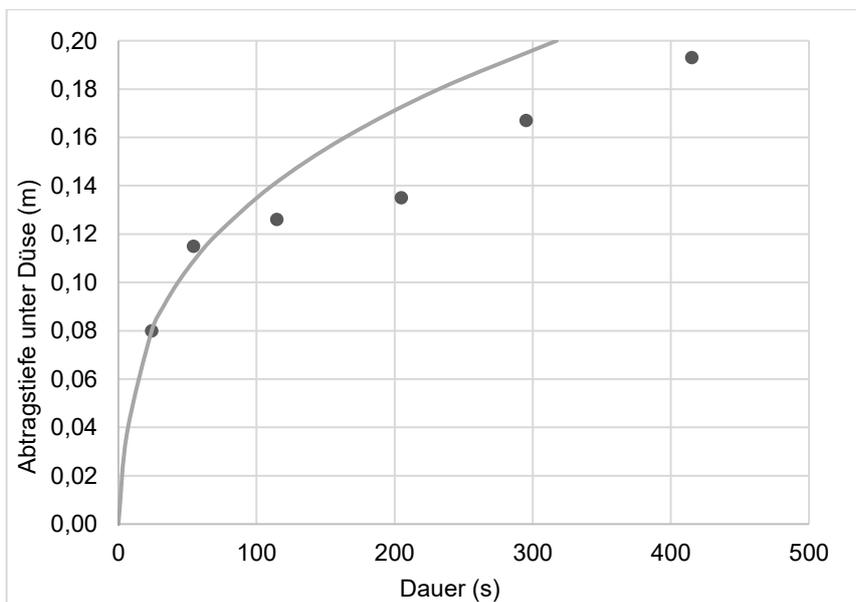
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 3.166,35 | 0,080 |
| 300 | 3.466,35 | 0,084 |
| 480 | 3.646,35 | 0,087 |
| 660 | 3.826,35 | 0,090 |
| 900 | 4.066,35 | 0,093 |
| 1.500 | 4.666,35 | 0,097 |
| 2.100 | 5.266,35 | 0,100 |
| 2.700 | 5.866,35 | 0,101 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|-------------------------|--------|
| ID | 12 | Höhe JET (m) | 0,48 |
| Kodierung | 1_Loe_070917_O_G_6_R | Wirk. Schubspg. (Pa) | 94,3 |
| Datum | 31.01.2018 | Versuchsdauer (s) | 2.700 |
| Durchführung | JS | Endtiefe (relativ) (m) | 0,0201 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 0,5 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 1,2 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,335 |



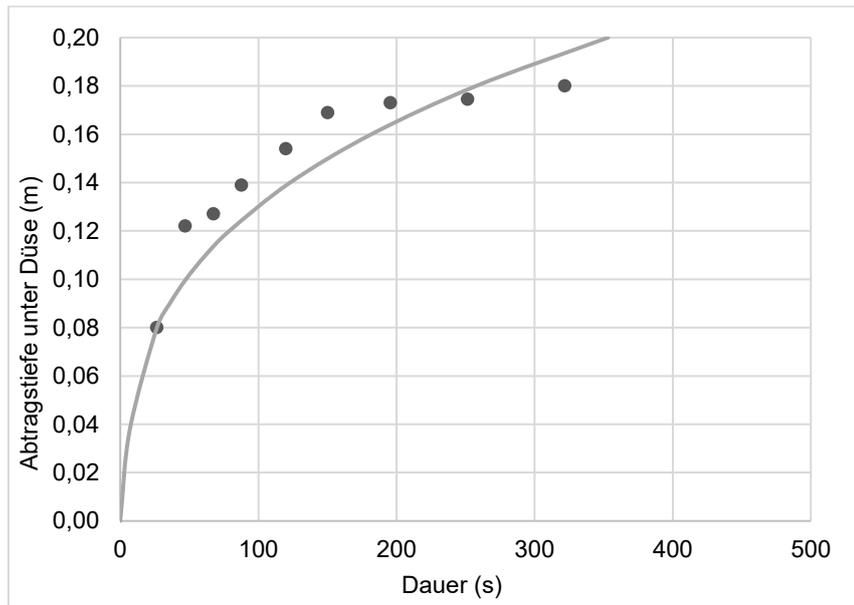
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 24,11 | 0,080 |
| 30,28 | 54,39 | 0,115 |
| 90,41 | 114,52 | 0,126 |
| 180,75 | 204,86 | 0,135 |
| 271,04 | 295,15 | 0,167 |
| 391,02 | 415,13 | 0,193 |
| 691,31 | 715,419 | 0,193 |

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------|
| ID | 13 | Höhe JET (m) | 1,68 |
| Kodierung | 1_Sta_080817_V_L_1_Di_Wgl05 | Wirk. Schubspg. (Pa) | 27,3 |
| Datum | 08.08.2017 | Versuchsdauer (s) | 690 |
| Durchführung | AR + AH | Endtiefe (relativ) (m) | 0,113 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 220 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,012 | Gleichgewichtstiefe (m) | 1,803 |



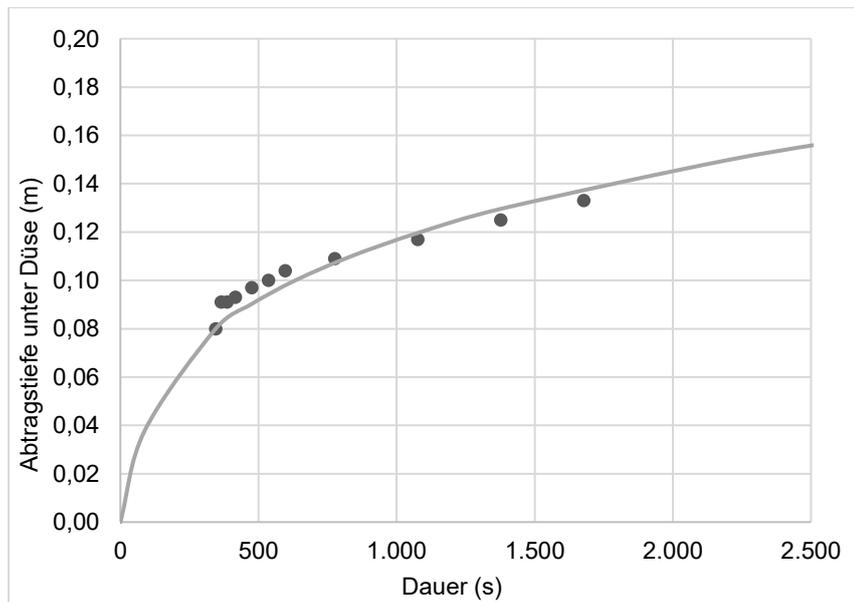
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 26,56 | 0.080 |
| 20.5 | 47,06 | 0.122 |
| 41 | 67,56 | 0.127 |
| 61.2 | 87,76 | 0.139 |
| 93.3 | 119,86 | 0.154 |
| 123.7 | 150,26 | 0.169 |
| 169.1 | 195,66 | 0.173 |
| 224.9 | 251,46 | 0.175 |
| 295.2 | 321,76 | 0.180 |

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------|
| ID | 14 | Höhe JET (m) | 1,68 |
| Kodierung | 1_Sta_080817_V_L_2_Di_Wg/10 | Wirk. Schubspg. (Pa) | 27,3 |
| Datum | 09.08.2017 | Versuchsdauer (s) | 295 |
| Durchführung | AR + AH | Endtiefe (relativ) (m) | 0.1 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 200 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,031 | Gleichgewichtstiefe (m) | 1,122 |



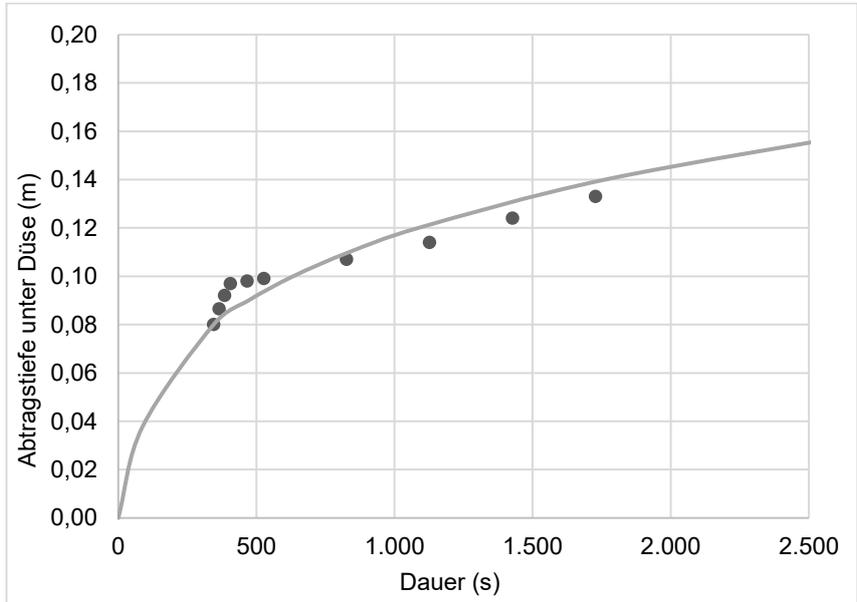
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 345,10 | 0,080 |
| 20,3 | 365,40 | 0,091 |
| 40,8 | 385,90 | 0,091 |
| 70,8 | 415,90 | 0,093 |
| 130,7 | 475,80 | 0,097 |
| 191 | 536,10 | 0,100 |
| 251,5 | 596,60 | 0,104 |
| 431,4 | 776,50 | 0,109 |
| 731,5 | 1.076,60 | 0,117 |
| 1.031,7 | 1.376,80 | 0,125 |
| 1.331,9 | 1.677,00 | 0,133 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|-------------------------|-------|
| ID | 15 | Höhe JET (m) | 1,68 |
| Kodierung | 1_Sta_080817_S_L_3_R | Wirk. Schubspg. (Pa) | 27,3 |
| Datum | 09.08.2017 | Versuchsdauer (s) | 1.330 |
| Durchführung | AR + AH | Endtiefe (relativ) (m) | 0,053 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 16 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,45 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,294 |



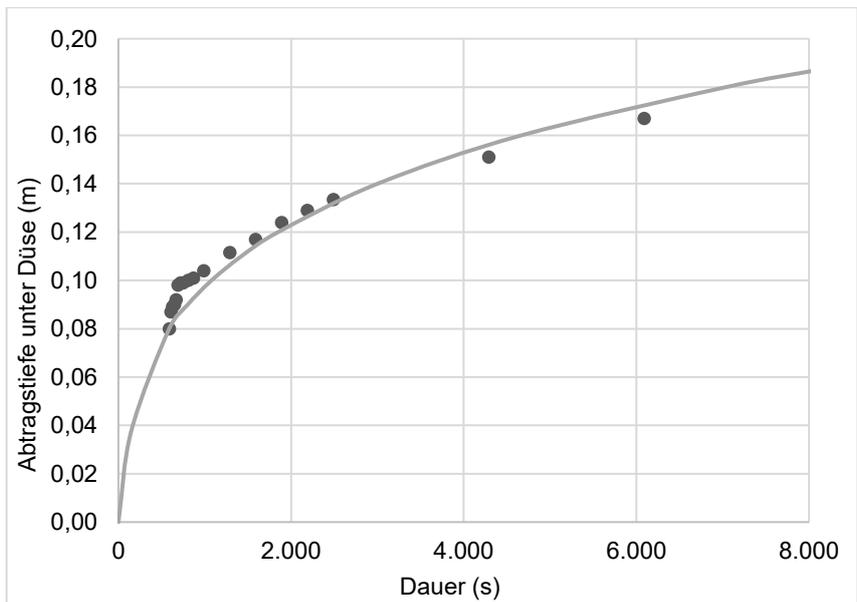
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 345,10 | 0,080 |
| 20,2 | 365,30 | 0,087 |
| 40,2 | 385,30 | 0,092 |
| 61,2 | 406,30 | 0,097 |
| 121,3 | 466,40 | 0,098 |
| 181,4 | 526,50 | 0,099 |
| 481,5 | 826,60 | 0,107 |
| 782,2 | 1.127,30 | 0,114 |
| 1.082,3 | 1.427,40 | 0,124 |
| 1.382,3 | 1.727,40 | 0,133 |

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|-------|
| ID | 16 | Höhe JET (m) | 1,68 |
| Kodierung | 1_Sta_080817_S_L_4_Dr | Wirk. Schubspg. (Pa) | 27,3 |
| Datum | 10.08.2017 | Versuchsdauer (s) | 1.380 |
| Durchführung | AR + AH | Endtiefe (relativ) (m) | 0,053 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 16 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,45 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,294 |



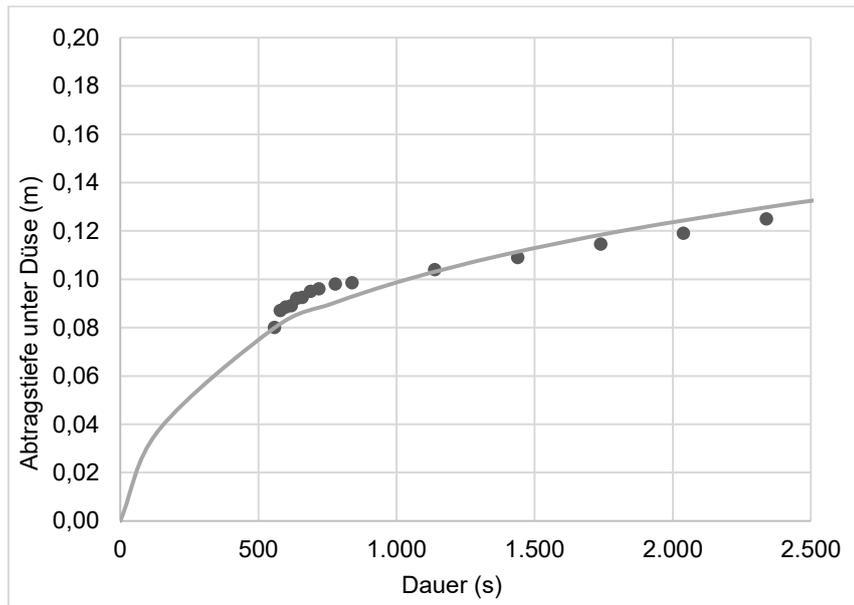
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 588,23 | 0,080 |
| 20 | 608,23 | 0,087 |
| 40 | 628,23 | 0,089 |
| 60 | 648,23 | 0,090 |
| 80 | 668,23 | 0,092 |
| 100 | 688,23 | 0,098 |
| 130 | 718,23 | 0,099 |
| 160 | 748,23 | 0,099 |
| 220 | 808,23 | 0,100 |
| 280 | 868,23 | 0,101 |
| 400 | 988,23 | 0,104 |
| 700 | 1.288,23 | 0,112 |
| 1.000 | 1.588,23 | 0,117 |
| 1.300 | 1.888,23 | 0,124 |
| 1.600 | 2.188,23 | 0,129 |
| 1.900 | 2.488,23 | 0,134 |
| 3.700 | 4.288,23 | 0,151 |
| 5.500 | 6.088,23 | 0,167 |

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 17 | Höhe JET (m) | 1,83 |
| Kodierung | 1_Sta_080817_S_L_5_Dr | Wirk. Schubspannung (Pa) | 18,3 |
| Datum | 14.08.2017 | Versuchsdauer (s) | 5.500 |
| Durchführung | AR + AH | Endtiefe (relativ) (m) | 0,087 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 14 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,3 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,295 |



