



Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



## **Förderung von Forschung, Entwicklung und Innovation in Sachsen EFRE-Technologieförderung 2014 bis 2020**

### **Sachbericht**

**Vorhabenbezeichnung:** Entwicklung eines Vorhersagesystems für Deichbrüche auf Basis experimenteller und mathematischer Modelle unter Berücksichtigung von Niederschlag und Vegetation bei sich ändernden Klimabedingungen sowie von umweltgerechten bautechnischen Lösungen zur Ertüchtigung vorhandener Dämme und Deiche (VSDS)

Teilprojekt: Simulation und Laborversuche

**Antragsnummer :** 100362351

**Kontonummer :** 3000738636

**Kreisnummer :** 612

**Antragsteller :** Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden

**Kundennummer :** 2000374508

**Clusternummer :** 3773

**PRANO-NR. :**

**Ausführender:** Institut für Grundwasserwirtschaft der TU Dresden  
komm. Leiter des Institutes: Prof. Dr. Stefan Stolte

**Wiss. Bearbeiter:**

Dr.-Ing. Thomas Fichtner

Dr.-Ing. Rene Blankenburg

Marwan El\_Masri (MSc)

Prof. Dr. Peter-Wolfgang Gräber

Dipl.-Ing. Frieder Hamann

## Inhaltsverzeichnis

<b>Teil 1: KURZFASSUNG</b>	<b>3</b>
<b>Teil 2: AUSFÜHRLICHER SACHBERICHT</b>	<b>3</b>
<b>1 PROJEKTZIEL</b>	<b>4</b>
<b>2 STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK</b>	<b>7</b>
2.1 NACHTEILE DES STANDES DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK	9
2.2 ANGABE VON ANDEREN LÖSUNGEN	11
<b>3 WISSENSCHAFTLICHE ERGEBNISSE</b>	<b>11</b>
3.1 AE-IGW 1: SOFTWAREENTWICKLUNG	11
3.1.1 <i>Mathematisches Modell der Wasserbilanz</i>	11
3.1.2 <i>Allgemeine Programmentwicklung</i>	12
3.1.3 <i>Codeentwicklung zur Stabilitätsberechnung</i>	13
3.1.4 <i>Weiterentwicklung GUI - Entwicklung einer Schnittstelle für den definierten Datenaustausch zwischen PCSiWaPro mit dem Stabilitätsmodul</i>	14
3.1.5 <i>Implementierung der Unschärfemodellierung auf Basis der Fuzzy-Set-Theorie</i>	17
3.1.6 <i>Zusammenfassung/Schlussfolgerung</i>	19
3.2 AE-IGW 2: KLEINSKALIGE LABORVERSUCHE	20
3.2.1 <i>Versuchsaufbau</i>	20
3.2.2 <i>Versuchsergebnisse Boden 1</i>	23
3.2.3 <i>Versuchsergebnisse Boden 2</i>	47
3.2.4 <i>Einfluss schnell absinkender Wasserspiegel</i>	52
3.2.5 <i>Zusammenfassung/Schlussfolgerung</i>	53
3.3 ZUSAMMENARBEIT MIT DEN PROJEKTPARTNERN	53
3.3.1 <i>M&amp;S Umweltprojekt GmbH</i>	53
3.3.2 <i>Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik e.V. (KSI)</i>	57
3.3.3 <i>Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik</i>	61
<b>4 VERWERTUNG</b>	<b>63</b>
4.1 VERWERTUNGSPOTENZIAL	63
4.2 MARKTANALYSE/-ABSCHÄTZUNG	63
4.3 VERWERTUNGSKONZEPT UND KALKULATIONSANSÄTZE	64
<b>5 VERÖFFENTLICHUNGEN</b>	<b>65</b>
<b>6 VERBESSERUNG DER UMWELTBEDINGUNGEN</b>	<b>66</b>
6.1 RISIKOPRÄVENTION, KATASTROPHENRESISTENZ	67
6.2 UMWELTRELEVANTE ZIELE	68
6.3 UMWELTENTLASTUNG	68
6.4 STOFFSTRÖME	68
<b>7 FINANZIERUNGS- UND ZEITPLAN</b>	<b>69</b>
<b>8 REFERENZEN</b>	<b>71</b>
<b>9 ANLAGEN - VERÖFFENTLICHUNGEN</b>	<b>74</b>

## Teil 1: Kurzfassung

**Zielstellung:** Das Gesamtziel des FuE-Vorhabens ist die Entwicklung eines praxistauglichen Vorhersagesystems für Deichbrüche, welches die Gefährdung von Deichbauwerken (wasserbauliche Erddämme) auf Basis experimenteller und mathematischer Modelle unter Berücksichtigung von Niederschlag und Vegetation bei sich ändernden Klimabedingungen zuverlässig prognostiziert, sowie von umweltgerechten bautechnischen Lösungen zur Ertüchtigung vorhandener wasserwirtschaftlicher Erdbaustauwerke.

**Realisierte Ergebnisse:** Mit dem vorliegenden Abschlussbericht wird ein Beitrag geliefert, die Stabilität von Deichen und Erddämmen mit modernsten mathematischen Simulationen prognostisch sowohl für Bestandsbauwerke als auch für Neubauten und Rekonstruktionen zu untersuchen. Im Zusammenhang mit den Ergebnissen der anderen Projektpartner ist damit ein entsprechendes Vorhersagesystem entstanden.

Die Ergebnisse des Verbundprojektes aller Projektpart können dazu beitragen, dass durch eine gezielte Untersuchung der Bestandsdeiche Hochwasserschäden minimiert werden können. Insbesondere die neuen Möglichkeiten der prognostischen Szenarienanalyse hinsichtlich der Wassergehaltsverteilung in Erdstauwerken und deren Stabilitätsabschätzungen sowie die Möglichkeit der ökologischen und ökonomischen Ertüchtigung von Bestandsdeichen ermöglicht künftige Auswirkungen des Klimawandels in Form von Starkniederschlagsereignissen zu minimieren.

**Anwendungsmöglichkeiten:** Mit den Ergebnissen des Projektes verbessern die wirtschaftlichen Projektpartner ihre Marktfähigkeit und erhöhen ihre Alleinstellungsmerkmale, die zur wirtschaftlichen Stärkung und zur vermehrten nationalen und internationalen Vermarktung von Ingenieurleistung, Verfahren und Anlagen beiträgt. Dies wird den am Projekt beteiligten sächsischen Unternehmen die Möglichkeit bieten, ihre Produkte und Dienstleistungen zu exportieren und die sächsische Wirtschaft damit in einem Zukunftsfeld zu stärken. Das Verwertungskonzept der TU Dresden, Institut für Grundwasserwirtschaft, besteht vor allen darin, die Qualität der umwelttechnischen/wasserwirtschaftlichen Lehre (incl. Aus- und Weiterbildung) sowie des Forschungspotential zu erhöhen. Die Ergebnisse (sowohl die eigenen Leistungen als auch die der Projektpartner) des Forschungsprojektes fließen direkt in die Lehrtätigkeit des Institutes ein und verbessern diese sofort. Das betrifft die Wissensvermittlung in Form von Vorlesungen/Übungen/Seminaren als auch die aktive Wissensaneignung der Studierenden in Form von Praktikums-, Projekt- und Abschlussarbeiten. Es können damit der sächsischen Wirtschaft gut ausgebildete Absolventen zur Verfügung gestellt werden. Die Ergebnisse liefern aber auch Grundlage für weitergehende Forschungen seitens der TU Dresden, insbesondere als Basis aufbauender Forschungsanträge, die über Drittmittel eingeworben werden müssen. Dies ist Grundlage für den Erhalt und weiteren Aufbau von personellen Forschungsressourcen als auch materieller Ausstattung.

## Teil 2: Ausführlicher Sachbericht

### 1 Projektziel

Das Gesamtziel des FuE-Vorhabens ist die Entwicklung eines praxistauglichen Vorhersagesystems für Deichbrüche, welches die Gefährdung von Deichbauwerken (wasserbauliche Erddämme) auf Basis experimenteller und mathematischer Modelle unter Berücksichtigung von Niederschlag und Vegetation bei sich ändernden Klimabedingungen zuverlässig prognostiziert, sowie von umweltgerechten bautechnischen Lösungen zur Ertüchtigung vorhandener wasserwirtschaftlicher Erdbaustauwerke. Im Folgenden wird dabei kein Unterschied bei der Verwendung der Begriffe „Erddamm“ und „Deich“ gemacht und beide Begriffe werden als Synonyme verwendet. Dabei spielt es keine Rolle, ob das Bauwerk nur zeitlich befristet mit Wasser (Deich) oder dauerhaft (Damm) eingestaut ist.

Darüber hinaus sollten bautechnische Lösungen entwickelt werden, die an den ermittelten kritischen Bereichen eine kostengünstige und dauerhaft sichere Gefahrenabwehr unter Verwendung der bereits vorhandenen mineralischen Dammbaumaterialien ermöglicht. Ressourcen-, Gewinnungs-, Einbau und transportaufwendiger Einsatz von Neumaterial muss dabei ebenso wie der Ausbau und die Entsorgung des vor Ort bereits vorhandenen Damm- und Deichbaumaterials weitgehend vermieden werden. Der Einsatz von Beton- oder Kunststoffeinbauten ist aus ökologischen Gründen diesbezüglich keine anzustrebende Alternative.

Gleichzeitig sollen umweltingenieurtechnische Richtlinien für eine nachhaltige Nutzung inkl. Bewertung dieser Erdbauwerke erarbeitet werden. Damit einhergehend soll es zu einer längeren Nutzungsdauer und zu einer Optimierung der wasserbaulichen Erddämme unter ökologischen, ökonomischen und bevölkerungspolitischen Akzeptanzgesichtspunkten kommen.

Die Aktualität des Forschungsprojektes wird durch die Ereignisse des Hochwassers im Rheinerftkreis/Eifel am 18.08.2021, hervorgerufen durch die Tiefdruckwetterlage „Bernd“, bestätigt. Hier drohte der Staudamm der Steinbachtalsperre auf Grund von Erosionserscheinungen, hervorgerufen durch ein Starkregenereignis, und einem anschließenden hohen Einstau zu brechen (Abbildung 1). Durch künstliches Absenken des Wasserspiegels mittels Pumpen konnte der Havariefall verhindert werden.



**Abbildung 1:** Damm der Steinbachtalsperre (Foto: Feuerwehr St. Augustin/Rhein-Sieg-Kreis, Janczura, S. (2021))

Ein weiterer Grund der verheerenden Wirkung des Augusthochwassers im Ahrtal in 2021 war das Versagen der Erddämme/Deiche an einer Kiesgrube. Die Kiesgrube ist im Sommer erst vollgelaufen, dann kam es zu Erdbeben. An der Bruchkante wurden mehrere Häuser zerstört.



**Abbildung 2:** Überschwemmung in Erfstadt-Blessem im August 2021 (Foto: dpa)

Neben den verheerenden Schäden des Hochwassers im August 2021 in der Eifelregion sind auch größere Schäden im Freistaat Sachsen, im Kreis Sächsische Schweiz und Erzgebirge entstanden. So war z.B. die Eisenbahnverbindung nach Prag-Südeuropa für mehrere Tage unterbrochen.

Das vorliegende Forschungsprojekt soll weitere Hilfsmittel zur Verfügung stellen, um auf solche Fälle auch im Vorfeld Sicherungsmaßnahmen zu ergreifen.

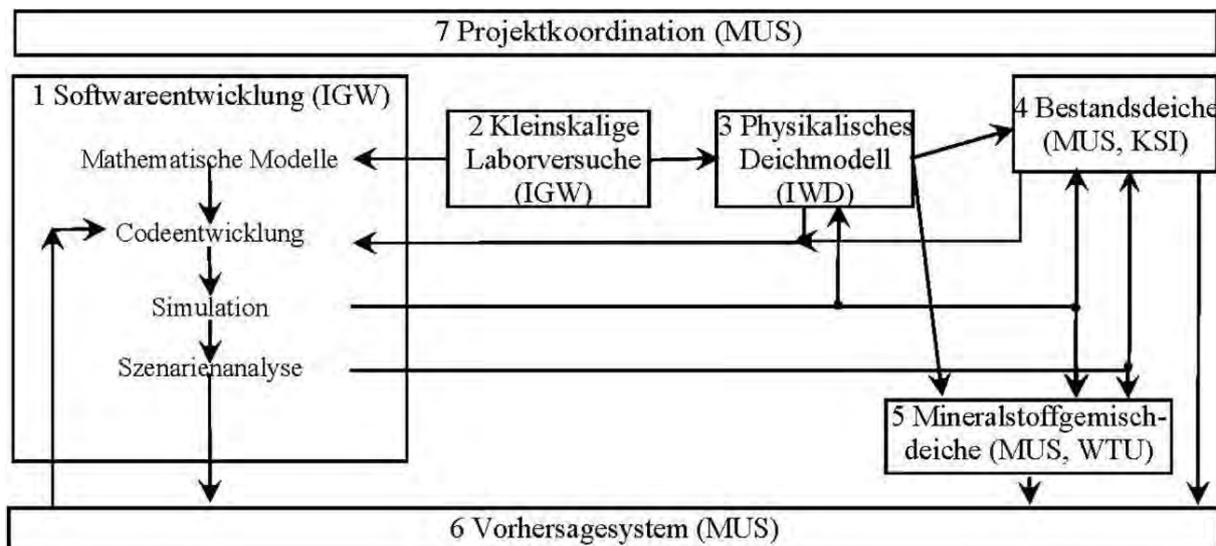
Die Ergebnisse des komplexen Projektes „Vorhersagesystem für Deichbrüche auf der Basis experimenteller und mathematischer Modelle unter Berücksichtigung von Niederschlag und Vegetation bei sich ändernden Klimabedingungen und von umweltgerechten bautechnischen Lösungen zur Ertüchtigung vorhandener Dämme und Deiche“ sollen einerseits den

für Deiche und Dämme zuständigen Behörden und Ämtern (z. B. Landestalsperrenverwaltungen, Flussmeistereien, Umweltbehörden) als technologische Grundlage zur Verfügung gestellt werden, andererseits auch den Planungs- und Entwicklungsbüros sowie den Baufirmen als Schnittstelle zu bestehenden Systemen zur Effektivierung ihrer Arbeit und zur Sicherung des vormarktwirtschaftlichen Wettbewerbes und von Alleinstellungsmerkmalen dienen.

In dem Verbundprojekt sind fünf Kooperationspartner integriert, wobei M&S Umweltprojekt GmbH der Verbundkoordinator ist.

- M&S Umweltprojekt GmbH (MUS) (Verbundkoordinator)
- Weischlitzer Tiefbau und Umweltschutz GmbH (WTU)
- Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik e.V. Meinsberg (KSI)
- Institut für Grundwasserwirtschaft, TU Dresden (IGW)
- Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, TU Dresden (IWD)

Das Verbundprojekt besteht aus 7 größeren Arbeitsetappen, die miteinander verzahnt sind und sich gegenseitig bedingen (siehe Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Verzahnung der Teilvorhaben innerhalb des Verbundprojektes

Für die Realisierung der Hauptarbeitsetappen sind jeweils ein oder zwei Partner verantwortlich (Tabelle 1). Unabhängig davon können weitere Partner an der Durchführung beteiligt sein. Die Partner des Verbundprojektes sind entweder einzeln oder im Verbund für diese Teilvorhaben federführend verantwortlich. Die Koordination des Verbundprojektes obliegt der M&S Umweltprojekt GmbH.

**Tabelle 1:** Hauptarbeitsetappen und verantwortliche Partner

Arbeits-einheit	Bezeichnung	Verantwortliche Partner
1	Softwareentwicklung	Institut für Grundwasserwirtschaft, TU Dresden
2	Kleinskalige Laborversuche	Institut für Grundwasserwirtschaft, TU Dresden
3	Physikalisches Deichmodell	Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, TU Dresden
4	Bestandsdeiche	M&S Umweltprojekt GmbH Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik e.V
5	Mineralstoffgemischdeiche	M&S Umweltprojekt GmbH Weischlitzer Tiefbau und Umweltschutz
6	Vorhersagesystem	M&S Umweltprojekt GmbH
7	Projektkoordination	M&S Umweltprojekt GmbH

## 2 Stand der Wissenschaft und Technik

Deiche und Dämme sind essentielle Erdbauwerke des Wasserbaus (sog. wasserbauliche Erddämme), die elementare Kernfunktionen besitzen. Deiche (Erdschüttungen mit Abdichtung) bilden wasserbauliche Schutzanlagen entlang von Küsten und Flüssen, die bei Hochwassersituationen durch temporären Einstau die Überschwemmung dahinterliegender Gebiete effektiv verhindern. Dämme (Erd- oder Felsschüttungen mit Abdichtung) stellen als Absperrbauwerk einen wesentlichen Bestandteil von Stauanlagen dar, die einen dauerhaften Einstau (Rückhaltebecken, Stausee etc.) ermöglichen.

Des Umfangs wegen wird hinsichtlich des regelwerkskonformen Baus und Betriebs solcher Anlagen auf die entsprechenden aktuellen Normen (z. B. DIN 19712, DIN 19700-10, DIN 19700-12) und Regelwerke (z. B. DWA-M 512-1) verwiesen. Bezüglich der Bewertung und des Managements eines potenziellen Überflutungsrisikos in gefährdeten Gebieten wird ferner auf die EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (EU-HWRM-RL) hingewiesen.

Grundlegende Eigenschaft beider Erdkörperstypen bildet die dauerhafte Gewährleistung der Standsicherheit und Funktionsfähigkeit, was neben anderen Eigenschaften vor allem eine hinreichende Standsicherheit der Bauwerke bedingt. Da eine Durchfeuchtung (Durchsickerung, Niederschlag) von Deich- oder auch Dammbauwerken deren Stabilitätseigenschaften erheblich verändert und somit ihre sichere Funktion drastisch herabsetzt, ist eine ausreichende Kenntnis des inneren Zustands des Erdkörpers für den Fall eines einseitigen Wassereinstaus zwingend erforderlich.

Insgesamt weist die Damm- und Deichbautechnologie ein bereits hohes Niveau auf. Trotz dieses heutzutage hohen technologischen Standards im Deich- und Dammbau haben jedoch die extremen Hochwasserereignisse innerhalb der letzten beiden Dekaden an Elbe (2002, 2006, 2010, 2013), Donau (2002, 2009, 2010, 2013) und Rhein (1993, 1995, 1999, 2007) ge-

zeigt, dass die Standsicherheit v. a. vieler alter Deiche durchaus gefährdet ist. Die Deichbrüche bei Deggendorf (Bayern) an der Donau und Fischbeck (Sachsen-Anhalt) an der Mittleren Elbe sowie viele weitere kleinere Deichbrüche stellten im Rahmen des Frühsommerhochwassers 2013 eindeutige Beispiele standsicherheitsbedingten Versagens dar. Die resultierenden Schäden infolge Hochwasser und Deichversagen sind erheblich (z. B. Freistaat Sachsen – im Jahr 2002 ca. 8 Mrd. EUR; im Jahr 2013 ca. 2 Mrd. EUR). Auch die dramatischen Ereignisse des Hochwassers im August 2021 im Erbkreis/Eifel unterstreichen sehr deutlich die Bedeutung und Notwendigkeit des Forschungsprojektes.

Hinsichtlich typischer Schädigungsmechanismen existiert eine Vielzahl von Mechanismen, die zum Teil gemeinsam wirken und in der Folge ein Erddammversagen im Wasserbau verursachen können. Aufgrund des Umfangs der diesbezüglichen Ausführungen wird an dieser Stelle z. B. auf das DWA-Merkblatt DWA-M 507 sowie auf BDZ, 2002 verwiesen.

Die innere Erosion stellt dabei die größte Gefahr für die Standsicherheit und Funktionsfähigkeit eines Dammbauwerks bei einer Durchsickerung (= laminare Durchströmung des Erdkörpers aufgrund einseitigen Wasseranstaus) dar. Die innere Erosion beeinflusst dabei die Ausprägung der Spiegellinie (= obere Grenze des durchströmten, voll gesättigten Erdkörpers) maßgeblich und führt im Hochwasserfall häufig zu der Gefährdung des Dammbrechens durch Stabilitätsversagen oder zu Setzungen im Damm. Letztere können zur Überschwemmung des Dammes führen, welche wiederum die Standsicherheit der luftseitigen Böschung gefährden. Vor allem ältere Deiche sind gefährdet.

Im Wesentlichen kann die Erosion im Inneren eines Deichkörpers in Kontakterosion und Suffosion unterschieden werden. Kontakterosion kann an der Schichtgrenze von fein- zu grobkörnigen Böden auftreten. Voraussetzung ist dabei eine Durchsickerung vom feinen zum groben Erdstoff. Dieser Vorgang kann entlang der Schichtgrenze stattfinden oder parallel zur Schichtgrenze. Partikel des feinkörnigeren Bodens werden durch die Porenräume der grobkörnigeren Schicht transportiert, was eine Abminderung des Bodenvolumens an der Schichtgrenze bewirkt. Folgen können Setzungen des Erdkörpers, oder des sich darüber befindlichen Bauwerks sein.

Bei der Suffosion werden feinere Partikel eines Korngemisches in Folge der Sickerströmung durch das Korngerüst der gröberen Kornfraktionen transportiert. Dies führt zu einer erhöhten hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens, was im Extremfall bis zum „Piping“ (Bildung von Erosionsröhren) führen kann. Solange sich die gröberen Bodenkörner gegenseitig abstützen, bleibt das Volumen zunächst konstant. Die Stabilität verschlechtert sich allerdings, was bis zum Kollaps führen kann. Betroffen sind hierbei vor allem Böden mit ungleichförmigen und intermittierend gestuften Korngrößenverteilungen.

Maßgebend bei allen Formen innerer Erosion sind vor allem die Bodenart, eine eventuell vorhandene Schichtung, sowie der hydraulische Gradient. So können innere Erosionsprozesse auch in ursprünglich standfesten Bereichen einsetzen, wenn sich z. B. auf Grund einer Dammerhöhung der hydraulische Gradient an der gefährdeten Stelle erhöht.

Problematisch beim derzeitigen Stand der Technik und somit bei der herkömmlichen Betrachtungsweise der Standsicherheit und Funktionsfähigkeit eines Dammbauwerks ist allerdings, dass hier nur der Bereich des Deiches unterhalb der Spiegellinie, mit voller Wassersättigung, berücksichtigt wird! Die Problematik der Instabilität im Bereich einer teilweisen Wassersättigung von Erddämmen und Deichen (oberhalb der Spiegellinie, z. B. infolge erheblichen Niederschlags) wird aktuell nicht oder nur völlig unzureichend betrachtet! Aufgrund dieser Tatsache muss bei der Bewertung der Standsicherheit und deren Gewährleistung zurzeit auf traditionelle ingenieurtechnische Verfahren zurückgegriffen werden, die aus Sicht und Erfahrung der Projektbearbeiter für diese anstehenden Aufgaben nicht ausreichend bzw. nur wenig geeignet sind!

Auf dem Gebiet der messtechnischen Überwachung von Stauanlagen ist ein deutlicher Trend zur Digitalisierung und Einbindung von Online-Sensorik festzustellen. Damit werden die Voraussetzungen für ein automatisiertes Monitoring von Wasserbauwerken geschaffen. Erkenntnisse aus den gemessenen realen hydrologischen Verhältnissen im Bauwerk können zu vergleichenden Rückschlüssen auf die Simulationsergebnisse führen. Damit kann die Modellierung angepasst und weiter verfeinert werden.

Die Ertüchtigung von bestehenden Dammbauwerken wird gegenwärtig häufig nur dann vorgenommen, wenn Bauwerksschädigungen bereits deutlich sichtbar sind. Im Regelfall wird dabei das vorhandene Dammbaumaterial abgetragen und auf Deponien entsorgt. Sehr häufig kommt bei dem sich daran anschließenden Dammbau Beton (vorgefertigte Betonelemente oder Ortsbeton) oder Kunststoff (Formelemente) zum Einsatz. Diese Materialien sind nur eingeschränkt begrünbar und verursachen beim Einbau sowie beim Transport erheblichen Aufwand. Daraus resultiert häufig eine geringe Akzeptanz dieser Baumaßnahmen bei den unmittelbaren Anwohnern.

## **2.1 Nachteile des Standes der Wissenschaft und Technik**

Deiche und Erddämme sind wichtige wasserbauliche Bauwerke zum vorsorgenden Hochwasserschutz. Sie sind häufig bereits vor vielen Jahrzehnten entstanden und aufgrund ihres Aufbaus und ihrer Zusammensetzung aus geschütteten Materialien mehr oder weniger durchlässig. Diese Bauwerke zeichnen sich dadurch aus, dass sie im Gegensatz zu Ingenieurbauwerken nicht für eine begrenzte normative Nutzungsdauer ausgelegt sind, sondern dass sie nachhaltig über sehr lange Zeiträume (bis unbestimmt) funktionstüchtig bleiben sollen.

Der derzeitige Stand der Technik berücksichtigt die Probleme der Instabilitäten im Bereich einer teilweisen Wassersättigung von Erddämmen und Deichen nicht oder nur völlig unzureichend. Bei der Bewertung der Sicherheit und deren Gewährleistung muss zurzeit auf traditionelle ingenieurtechnische Verfahren zurückgegriffen werden, die für diese anstehenden Aufgaben nicht bzw. wenig geeignet sind. Gründe für die geringe Eignung der traditionellen Methoden und Verfahren sind in vielen vereinfachten Annahmen bei der Herleitung der Bemessungsregel für Erddämme, in der Einschränkung auf stationäre Wasserbilanzen in der gesättigten Bodenzone (unterhalb der Spiegellinie), in der beschränkten Betrachtung der Erdstoffigenschaften (meist keine umfassende umweltrelevante Schadstoffanalyse), keine

Betrachtung zeitlich variabler Materialeigenschaften, keine Betrachtung zeitlich variabler meteorologischer und vegetativer Einflüsse zu sehen.

Im klassischen Fall wird davon ausgegangen, dass nur in vollgesättigten Bodenbereichen Rutschungen und Suffosionserscheinungen auf der Luftseite des Deiches entstehen können. An einem physikalischen Modell konnte allerdings die Instabilität oberhalb der Spiegellinie, d.h. im teilgesättigten Bereich, nachgewiesen werden (Aigner, 2004).

Maßgebliche Gründe für die geringe Eignung der traditionellen Methoden und Verfahren sind in vielen vereinfachten Annahmen bei der Herleitung der Bemessungsregel für durchströmte Erddämme zu sehen, v. a.:

- in der Einschränkung auf stationäre Wasserbilanzen in der gesättigten Bodenzone (unterhalb der Spiegellinie),
- in der beschränkten Betrachtung der chemischen Eigenschaften der Mineralstoffe (meist liegt keine dem Stand der Technik entsprechende umweltrelevante Schadstoffanalyse vor und es fehlt i.d.R. auch die Kenntnis zu umwandlungs- sowie zersetzungsgefährdeten Bestandteilen wie z.B. Kalk, Kalkstein, Anhydrit, Humus, Torf etc.),
- in der Vernachlässigung der Betrachtung zeitlich veränderlicher Materialeigenschaften und
- in der Vernachlässigung der Betrachtung zeitlich variabler meteorologischer und vegetativer Faktoren mit Einfluss auf die ungesättigte Bodenzone (oberhalb der Spiegellinie).

Für die Beschreibung der Wasserbewegung im vollgesättigten Erdkörper (Durchsickerung) werden im Allgemeinen analytische Methoden (Verfahren nach DACHLER, PAVLOVSKY, KOZENY-CASAGRANDE, DUPUIT-THIEME u. a.) bzw. numerische Modelle (z. B. Finite-Elemente-Methode [FEM], BAW-Merkblatt MSD) angewendet, die auf vereinfachten vertikal-ebenen Grundwasserströmungsgleichungen beruhen. Diese Art der Berechnung bzw. Modellierung besitzt dabei folgende methodischen Restriktionen:

- ausschließliche Betrachtung des vollgesättigten Deichbereiches,
- nur angenäherter Verlauf der tatsächlichen Spiegellinie,
- keine Informationen außerhalb/oberhalb des vollgesättigten Bereiches,
- keine Informationen über Auftrieb/Entlastung an der Luftseite des wasserbaulichen Erddammes,
- keine geomechanischen, vom Sättigungsgrad abhängigen Berechnungen möglich (z. B. Böschungs- und Geländebruch),
- nur gravitationsgetriebene Strömung; Kapillarkräfte (Druckgradienten) werden nicht berücksichtigt,
- eine Bemessung für Niederschläge, v. a. Starkregenereignisse, ist nicht möglich,
- Betrachtung nur als quasi-zweidimensionale Modelle, d. h. heterogener Deichaufbau, wie er in der überwiegenden Zahl vorkommt, kann nicht wiedergegeben werden.

Die Ausweisung eines Deichbruchrisikos wird aktuell in verschiedenen DIN-Normen wie z. B. in:

- der Geländebruchsicherheit nach DIN 4084,
- der Grundbruchsicherheit nach DIN 4017 und
- der Berechnung von Teilsicherheiten nach DIN 1054

vorgegeben. Diese Vorgaben sind in den meisten Fällen nur auf Grund von reinen empirischen Erfahrungen festgelegt und damit oftmals nicht wissenschaftlich begründet.

## 2.2 Angabe von anderen Lösungen

Mittels vorhandener Programmsysteme (z. B. HYDRUS (Šimůnek et al. (2016), Šimůnek et al., (2018), Šejna et al. (2018); PCSiWaPro<sup>®</sup> (Gräber et al. (2006) u. a.)) ist die Berechnung des Wasserhaushaltes in variabel gesättigten porösen Medien, wie dem Boden, möglich. Allerdings liegen nur beim Programm PCSiWaPro die Quellcodenutzungsrechte bei den Projektpartnern. Der größte Nachteil besteht aber darin, dass derzeit Stabilitätsbetrachtungen weder in dem Programm PCSiWaPro noch in anderen Wasserhaushaltsprogrammen integriert sind.

Eine Möglichkeit für eine Stabilitätsanalyse bietet hingegen die Software Geo-Slope (GeoStudio, 2019). Das Programmsystem hat jedoch auch einige Nachteile. Zum Beispiel erfolgen keine Berücksichtigung des Gewichts des Niederschlagswassers im ungesättigten Gefälle sowie keine Berücksichtigung des Einflusses der Wassersättigung auf der Änderung der Bodenparameter (Kohäsion, interner Reibungswinkel, Saugspannung der Bodenmatrix).

Andere Programme zur Stabilitätsanalyse, wie z.B. GGU-STABILITY oder GGU-SLICE (Civilserve GmbH) verwenden ebenfalls nur die stationäre Lösung der Darcy-Gleichung und vernachlässigen damit den teilgesättigten Bereich sowie die dynamische Wasserbewegung. Sie ermöglichen jedoch auf Basis der Spiegellinienberechnung eine Berechnung von verschiedenen geotechnischen und geohydraulischen Sicherheiten.

## 3 Wissenschaftliche Ergebnisse

Im Folgenden werden nur die erbrachten Leistungen des Projektpartners Institut für Grundwasserwirtschaft der TU Dresden zu dessen verantwortlichen Arbeitspaketen dargestellt. Die Ergebnisse der anderen Partner sind deren Endberichten zu entnehmen (siehe auch Web-Page des vorliegenden VSDS-Projektes:

<http://www.mus-umweltprojekt.de/fue-verbundprojekt-vsds.html>)

### 3.1 AE-IGW 1: Softwareentwicklung

#### 3.1.1 Mathematisches Modell der Wasserbilanz

Das mathematische Modell der Wasserhaushaltsberechnung im Programm PCSiWaPro (Graeber et al., 2006) basiert auf der RICHARDS-Gleichung (Richards, 1931) und wird für den

2D vertikal-ebenen Strömungszustand numerisch unter Anwendung der Methode der Endlichen Elemente gelöst. Damit ist es möglich, die Wasserbilanz ganzheitlich im Deichkörper abzubilden und in Bezug auf die Wassersättigung sowohl teil- als auch vollgesättigte Bereiche zu betrachten. Speziell auf die Deichdurchströmung bezogen, können damit die Sickerwasserströmung oberhalb der Sickerlinie inkl. des kapillaren Aufstiegs sowie der vollgesättigte Einstaubereich unterhalb der Sickerlinie modellseitig abgebildet werden.

Als Referenz für ausgewählte Modelle dienen außerdem Simulationen mittels des international verwendeten Simulationsprogramms HYDRUS 2D/3D (Šejna et al. (2018), Šimůnek et al. (2016) und Šimůnek et al. (2018)).

### 3.1.2 Allgemeine Programmentwicklung

PCSiWaPro verfügt über zahlreiche zeitvariable und zeitkonstante Randbedingungen, um die ablaufenden äußeren Prozesse adäquat modellseitig abbilden zu können. Beispiele für Randbedingungen sind z.B. die zeitabhängige Vorgabe der Einstauhöhe während der Simulationslaufzeit, welche als Messwerte in den physikalischen Experimenten erhoben wurden. Im Rahmen der modelltechnischen Begleitung der kleinskaligen Laborversuche und des beim Projektpartner IWD laufenden Großversuchs zeigte sich, dass für eine exakte Berücksichtigung der ablaufenden Prozesse noch Anpassungen in der Umsetzung spezifischer Randbedingungen implementiert werden müssen.