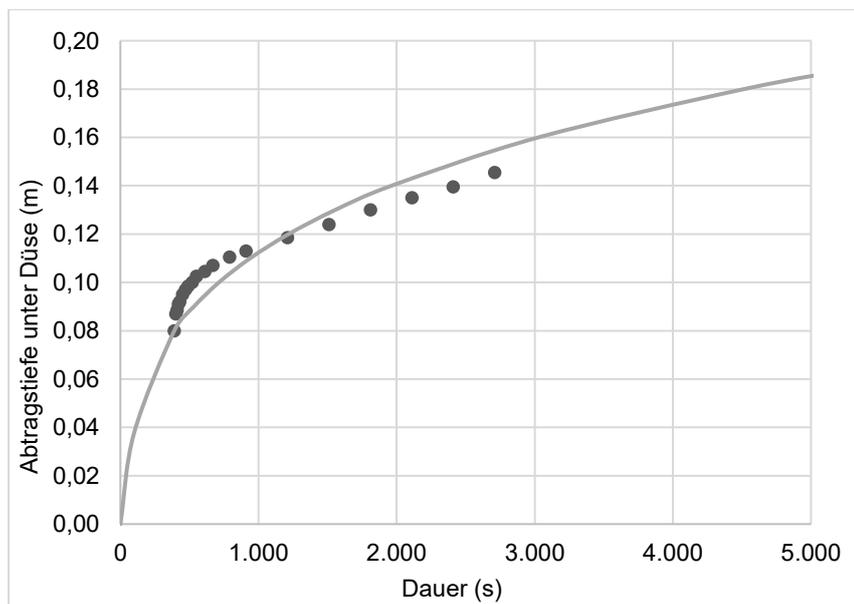
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 559,32 | 0,080 |
| 20 | 579,32 | 0,087 |
| 40 | 599,32 | 0,089 |
| 60 | 619,32 | 0,089 |
| 80 | 639,32 | 0,092 |
| 100 | 659,32 | 0,093 |
| 130 | 689,32 | 0,095 |
| 160 | 719,32 | 0,096 |
| 220 | 779,32 | 0,098 |
| 280 | 839,32 | 0,099 |
| 580 | 1.139,32 | 0,104 |
| 880 | 1.439,32 | 0,109 |
| 1.180 | 1.739,32 | 0,115 |
| 1.480 | 2.039,32 | 0,119 |
| 1.780 | 2.339,32 | 0,125 |

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 18 | Höhe JET (m) | 1,83 |
| Kodierung | 1_Sta_080817_S_L_6_Dr | Wirk. Schubspannung (Pa) | 18,3 |
| Datum | 14.08.2017 | Versuchsdauer (s) | 1780 |
| Durchführung | AH | Endtiefe (relativ) (m) | 0,045 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 15 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,43 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,247 |



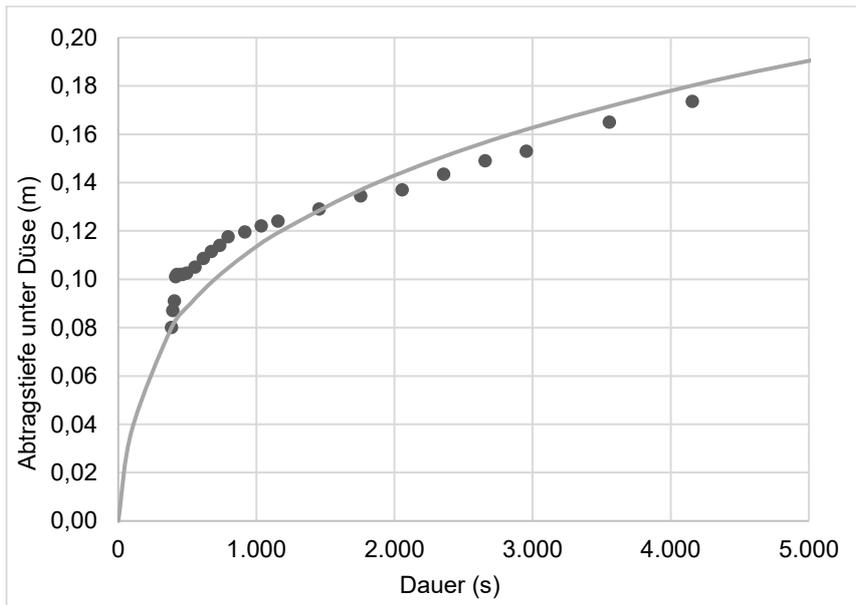
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 390,37 | 0,080 |
| 10 | 400,37 | 0,087 |
| 20 | 410,37 | 0,089 |
| 30 | 420,37 | 0,091 |
| 40 | 430,37 | 0,092 |
| 60 | 450,37 | 0,095 |
| 80 | 470,37 | 0,097 |
| 100 | 490,37 | 0,099 |
| 130 | 520,37 | 0,100 |
| 160 | 550,37 | 0,103 |
| 220 | 610,37 | 0,105 |
| 280 | 670,37 | 0,107 |
| 400 | 790,37 | 0,111 |
| 520 | 910,37 | 0,113 |
| 820 | 1.210,37 | 0,119 |
| 1.120 | 1.510,37 | 0,124 |
| 1.420 | 1.810,37 | 0,130 |
| 1.720 | 2.110,37 | 0,135 |
| 2.020 | 2.410,37 | 0,140 |
| 2.320 | 2.710,37 | 0,146 |

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|-------|
| ID | 20 | Höhe JET (m) | 143 |
| Kodierung | 1_Sta_080817_S_L_8_Dr | Wirk. Schubspg. (Pa) | 38,4 |
| Datum | 15.08.2017 | Versuchsdauer (s) | 2320 |
| Durchführung | AH | Endtiefe (relativ) (m) | 0,066 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 10 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,55 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,316 |



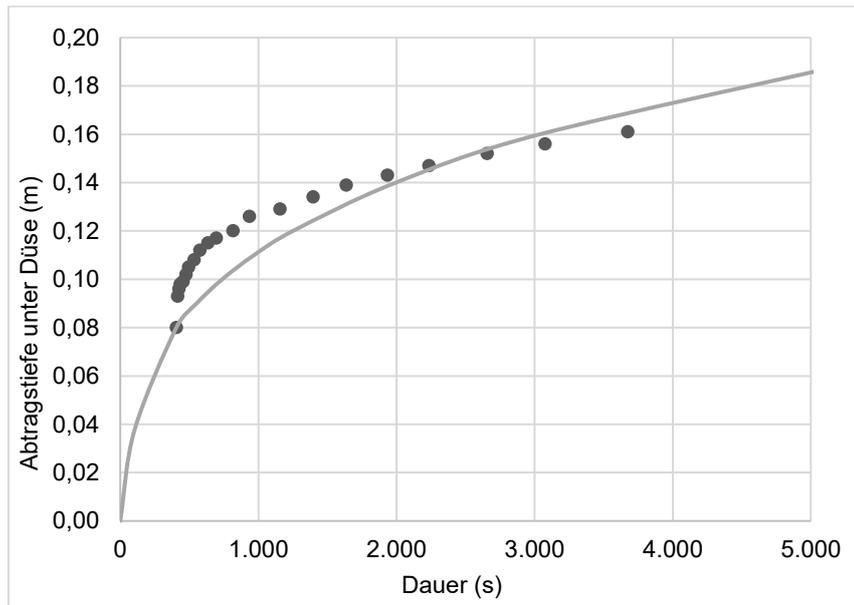
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 385,50 | 0,080 |
| 10 | 395,50 | 0,087 |
| 20 | 405,50 | 0,091 |
| 30 | 415,50 | 0,101 |
| 40 | 425,50 | 0,102 |
| 60 | 445,50 | 0,102 |
| 80 | 465,50 | 0,102 |
| 110 | 495,50 | 0,103 |
| 170 | 555,50 | 0,105 |
| 230 | 615,50 | 0,109 |
| 290 | 675,50 | 0,112 |
| 350 | 735,50 | 0,114 |
| 410 | 795,50 | 0,118 |
| 530 | 915,50 | 0,120 |
| 650 | 1.035,50 | 0,122 |
| 770 | 1.155,50 | 0,124 |
| 1.070 | 1.455,50 | 0,129 |
| 1.370 | 1.755,50 | 0,135 |
| 1.670 | 2.055,50 | 0,137 |
| 1.970 | 2.355,50 | 0,144 |
| 2.270 | 2.655,50 | 0,149 |
| 2.570 | 2.955,50 | 0,153 |
| 3.170 | 3.555,50 | 0,165 |
| 3.770 | 4.155,50 | 0,174 |

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|-------|
| ID | 19 | Höhe JET (m) | 143 |
| Kodierung | 1_Sta_080817_S_L_7_Dr | Wirk. Schubspg. (Pa) | 38,4 |
| Datum | 15.08.2017 | Versuchsdauer (s) | 3.770 |
| Durchführung | AH | Endtiefe (m) | 0,094 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 10 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,36 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,390 |



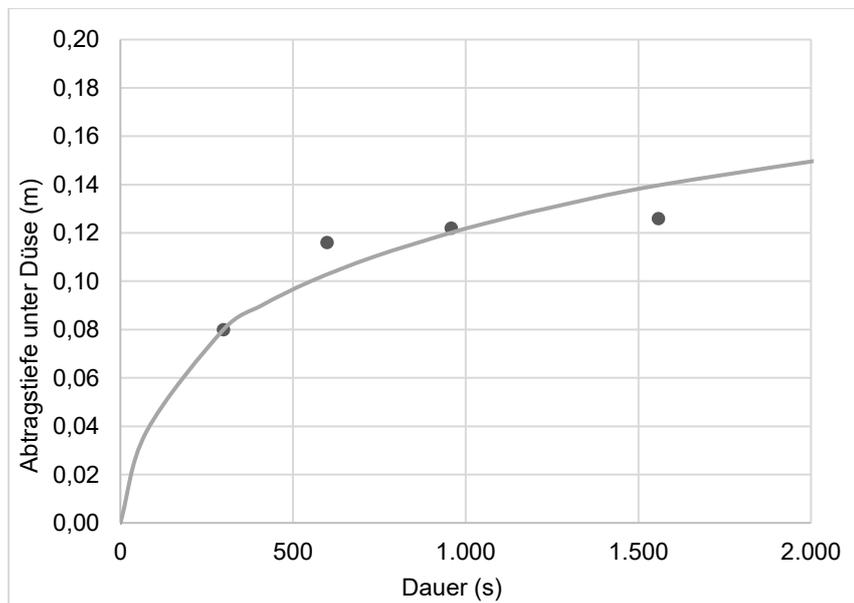
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 406,05 | 0,080 |
| 10 | 416,05 | 0,093 |
| 20 | 426,05 | 0,096 |
| 30 | 436,05 | 0,098 |
| 50 | 456,05 | 0,099 |
| 70 | 476,05 | 0,102 |
| 90 | 496,05 | 0,105 |
| 130 | 536,05 | 0,108 |
| 170 | 576,05 | 0,112 |
| 230 | 636,05 | 0,115 |
| 290 | 696,05 | 0,117 |
| 410 | 816,05 | 0,120 |
| 530 | 936,05 | 0,126 |
| 750 | 1.156,05 | 0,129 |
| 990 | 1.396,05 | 0,134 |
| 1.230 | 1.636,05 | 0,139 |
| 1.530 | 1.936,05 | 0,143 |
| 1.830 | 2.236,05 | 0,147 |
| 2.250 | 2.656,05 | 0,152 |
| 2.670 | 3.076,05 | 0,156 |
| 3.270 | 3.676,05 | 0,161 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|-------------------------|-------|
| ID | 21 | Höhe JET (m) | 1,83 |
| Kodierung | 1_Sta_080817_V_L_9_R | Wirk. Schubspg. (Pa) | 18,3 |
| Datum | 02.11.2017 | Versuchsdauer (s) | 3.270 |
| Durchführung | AH | Endtiefe (relativ) (m) | 0,081 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 20 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,2 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,362 |



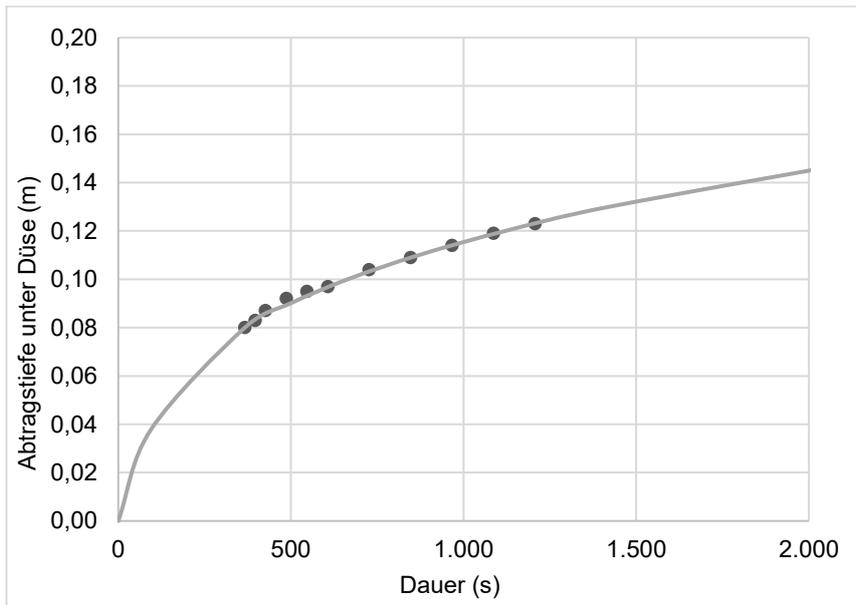
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 298,59 | 0,080 |
| 300 | 598,59 | 0,116 |
| 660 | 958,59 | 0,122 |
| 1.260 | 1.558,59 | 0,126 |

| | | | |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------|
| ID | 22 | Höhe JET (m) | 1,20 |
| Kodierung | 1_Sta_080817_V_L_10_Wgl | Wirk. Schubspg. (Pa) | 51 |
| Datum | 11.01.2018 | Versuchsdauer (s) | 1.260 |
| Durchführung | AR+JS | Endtiefe (relativ) (m) | 0,046 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 10 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 1,04 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,265 |



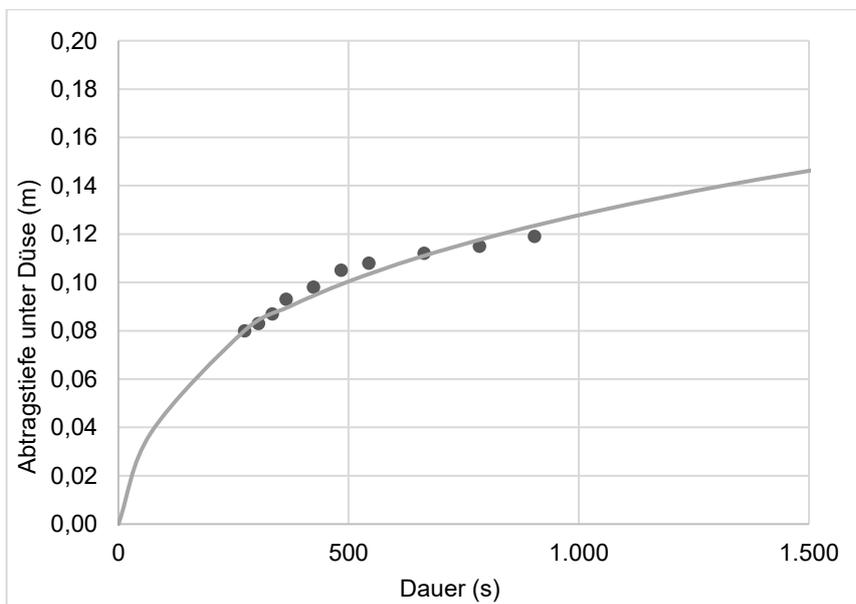
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 366,73 | 0,080 |
| 30 | 396,73 | 0,083 |
| 60 | 426,73 | 0,087 |
| 120 | 486,73 | 0,092 |
| 180 | 546,73 | 0,095 |
| 240 | 606,73 | 0,097 |
| 360 | 726,73 | 0,104 |
| 480 | 846,73 | 0,109 |
| 600 | 966,73 | 0,114 |
| 720 | 1.086,73 | 0,119 |
| 840 | 1.206,73 | 0,123 |

| | | | |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------|
| ID | 23 | Höhe JET (m) | 1,72 |
| Kodierung | 1_Sta_080817_V_L_11_Wgl | Wirk. Schubspg. (Pa) | 22,4 |
| Datum | 15.01.2018 | Versuchsdauer (s) | 840 |
| Durchführung | AR+JS | Endtiefe (relativ) (m) | 0,043 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 18 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,2 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,400 |