Die erste Erweiterung betrifft das automatische Umschalten der Randbedingung (RB) „zeitabhängige Potentialhöhe“ (interne Kodierung +8, RB 1. Art) zum Typ „atmosphärische RB mit Stoffaufkonzentration“ (interne Kodierung -4, RB 2. Art) und vice versa unter der Bedingung eines auftretenden negativen Matrixpotenziales an einem Knoten. Diese Erweiterung ermöglicht beispielsweise die Einbeziehung von Niederschlag und Verdunstung auf Flächen, die zeitlich variabel eingestaut sind (z.B. im Verlauf einer Hochwasserganglinie). Da der Vorgang reversibel ist, kann auch der Durchgang mehrerer Hochwasserwellen simuliert werden. Eine weitere Erweiterung betrifft den Randbedingungstyp „Sickerbereich“ (interne Kodierung -2, RB 2. Art), der typischerweise für den luftseitigen Sickerwasseraustritt eines Dammkörpers verwendet wird. Hier wurde ebenfalls eine automatische Umschaltung zu einer atmosphärischen Randbedingung (interne Kodierung -4) implementiert. Hintergrund ist die Charakteristik der Randbedingung: diese sieht vor, dass ein Abstrom (Wasser verlässt den Modellraum) über einen Knoten nur dann erfolgen darf, wenn der Knoten wassergesättigt ist, was einem Matrixpotential von 0 entspricht. Ein Zustrom (Wasser wird dem Modellbereich zugeführt) über einen Knoten war bislang nicht statthaft. Da der Bereich des Sickerwasseraustritts a priori nicht bekannt ist, bleiben daher große Bereiche der Luftseite eines Damms „inaktiv“. Die durch Niederschläge potentiell verursachte Aufsättigung in oberflächennahen Schichten innerhalb des Dammkörpers ließ sich damit nur unzureichend abbilden. Die Umschaltung auf den Typ -4 erfolgt, solange der Knoten ungesättigt ist. Da die Umschaltung reversibel ist, können wechselnde Sättigungszustände, wie sie beim Durchgang mehrerer Hochwasserwellen auftreten, simuliert werden.

### **3.1.3 Codeentwicklung zur Stabilitätsberechnung**

In der gängigen Praxis erfolgt die Berechnung von Stabilitätszuständen bzw. Versagenswahrscheinlichkeiten der Deichkörper mittels des Verfahrens nach BISHOP bzw. allgemein mit den klassischen Stabilitätsansätzen (z.B. JANBU, MORGENSTERN-PRICE). Diese arbeiten mit Gleit- bzw. Bruchkörpern, welche geometrisch vordefiniert sind.

Allgemein betrachtet das Verfahren nach BISHOP die globale Standsicherheit und neben Sediment spezifischen Eingabeparametern (Kohäsion, Wichte, innerer Reibungswinkel) wird in handelsüblicher Software häufig nur die Sickerlinie als definierender Zustand abgefragt. Für die gesättigten Bereiche unterhalb, aber auch für den ungesättigten Teil oberhalb, wird dann vereinfacht ein hydrostatisches Equilibrium für die Porendruckverteilung angenommen. Infiltration zusätzlichen Wassers in oberflächennahe Schichten, z.B. durch Niederschläge, führt jedoch zu einer Veränderung des Wassergehalts und damit auch der Porendrücke, sodass kein hydrostatisches Equilibrium bezogen auf die Sickerlinie mehr vorhanden ist. Hinsichtlich der sedimentspezifischen Parameter Kohäsion, Wichte und innerer Reibungswinkel ist dies kritisch zu sehen, da dies wassergehaltsabhängige Größen sind. Wenn für die Stabilitätsberechnung nur die Sickerlinie angegeben wird, sind in dieser Betrachtungsweise auch nur zwei Wassergehalte im System vorhanden: Vollsättigung und eine konstant definierte Teilsättigung oberhalb der Sickerlinie. Dies entspricht jedoch i. d. R. nicht der Realität, da im ungesättigten Bereich verschiedene Wassergehalte (entsprechend der Porendruckverteilung) auftreten.

#### ***Lösungsansatz***

Für eine Stabilitätsberechnung ist daher die Eingabe der gesamten Porendruckverteilung, anstatt nur die Sickerlinie, erforderlich. Mit Hilfe von PCSiWaPro lässt sich für beliebige hydraulische Belastungsszenarien eine Wassergehaltsverteilung über den kompletten Bereich und ein entsprechender Input für ein nachgeschaltetes, adaptiertes Stabilitätsmodul kann bereitgestellt werden (siehe Kapitel 3.1.4). Für dieses Stabilitätsmodell sollten folglich auch die Parameter Kohäsion, Wichte und innerer Reibungswinkel als wassergehaltsabhängige Größen implementiert sein. Für die Wichte ist dies recht einfach zu realisieren, da das im Boden enthaltene Wasser mehr oder weniger direkt mit in die Berechnung bzw. Bestimmung eingeht. Für Kohäsion und innerer Reibungswinkel ist eine Wassergehaltsabhängigkeit schwieriger zu definieren bzw. labortechnisch zu bestimmen.

#### ***Alternative Lösungsansätze***

Neben der globalen Betrachtung der Böschungsstandfestigkeit, spielen zudem lokale Versagensmechanismen und -erscheinungen, welche vor allem in den oberflächennahen Bereichen und damit in der i.d.R. teilgesättigten Zone auftreten, eine große Rolle. Die Aufsättigung oberflächennaher Schichten, beispielsweise durch Infiltration von Niederschlagswasser, kann zu Hangrutschungen führen. In diesem Fall ist die globale Standsicherheit noch nicht gefährdet, der Deichkörper bzw. die Böschung jedoch geschwächt, sodass weitere Belastun-

gen schon eher zum Versagen führen können. Auch wenn über iterative Verfahren im Rahmen des Verfahrens nach BISHOP eine große Anzahl dieser Geometrien abgedeckt werden kann, unterliegt dieser Ansatz gewissen Limitationen, da nicht alle Möglichkeiten abgedeckt werden können. Eine geeignetere Möglichkeit zur Lokalisierung und Quantifizierung niederschlagsinduzierter Böschungsrutschungen unter teil- sowie vollgesättigten Verhältnissen stellt das Zusatzmodul SLOPE CUBE (Lu et al, 2019) des Programmsystem HYDRUS dar. Dieses verwendet einen Ansatz basierend auf der Theorie der effektiven Belastung bzw. Spannung („effective stress“), wobei die Saugspannung im Boden und damit auch der Wassergehalt eine maßgebliche Rolle spielt (Lu & Godt, 2013). Über ein Finite-Elemente (FE) Verfahren wird ein Stabilitätswert für jeden Knoten bzw. jede Zelle im Modell berechnet und es besteht keine Limitation in Bezug auf geometrisch vordefinierte Gleitkörper.

Für die Anwendung von SLOPE CUBE muss allerdings eine entsprechende Parametrisierung der Sedimentparameter für die Stabilitätsbetrachtung erfolgen. Aufgrund des verwendeten theoretischen Ansatzes nach LU und KAYA (2014) müssen neben den üblichen Parametern, wie spezifisches Gewicht bzw. Wichte, effektive Kohäsion und effektiver innerer Reibungswinkel, noch weitere definiert werden. Diese umfassen u.a. auch den so genannten Young-Modulus, ein wassergehaltsabhängiges Elastizitätsmodul, sowie einen von LU und KAYA (2014) definierten Formparameter  $m$  („Power Law Parameter“) zur Beschreibung der Wassergehaltsabhängigkeit der Elastizitäts- bzw. Scher-Module. Diese Werte sind nicht aus geläufigen Größen der Geotechnik (z.B. E-Module) ableitbar und müssen experimentell und bodenspezifisch bestimmt werden. LU und KAYA (2013) stellen hierfür ein experimentelles Verfahren vor, welches im Rahmen des Projekts von Seiten des IGW jedoch nicht realisierbar ist. Hauptproblem ist, dass die Durchführung der beschriebenen einaxialen Druckversuche bei rolligen und selbst bindigeren Materialien nicht ohne weiteres möglich bzw. sinnvoll ist, sodass eine weitere Betrachtung bzw. Spezifizierung der in LU und KAYA (2013) beschriebenen Vorgehensweise aus geotechnischer Sicht notwendig wäre. Die in der bereits aufgeführten Literatur von LU und KAYA zu findenden beispielhaften Sedimente sind nicht mit denen im Projekt verwendeten vergleichbar, sodass auch eine Adaption dieser Literaturwerte für die Modellsimulationen im Projekt nicht möglich ist. Vorgenommene Abschätzungen der für SLOPE CUBE notwendigen Sedimentparameter führten zu numerisch instabilem und auch nicht plausiblen Resultaten, sodass von einer weiteren Bearbeitung abgesehen werden musste. Da die beschriebenen Laborversuche zur Parameteridentifikation von SLOPE CUBE nicht dem allgemein anerkannten Stand der Technik entsprechen, ist eine Anwendbarkeit in einem praxistauglichen System zur Stabilitätsbetrachtung derzeit auch nicht als realistisch einzuschätzen und ist in weiteren Forschungsprojekten zu untersuchen.

### **3.1.4 Weiterentwicklung GUI - Entwicklung einer Schnittstelle für den definierten Datenaustausch zwischen PCSiWaPro mit dem Stabilitätsmodul**

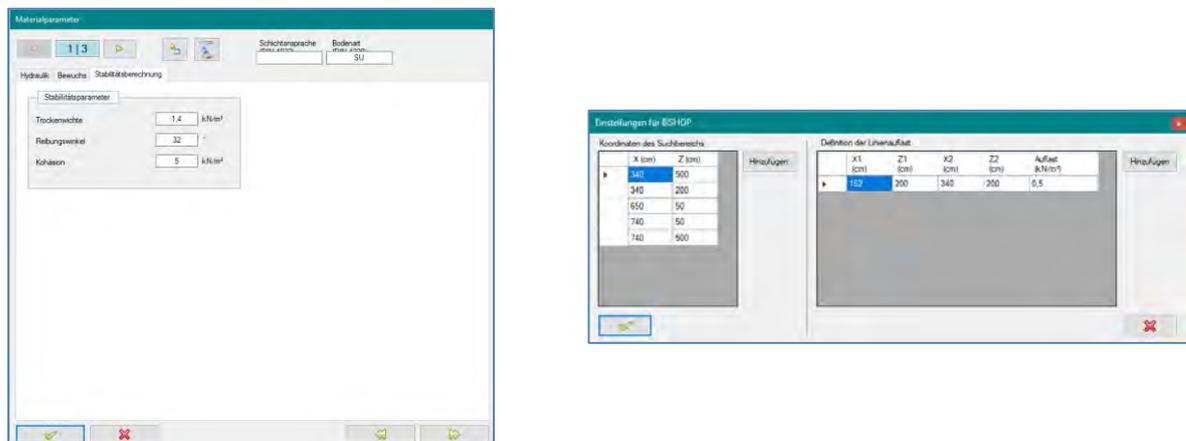
Aufgrund der in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Einschränkungen der verfügbaren Methoden und Anwendungen, wurde sich dazu entschieden, ein eigenes Modul zur Stabilitätsberechnung auf Grundlage des Verfahrens nach BISHOP zu entwickeln. Federführend erfolgte dies

durch den Projektpartner Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD) (siehe Bericht IWD). Als Eingabe für die Stabilitätsberechnung dient dabei die Wassergehaltsverteilung über den vollständigen Deichbereich, die mit Hilfe von PCSiWaPro in Abhängigkeit der Randbedingungen (Einstau, Niederschlag) ermittelt wird. Dies liefert einen entsprechenden Input für ein nachgeschaltetes, adaptiertes Stabilitätsmodul. Eine Kopplung beider Anwendungen wurde im Rahmen der Projektbearbeitung realisiert.

Speziell in Bezug auf die Punkte AE-IGW 1.2 sowie AE-IGW 1.3 wurde die GUI erweitert, um eine Schnittstelle zu dem beim Projektpartner IWD entwickelten Tool zu schaffen. Wesentlich bei der Implementierung der Schnittstelle war die Übergabe sämtlicher Parameter und Berechnungsergebnisse, die bei der Stabilitätsberechnung nach der BISHOP-Methode Anwendung finden.

Im Programm PCSiWaPro musste neben der GUI (grafische Benutzerschnittstelle) auch die Datenbankstruktur für Modelldaten angepasst werden, um die bodenspezifischen Parameter für die Stabilitätsbetrachtung und andere Eingabegrößen im Programm PCSiWaPro erfassen und speichern zu können. Folgende Daten werden durch PCSiWaPro erfasst:

- Kohäsion, Trockenwichte und Reibungswinkel für jede Bodenschicht,
- Suchpolygon für die Gleitkreissuche und
- Optional: Linienauflasten für spezielle Szenarien, z.B. Sicherungsmaßnahmen



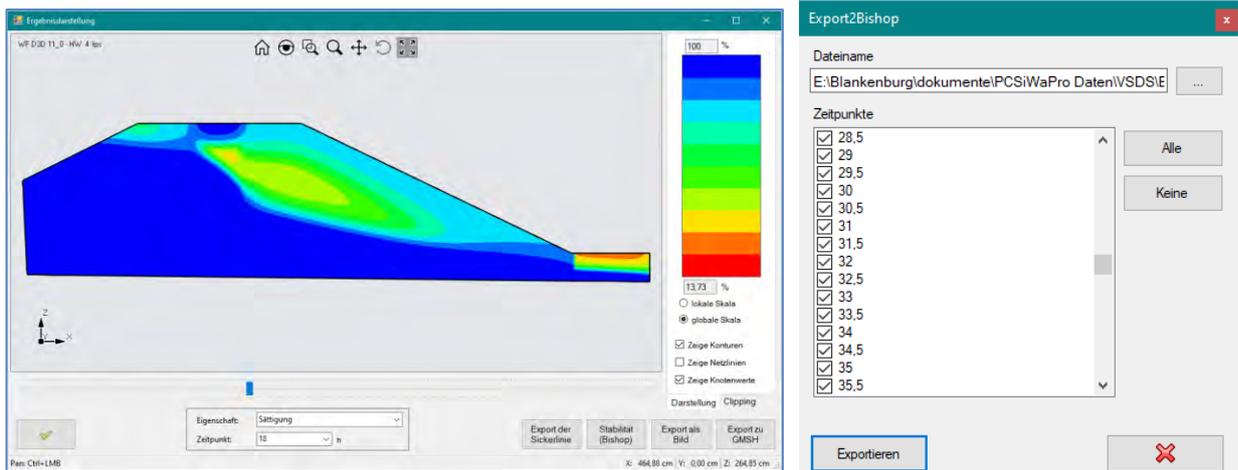
**Abbildung 4:** Erfassung bodenspezifischer Parameter (links), Suchbereich sowie optional Linienauflasten (rechts)

Sämtliche Daten werden einheitenkonform durch den Anwender erfasst und vom Programm gespeichert (Abbildung 4). Darüber hinaus wurde eine Schnittstelle zur Datenübergabe entwickelt, in der die folgenden Daten übergeben werden:

- Knoten des Finite-Elemente-Netzes inkl. Koordinaten, Schichtzuordnung, berechneten Druckhöhen und Wassergehalten,
- Sickerlinie innerhalb des PCSiWaPro-Modells,
- Stabilitätsparameter für jede Bodenschicht,
- Koordinaten des Polygons für die Gleitkreissuche und

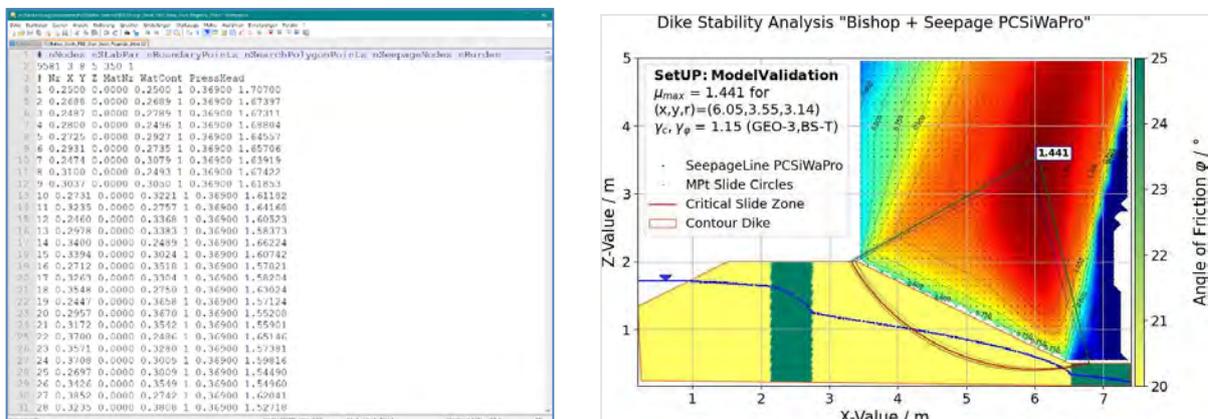
- Linienauflasten

Die Schnittstelle ist so gestaltet, dass beliebige Zeitpunkte vom Anwender ausgewählt und exportiert werden können. In Verbindung mit den zuvor genannten Beobachtungspunkten, der grafischen Visualisierung und im späteren Verlauf auch mit den Ergebnissen der Unschärfemodellierung können Zeitpunkte mit besonders kritischen hydraulischen Zuständen erfasst und analysiert werden (Abbildung 5).