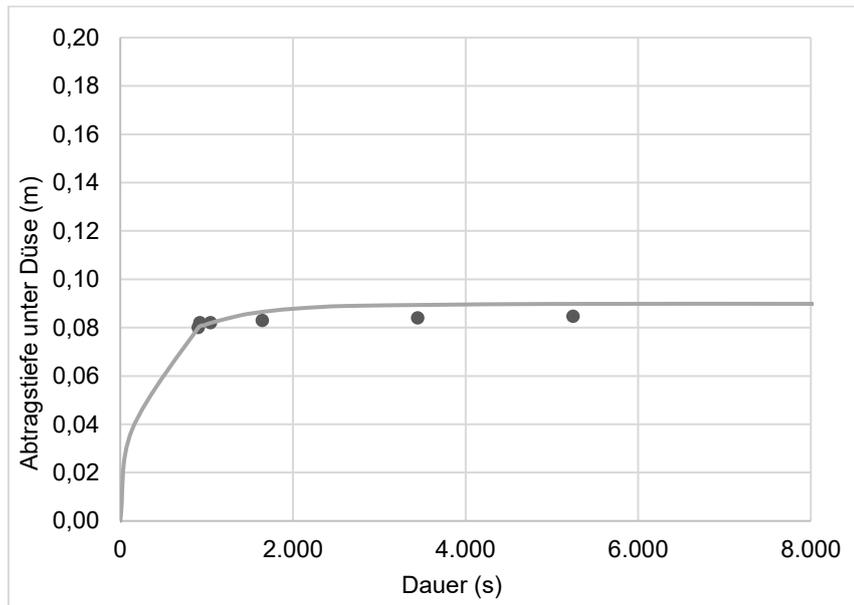
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 273,83 | 0,080 |
| 30 | 303,83 | 0,083 |
| 60 | 333,83 | 0,087 |
| 90 | 363,83 | 0,093 |
| 150 | 423,83 | 0,098 |
| 210 | 483,83 | 0,105 |
| 270 | 543,83 | 0,108 |
| 390 | 663,83 | 0,112 |
| 510 | 783,83 | 0,115 |
| 630 | 903,83 | 0,119 |

| | | | |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------|
| ID | 24 | Höhe JET (m) | 1,72 |
| Kodierung | 1_Sta_080817_V_L_12_Wgl | Wirk. Schubspg. (Pa) | 22,4 |
| Datum | 15.01.2018 | Versuchsdauer (s) | 630 |
| Durchführung | AR+JS | Endtiefe (relativ) (m) | 0,039 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 24 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,16 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,447 |



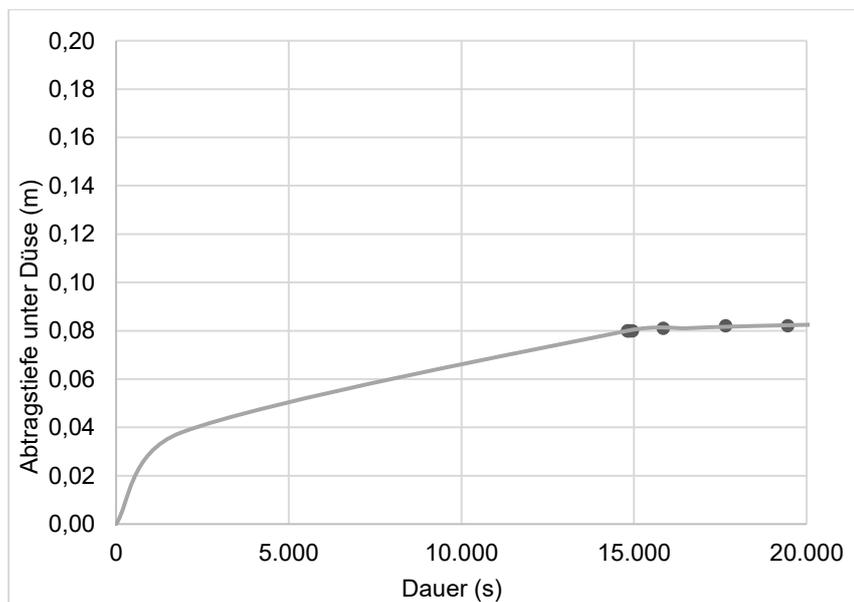
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 905,11 | 0,080 |
| 20 | 925,11 | 0,082 |
| 140 | 1.045,11 | 0,082 |
| 740 | 1.645,11 | 0,083 |
| 2.540 | 3.445,11 | 0,084 |
| 4.340 | 5.245,11 | 0,085 |

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|--------|
| ID | 25 | Höhe JET (m) | 1,40 |
| Kodierung | 1_Loe_170317_L_L_Ah_R | Wirk. Schubspg. (Pa) | 41,8 |
| Datum | 18.08.2017 | Versuchsdauer (s) | 4.340 |
| Durchführung | AR+PN | Endtiefe (relativ) (m) | 0,0047 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 8 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 7,4 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,089 |



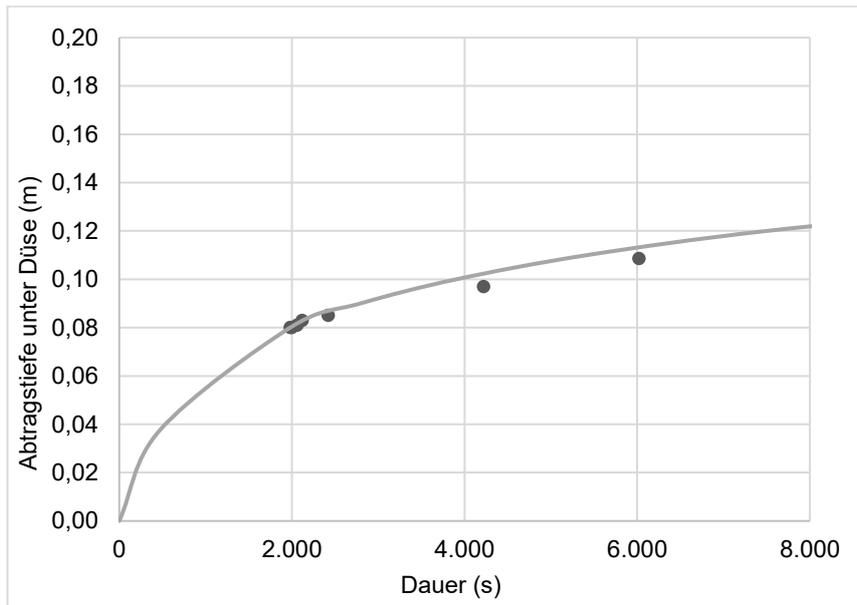
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 14.810,30 | 0,08 |
| 20 | 14.830,30 | 0,08 |
| 80 | 14.890,30 | 0,08 |
| 140 | 14.950,30 | 0,08 |
| 1.040 | 15.850,30 | 0,081 |
| 2.840 | 17.650,30 | 0,082 |
| 4.640 | 19.450,30 | 0,082 |

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|-------|
| ID | 26 | Höhe JET (m) | 1,40 |
| Kodierung | 1_Loe_170317_L_L_Bs_R | Wirk. Schubspg. (Pa) | 41,8 |
| Datum | 18.08.2017 | Versuchsdauer (s) | 4.640 |
| Durchführung | AR+PN | Endtiefe (relativ) (m) | 0,002 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 0,6 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 8,2 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,085 |



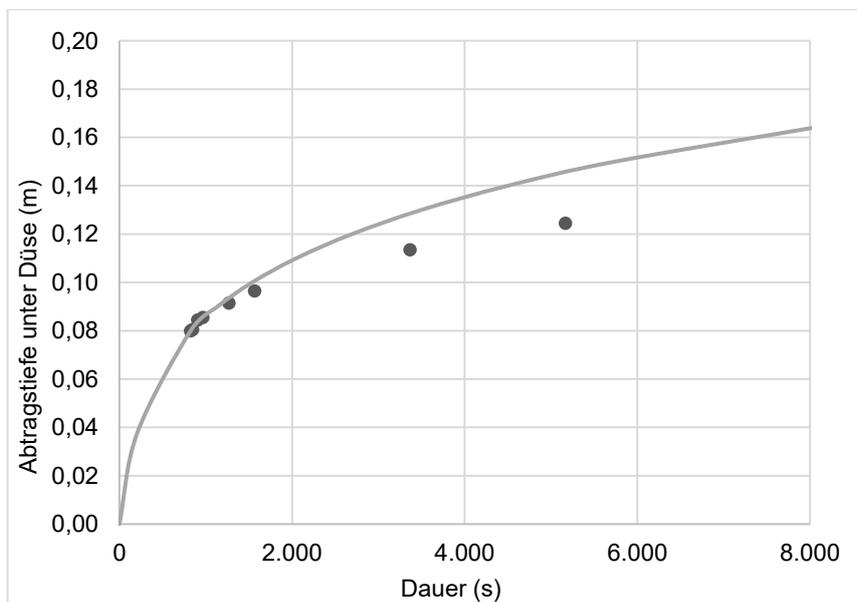
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 1.979,98 | 0,080 |
| 20 | 1.999,98 | 0,080 |
| 80 | 2.059,98 | 0,081 |
| 140 | 2.119,98 | 0,083 |
| 440 | 2.419,98 | 0,085 |
| 2.240 | 4.219,98 | 0,097 |
| 4.040 | 6.019,98 | 0,109 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|-------------------------|--------|
| ID | 27 | Höhe JET (m) | 1,40 |
| Kodierung | 1_Loe_170317_L_L_C_R | Wirk. Schubspg. (Pa) | 41,8 |
| Datum | 18.08.2017 | Versuchsdauer (s) | 4.040 |
| Durchführung | AR+PN | Endtiefe (relativ) (m) | 0,0285 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 2 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 2,1 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,169 |



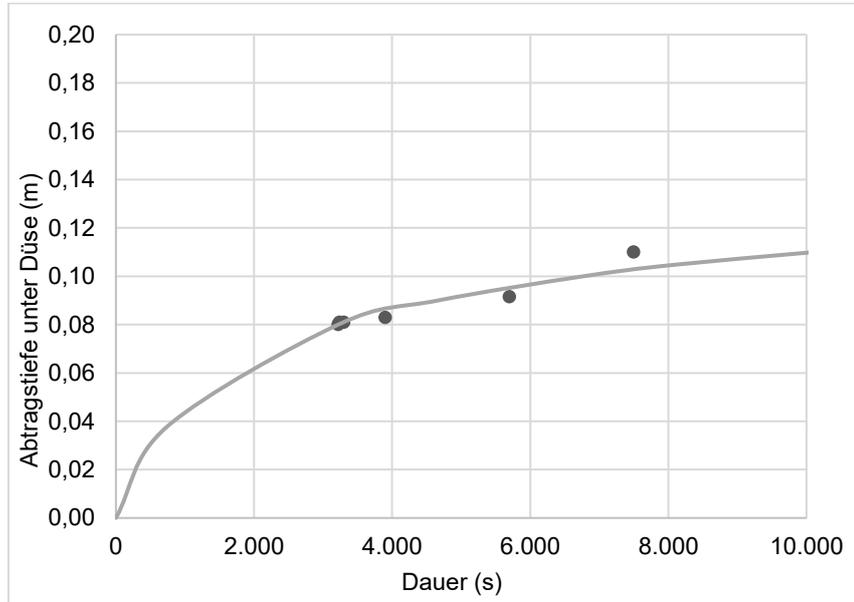
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 825,74 | 0,080 |
| 20 | 845,74 | 0,081 |
| 80 | 905,74 | 0,085 |
| 140 | 965,74 | 0,086 |
| 440 | 1.265,74 | 0,092 |
| 740 | 1.565,74 | 0,097 |
| 2.540 | 3.365,74 | 0,114 |
| 4.340 | 5.165,74 | 0,125 |

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|-------|
| ID | 28 | Höhe JET (m) | 1,63 |
| Kodierung | 1_Gru_220517_L_L_Ae_R | Wirk. Schubspg. (Pa) | 28,7 |
| Datum | 23.08.2017 | Versuchsdauer (s) | 4.340 |
| Durchführung | PN | Endtiefe (relativ) (m) | 0,045 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 6,5 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,71 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,240 |



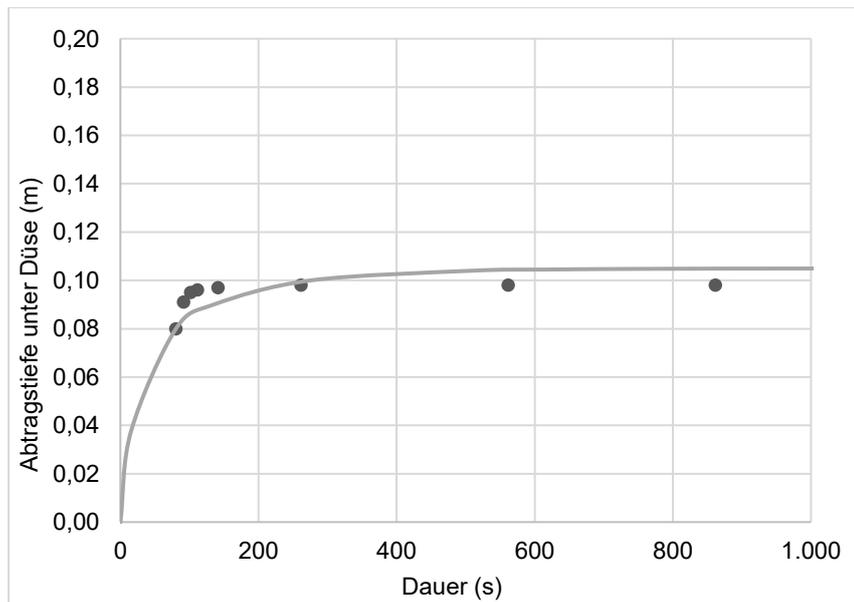
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 3.218,51 | 0,080 |
| 20 | 3.238,51 | 0,081 |
| 80 | 3.298,51 | 0,081 |
| 680 | 3.898,51 | 0,083 |
| 2.480 | 5.698,51 | 0,092 |
| 4.280 | 7.498,51 | 0,110 |

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 29 | Höhe JET (m) | 1,83 |
| Kodierung | 1_Gru_220517_L_L_Bs_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 18,3 |
| Datum | 23.08.2017 | Versuchsdauer (s) | 4.280 |
| Durchführung | PN | Endtiefe (relativ) (m) | 0,03 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 3 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 1,3 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,142 |



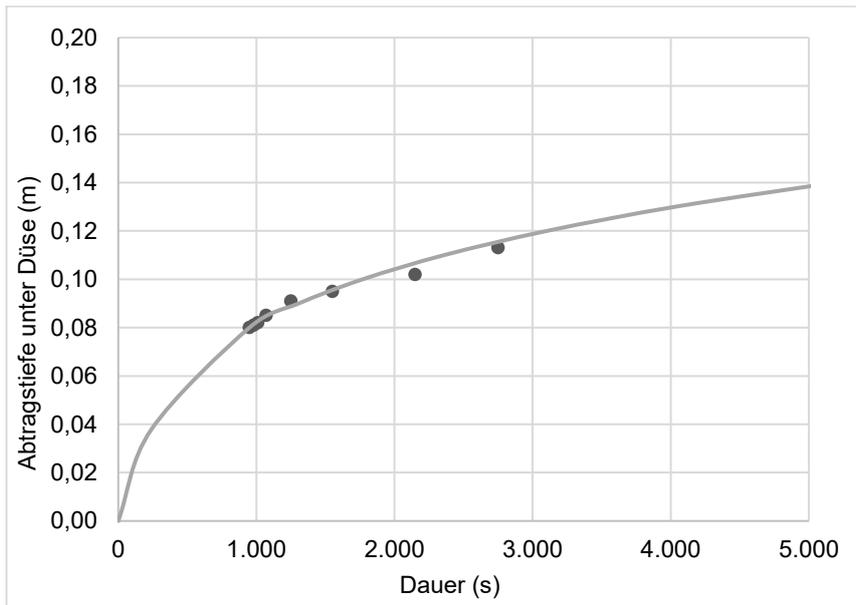
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 80,50 | 0,080 |
| 11 | 91,50 | 0,091 |
| 21 | 101,50 | 0,095 |
| 31 | 111,50 | 0,096 |
| 61 | 141,50 | 0,097 |
| 181 | 261,50 | 0,098 |
| 481 | 561,50 | 0,098 |
| 781 | 861,50 | 0,098 |

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 30 | Höhe JET (m) | 1,63 |
| Kodierung | 1_Gru_220517_L_L_Cv_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 18,5 |
| Datum | 23.08.2017 | Versuchsdauer (s) | 780 |
| Durchführung | PN | Endtiefe (relativ) (m) | 0,018 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 150 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 2,4 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,105 |