**Abbildung 5:** Grafische Modellauswertung zur Beurteilung kritischer Zeitpunkte (links) und Export der nutzerdefinierter Zeitpunkte zum BISHOP-Skript (rechts)

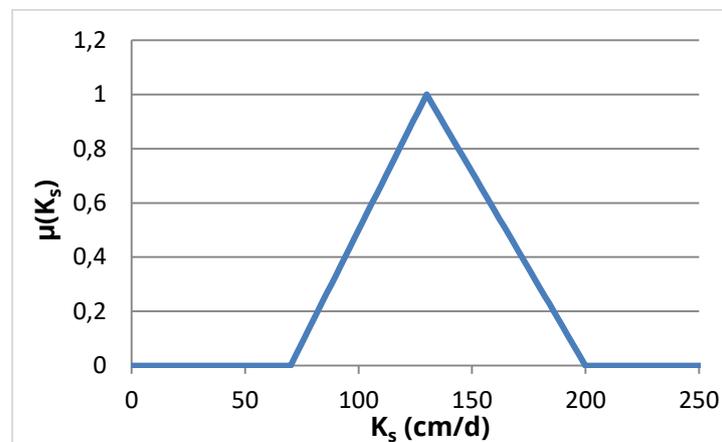
Für den Anwender ist die Datenübergabe an das BISHOP-Skript transparent und offen. Es wird pro Zeitpunkt eine ASCII-Datei (Textformat) erstellt (Abbildung 6), die alle oben angegebenen Daten enthält. Im Header der Datei steht die jeweilige Anzahl der einzelnen Datenbereiche, Kommentare erläutern deren Bedeutung. Das Layout und die Inhalte entstanden in enger Kooperation mit dem Partner IWD. Das BISHOP-Skript berechnet über die Gleitkreissuche die maximalen Ausnutzungsgrade und gibt die Ergebnisse in Form einer Darstellung der Äquipotentiallinien (hier Linien gleicher Ausnutzungsgrade) wieder.



**Abbildung 6:** Ausschnitt aus der ASCII-Schnittstellendatei (links) sowie die grafische Visualisierung der Ausnutzungsgrade als Ergebnis der BISHOP -Analyse (rechts)

### 3.1.5 Implementierung der Unschärfemodellierung auf Basis der Fuzzy-Set-Theorie

Die Implementierung der Unschärfemodellierung erfolgte auf Basis von am Institut für Grundwasserwirtschaft existierenden Vorarbeiten (Blankenburg et al., 2010). Die Anwendung der Fuzzy-Set-Theorie bietet mit der  $\alpha$ -Level-Zuordnung von Parameterbereichen die Möglichkeit, den Grad der Unschärfe einzelner Parameter, aber auch Randbedingungswerte nutzerseitig definieren zu können. Über Zugehörigkeitsfunktionen kann die Schwankungsbreite sowie die Charakteristik der unscharfen Zahl in einem Simulationsprogramm verwendet werden (Abbildung 7). Weiterhin ist es auf diese Weise möglich, geschätzte Eingangsdaten, die höheren Schwankungsbreiten unterliegen, anders einzuordnen als gemessene Eingangsdaten, die in der Regel in höherer Genauigkeit vorliegen.



**Abbildung 7:** Zugehörigkeitsfunktion für die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit

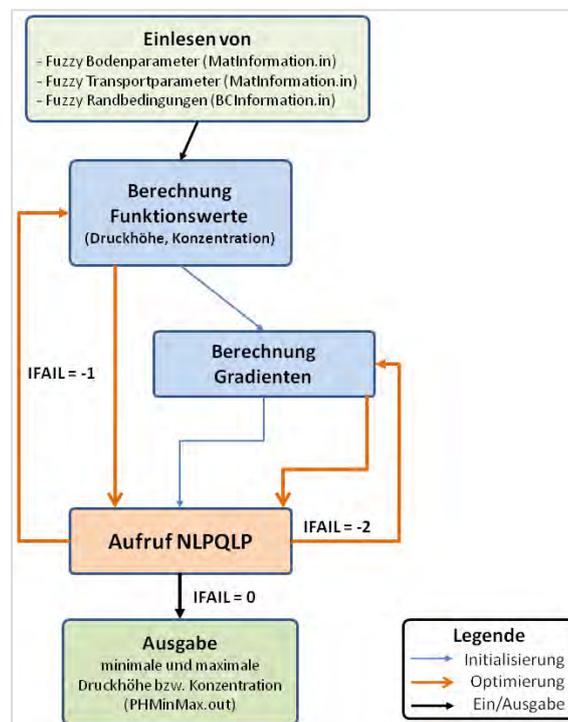
Um dem Nutzer die Angabe der Schwankungsbreiten zu ermöglichen, wurde ein Anwenderdialog in das Programm PCSiWaPro implementiert und die Datenbankstruktur der Modell-  
 daten erweitert (Abbildung 8).

Fuzzy Parameter	$\alpha=0$		$\alpha=1$		Einheit
	links	rechts	links	rechts	
<input checked="" type="checkbox"/> Porosität	0,36	0,43	0,4	0,4	
<input type="checkbox"/> Res. Wassergehalt	0,078	0,078	0,078	0,078	
<input type="checkbox"/> Res. Luftgehalt	0	0	0	0	
<input type="checkbox"/> $\alpha^d$	0,036	0,036	0,036	0,036	1/cm
<input type="checkbox"/> $\alpha^i$	0,036	0,036	0,036	0,036	1/cm
<input checked="" type="checkbox"/> Anstiegsparameter n	1,4	3	1,8	2,3	
<input checked="" type="checkbox"/> Leitfähigkeit $k_o$	0,1	5	1	1,7	cm/min
<input type="checkbox"/> Wassergehalt bei Bestimmung von $k_o$	0,43	0,43	0,43	0,43	
<input type="checkbox"/> Parameter $\lambda$	0,5	0,5	0,5	0,5	
<input type="checkbox"/> Parameter m	0,38	0,38	0,38	0,38	

**Abbildung 8:** Vorgabe der  $\alpha$ -Level-Werte für die bodenhydraulischen Parameter

Die Arbeiten beschränken sich zunächst auf die Implementierung der Unsicherheiten in den bodenhydraulischen Parametern, da diese sehr sensitiv auf die Zielfunktion wirken und in der Regel größeren Schwankungsbereichen bzw. Unsicherheiten unterliegen als Randbedingungen. Speziell in Bezug auf die Durchströmung von Dämmen und Deichen sind die wesentlichen Randbedingungen, wie z.B. die Einstauhöhe, in der Regel bekannt bzw. dienen als Bemessungsgröße für Hochwasserszenarien. Grundsätzlich lässt sich die Problemstellung auch auf andere Prozesse erweitern, z.B. Stofftransport. Dieser wird im Rahmen des Projekts jedoch vernachlässigt.

Die Anwendung der Fuzzy-Set-Theorie unter Angabe der Parameterbereiche führt zur Intervallarithmetik und wird aufgrund des betrachteten nichtlinearen Prozesses (Strömung) und den entsprechenden Parameterfunktionen (z.B. Retentionsfunktion) in ein Optimierungsproblem überführt. In Abbildung 9 ist der Ablauf der Unschärfesimulation schematisch dargestellt und wird im folgenden Absatz kurz beschrieben.

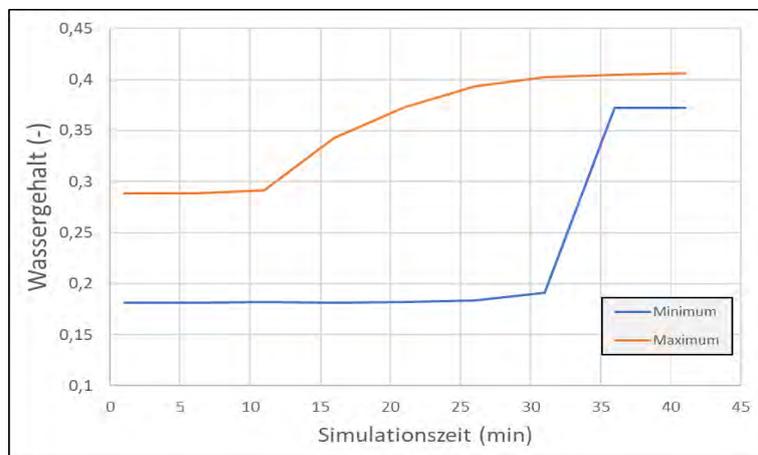


**Abbildung 9:** Ablaufschema der Unschärfesimulation auf Basis der Fuzzy-Set-Theorie

Zunächst werden die vom Nutzer definierten Fuzzy-Parameter verarbeitet, deren Schwankungsbreiten und Zugehörigkeiten vorgegeben werden können. Obwohl theoretisch beliebig viele Zugehörigkeitsstufen ( $\alpha$ -Level) definiert werden könnten, wird sich in PCSiWaPro aus praktischen Gründen (Reduzierung des numerischen Aufwands) auf 2 Stufen beschränkt. Aus den Schwankungsbreiten für jedes Zugehörigkeitslevel werden die Anfangswerte der Fuzzy-Parameter bestimmt. Damit wird ein erster Funktionswert für die zu bewertende Größe (z.B. Druckhöhe, Wassergehalt) berechnet. Anhand des Funktionswerts wird

anschließend für jeden Fuzzy-Parameter der Gradient berechnet, um die Sensitivität der jeweiligen Größe auf den Funktionswert zu ermitteln. Mit den Grenzwerten und Anfangswerten der Fuzzy-Parameter, dem Startwert für die Zielfunktion sowie den Gradienten wird der Optimierer NLPQLP (Schittkowski, 2006) aufgerufen.

Dieser ermittelt aus den Eingangswerten neue Fuzzy-Parameter innerhalb der vorgegebenen Grenzen, um den Funktionswert der Zielfunktion zu minimieren bzw. zu maximieren. Durch Auswertung der Variable IFAIL wird der Programmablauf gesteuert. Das Ergebnis der Fuzzy-Analyse mit unscharfen Eingangsparametern sind in der Regel Hüllkurven der betreffenden Größe am untersuchten Ort. Die Hüllkurven stellen die minimal und maximal zu erwartenden Werte im zeitlichen Verlauf der Simulation dar. Abbildung 10 zeigt das Ergebnis der Unsicherheitsanalyse am Beispiel des Wassergehalts.



**Abbildung 10:** Ergebnis einer Unsicherheitsanalyse an einem Punkt im Deichkörper in Form einer Hüllkurve für minimal und maximal zu erwartende Wassergehalte bei gegebenen Parameterunsicherheiten

### 3.1.6 Zusammenfassung/Schlussfolgerung

Die Software PCSiWaPro wurde im Rahmen des Vorhabens weiterentwickelt, um die Prozessbetrachtung bei der Deichdurchströmung präziser abbilden zu können. Dafür war es erforderlich, gezielt Erweiterungen in der Umsetzung spezifischer Randbedingungen zu implementieren. Die Auswirkung der erweiterten Randbedingungen auf das Simulationsergebnis konnte in versuchsbegleitenden Modellrechnungen überprüft werden.

In enger Kooperation mit dem Partner IWD wurde eine Programmschnittstelle entwickelt, die auf Basis der wasserhaushaltlichen Betrachtungen in PCSiWaPro nachgelagerte Analysen des Ausnutzungsgrads im eingestauten Dammkörper mit Hilfe des BISHOP-Verfahrens erlauben. Die Schnittstelle ist weitestgehend anwenderfreundlich gestaltet und auch für komplexere Modelle geeignet. Getestet wurde die Schnittstelle im Rahmen des Vorhabens anhand eines Modells des großskaligen Versuchsdeichs des Partner IWD.

Die Implementierung der Unschärfeanalyse in das Programm PCSiWaPro wurde grundlegend fertiggestellt. Der Anwender kann für alle verfügbaren bodenhydraulischen Parameter

entsprechende Zugehörigkeitsfunktionen definieren. Die Funktionsweise des Ansatzes konnte anhand eines einfachen Modells bestätigt werden. Für die weitere Entwicklung und Überführung in die ingenieurmäßige Praxis ist ein paralleler Berechnungsansatz der Gradientenberechnungen erforderlich, da mit zunehmender Anzahl unscharfer Parameter der numerische Aufwand exponentiell ansteigt und mit Blick auf komplexe Modelle zu längeren Rechenzeiten führen kann.

### **3.2 AE-IGW 2: Kleinskalige Laborversuche**

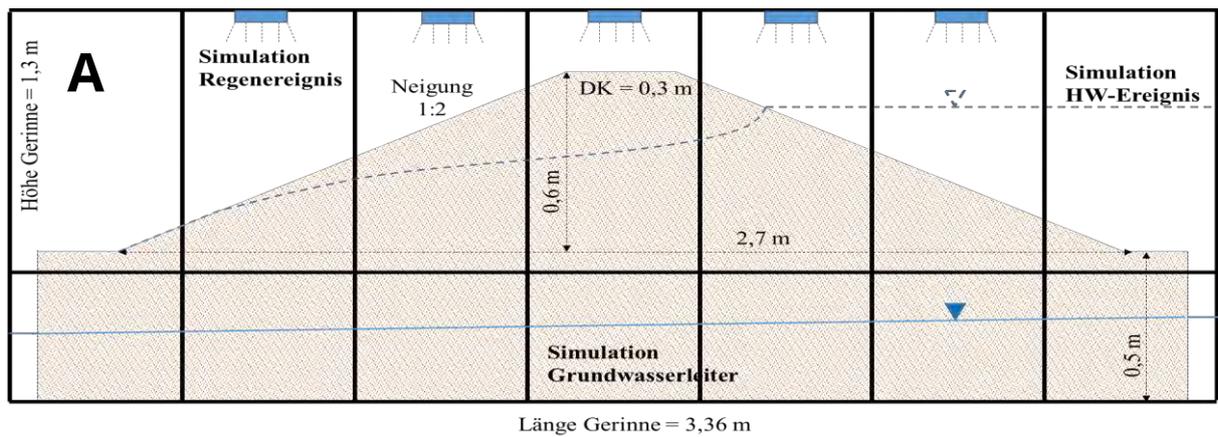
Hauptziel der durchgeführten Versuche war die Untersuchung des Einflusses veränderlicher Wassergehalte im ungesättigten Teil der Deiche und Dämme, hauptsächlich beeinflusst durch Niederschlagsereignisse, auf die Hangstabilität sowie Erosionserscheinungen während auftretender Hochwasserereignisse. Hierbei sollten die folgenden speziellen Fragestellungen beantwortet werden:

- Kommt es durch erhöhte Anfangswassergehalte, bis hin zur Vollsättigung, im ungesättigten Teil des Deiches zu verstärkten Hangrutschungen während auftretenden Hochwasserereignissen?
- Welchen Einfluss haben Niederschlagsereignisse, die während Hochwasserereignissen auftreten, auf die Hangstabilität?
- Wie beeinflusst der Einbau verfestigter, bereits vorhandener mineralischer Dammbaumaterialien die Aufsättigung des Deiches und in dessen Folge die Hangstabilität sowie auftretende Erosionserscheinungen?
- Welchen Einfluss haben schnell absinkende Hochwasserspiegel auf die innere Erosion?