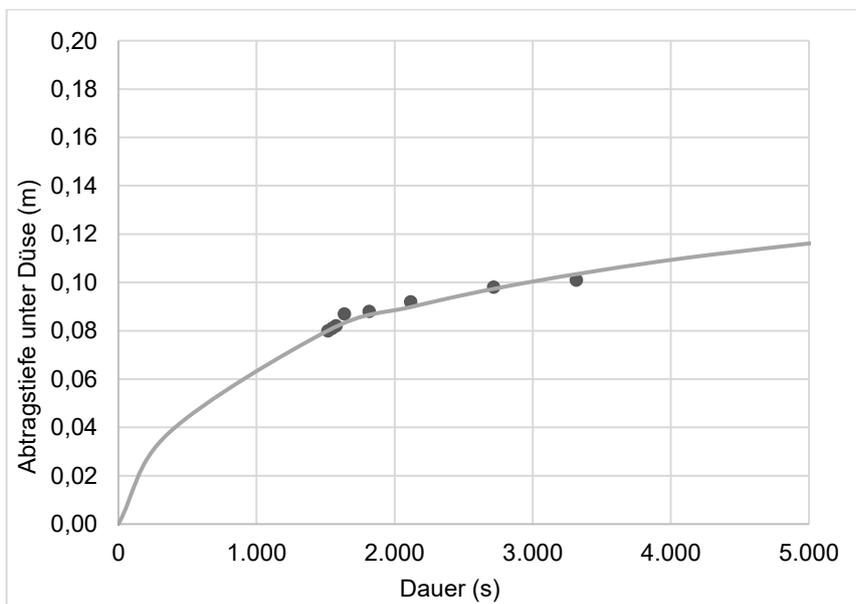
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 949,66 | 0,080 |
| 30 | 979,66 | 0,081 |
| 60 | 1.009,66 | 0,082 |
| 120 | 1.069,66 | 0,085 |
| 300 | 1.249,66 | 0,091 |
| 600 | 1.549,66 | 0,095 |
| 1.200 | 2.149,66 | 0,102 |
| 1.800 | 2.749,66 | 0,113 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 31 | Höhe JET (m) | 0,23 |
| Kodierung | 1_Loe_160418_L_G_B_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 108,2 |
| Datum | 17.04.2018 | Versuchsdauer (s) | 1.800 |
| Durchführung | JS | Endtiefe (relativ) (m) | 0,033 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 1,5 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 2,7 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,239 |



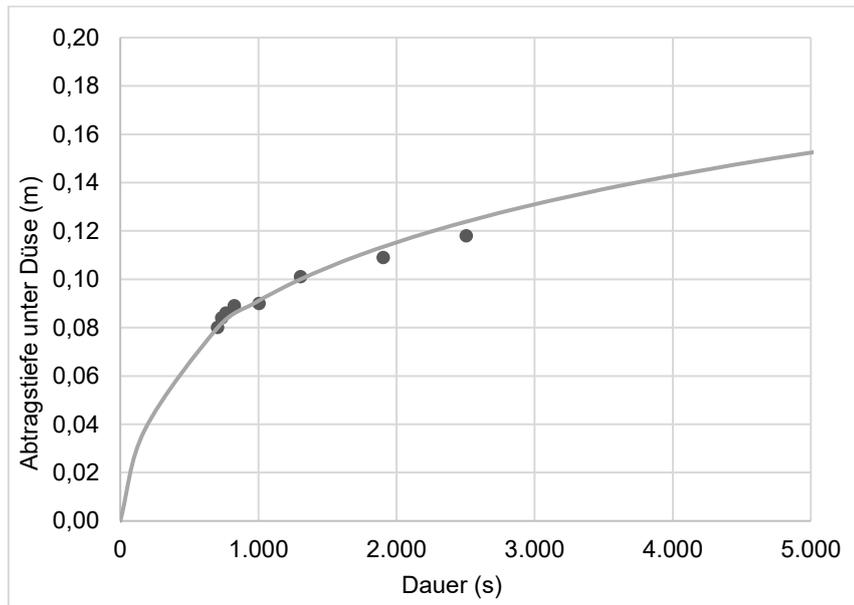
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 1.515,81 | 0,080 |
| 30 | 1.545,81 | 0,081 |
| 60 | 1.575,81 | 0,082 |
| 120 | 1.635,81 | 0,087 |
| 300 | 1.815,81 | 0,088 |
| 600 | 2.115,81 | 0,092 |
| 1.200 | 2.715,81 | 0,098 |
| 1.800 | 3.315,81 | 0,101 |

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 32 | Höhe JET (m) | 0,23 |
| Kodierung | 1_Loe_160418_L_L_B_Au | Wirk. Schubspannung (Pa) | 108,2 |
| Datum | 17.04.2018 | Versuchsdauer (s) | 1.800 |
| Durchführung | JS | Endtiefe (relativ) (m) | 0,021 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 1 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 5,1 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,174 |



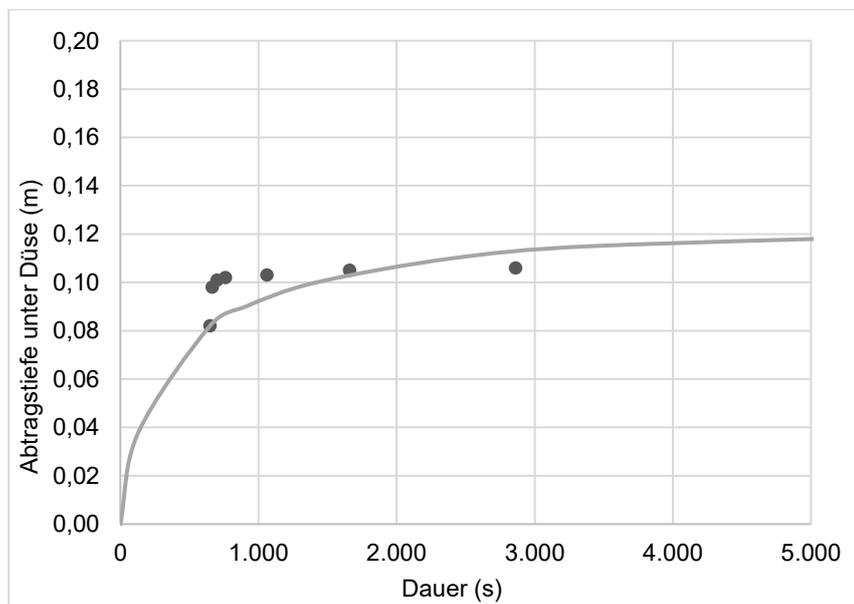
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 705,30 | 0,080 |
| 30 | 735,30 | 0,084 |
| 60 | 765,30 | 0,086 |
| 120 | 825,30 | 0,089 |
| 300 | 1.005,30 | 0,090 |
| 600 | 1.305,30 | 0,101 |
| 1.200 | 1.905,30 | 0,109 |
| 1.800 | 2.505,30 | 0,118 |

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|-------|
| ID | 33 | Höhe JET (m) | 0,23 |
| Kodierung | 1_Loe_160418_L_L_B_Au | Wirk. Schubspg. (Pa) | 108,2 |
| Datum | 17.04.2018 | Versuchsdauer (s) | 1.800 |
| Durchführung | JS | Endtiefe (relativ) (m) | 0,038 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 2 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 2,3 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,259 |



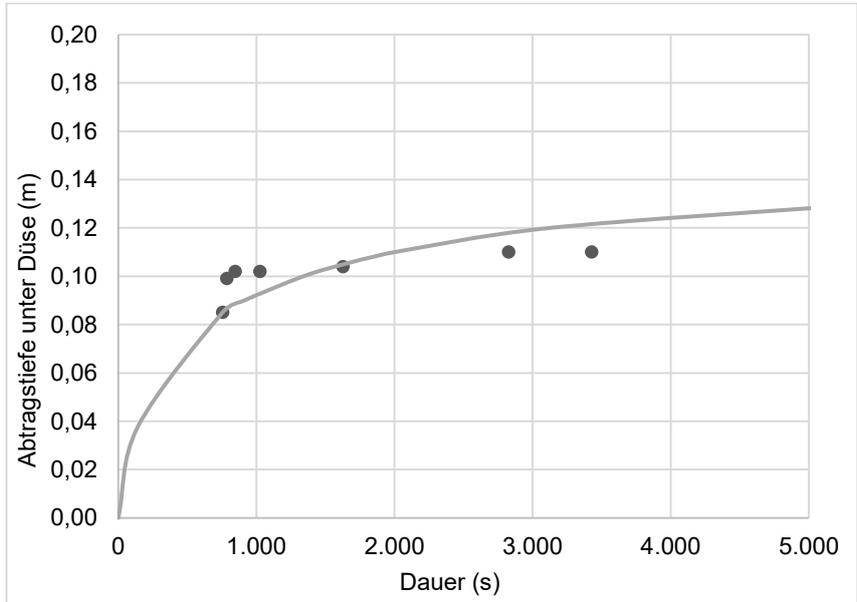
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 648,57 | 0,082 |
| 15,7 | 664,27 | 0,098 |
| 50,7 | 699,27 | 0,101 |
| 111,7 | 760,27 | 0,102 |
| 411,7 | 1.060,27 | 0,103 |
| 1.011,7 | 1.660,27 | 0,105 |
| 2.211,7 | 2.860,27 | 0,106 |

| | | | |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|-------|
| ID | 34 | Höhe JET (m) | 0,96 |
| Kodierung | 2_Loe_1-2_OU_1808_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 64,9 |
| Datum | 13.12.2018 | Versuchsdauer (s) | 2.210 |
| Durchführung | AR | Endtiefe (relativ) (m) | 0,024 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 5 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 6,3 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,121 |



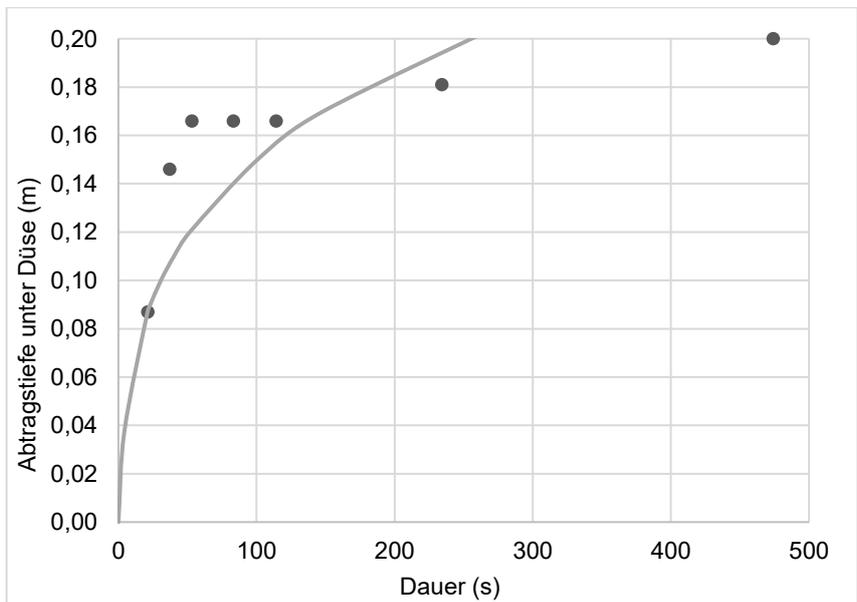
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 754,86 | 0,085 |
| 30,8 | 785,66 | 0,099 |
| 91,8 | 846,66 | 0,102 |
| 271,8 | 1.026,66 | 0,102 |
| 871,8 | 1.626,66 | 0,104 |
| 2.071,8 | 2.826,66 | 0,110 |
| 2.671,8 | 3.426,66 | 0,110 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|-------|
| ID | 35 | Höhe JET (m) | 0,84 |
| Kodierung | <i>2_Loe_1-1_OU_1808_R</i> | Wirk. Schubspannung (Pa) | 72 |
| Datum | 14.12.2018 | Versuchsdauer (s) | 2.670 |
| Durchführung | AR | Endtiefe (relativ) (m) | 0,025 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 4 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 5,5 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,137 |



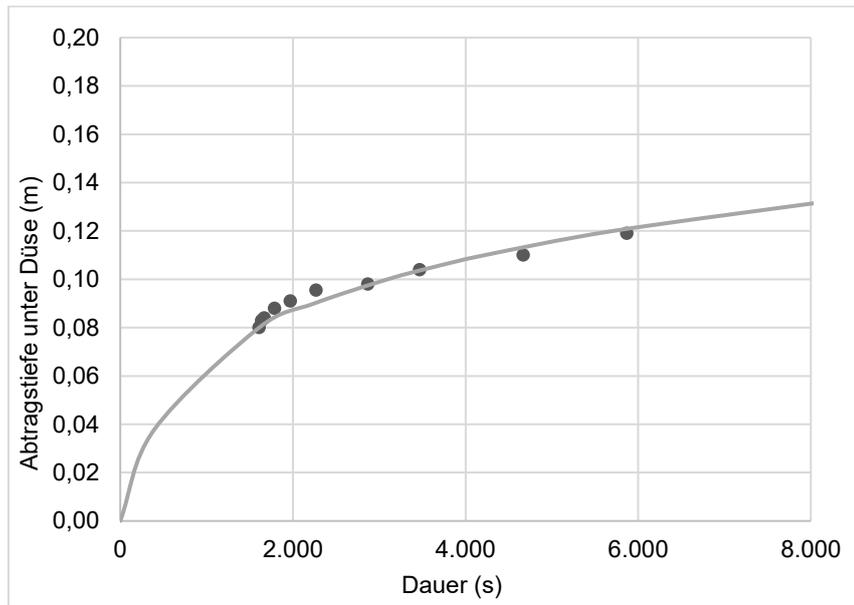
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 21,14 | 0,087 |
| 16 | 37,14 | 0,146 |
| 32 | 53,14 | 0,166 |
| 62 | 83,14 | 0,166 |
| 93 | 114,14 | 0,166 |
| 213 | 234,14 | 0,181 |
| 453 | 474,14 | 0,201 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|-------|
| ID | 36 | Höhe JET (m) | 0,84 |
| Kodierung | <i>2_Loe_4-1_OU_1808_R</i> | Wirk. Schubspannung (Pa) | 72 |
| Datum | 17.12.2018 | Versuchsdauer (s) | 453 |
| Durchführung | AR | Endtiefe (relativ) (m) | 0,114 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 120 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,514 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,447 |



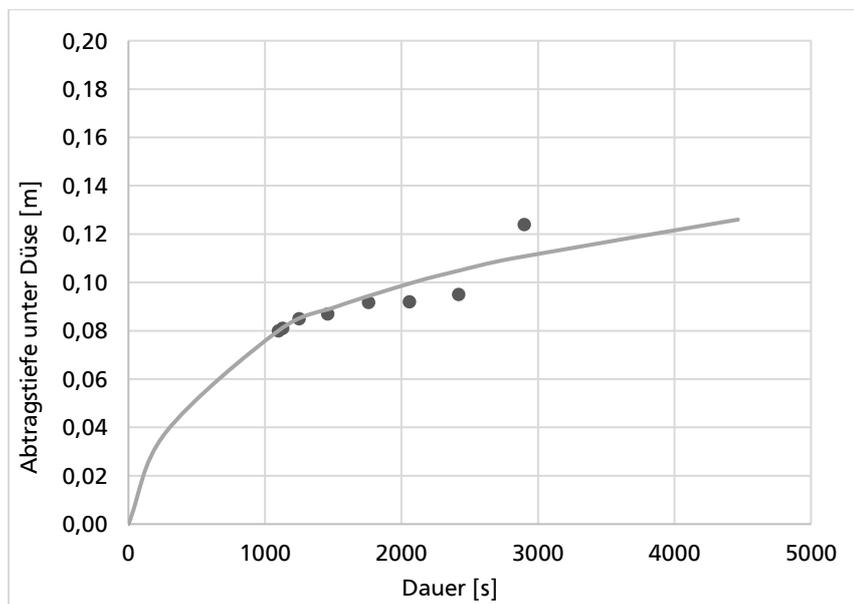
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 1.608,89 | 0,080 |
| 30 | 1.638,89 | 0,083 |
| 60 | 1.668,89 | 0,084 |
| 180 | 1.788,89 | 0,088 |
| 360 | 1.968,89 | 0,091 |
| 660 | 2.268,89 | 0,096 |
| 1.260 | 2.868,89 | 0,098 |
| 1.860 | 3.468,89 | 0,104 |
| 3.060 | 4.668,89 | 0,110 |
| 4.260 | 5.868,89 | 0,119 |

| | | | |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------|
| ID | 37 | Höhe JET (m) | 1,40 |
| Kodierung | <i>2_Loe_42_OU_1808_R</i> | Wirk. Schubspannung (Pa) | 40 |
| Datum | 17.12.2018 | Versuchsdauer (s) | 4.260 |
| Durchführung | AR | Endtiefe (relativ) (m) | 0,039 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 2,5 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 1,62 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,188 |



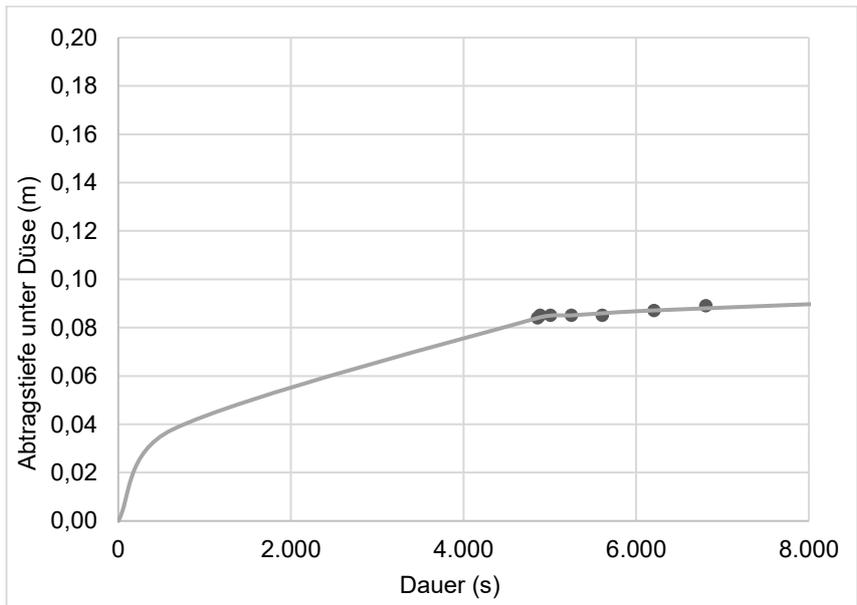
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 1.254,47 | 0,084 |
| 30 | 1.284,47 | 0,085 |
| 150 | 1.404,47 | 0,089 |
| 360 | 1.614,47 | 0,091 |
| 660 | 1.914,47 | 0,096 |
| 960 | 2.214,47 | 0,096 |
| 1.320 | 2.574,47 | 0,099 |
| 1.800 | 3.054,47 | 0,128 |

| | | | |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------|
| ID | 38 | Höhe JET (m) | 0,84 |
| Kodierung | <i>2_Loe_B_LG_1804_Pr</i> | Wirk. Schubspannung (Pa) | 72 |
| Datum | 18.12.2018 | Versuchsdauer (s) | 1.800 |
| Durchführung | AR + SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,044 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 2 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 2,48 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,204 |



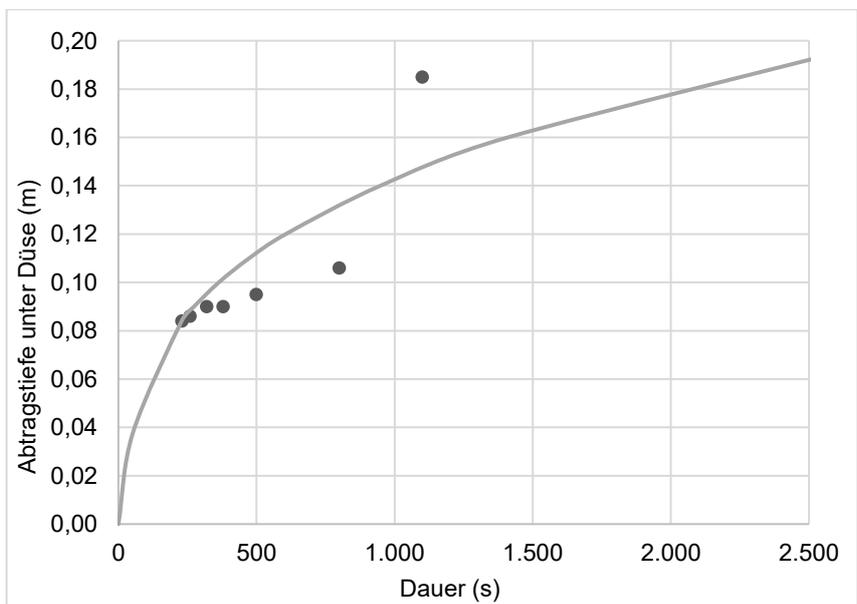
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 4.858,33 | 0,084 |
| 30 | 4.888,33 | 0,085 |
| 150 | 5.008,33 | 0,085 |
| 390 | 5.248,33 | 0,085 |
| 750 | 5.608,33 | 0,085 |
| 1.350 | 6.208,33 | 0,087 |
| 1.950 | 6.808,33 | 0,089 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 39 | Höhe JET (m) | 0,84 |
| Kodierung | 2_Loe_B_LG_1804_Wi 1 | Wirk. Schubspannung (Pa) | 72 |
| Datum | 18.12.2018 | Versuchsdauer (s) | 1.950 |
| Durchführung | AR + SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,005 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 1 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 11,67 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,094 |



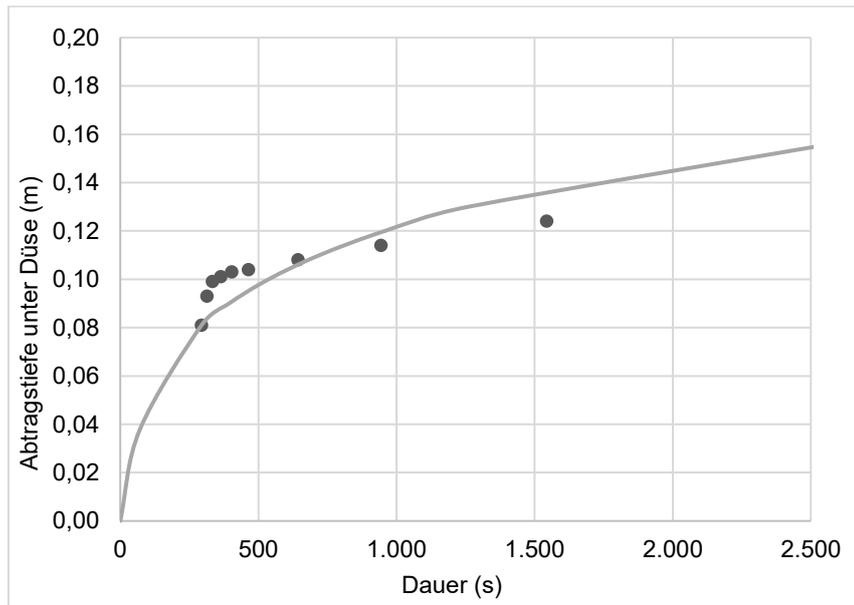
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 229,02 | 0,084 |
| 30 | 259,02 | 0,086 |
| 90 | 319,02 | 0,090 |
| 150 | 379,02 | 0,090 |
| 270 | 499,02 | 0,095 |
| 570 | 799,02 | 0,106 |
| 870 | 1.099,02 | 0,185 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 40 | Höhe JET (m) | 0,84 |
| Kodierung | 2_Loe_B_LG_1804_Wi 2 | Wirk. Schubspannung (Pa) | 72 |
| Datum | 19.12.2018 | Versuchsdauer (s) | 870 |
| Durchführung | SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,101 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 10 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,23 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,669 |



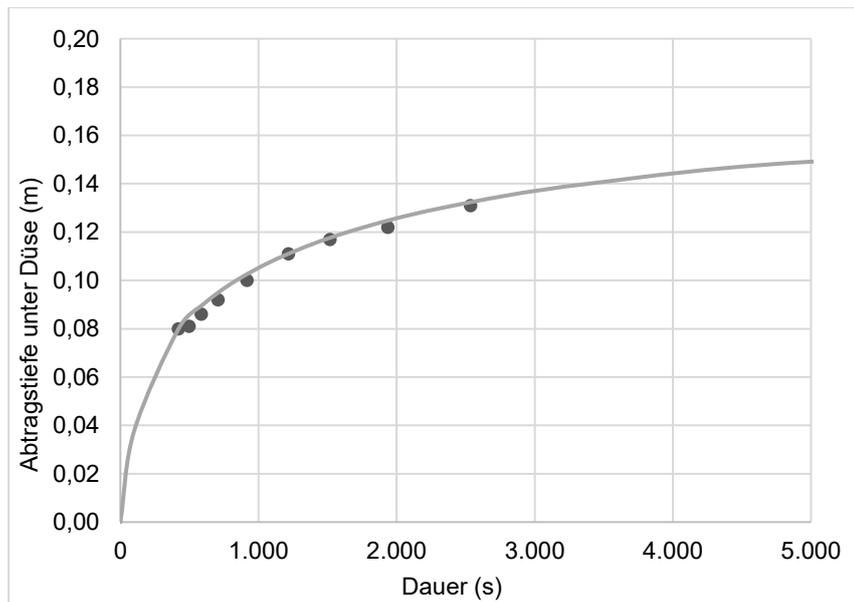
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 294,24 | 0,081 |
| 20 | 314,24 | 0,093 |
| 40 | 334,24 | 0,099 |
| 70 | 364,24 | 0,101 |
| 110 | 404,24 | 0,103 |
| 170 | 464,24 | 0,104 |
| 350 | 644,24 | 0,108 |
| 650 | 944,24 | 0,114 |
| 1.250 | 1.544,24 | 0,124 |

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 41 | Höhe JET (m) | 1,45 |
| Kodierung | 2_Sta_1_V_1708_Wgl_10 | Wirk. Schubspannung (Pa) | 36,7 |
| Datum | 20.12.2018 | Versuchsdauer (s) | 1.250 |
| Durchführung | AR + SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,043 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 15 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 1,14 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,214 |



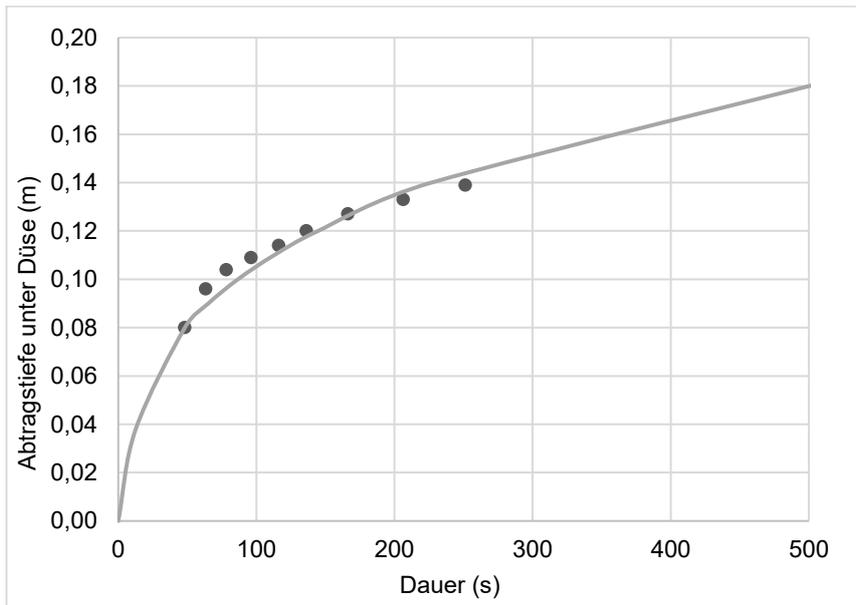
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 421,22 | 0,080 |
| 75 | 496,22 | 0,081 |
| 165 | 586,22 | 0,086 |
| 285 | 706,22 | 0,092 |
| 495 | 916,22 | 0,100 |
| 795 | 1.216,22 | 0,111 |
| 1.095 | 1.516,22 | 0,117 |
| 1.515 | 1.936,22 | 0,122 |
| 2.115 | 2.536,22 | 0,131 |

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 42 | Höhe JET (m) | 1,32 |
| Kodierung | 2_Sta_2_V_1708_Wgl_15 | Wirk. Schubspannung (Pa) | 44,2 |
| Datum | 21.01.2019 | Versuchsdauer (s) | 2.115 |
| Durchführung | AR + SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,051 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 9 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 2,4 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,162 |



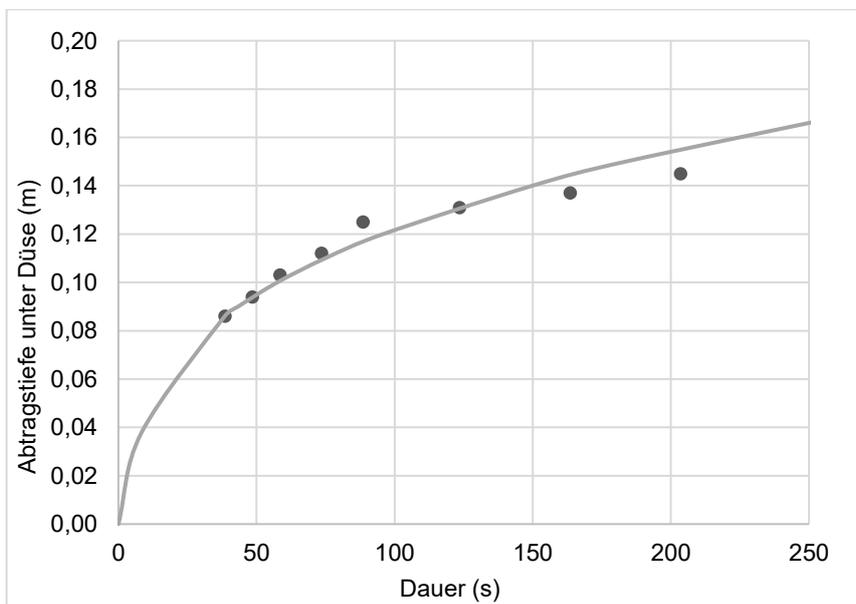
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 48,20 | 0,080 |
| 15 | 63,20 | 0,096 |
| 30 | 78,20 | 0,104 |
| 48 | 96,20 | 0,109 |
| 68 | 116,20 | 0,114 |
| 88 | 136,20 | 0,120 |
| 118 | 166,20 | 0,127 |
| 158 | 206,20 | 0,133 |
| 203 | 251,20 | 0,139 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------|
| ID | 43 | Höhe JET (m) | 1,56 |
| Kodierung | 2_Sta_3_V_1708_Wgl_5 | Wirk. Schubspannung (Pa) | 30,3 |
| Datum | 22.01.2019 | Versuchsdauer (s) | 203 |
| Durchführung | SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,059 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 100 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,12 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,601 |



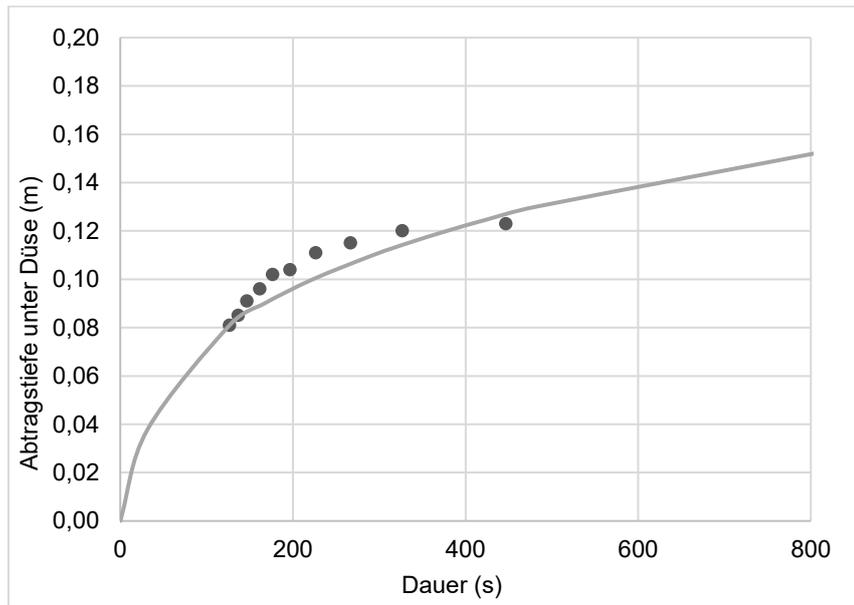
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 38,51 | 0,086 |
| 10 | 48,51 | 0,094 |
| 20 | 58,51 | 0,103 |
| 35 | 73,51 | 0,112 |
| 50 | 88,51 | 0,125 |
| 85 | 123,51 | 0,131 |
| 125 | 163,51 | 0,137 |
| 165 | 203,51 | 0,145 |

| | | | |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|-------|
| ID | 44 | Höhe JET (m) | 1,56 |
| Kodierung | 2_Gru_Cv_LG_1705_Pr | Wirk. Schubspannung (Pa) | 30,3 |
| Datum | 22.01.2019 | Versuchsdauer (s) | 165 |
| Durchführung | SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,059 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 150 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,087 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,705 |