#### **3.2.1 Versuchsaufbau**

Zur Beantwortung der Fragestellungen erfolgte der Aufbau von zwei 2D-Versuchsgerinnen (Abbildung 11) auf Grundlage von modelltechnischen Planungen. Dazu zählten sowohl numerische Simulationen zur Festlegung einer geeigneten Dimensionierung als auch statische Berechnungen zum Nachweis der Standsicherheit. Weiterhin waren Vorgaben aus der DIN 19712 und dem DWA Merkblatt-M 507-1 sowie gewonnene Erkenntnisse aus einer zuvor durchgeführten Literaturrecherche Basis für die Konzipierung eines geeigneten Versuchsaufbaus. Die Randbedingungen der schlussendlich aufgebauten Versuchsgerinne sind im Folgenden aufgeführt:

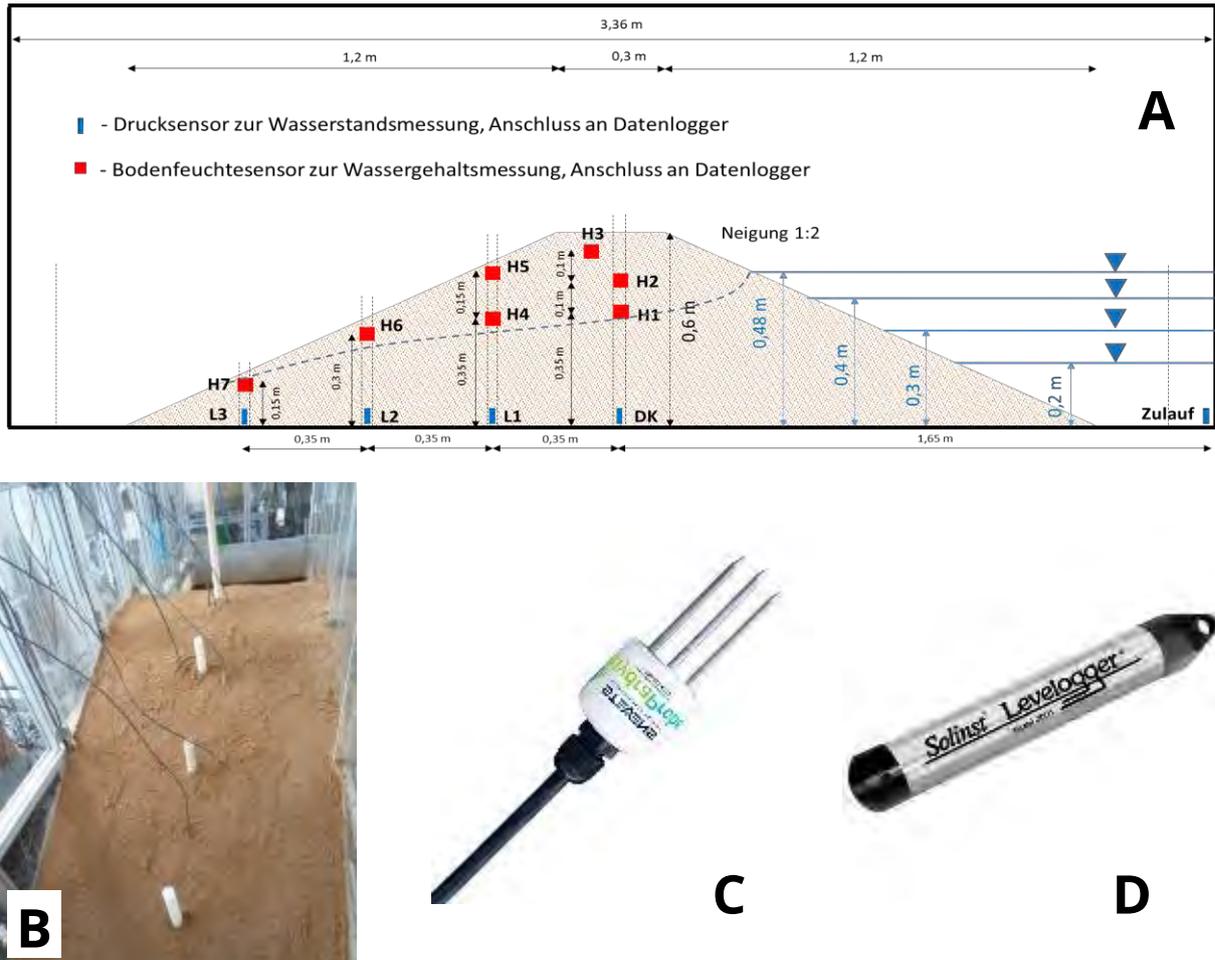
- Abmessungen 2D-Tank: Länge 336 cm, Breite 98 cm und Höhe 130 cm (Abbildung 11A)
- Seitenwände und Boden aus Plexiglas zur visuellen Beobachtung von Sickerlinie und Veränderungen der Deichgeometrie
- Zulauf von Wasser zur Simulation von Hochwasserereignissen über bodennah angebrachte  $\frac{3}{4}$  Zoll Schlauchleitungen, Steuerung über Schwimmerschalter (Abbildung 11C)
- Ablauf austretenden Wassers auf der Luftseite des Deiches über bodennah angebrachte  $\frac{3}{4}$  Zoll Schlauchleitungen, Erfassung der Wassermenge über Wägung (Abbildung 11C)



**Abbildung 11:** 2D-Versuchsgerinne mit den möglichen Versuchsvariationen Hochwasserereignis, Regenereignis und Simulation Grundwasserleiter (A), 2D-Versuchsgerinne (B), Realisierung von Zu- bzw. Ablauf (C), Installation von Lochblech incl. Geotextil sowie Dachpappe (D) und 2D-Versuchsgerinne mit Deich auf Bodenplatte (E)

- Vermeidung von Wandeffekten bzw. Reduzierung der Fließgeschwindigkeit im Wandbereich durch installierte vertikale Stege auf beiden Längsseiten des Gerinnes im Abstand von 40 cm
- Anbringen von Dachpappe auf der Bodenfläche zur Vermeidung von bevorzugtem Rutschen des Deiches (Abbildung 11D)
- Installation von Lochblechen incl. Geotextil auf der Einstau- und Luftseite des Deiches für die später geplante Realisierung eines Bodenkörpers unter dem Deich (Abbildung 11D)

Zur Überwachung der Bodenfeuchte im Deichkörper werden Wassergehaltssonden (Hydrasonden der Firma Stevenswater, Portland, OR, USA) (Abbildung 12C) an sieben Positionen installiert (Abbildung 12A). Zur Erfassung qualitativer Veränderungen der Sickerwasserlinie werden an vier Positionen Pegelrohre installiert (Abbildung 12A), in denen der Wasserstand mittels Wasserstandsdatenloggern (Levellogger der Firma Solinst, Georgetown, Canada) (Abbildung 12D) gemessen wird, zusätzlich erfolgt die Messung des Wasserstandes im Zulauf.



**Abbildung 12:** Seitenansicht 2D-Versuchsgrinne mit Position der eingebauten Wassergehaltssensoren und Wasserstandsdatenloggern (A), Ansicht der Luftseite des Deiches mit eingebauten Pegelrohren und Wassergehaltssensoren (B), Hydrasonde (C) und Levellogger (D)

Im Zuge der durchgeführten Versuche zur Beantwortung der aufgeführten Fragestellungen hinsichtlich Aufsättigung und Hangstabilität erfolgte der Einsatz von zwei verschiedenen Bodenarten, um den Einfluss unterschiedlicher Materialeigenschaften auf diese Prozesse zu untersuchen. Die mittels Verdunstungsmethode ermittelten Retentionsparameter sowie die im Permeameter-Versuch bestimmten hydraulischen Durchlässigkeiten der beiden Böden sind in Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2:** Ermittelte Materialparameter für den Boden 1 und Boden 2

	<b>Boden 1</b>	<b>Boden 2</b>
<b>Residualer Wassergehalt <math>\Theta_r</math> (-)</b>	0,10	0,15
<b>Gesättigter Wassergehalt <math>\Theta_s</math> (-)</b>	0,355	0,358
<b>Lufttrittparameter <math>\alpha</math> (1/m)</b>	4,07	2,77
<b>Porengrößenverteilung <math>n</math> (-)</b>	2,50	2,01
<b>Gesättigte Hydraulische Leitfähigkeit <math>K</math> (m/s)</b>	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6}$
<b>Tortuosität <math>\lambda</math> (-)</b>	0,5	-1,5

### 3.2.2 Versuchsergebnisse Boden 1

Zur Testung und Validierung sowie im Folgenden zur Beantwortung der aufgeführten Fragestellungen erfolgte die Durchführung von mehreren Szenarien mit Boden 1 mit veränderlichen Randbedingungen und dem in Abbildung 12A dargestellten Versuchsaufbau. Eine Übersicht über die durchgeführten Szenarien und die zugehörige Zielstellungen sind Tabelle 3 zu entnehmen.

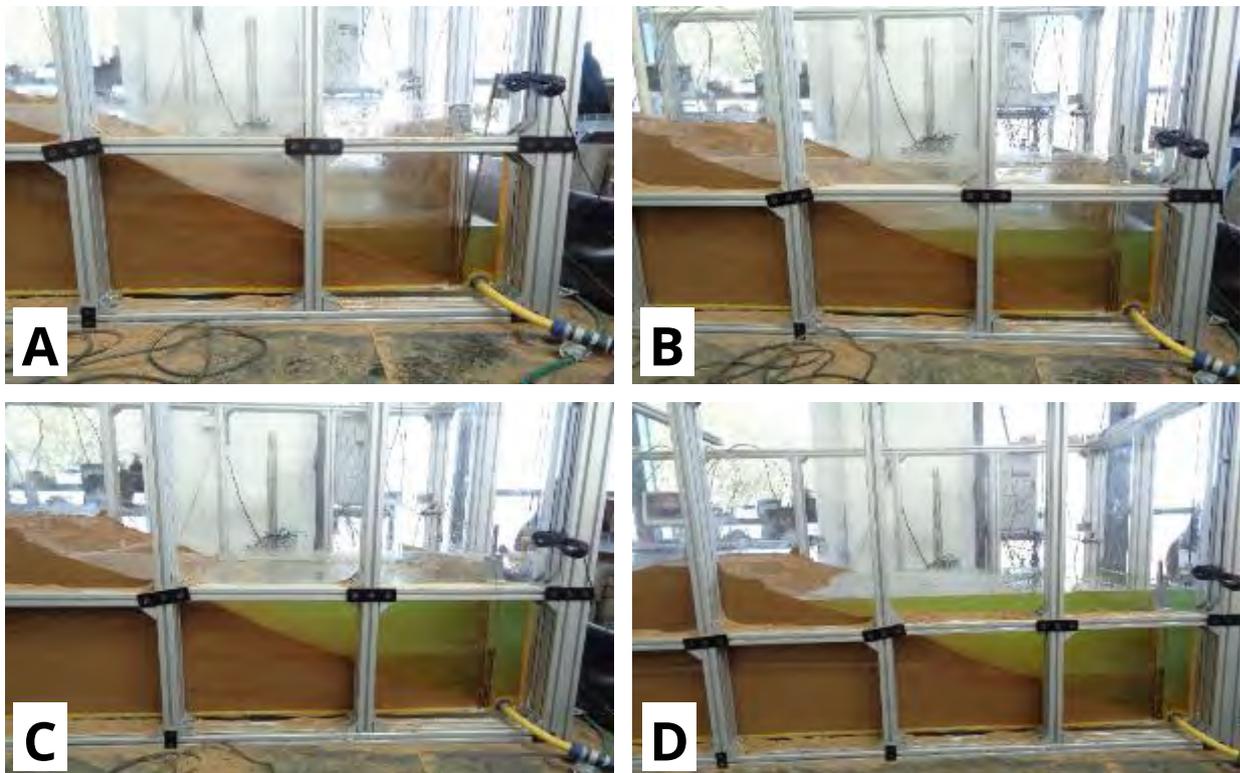
**Tabelle 3:** Übersicht der im Rahmen des Berichtszeitraumes mit Boden 1 durchgeführten Szenarien im Labormaßstab

<b>Sz.</b>	<b>Randbedingungen</b>	<b>Ziel</b>
	<b><u>Boden 1</u></b>	
1	Stufenweiser Einstau	Realisierung von stationären Zuständen (20, 30, 40 cm) bis zum Versagen
2	Stufenweiser Einstau	Wiederholung: Szenario 1
5	Sofortiger Einstau auf 80 % der Bemessungshöhe	Einfluss des schnellen Wasseranstiegs auf Versagen
9	Stufenweiser Einstau ohne Messtechnik	Einfluss von Messtechnik auf Versagen
3	Beregnung (100a / 2h) + stufenweiser Einstau	Testung der Möglichkeit der Aufsättigung in der unges. Zone des Deiches / Einfluss einer potenziellen Vorsättigung auf Deichversagen
4	Beregnung (100a / 60 min - 30 min Pause)	
6	Beregnung (100a / 20 min - 40 min Pause)	
7	Beregnung (100a / 10 min - 50 min Pause)	
8	Beregnung (100a / 5 min - 55 min Pause) + stufenweiser Einstau + 12 cm Unterbau	Einfluss des Unterbaus auf Aufsättigung des Deiches durch Beregnung und Einstau / Testung der Möglichkeit der Aufsättigung der unges. Zone des Deiches
10	Beregnung (100a / 5 min - 55 min Pause) + stufenweiser Einstau + 25 cm Unterbau	
12	Einstau 30 cm + Beregnung ((100a / 5 min - 55 min Pause)	Einfluss von Beregnung auf Versagen bei Vorsättigung durch Einstau

15	Stufenweiser Einstau mit Flüssigbodenkern	Realisierung von stationären Zuständen (20, 30, 40 cm) bis zum Versagen
17	Stufenweiser Einstau mit Flüssigbodenkern	Wiederholung: Szenario15
21	Stufenweiser Einstau mit Flüssigbodenkern, Böschungsneigung 1:1	Realisierung von stationären Zuständen (20, 30, 40 cm) bis zum Versagen
22	Stufenweiser Einstau, Böschungsneigung 1:1	Realisierung von stationären Zuständen (20, 30, 40 cm) bis zum Versagen

### **Stufenweiser statischer Einstau (Szenario 1)**

Zur Testung des Versuchssystems sowie zur Gewinnung erster Daten für die numerische modelltechnische Begleitung erfolgte ein stufenweiser einseitiger Einstau des Deiches (Abbildung 13) bis im physikalischen Modell Versagenserscheinungen aufgetreten sind. Die Einstauhöhen betragen dabei 20, 30, 40 und 48 cm, wobei diese bis zur Ausbildung stationärer Zustände realisiert wurden. Die maximale Einstauhöhe entspricht hierbei einem festgelegten Bemessungshochwasser. Der häufig pauschal definierte Freibord (DIN 19712, 2013), der Abstand zwischen dem Bemessungshochwasser und der Deichkrone, betrug somit 12 cm.

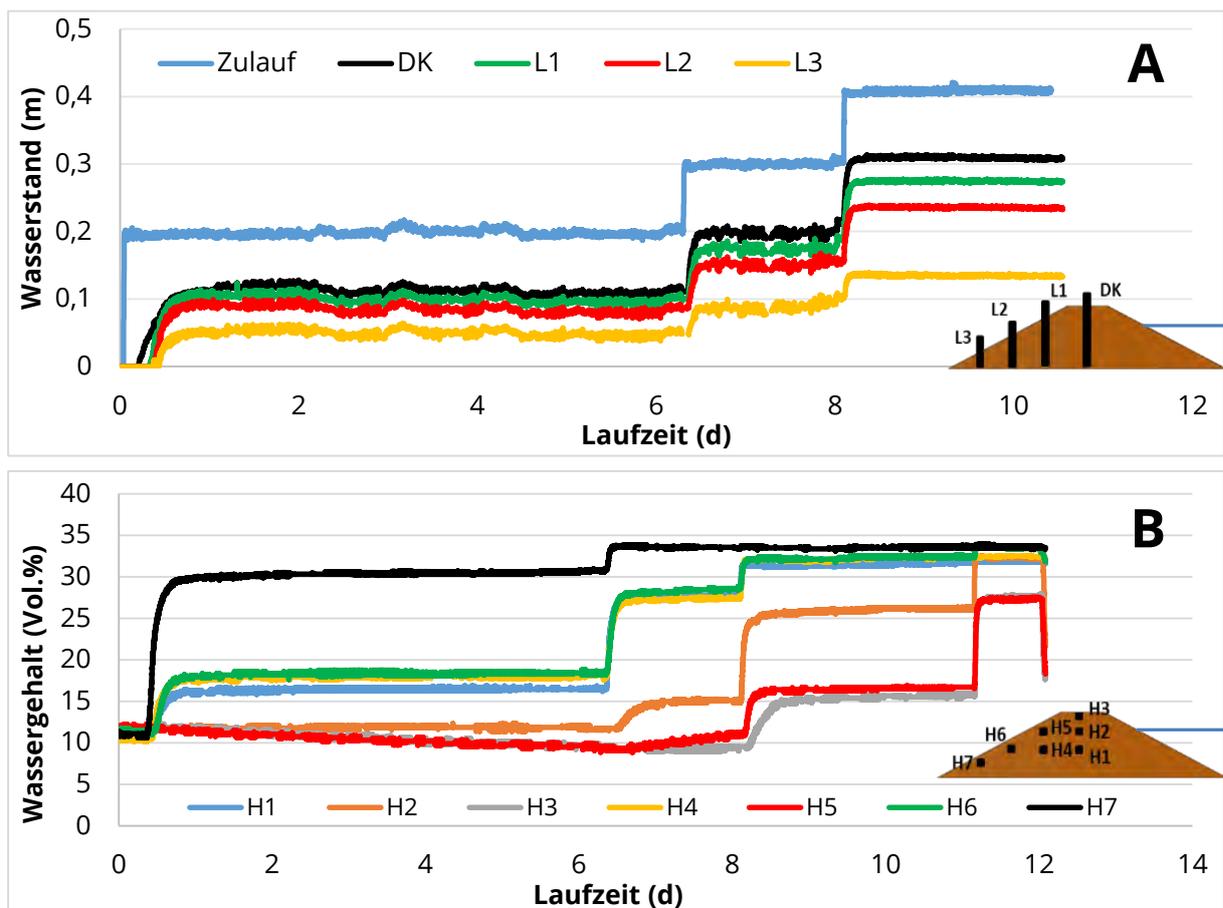


**Abbildung 13:** Stufenweiser Einstau in Szenario 1 – 20 cm (A), 30 cm (B), 40 cm (C), 52 cm (D)

Anhand der im Zuge des stufenweisen Einstaus gemessenen Wasserstände (Abbildung 14A) kann die Ausbildung der Sickerlinie logisch nachvollzogen werden.

Der Anstieg des Wasserspiegels setzt sich zeitverzögert und abfallend vom Zulauf über die Messpunkte DK, L1, L2 und L3 fort.

Auch im Falle des Wassergehaltes kann die Reaktion auf den stufenweisen Einstau nachvollzogen werden (Abbildung 14B). Die erste und stärkste Reaktion auf den Einstau zeigt dabei Sensor H7, aufgrund der ausgebildeten Sickerlinie und den dadurch bedingten kapillaren Aufstieg von Wasser. Schon bei einem Einstau von 30 cm liegen die Wassergehalte hier im Bereich der Vollsättigung. Die vom Deichkörperboden aus weiter oben platzierten Sensoren H1, H4 und H6 zeigen zunächst nur einen geringeren Anstieg, mit fortschreitendem Einstau nähern sich auch hier die Wassergehalte der Vollsättigung. Die am weitesten vom Deichkörperboden und somit von der Sickerlinie entfernt platzierten Sensoren H2, H3 und H5 zeigen zunächst keine Reaktion auf den Einstau. Im Gegenteil, hier lässt sich ein Absinken der Wassergehalte durch einen vertikalen schwerkraftbedingten Wassertransport beobachten. Im weiteren Verlauf lassen sich auch hier Anstiege verzeichnen. Ein Anstieg der Wassergehalte in Richtung Vollsättigung lässt sich hier erst bei der Erhöhung des Einstaus auf 48 cm beobachten.



**Abbildung 14:** Zeitlicher Verlauf des Wasserstandes im Zulauf sowie den Positionen DK, L1, L2 und L3 (A) und zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes in den Positionen H1 bis H7 (B) während Szenario 1

Während es beim Einstau bis zu einer Höhe von 40 cm nahezu keine Hangrutschungsercheinungen gab, kam es nach der Erhöhung des Einstaus auf 48 cm zum oberflächigen Abrutschen eines Teils des luftseitigen Deichhanges. Die Standsicherheit des Gesamtdaiches wurde dadurch allerdings noch nicht beeinträchtigt.

### **Numerisches Modell und dessen Kalibrierung anhand der Daten von Szenario 1**

Analog zu den durchgeführten 2D-Gerinneversuchen erfolgte die Begleitung mittels numerischer Simulationsmodelle. Für die Simulation der erzielten Ergebnisse im Labormaßstab wurde daher ein numerisches Modell mittels PCSiWaPro aufgebaut. Dabei stand zunächst die Modellkalibrierung und -validierung im Vordergrund. Im dazu aufgebauten numerischen Modell wurde ein einseitiger Einstau auf verschiedene Wasserstände nachgebildet, bis im physikalischen Modell Versagenserscheinungen aufgetreten sind. Dafür wurde an der „Wasserseite“ im numerischen Modell eine zeitabhängige Potentialhöhe als Randbedingung (RB) (Code: +8, definiert entsprechend des Einstaus) und an der „Luftseite“ eine Sickerfläche (Code: -2, Abfluss ab einer Druckhöhe von 0 m möglich) implementiert. Die undurchlässige Bodenplatte wird durch eine no-flow RB (kein Fluss) repräsentiert. Vorhandene Beobachtungspunkte (4 x Druckhöhe, 7 x Wassergehalt) wurden ebenfalls im Modell nachgebildet, sodass Messdaten mit den simulierten Daten verglichen werden können.

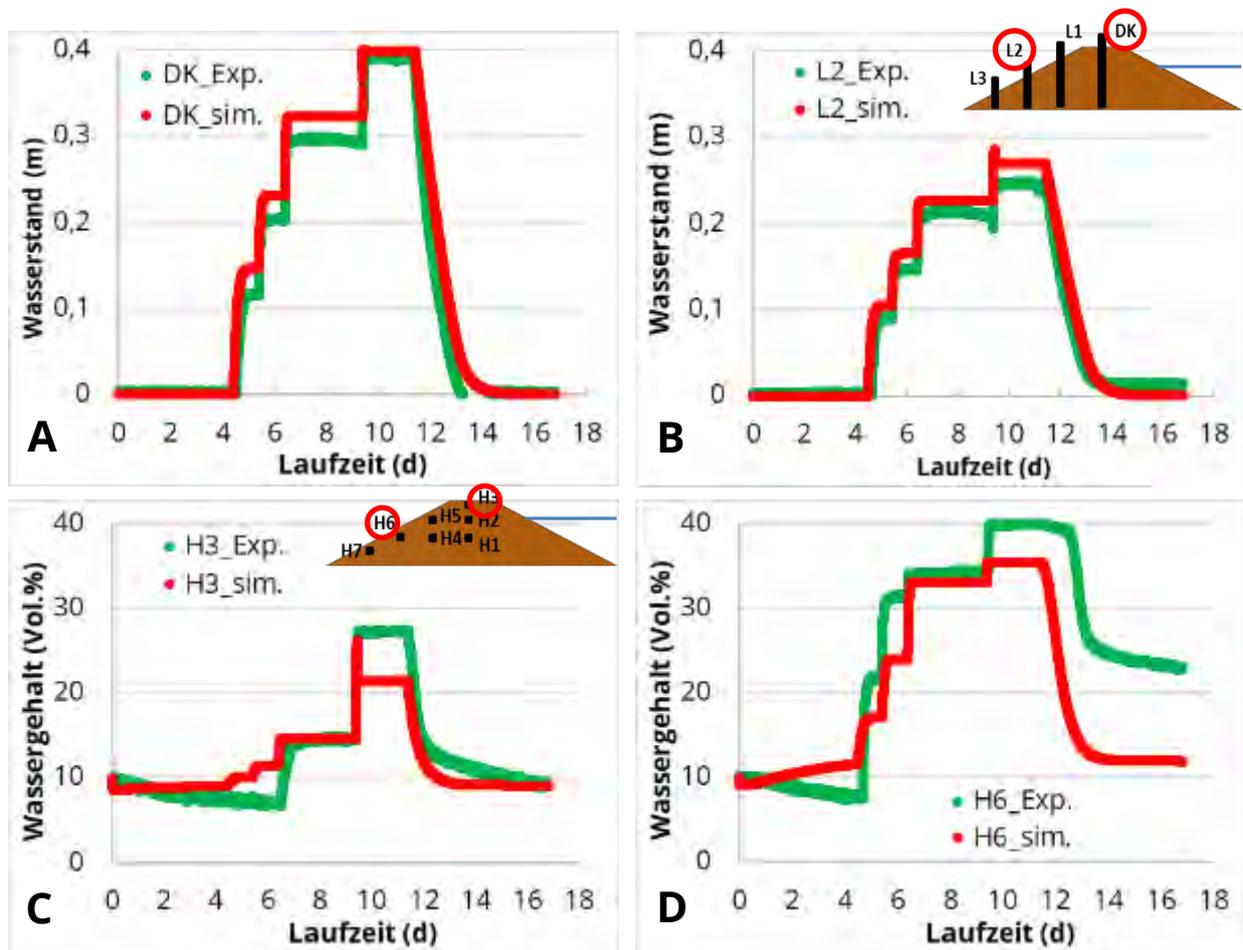
Als Ausgangswerte für die Modellierung bzw. Grundlage für die inverse Anpassung der hydraulischen Parameter des homogenen Materials dienen laborativ bestimmte Materialparameter (Tabelle 4, Spalte: Labormessung) für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, Residual- und Sättigungswassergehalt sowie die Formparameter der MUALEM-VAN-GENUCHTEN Retentionsfunktion. Beim Vergleich der experimentell bestimmten Messdaten mit den simulierten Werten für die Druckhöhen wurde ersichtlich, dass die Wasserausbreitung im numerischen Modell zunächst deutlich unterschätzt wird, bzw. ein zeitlicher Versatz in der Ausbildung der Sickerlinie auftritt, d.h. dass die Strömung im physikalischen Modell schneller abläuft. Auch die Übereinstimmung mit den Wassergehaltsmessungen ist mit den initialen Parametern nicht ausreichend. Daher erfolgte im Rahmen der Kalibrierung eine Anpassung der Materialparameter, wobei der K-Wert hauptsächlich über den Abstrom in den stationären Zuständen der physikalischen Versuche definiert wurde (Tabelle 4, Spalte: Kalibrierung).

**Tabelle 4:** Materialparameter für den Boden 1- Labormessung und Kalibrierung

	<b>Labormessung</b>	<b>Kalibrierung</b>
<b>Residualer Wassergehalt <math>\Theta_r</math> (-)</b>	0,10	0,08
<b>Gesättigter Wassergehalt <math>\Theta_s</math> (-)</b>	0,355	0,355
<b>Lufteintrittsparameter <math>\alpha</math> (1/m)</b>	4,07	8,3
<b>Porengrößenverteilung <math>n</math> (-)</b>	2,5	3,16
<b>Gesättigte Hydraulische Leitfähigkeit <math>K</math> (m/s)</b>	$2 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$
<b>Tortuosität <math>\lambda</math> (-)</b>	0,5	-1,5

Mit den angepassten Materialparametern konnte eine gute Übereinstimmung für die Ausbreitung der Sickerlinie mit den Modellen erreicht werden (Abbildung 15A+B). Die modellierten Wassergehalte an den Messpunkten weichen etwas mehr von den gemessenen Daten ab, wobei auch mit einer weiteren Anpassung keine besseren Ergebnisse erreicht werden können (Abbildung 15C+D). Bei einigen Messpunkten tritt eine Unterschätzung, bei anderen eine Überschätzung zum gleichen Zeitpunkt auf, sodass nie eine gesamtheitliche Verbesserung im konzeptionell homogenen Deich möglich sein wird.

Generell scheint das Modell den kapillaren Aufstieg etwas zu unterschätzen, wobei anhand der Messdaten kein einheitliches Ergebnis vorhanden ist. Erste Betrachtungen, ob z.B. bestimmte Wassergehaltsbereiche besser bzw. schlechter abgebildet werden können, haben keine eindeutige Klärung gebracht. Nach einer möglichst optimalen Anpassung der Materialparameter werden die Modelle zur Versuchsbegleitung bzw. -kontrolle und als Prognosewerkzeuge für weitere Szenarien verwendet.



**Abbildung 15:** Vergleich von experimentell ermittelten und simulierten Druckhöhen in den Beobachtungspunkten DK (A) und L3 (B) sowie Wassergehalten in den Beobachtungspunkten H3 (C) und H6 (D) für Szenario 2 nach Anpassung der Bodenparameter

### **Güte der Kalibrierung**

Im Mittelpunkt der hierbei durchgeführten Untersuchungen stand die Bewertung der Prognosegüte des kalibrierten Modells nach Anpassung der Eingangsparameter. Im speziellen sollte ermittelt werden, an welchem Beobachtungspunkt bzw. in welchem Bereich des Deiches die experimentellen Werte besser durch das Modell abgebildet werden.

Neben dem visuellen Vergleich von beobachteten sowie simulierten Wassergehalten und Druckhöhen erfolgt die Quantifizierung der Abweichung der simulierten von den gemessenen Wassergehalten und Druckhöhen mittels verschiedener Fehlerindikatoren. In den hier durchgeführten Untersuchungen kamen der Root Mean Square Error (RMSE) sowie die Nash-Sutcliffe Effizienz (NSE) zum Einsatz, um die Güte der Kalibrierung zu bewerten.

Der Root Mean Square Error (RMSE) ist dabei eine Maßzahl zur Beurteilung der Prognosegüte. Er gibt die durchschnittliche quadratische Abweichung der simulierten von den experimentellen Messwerten an. Je größer der RMSE ist, desto schlechter ist die Anpassung des Modells (Moriassi et al., 2007). Berechnet wird der RMSE aus der Quadratwurzel des durchschnittlichen Prognosefehlers nach der folgenden Gleichung:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{mess} - y_{sim})^2}$$

wobei

$y_{mess}$  = gemessene Wassergehalte bzw. Druckhöhen (Vol.% bzw. m)

$y_{sim}$  = simulierte Wassergehalte bzw. Druckhöhen (Vol.% bzw. m)

n = Anzahl Datensätze (-)

Darüber hinaus erfolgt die Bewertung der Güte durch den Fehlerindikator NASH-SUTcliffe Effizienz (NSE). Dies ist ein kombiniertes Maß für zufälligen und systematischen Fehler (Nash & Sutcliffe, 1970). Der Ergebniswert bewegt sich zwischen  $-\infty$  und 1. Wobei 1 bedeutet, dass es sich hierbei um ein perfekt angepasstes Modell handelt. Der Wert 0 bedeutet, dass die Modellierung so gut wie der Mittelwert der Beobachtung ist. Ein  $NSE < 0$  tritt hingegen auf, wenn der Mittelwert der Beobachtung ein besseres „Modell“, darstellt als das eigentliche Simulationsmodell (Drabek, 2010). Der NSE berechnet sich wie folgt:

$$NSH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{mes} - y_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{mess} - y_{mess\emptyset})^2}$$

wobei

$y_{mess}$  = gemessene Wassergehalte/Druckhöhen (Vol.%/m)

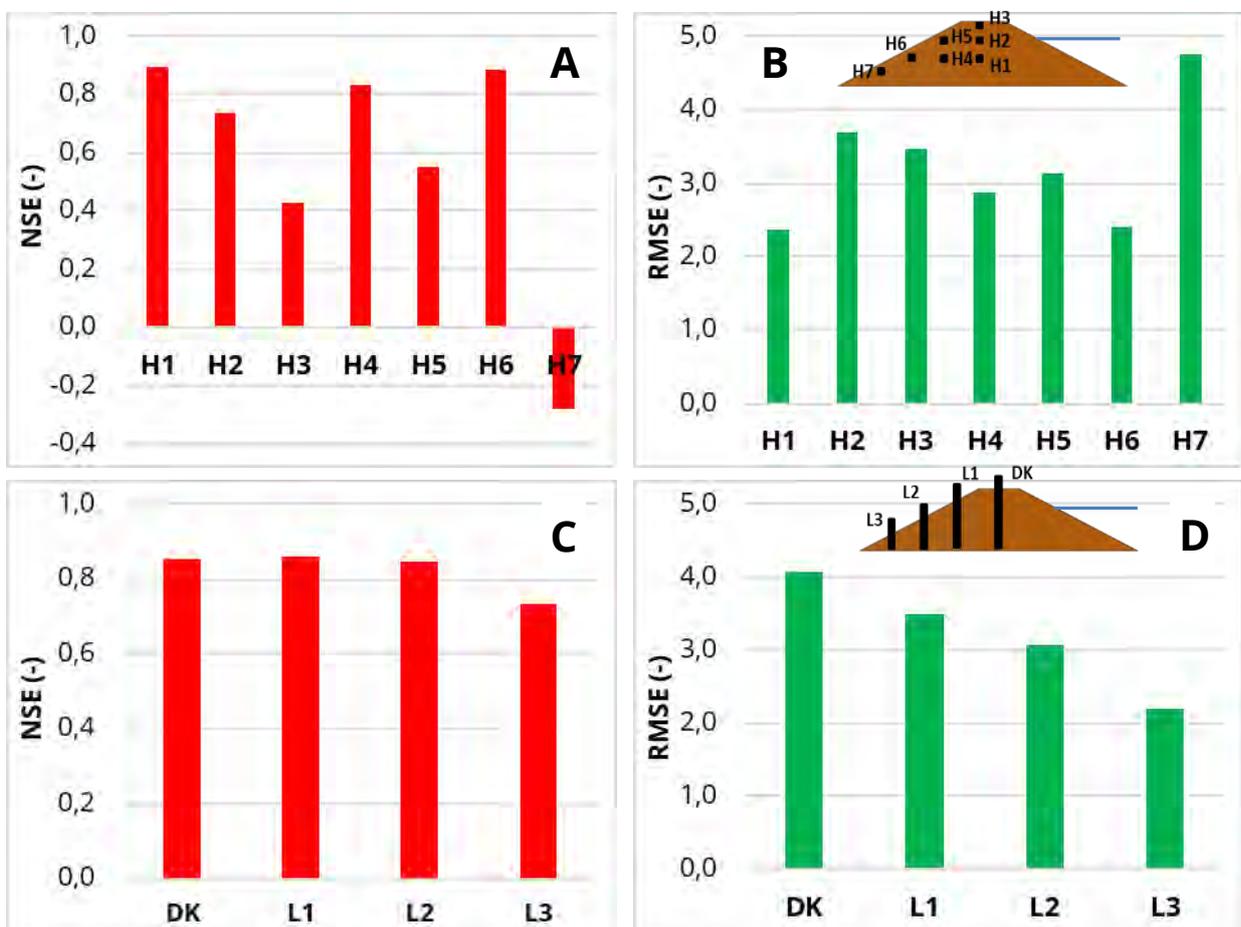
$y_{mess\emptyset}$  = durchschnittlich gemessene Wassergehalte/Druckhöhen (Vol.%/m)