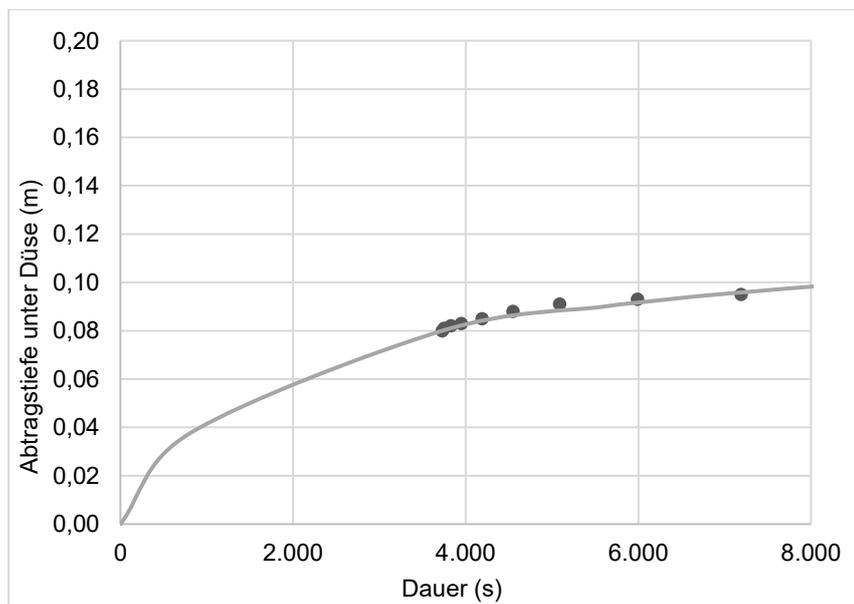
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 126,65 | 0,081 |
| 10 | 136,65 | 0,085 |
| 20 | 146,65 | 0,091 |
| 35 | 161,65 | 0,096 |
| 50 | 176,65 | 0,102 |
| 70 | 196,65 | 0,104 |
| 100 | 226,65 | 0,111 |
| 140 | 266,65 | 0,115 |
| 200 | 326,65 | 0,12 |
| 320 | 446,65 | 0,123 |
| 500 | 626,65 | 0,126 |

| | | | |
|-----------------------------|--------------------|--------------------------|-------|
| ID | 45 | Höhe JET (m) | 1,56 |
| Kodierung | 2_Gru_A_LG_1705_Pr | Wirk. Schubspannung (Pa) | 30,3 |
| Datum | 23.01.2019 | Versuchsdauer (s) | 500 |
| Durchführung | SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,045 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 40 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,34 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,357 |



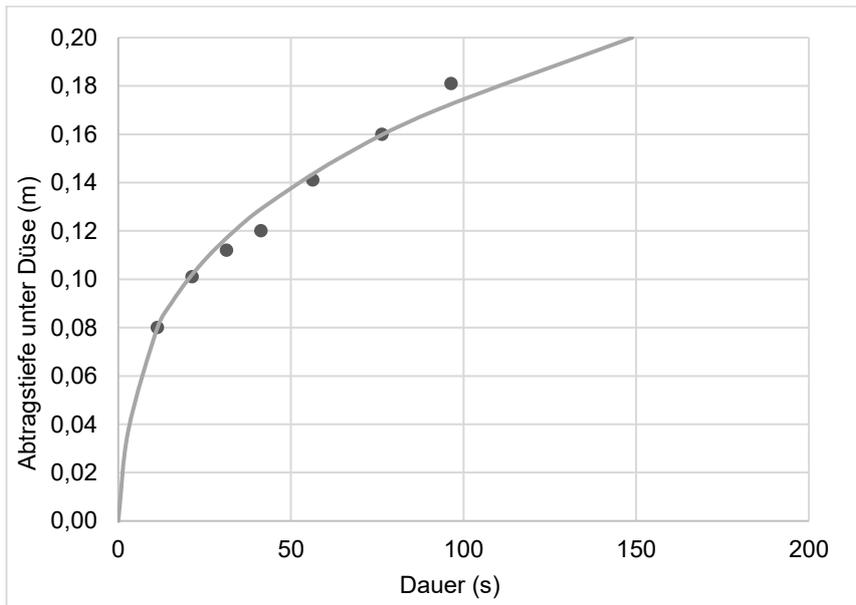
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 3.728,71 | 0,080 |
| 20 | 3.748,71 | 0,081 |
| 100 | 3.828,71 | 0,082 |
| 220 | 3.948,71 | 0,083 |
| 460 | 4.188,71 | 0,085 |
| 820 | 4.548,71 | 0,088 |
| 1.360 | 5.088,71 | 0,091 |
| 2.260 | 5.988,71 | 0,093 |
| 3.460 | 7.188,71 | 0,095 |

| | | | |
|-----------------------------|--------------------|--------------------------|-------|
| ID | 46 | Höhe JET (m) | 1,20 |
| Kodierung | 2_Loe_A_LG_1703_Pr | Wirk. Schubspannung (Pa) | 51 |
| Datum | 23.01.2019 | Versuchsdauer (s) | 3460 |
| Durchführung | SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,015 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 1 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 4,69 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,125 |



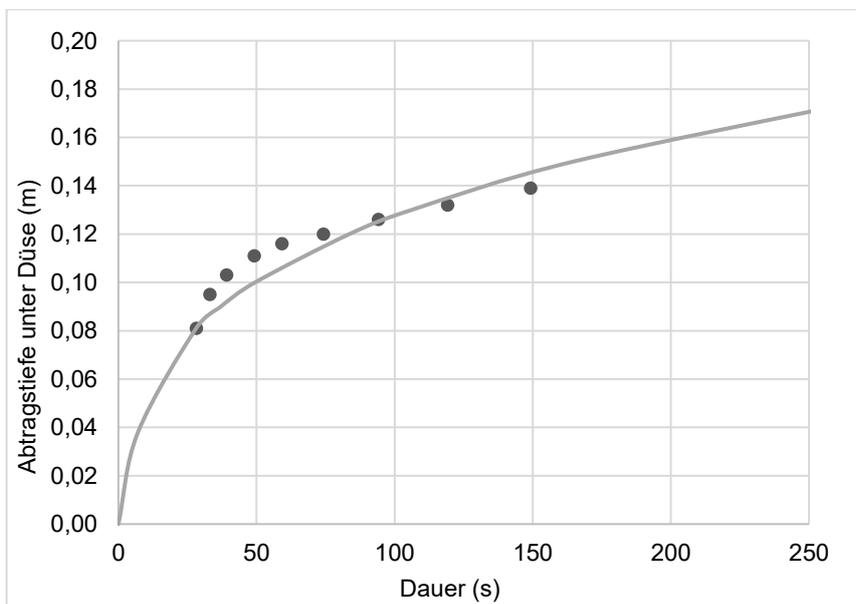
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 11,35 | 0,080 |
| 10 | 21,35 | 0,101 |
| 20 | 31,35 | 0,112 |
| 30 | 41,35 | 0,12 |
| 45 | 56,35 | 0,141 |
| 65 | 76,35 | 0,16 |
| 85 | 96,35 | 0,181 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|-------|
| ID | 47 | Höhe JET (m) | 1,20 |
| Kodierung | <i>2_Loe_Cv_LG_1703_Pr</i> | Wirk. Schubspannung (Pa) | 51 |
| Datum | 23.01.2019 | Versuchsdauer (s) | 85 |
| Durchführung | SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,101 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 250 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,01 | Gleichgewichtstiefe (m) | 2,699 |



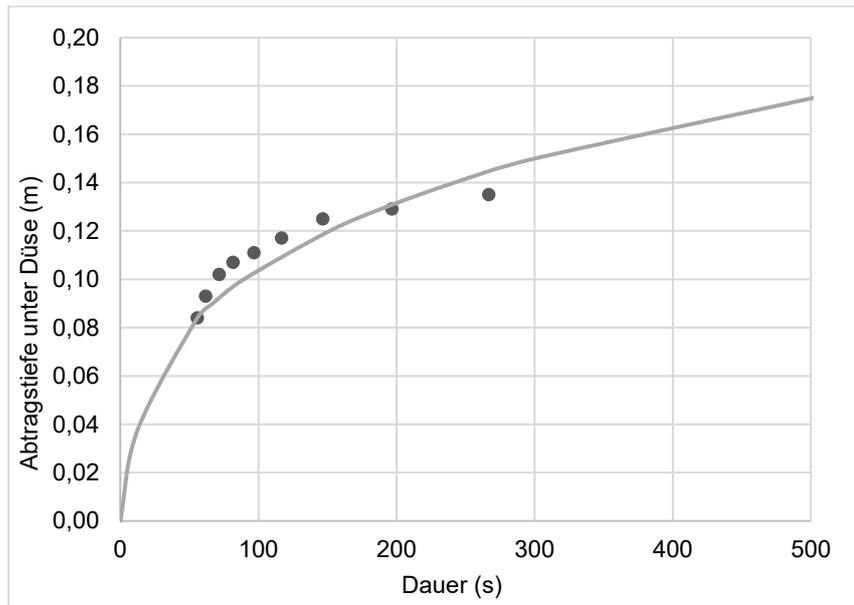
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 28,15 | 0,081 |
| 5 | 33,15 | 0,095 |
| 11 | 39,15 | 0,103 |
| 21 | 49,15 | 0,111 |
| 31 | 59,15 | 0,116 |
| 46 | 74,15 | 0,120 |
| 66 | 94,15 | 0,126 |
| 91 | 119,15 | 0,132 |
| 121 | 149,15 | 0,139 |

| | | | |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|-------|
| ID | 48 | Höhe JET (m) | 1,36 |
| Kodierung | <i>2_Loe_4_OG_1808_R</i> | Wirk. Schubspannung (Pa) | 41,8 |
| Datum | 24.01.2019 | Versuchsdauer (s) | 121 |
| Durchführung | SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,058 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 130 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,41 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,382 |



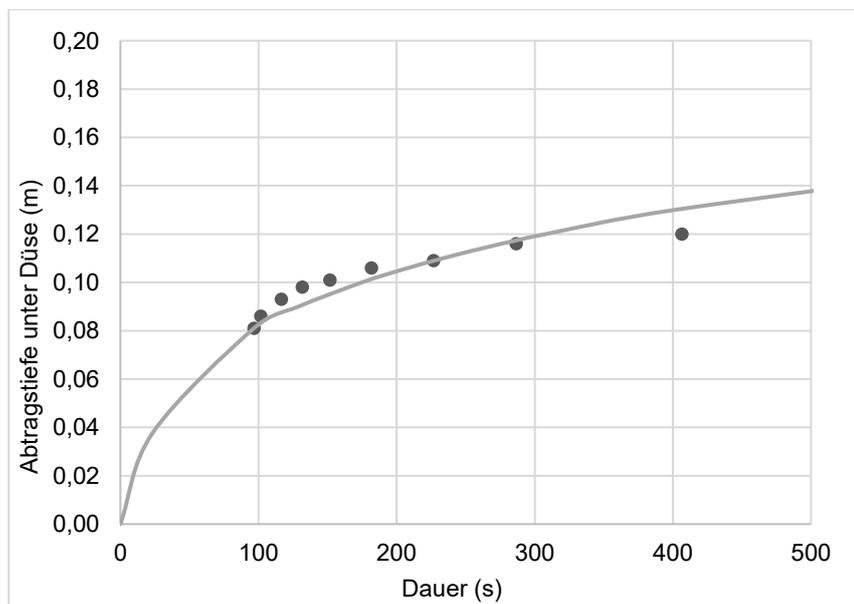
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 55,81 | 0,084 |
| 6 | 61,81 | 0,093 |
| 16 | 71,81 | 0,102 |
| 26 | 81,81 | 0,107 |
| 41 | 96,81 | 0,111 |
| 61 | 116,81 | 0,117 |
| 91 | 146,81 | 0,125 |
| 141 | 196,81 | 0,129 |
| 211 | 266,81 | 0,135 |

| | | | |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|-------|
| ID | 49 | Höhe JET (m) | 1,04 |
| Kodierung | 2_Loe_2-2_OG_1808_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 60,4 |
| Datum | 24.01.2019 | Versuchsdauer (s) | 211 |
| Durchführung | SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,051 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 50 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,67 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,359 |



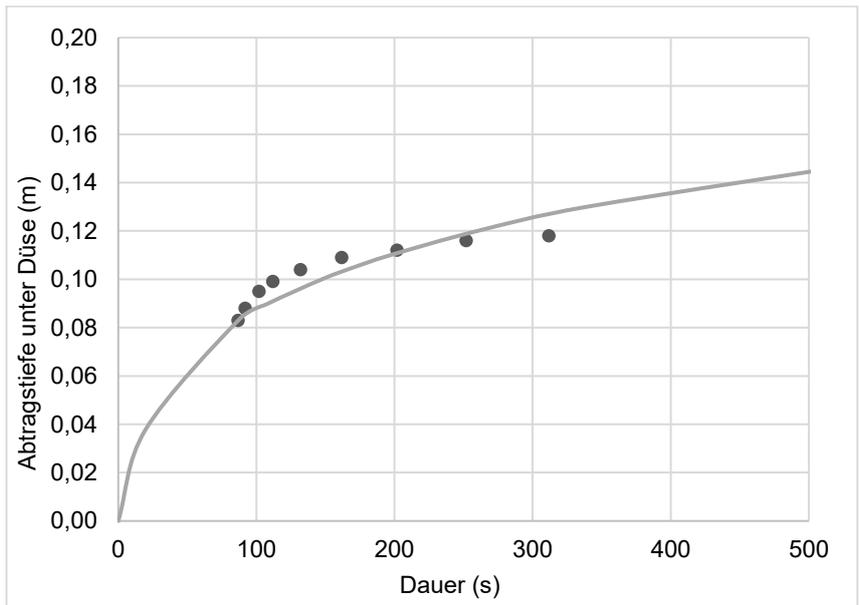
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 96,65 | 0,081 |
| 5 | 101,65 | 0,086 |
| 20 | 116,65 | 0,093 |
| 35 | 131,65 | 0,098 |
| 55 | 151,65 | 0,101 |
| 85 | 181,65 | 0,106 |
| 130 | 226,65 | 0,109 |
| 190 | 286,65 | 0,116 |
| 310 | 406,65 | 0,120 |

| | | | |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|-------|
| ID | 50 | Höhe JET (m) | 1,51 |
| Kodierung | 2_Loe_2-1_OG_1808_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 33,1 |
| Datum | 25.01.2019 | Versuchsdauer (s) | 310 |
| Durchführung | SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,039 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 50 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,88 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,232 |



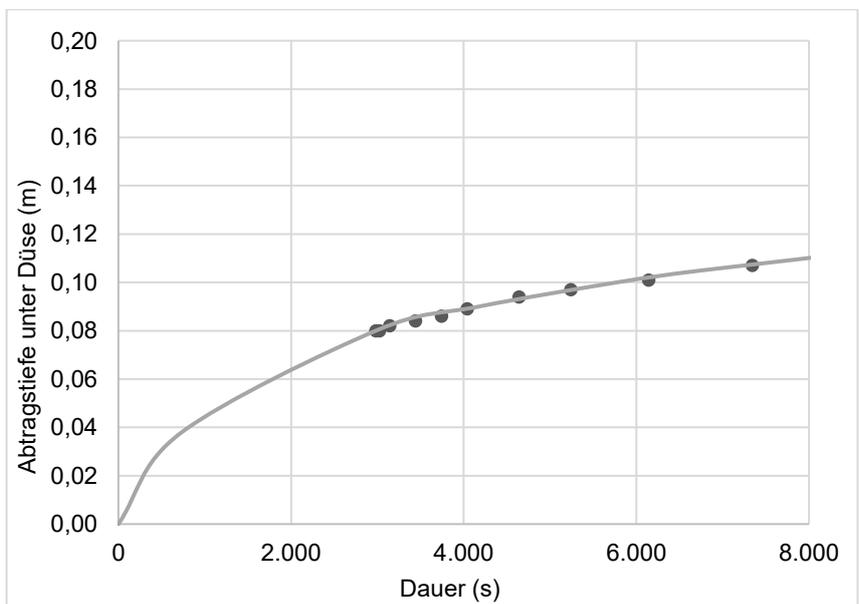
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 86,89 | 0,083 |
| 5 | 91,89 | 0,088 |
| 15 | 101,89 | 0,095 |
| 25 | 111,89 | 0,099 |
| 45 | 131,89 | 0,104 |
| 75 | 161,89 | 0,109 |
| 115 | 201,89 | 0,112 |
| 165 | 251,89 | 0,116 |
| 225 | 311,89 | 0,118 |

| | | | |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|-------|
| ID | 51 | Höhe JET (m) | 1,52 |
| Kodierung | <i>2_Loe_6_OG_1808_R</i> | Wirk. Schubspannung (Pa) | 32,8 |
| Datum | 28.01.2019 | Versuchsdauer (s) | 225 |
| Durchführung | SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,035 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 60 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,89 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,229 |



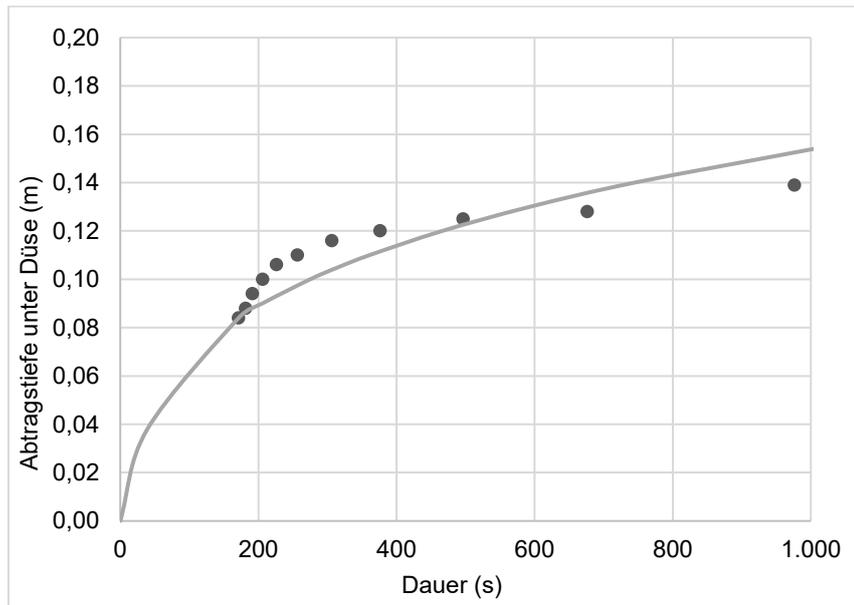
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 2.981.41 | 0,080 |
| 40 | 3.021.41 | 0,080 |
| 160 | 3.141.41 | 0,082 |
| 460 | 3.441.41 | 0,084 |
| 760 | 3.741.41 | 0,086 |
| 1.060 | 4.041.41 | 0,089 |
| 1.660 | 4.641.41 | 0,094 |
| 2.260 | 5.241.41 | 0,097 |
| 3.160 | 6.141.41 | 0,101 |
| 4.360 | 7.341.41 | 0,107 |

| | | | |
|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------|
| ID | 52 | Höhe JET (m) | 1,04 |
| Kodierung | <i>2_Loe_2-2_V_1808_Wgl_234</i> | Wirk. Schubspg. (Pa) | 60,4 |
| Datum | 28.01.2019 | Versuchsdauer (s) | 4360 |
| Durchführung | SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,027 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 0.9 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 2,6 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,182 |



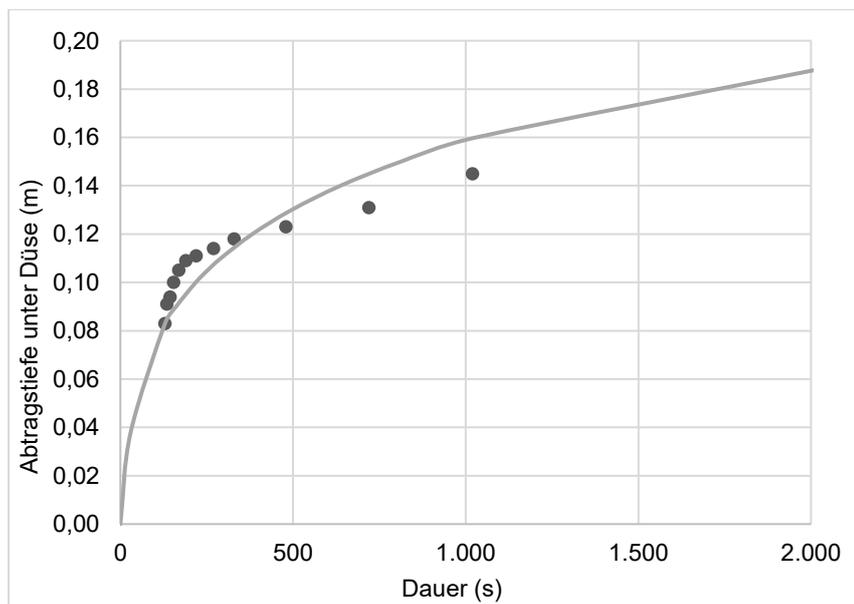
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 171,40 | 0,084 |
| 10 | 181,40 | 0,088 |
| 20 | 191,40 | 0,094 |
| 35 | 206,40 | 0,100 |
| 55 | 226,40 | 0,106 |
| 85 | 256,40 | 0,110 |
| 135 | 306,40 | 0,116 |
| 205 | 376,40 | 0,120 |
| 325 | 496,40 | 0,125 |
| 505 | 676,40 | 0,128 |
| 805 | 976,40 | 0,139 |

| | | | |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|-------|
| ID | 53 | Höhe JET (m) | 1,52 |
| Kodierung | 2_Loe_1-1_OG_1808_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 32,8 |
| Datum | 28.01.2019 | Versuchsdauer (s) | 805 |
| Durchführung | SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,055 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 30 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,372 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,355 |



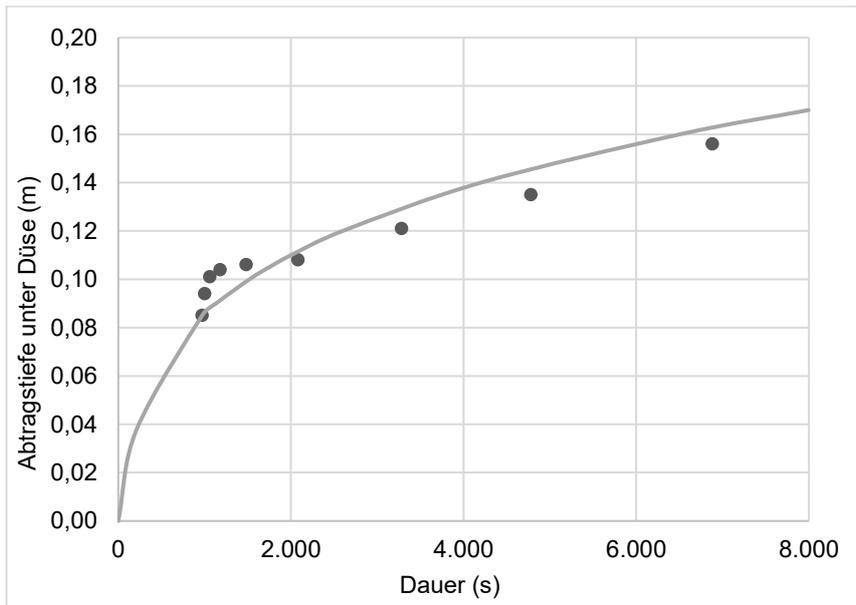
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 129,29 | 0,083 |
| 5 | 134,29 | 0,091 |
| 15 | 144,29 | 0,094 |
| 25 | 154,29 | 0,100 |
| 40 | 169,29 | 0,105 |
| 60 | 189,29 | 0,109 |
| 90 | 219,29 | 0,111 |
| 140 | 269,29 | 0,114 |
| 200 | 329,29 | 0,118 |
| 350 | 479,29 | 0,123 |
| 590 | 719,29 | 0,131 |
| 890 | 1.019,29 | 0,145 |

| | | | |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|-------|
| ID | 54 | Höhe JET (m) | 1,52 |
| Kodierung | 2_Loe_1-2_OG_1808_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 32,8 |
| Datum | 29.01.2019 | Versuchsdauer (s) | 890 |
| Durchführung | SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,062 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 40 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,8 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,242 |



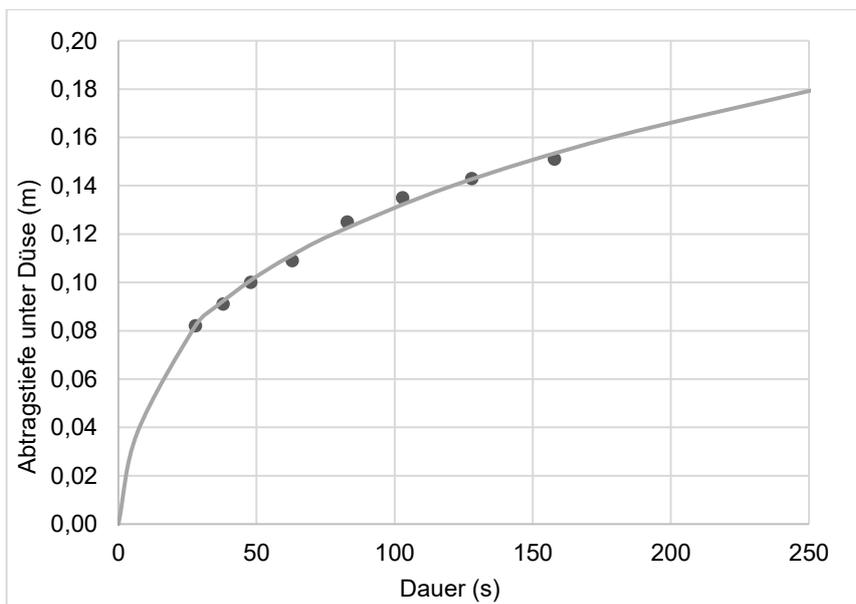
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 971,48 | 0,085 |
| 30 | 1.001,48 | 0,094 |
| 90 | 1.061,48 | 0,101 |
| 210 | 1.181,48 | 0,104 |
| 510 | 1.481,48 | 0,106 |
| 1.110 | 2.081,48 | 0,108 |
| 2.310 | 3.281,48 | 0,121 |
| 3.810 | 4.781,48 | 0,135 |
| 5.910 | 6.881,48 | 0,156 |

| | | | |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-------|
| ID | 55 | Höhe JET (m) | 1,04 |
| Kodierung | 2_Loe_B_V_1804_Wgl_226 | Wirk. Schubspg. (Pa) | 60,4 |
| Datum | 29.01.2019 | Versuchsdauer (s) | 5.910 |
| Durchführung | SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,071 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 3 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,93 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,305 |



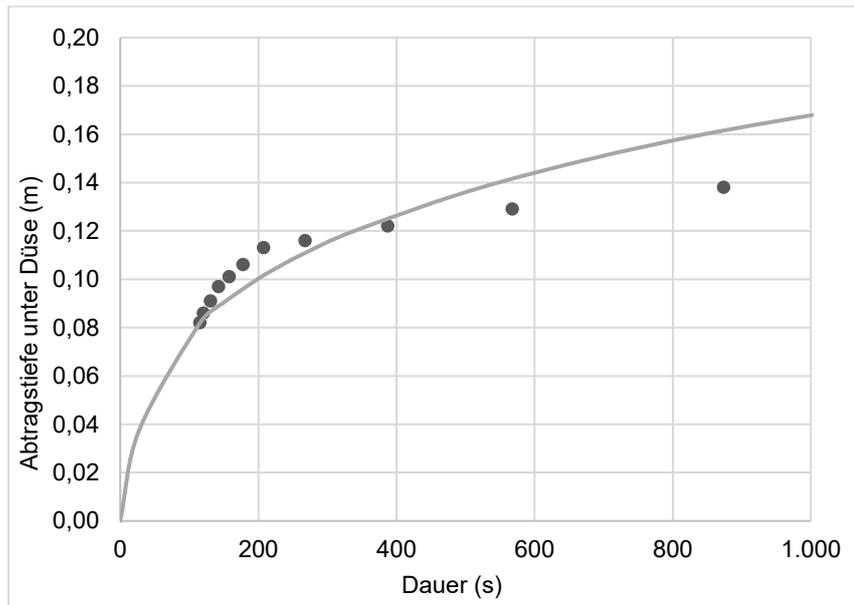
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 27,86 | 0,082 |
| 10 | 37,86 | 0,091 |
| 20 | 47,86 | 0,100 |
| 35 | 62,86 | 0,109 |
| 55 | 82,86 | 0,125 |
| 75 | 102,86 | 0,135 |
| 100 | 127,86 | 0,143 |
| 130 | 157,86 | 0,151 |

| | | | |
|-----------------------------|--------------------|--------------------------|-------|
| ID | 56 | Höhe JET (m) | 1,29 |
| Kodierung | 2_Loe_4_V_1808_Wgl | Wirk. Schubspannung (Pa) | 46,1 |
| Datum | 29.01.2019 | Versuchsdauer (s) | 130 |
| Durchführung | SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,069 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 120 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,034 | Gleichgewichtstiefe (m) | 1,392 |



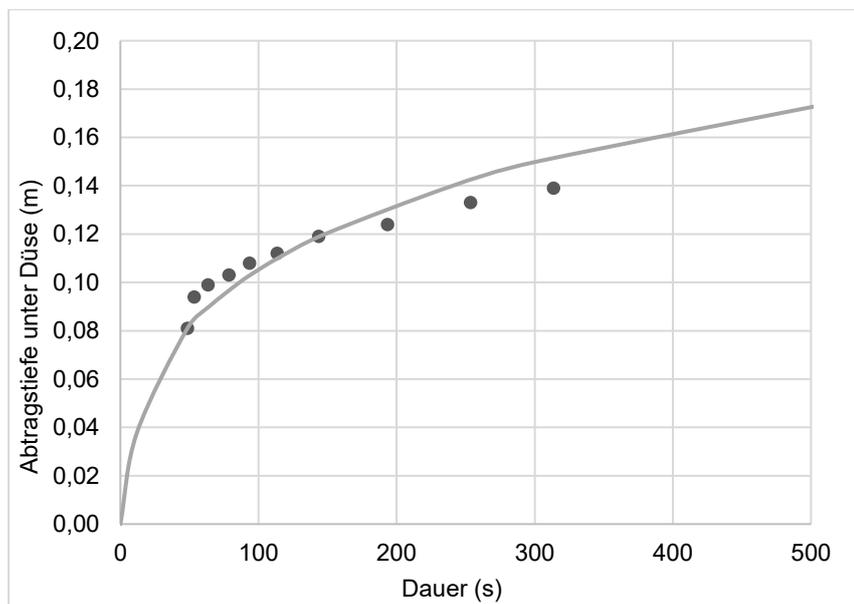
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 115,63 | 0,082 |
| 5 | 120,63 | 0,086 |
| 15 | 130,63 | 0,091 |
| 27 | 142,63 | 0,097 |
| 42 | 157,63 | 0,101 |
| 62 | 177,63 | 0,106 |
| 92 | 207,63 | 0,113 |
| 152 | 267,63 | 0,116 |
| 272 | 387,63 | 0,122 |
| 452 | 567,63 | 0,129 |
| 758 | 873,63 | 0,138 |

| | | | |
|-----------------------------|-------------------|--------------------------|-------|
| ID | 57 | Höhe JET (m) | 1,29 |
| Kodierung | 2_Loe_6_V_1808_Wg | Wirk. Schubspannung (Pa) | 46,1 |
| Datum | 30.01.2019 | Versuchsdauer (s) | 758 |
| Durchführung | SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,056 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 30 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,68 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,311 |