$y_{sim}$  = simulierte Wassergehalte/Druckhöhen (Vol.%/m)

n = Anzahl Datensätze (-)

Die Ergebnisse zeigen hier eine recht hohe Güte der Kalibrierung in den Beobachtungspunkten H1 bis H6 für den Wassergehalt. Die durchschnittliche maximale Abweichung nach dem RMSE liegt hier bei rund 3 Vol.% (Abbildung 16B). Dies entspricht dem systematischen Fehler der für die Messung des Wassergehaltes eingesetzten Hydra-Sonden. Lediglich in Punkt H7 gibt es sowohl nach dem NSE (Abbildung 16A) als auch nach dem RMSE (Abbildung 16B) eine weniger gute Übereinstimmung von Messwerten und Simulation.

Im Falle der Druckhöhen zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den Abweichungen der Wassergehalte, wobei es hier keinen so starken Ausreißer gibt. Sowohl nach dem NSE (Abbildung 16C) als auch nach dem RMSE (Abbildung 16D) gibt es eine gute Übereinstimmung von Messwerten und Simulation.



**Abbildung 16:** Ermittelte Fehlerindikatoren für die Güte der Kalibrierung im Rahmen von Szenario 14 – NSE für die Wassergehalte von H1 bis H7 (A), RMSE für die Wassergehalte von H1 bis H7 (B), NSE für die Druckhöhen von DK bis L3 (C), RMSE für die Druckhöhen von DK bis L3 (D)

### **Analyse der Sensitivität von Druckhöhen und Wassergehalt in Deichkörpern bei Variation von Modellrandbedingungen**

Um die Sensitivität des Systems bzw. der Parameter Wassergehalt sowie Druckhöhe auf die Variation von Modellrandbedingungen zu untersuchen, wurden weitere Simulationen diesbezüglich durchgeführt. Dabei sollten unter anderem Bereiche des Deiches identifiziert werden, die am sensitivsten auf Veränderungen der Parameter reagieren.

Im Mittelpunkt dieser Sensitivitätsanalyse standen dabei die nach der Kalibrierung des Modells relevantesten Parameter zur Charakterisierung der verwendeten Böden, die hydraulische Durchlässigkeit  $K$  sowie die VAN GENUCHTEN-Parameter  $\alpha$  und  $n$  (Tabelle 5).

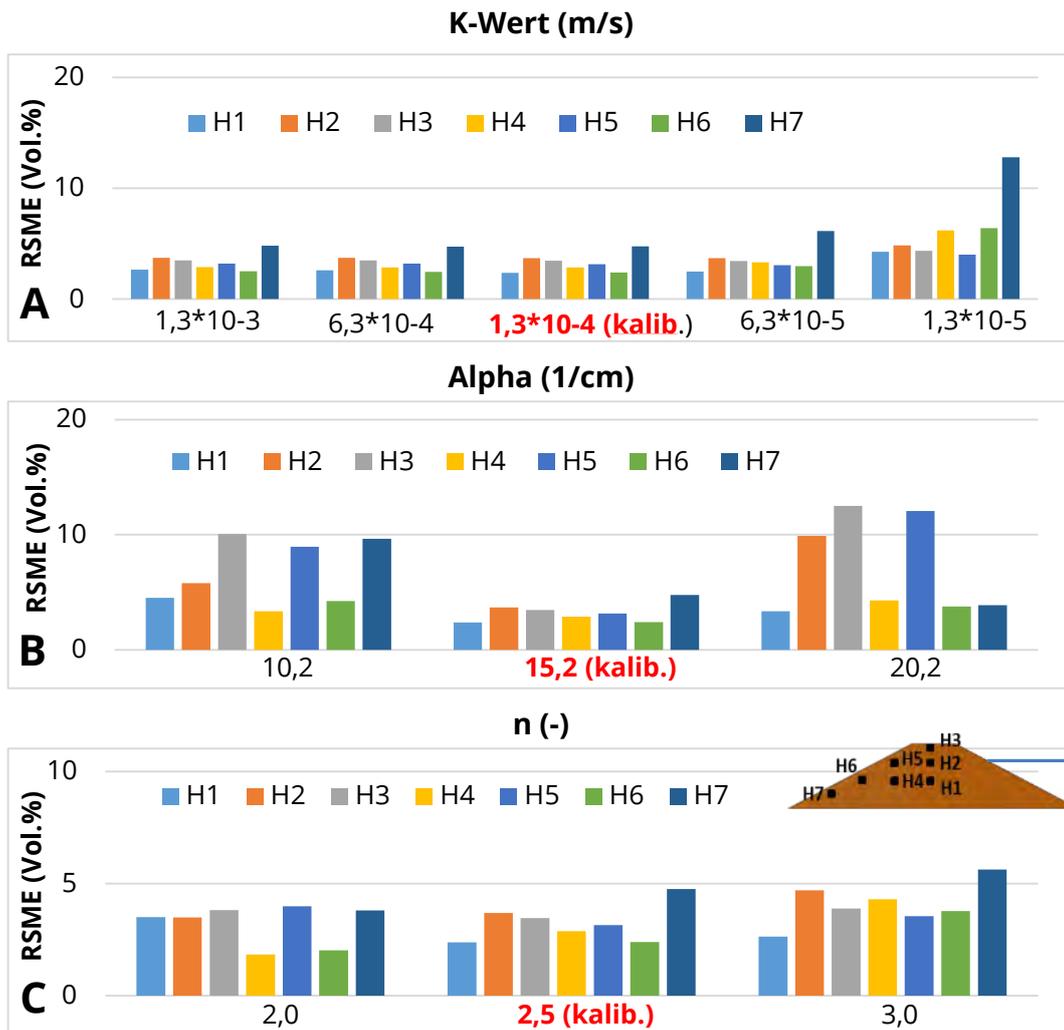
**Tabelle 5:** Im Zuge der Sensitivitätsanalyse variierte Parameter incl. der Bandbreite der Variation, Werte der Kalibrierung in rot

Parameter	Varianten				
<b>K (m/s)</b>	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
<b>Alpha (1/m)</b>	10,2		15,2	20,2	
<b>n (-)</b>	2,0		2,5	3,0	

Bei den unterschiedlichen Simulationsläufen wird jeweils ein Parameter, unter Beibehaltung der übrigen, sinnvoll variiert, um die Auswirkungen dieses einen Parameters auf das Gesamtsystem zu bestimmen. Anschließend wird ein anderer Parameter auf seinen Einfluss untersucht, wobei die vorherige mit ihrem ursprünglichen Wert konstant gehalten wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Wassergehalt im unteren Bereich der luftseitigen Böschung (H7, L3) am sensitivsten auf die Veränderung der hydraulischen Durchlässigkeit reagiert (Abbildung 17 A). In diesem annähernd vollgesättigten Bereich des Deichkörpers (Abbildung 14B, Seite 25) spielen die Parameter  $\alpha$  und  $n$  keine Rolle, die Sensitivität des Wassergehaltes wird hier fast ausschließlich durch den veränderlichen Parameter hydraulische Durchlässigkeit verursacht. Die Wassergehalte an den restlichen Beobachtungspunkten im teilgesättigten Bereich zeigen nur eine sehr geringe Sensitivität gegenüber der veränderlichen hydraulischen Leitfähigkeit, die Schwankungen liegen hier im Bereich der Messungengenauigkeit der Sensoren zur Messung des Wassergehaltes.

Im teilgesättigten Bereich des Deiches hingegen reagiert der Wassergehalt am sensitivsten auf eine Veränderung der Parameter  $\alpha$  und  $n$  (Abbildung 17 B+C), da hier die Sensitivität des Wassergehaltes fast ausschließlich durch die Beziehung von Wassergehalt und Druckhöhe auf Basis der Saugspannungs-Sättigungskurve bestimmt wird. Am deutlichsten wird diese Sensitivität bei der Betrachtung der Ergebnisse für die Beobachtungspunkte H2, H3 und H5, bei denen am längsten teilgesättigte Verhältnisse zu beobachten waren (Abbildung 14B, Seite 25). Eine stärkere Ausprägung der Sensitivität des Wassergehaltes kann zudem bei der Variation des Maßstabsfaktors  $\alpha$  beobachtet werden (Abbildung 17 B).

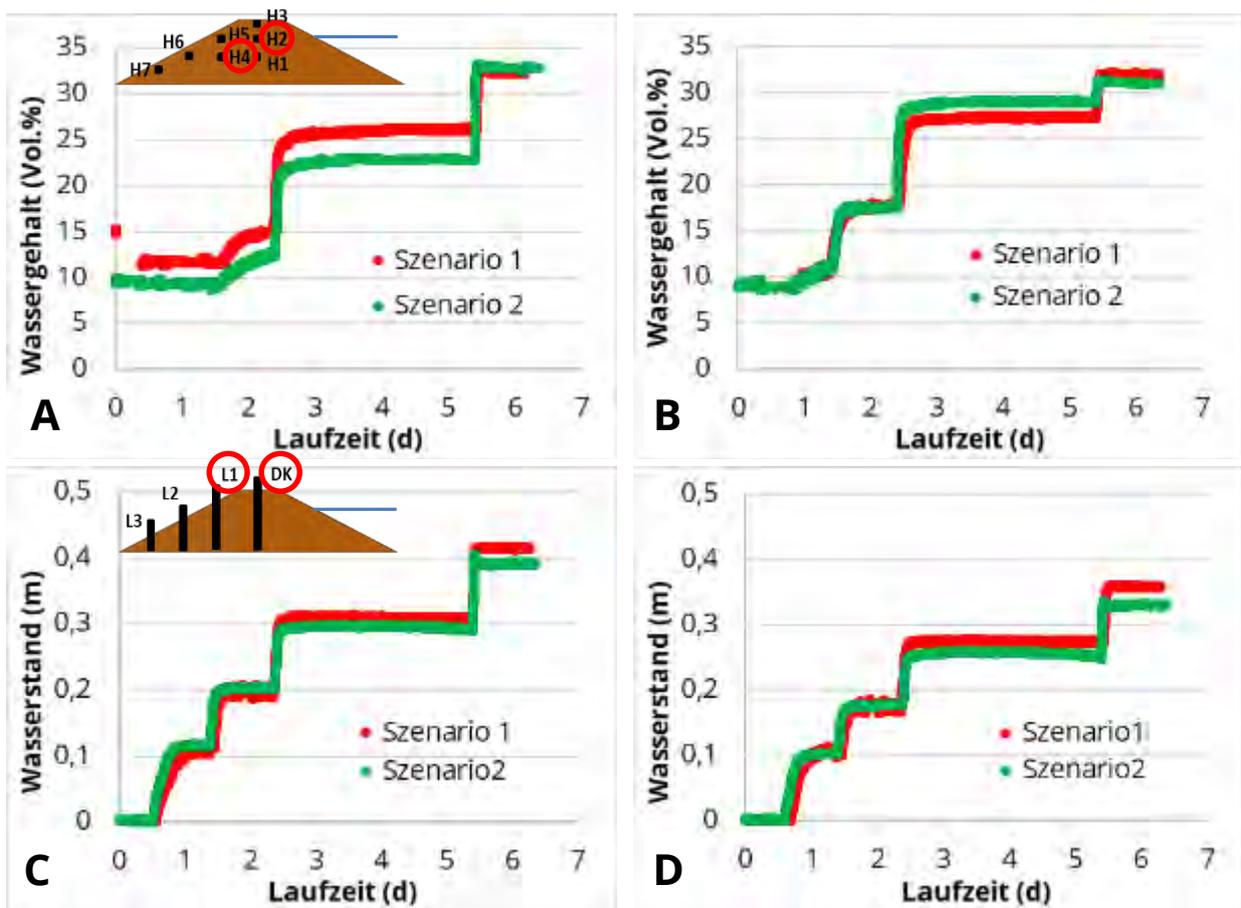


**Abbildung 17:** RMSE-Werte für die durchgeführte Sensitivitätsanalyse für Boden 1 mit Variation von K (A), Alpha (B) und n (C)

### Versuche zur Reproduzierbarkeit (Szenario1 + 2)

Zur Testung der Reproduzierbarkeit der Versuche erfolgte zunächst die Wiederholung von Szenario 1. Die Randbedingungen in diesem Szenario 2 entsprachen dabei exakt denen von Szenario 1 (Boden 1, Lagerungsdichte 1,67 g/cm<sup>3</sup>, Einstau 20/30/40/48 cm).

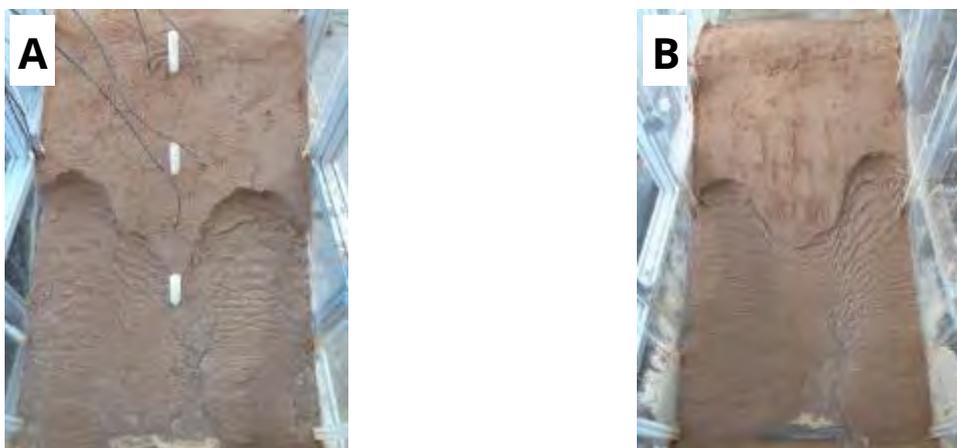
Anhand der beobachteten Ergebnisse für den volumetrischen Wassergehalt, beispielhaft dargestellt durch die Punkte H2 (Abbildung 18A) und H4 (Abbildung 18B) sowie den Wasserstand, beispielhaft dargestellt für die Punkte DK (Abbildung 18C) und L1 (Abbildung 18D) lässt sich nachweisen, dass in Szenario 2 als Wiederholung von Szenario 1 eine gute Übereinstimmung sowohl für den volumetrischen Wassergehalt (beispielhaft RMSE H2 = 2,78 und H4 = 1,63) als auch für den Wasserstand (beispielhaft RMSE DK = 0,019 und L1 = 0,020) anzutreffen sind. Diese Ergebnisse zeigen eine gute Reproduzierbarkeit für Boden 1.



**Abbildung 18:** Versuche zur Reproduzierbarkeit, Vergleich von Szenario 1 und 2, Wassergehalt in Punkt H2 (A) und H4 (B) sowie Wasserstand in Punkt DK (C) und L1 (D)

### ***Einfluss der Messtechnik auf Rutschungserscheinungen (Szenario 9)***

Im Zuge der ersten durchgeführten Versuche konnten im Bereich des luftseitigen Böschungsbereiches des Deiches bei ausreichend hohem Wassereinstau Rutschungserscheinungen beobachtet werden (Abbildung 19A).