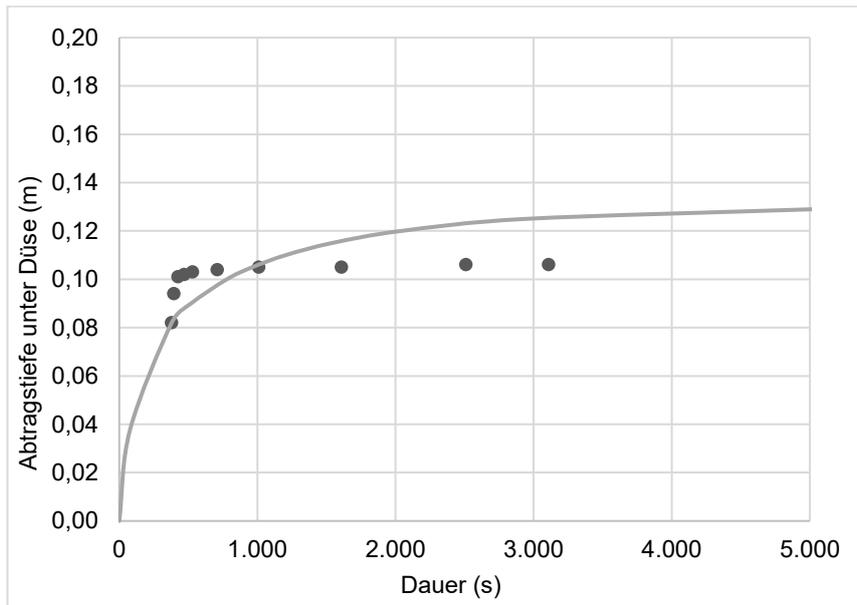
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 48,53 | 0,081 |
| 5 | 53,53 | 0,094 |
| 15 | 63,53 | 0,099 |
| 30 | 78,53 | 0,103 |
| 45 | 93,53 | 0,108 |
| 65 | 113,53 | 0,112 |
| 95 | 143,53 | 0,119 |
| 145 | 193,53 | 0,124 |
| 205 | 253,53 | 0,133 |
| 265 | 313,53 | 0,139 |

| | | | |
|-----------------------------|-------------------|--------------------------|-------|
| ID | 58 | Höhe JET (m) | 1,72 |
| Kodierung | 2_Loe_3_OG_1808_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 21,4 |
| Datum | 30.01.2019 | Versuchsdauer (s) | 265 |
| Durchführung | AR + SA | Endtiefe (relativ) (m) | 0,058 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 150 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,36 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,291 |



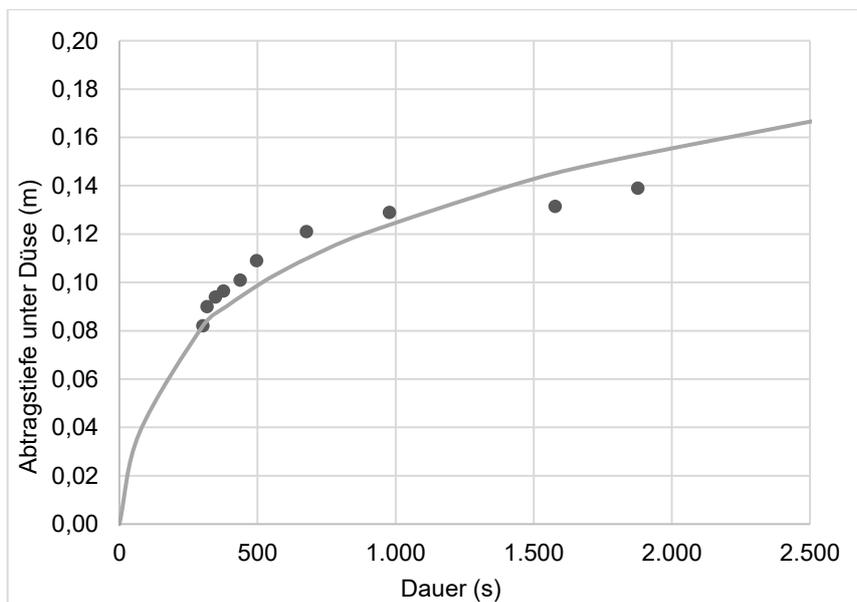
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 379,46 | 0,082 |
| 15 | 394,46 | 0,094 |
| 45 | 424,46 | 0,101 |
| 90 | 469,46 | 0,102 |
| 150 | 529,46 | 0,103 |
| 330 | 709,46 | 0,104 |
| 630 | 1.009,46 | 0,105 |
| 1.230 | 1.609,46 | 0,105 |
| 2.130 | 2.509,46 | 0,106 |
| 2.730 | 3.109,46 | 0,106 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|-------|
| ID | 59 | Höhe JET (m) | 1,32 |
| Kodierung | <i>2_Loe_6-2_OU_1808_R</i> | Wirk. Schubspannung (Pa) | 43,9 |
| Datum | 01.02.2019 | Versuchsdauer (s) | 2.730 |
| Durchführung | AR | Endtiefe (relativ) (m) | 0,024 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 12 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 3,7 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,130 |



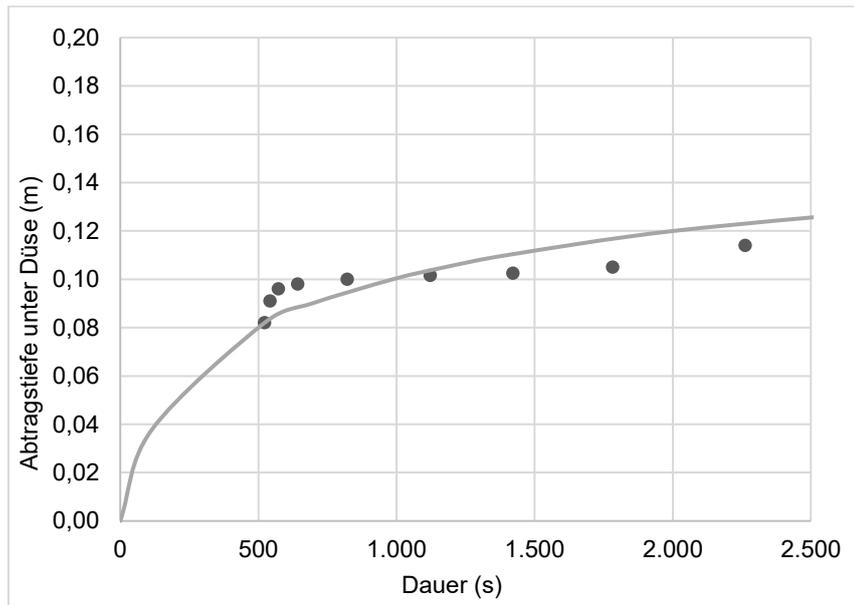
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 302,31 | 0,082 |
| 14,5 | 316,81 | 0,090 |
| 44,5 | 346,81 | 0,094 |
| 74,5 | 376,81 | 0,097 |
| 134,5 | 436,81 | 0,101 |
| 194,5 | 496,81 | 0,109 |
| 374,5 | 676,81 | 0,121 |
| 674,5 | 976,81 | 0,129 |
| 1.274,5 | 1.576,81 | 0,132 |
| 1.574,5 | 1.876,81 | 0,139 |

| | | | |
|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|-------|
| ID | 60 | Höhe JET (m) | 1,32 |
| Kodierung | <i>2_Loe_6-1_OU_1808_R</i> | Wirk. Schubspannung (Pa) | 43,9 |
| Datum | 05.02.2019 | Versuchsdauer (s) | 1.575 |
| Durchführung | AR | Endtiefe (relativ) (m) | 0,057 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 12 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,58 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,329 |



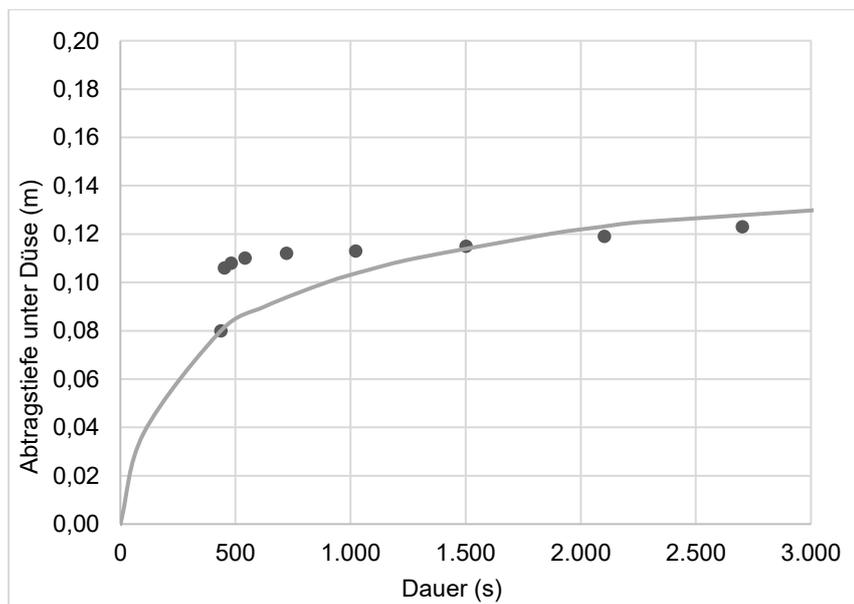
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 522,31 | 0,082 |
| 20 | 542,31 | 0,091 |
| 50 | 572,31 | 0,096 |
| 120 | 642,31 | 0,098 |
| 300 | 822,31 | 0,100 |
| 600 | 1.122,31 | 0,102 |
| 900 | 1.422,31 | 0,103 |
| 1.260 | 1.782,31 | 0,105 |
| 1.740 | 2.262,31 | 0,114 |

| | | | |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|-------|
| ID | 61 | Höhe JET (m) | 1,32 |
| Kodierung | 2_Loe_2-2_OU_1808_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 43,9 |
| Datum | 07.02.2019 | Versuchsdauer (s) | 1.740 |
| Durchführung | AR | Endtiefe (relativ) (m) | 0,032 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 8 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 2,65 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,154 |



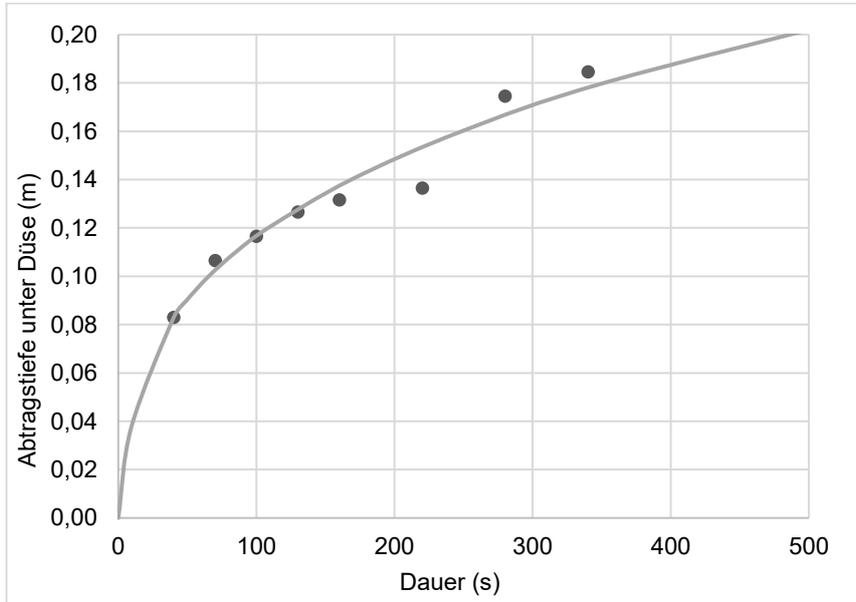
| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 436,80 | 0,080 |
| 15 | 451,80 | 0,106 |
| 45 | 481,80 | 0,108 |
| 105 | 541,80 | 0,110 |
| 285 | 721,80 | 0,112 |
| 585 | 1.021,80 | 0,113 |
| 1.065 | 1.501,80 | 0,115 |
| 1.665 | 2.101,80 | 0,119 |
| 2.265 | 2.701,80 | 0,123 |

| | | | |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|-------|
| ID | 62 | Höhe JET (m) | 1,32 |
| Kodierung | 2_Loe_2-1_OU_1808_R | Wirk. Schubspannung (Pa) | 43,9 |
| Datum | 08.02.2019 | Versuchsdauer (s) | 2.265 |
| Durchführung | AR | Endtiefe (relativ) (m) | 0,043 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 9 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 2,8 | Gleichgewichtstiefe (m) | 0,150 |



| Gemessene Kurve | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|
| t_{mess} (s) | t_{theo} (s) | H (m) |
| 0 | 40,16 | 0,083 |
| 30 | 70,16 | 0,107 |
| 60 | 100,16 | 0,117 |
| 90 | 130,16 | 0,127 |
| 120 | 160,16 | 0,132 |
| 180 | 220,16 | 0,137 |
| 240 | 280,16 | 0,175 |
| 300 | 340,16 | 0,185 |

| | | | |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|-------|
| ID | 63 | Höhe JET (m) | 1,32 |
| Kodierung | <i>2_Loe_3_OU_1808_R</i> | Wirk. Schubspannung (Pa) | 43,9 |
| Datum | 08.02.2019 | Versuchsdauer (s) | 300 |
| Durchführung | AR | Endtiefe (relativ) (m) | 0,102 |
| k_d (cm ³ /Ns) | 90 | Vergleichsmessung (m) | - |
| τ_c (Pa) | 0,0085 | Gleichgewichtstiefe (m) | 2,717 |



Anhang 5-5: Schlüssel zur Probencodierung

Messkampagne

| | |
|---|---|
| 1ste Messkampagne (August 17 bis Februar 18) | 1 |
| 2te Messkampagne (Dezember 18 bis März 19) | 2 |

Ort / Boden

| | |
|--------------------|-----|
| Standard | Sta |
| Groß-Bieberau Löss | Loe |
| Messbach Gruss | Gru |

Datum der Probenahme JJ_MM

| | |
|--|-------|
| Leitprofil Loess 17.03.2017 | 17_03 |
| Leitprofil Grus 22.05.2017 | 22_05 |
| Eingang Standardboden ~08.08.2017 | 08_08 |
| Oberflächenproben Loess - 1te 07.09.2017 | 07_09 |
| B-Horizont Loess 16.04.2018 | 16_04 |
| Oberflächenproben Loess - 2te 15.08.18 | 15_08 |

Art der Probenahme

| | |
|-----------------|---|
| Standard | S |
| Vergleichsprobe | V |
| Leitprofil | L |
| Oberfläche | O |

Art der Probe

| | |
|------------|---|
| Gestört | G |
| Ungestört | U |
| Laborprobe | L |

Nummer zur Näheren Bezeichnung

| | |
|--|----------|
| Standard Versuche 1-X | z.B. 1 |
| Vegleichsprobe Versuche 1-X | z.B. 1 |
| Leitprofil - Horizontbezeichnung | z.B. Ah |
| B-Horizont Loess Versuche 1-X | z.B. B1 |
| Oberflächenproben Nummer des Standorts | z.B. 6-1 |

Vergleichsproben

| | |
|--------------------------------------|-----|
| Regulärer Versuch - kein Vergleich | R |
| Identischer Vergleich - Wiederholung | Wi |
| Wassergehalt | Wgl |
| Dichte | Di |
| Druckhöhe | Dr |
| Aufbereitung | Au |
| Person - Versuchsdurchführung | Pr |

Anhang 5-6: Fotodokumentation Starkregenereignis vom 23.04.2018



Erodiertes Feinmaterial nach Wiederablagerung, Ausbildung von Trockenrissen



Wiederabgelagertes Feinmaterial



Sedimentablagerung am Hangende



Fahrspuren als bevorzugte Erosionspfade



Flächenhafter Abtrag in Bewuchslücken



Flächenhafter Abtrag in Bewuchslücken



Oberfläche nach Ereignisende, Bewuchs vollständig verschlammmt (benachbarter Hang)