**Abbildung 19:** Luftseitige Rutschungserscheinungen im Szenario mit Messtechnik (A) und im Szenario ohne Messtechnik (B)

Anhand der beobachteten Ergebnisse lässt sich visuell nachweisen, dass es im Szenario ohne Messtechnik (Abbildung 19B) nahezu gleiche Rutschungserscheinungen wie im Szenario mit installierter Messtechnik (Abbildung 19A) gibt. Die vermutete Beeinflussung vor allem durch die installierten Pegelrohre kann vernachlässigt werden und die Erfassung der Wasserstände im Deich kann weiterhin mittels dieser Methode erfolgen.

## ***Beregnungsversuche***

### ***Konzipierung Beregnungsanlage***

Ein Ziel der Untersuchungen im 2D-Gerinneversuch war der Nachweis des Einflusses veränderlicher Wassergehalte im ungesättigten Teil des Deiches, verursacht durch Niederschlagsereignisse, auf die Böschungstabilität. Im Rahmen des 2D-Gerinneversuches sollte daher der Modelldeich vor sowie während des Einstaus mit Niederschlagsereignissen verschiedener Intensität und Dauer beaufschlagt werden. Dadurch sollten die Auswirkungen einer veränderten Hydraulik in der ungesättigten Zone des Deiches auf dessen Stabilität und Versagensmechanismen untersucht werden.

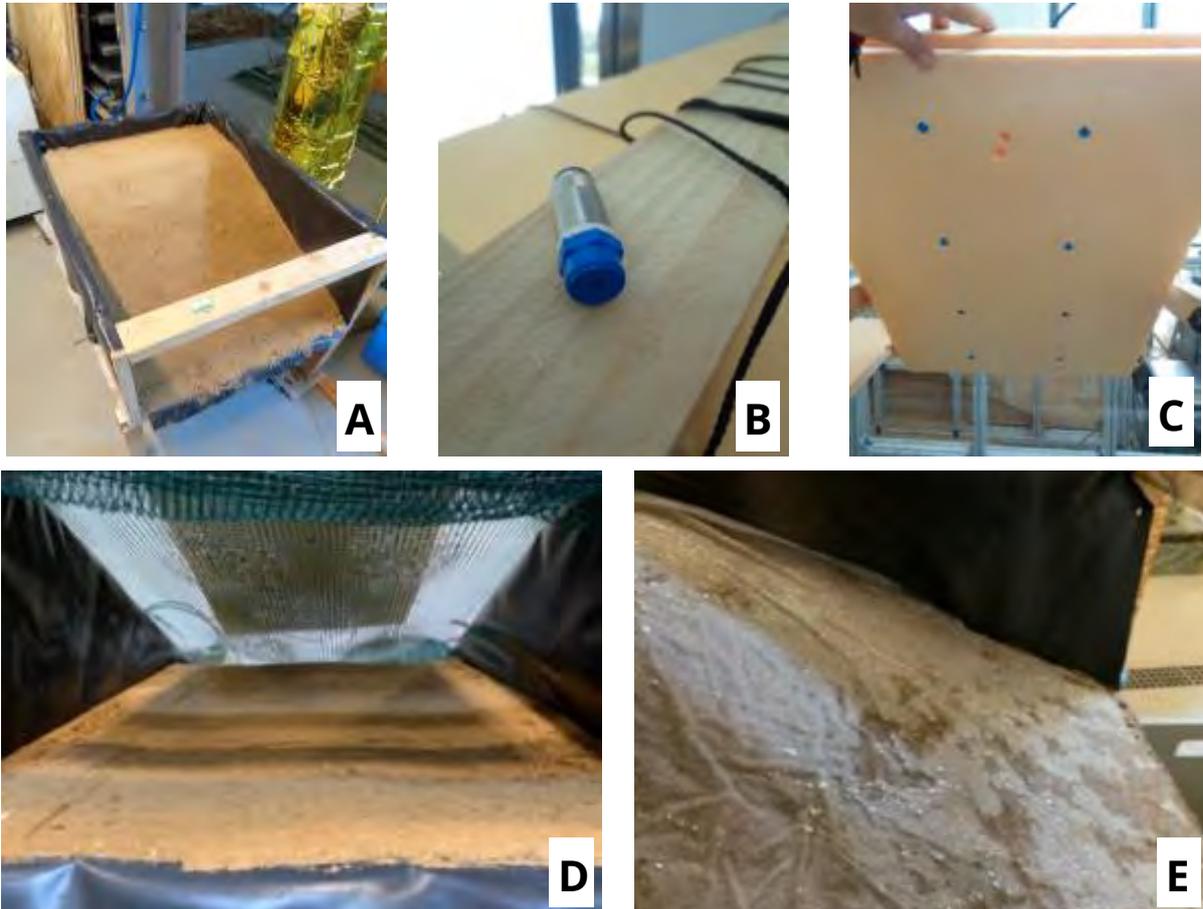
Beim Einsatz klassischer Beregnungsmethoden besteht hier allerdings aufgrund der meist unbewachsenen Bodenoberfläche der Modelldeiche die Problematik des verstärkten Oberflächenabflusses der Niederschlagswässer, einhergehend mit einer ungewollten Verfrachtung von Bodenmaterial. Ziel von durchgeführten Vorversuchen war es daher, geeignete Methoden zu identifizieren, mit denen eine Beregnung der Deichoberfläche möglich ist. Dazu erfolgte eine Testung möglicher Beregnungsanlagen/Methoden durch die Simulation von Niederschlagsereignissen verschiedener Intensität und Dauer an einem kleinskaligen Modelldeich (Abbildung 20A). Dieser besitzt eine Länge von 0,73 m, eine Breite von 0,48 m und eine Höhe von 0,26 m, das Deichkörpervolumen beträgt somit 0,055 m<sup>3</sup>. Das Bodenmaterial (Boden 1) wurde dabei auf einem durchlässigen Metallgitter eingebaut, welches von einem Geotextil bedeckt war. Somit konnte die Durchsickerung des Modelldeiches während der Beregnungsversuche gewährleistet werden. Die Böschungsneigung betrug genau wie im 2D-Gerinneversuch 1:2.

Im Rahmen der Versuche wurden drei Beregnungsmethoden getestet. Bei Variante 1 erfolgte die Beregnung mittels Sprühregen-Düsen (Uni-Line der Firma M.R.S., Abbildung 20B). Die Beaufschlagung der Düsen mit ausreichendem Arbeitsdruck wurde mittels einer Pumpe (Whisper Power Pump der Firma M.R.S.) realisiert. Der Sprühkegeldurchmesser beträgt hierbei 0,2 m bei einem Sprühwinkel von 80°. Um eine ausreichende Menge an Wasser gleichmäßig auf die Deichoberfläche zu verteilen, erfolgte schlussendlich die Platzierung von 8 Düsen oberhalb des Deichkörpers (Abbildung 20C). Die Positionierung der Haltevorrichtung für die Düsen erfolgte in einer geeigneten Höhe über dem Modelldeich, um die Verluste durch niederschlagendes Wasser außerhalb des Deichkörpers zu minimieren.

Bei Variante 2 wurde ein oberhalb der Deichoberfläche gespanntes Netz (Maschenweite 10 mm) mittels der Sprühdüsen beregnet (Abbildung 20D). Die sich am Netz sammelnden

Tropfen treffen, nach dem Anwachsen auf eine ausreichende Größe, auf die Bodenoberfläche.

Bei Variante 3 erfolgte die Durchfeuchtung des Bodens über ein auf die Oberfläche aufgelegtes Vlies, welches durch die Sprühdüsen beregnet wurde (Abbildung 20E).



**Abbildung 20:** Konzipierung Beregnungsanlage, Modelldeich (A), Sprühregen-Düsen (B), Platzierung von Düsen mittels Haltevorrichtung (C), Beregnungsvariante Netz (D), Beregnungsvariante Vlies (E)

Für die Beregnung kamen zwei verschiedene Ereignisse mit unterschiedlicher Intensität und Dauer zum Einsatz, ein Ereignis mit fünfjährigem Wiederkehrintervall und einer Dauer von 60 min sowie ein Ereignis mit hundertjährigem Wiederkehrintervall und einer Dauer von 60 min. Bezogen auf die Grundfläche des Deichkörpers und unter Anwendung der KOSTRA-DWD Datenbank (2010) ergaben sich somit Regenintensitäten von 183 bzw. 335 ml/min.

Eine Eignungsbewertung der verschiedenen Methoden erfolgte dabei nach den in der Tabelle 6 aufgeführten Kriterien. Dafür wurden visuelle Beobachtungen sowie die Aufstellung einer Wasserbilanz (Eingetragene Wassermenge, Oberflächenabfluss, den Deichkörper durchsickerte Wassermenge) zu Rate gezogen.

Anhand der Ergebnisse konnten Variante 1 und 3 als am geeignetsten identifiziert werden. Trotz der laut Bewertungskriterien ähnlich guten Eignung von Variante 1 und 3 ist Variante 3 für die hier durchzuführenden Versuche nicht zu empfehlen. Grund dafür ist die Abdeckung

der Bodenoberfläche mit dem Vlies. Dies ist im Hinblick auf die Versuche zur Stabilität von Nachteil, da es hierdurch zu einer Unterbindung von einer natürlich stattfindenden Verfrachtung von Bodenmaterial/Rutschung kommen kann. Variante 2 wurde aufgrund der starken Verfrachtung von Bodenmaterial durch die auf der Bodenoberfläche auftreffenden großen Tropfen nicht weiter berücksichtigt.

**Tabelle 6:** Eignungsbewertung der getesteten Berechnungsvarianten

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
<b>Aufbau</b>	+++	+	++
<b>Benetzung Bodenoberfläche</b>	++	-	+++
<b>Verfrachtung Bodenmaterial</b>	++	-	+++
<b>Oberflächenabfluss</b>	++	++	++
<b>Reproduzierbarkeit</b>	++	+	++

+++ sehr gut + gut - schlecht --- sehr schlecht

Nach der Identifizierung einer geeigneten Berechnungsmethode erfolgte in weiteren Szenarien die Beschickung des Deiches mit Niederschlagsereignissen mit hundertjährigem Wiederkehrintervall, um erhöhte volumetrische Wassergehalte im ungesättigten Bereich des Deiches zu realisieren und den Einfluss auf die Stabilität und das Versagensauftreten/-erscheinungen bei nachfolgenden Hochwasserereignissen zu untersuchen (Abbildung 21). Bezogen auf die Grundfläche des Deichkörpers von 2,7 m<sup>2</sup> und unter Anwendung der KOSTRA-DWD Datenbank (2010) ergaben sich somit Regenintensitäten von 0,96 (l/m<sup>2</sup>)/min. Beim Regenereignis, welches dem Hochwasser 2002 in Sachsen voranging, betrug die Intensität bis zu 0,5 (l/m<sup>2</sup>)/min.

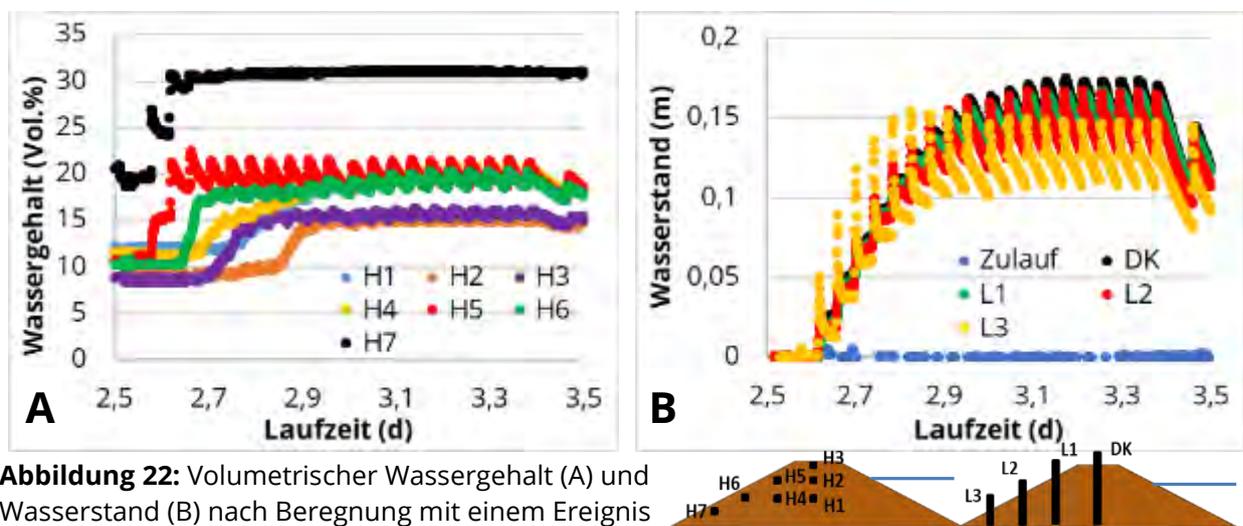


**Abbildung 21:** Deichkörper mit Berechnungssystem

Zunächst erfolgte die Testung der Aufsättigung des Deichkörpers in Abhängigkeit von der Länge des Niederschlagsereignisses. Bei einer anfänglichen Regendauer von 60 min gefolgt von einer 30-minütigen Pause (Szenario 4) kam es allein schon durch das Regenereignis zu

einer Vollsättigung im unteren Bereich des Deiches und in dessen Folge sehr rasch zu Rutschungserscheinungen im Bereich beider Böschungen. Verursacht wird dies durch die Tatsache, dass mehr Wasser durch den Niederschlag infiltrierte als abfließen konnte.

Um diesen unerwünschten Effekt zu vermeiden, wurde in den anschließenden Beregnungsversuchen (Szenario 7) die Regendauer auf 10 min gefolgt von einer Pause von 50 min reduziert, so dass ein größerer Zeitraum für das Abfließen des infiltrierten Wassers zur Verfügung stand. Um in Summe ähnliche Mengen wie beim 60-minütigen Ereignis zu infiltrieren, erfolgte die Realisierung einer größeren Anzahl an Ereignissen. Das Beregnen in Intervallen lässt sich sehr gut an dem periodischen Auf und Ab der oberflächennahen Messung des volumetrischen Wassergehaltes erkennen (Abbildung 22A - Messpunkte H5, H6).



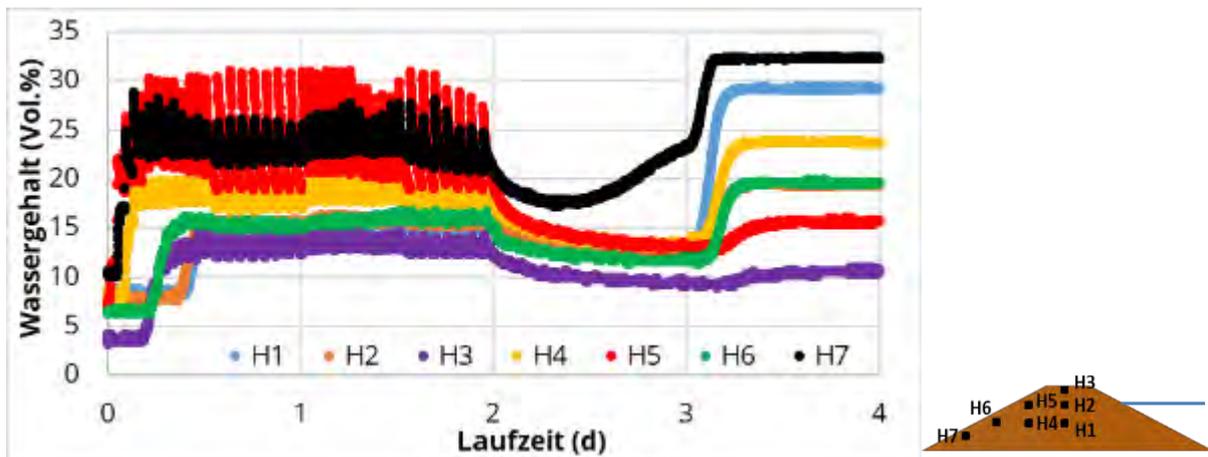
**Abbildung 22:** Volumetrischer Wassergehalt (A) und Wasserstand (B) nach Beregnung mit einem Ereignis mit hundertjährigem Wiederkehrintervall bei einer Dauer von 10 min gefolgt von 50 Minuten Pause

Die Messungen des Wasserstandes im Deichkörper können diesen Effekt auch abbilden (Abbildung 22B). Zudem lässt sich anhand der Wasserstände gut beobachten, dass der Wasseranstieg im Deichkörper zwar noch vorhanden war, aber lediglich max. 15 cm erreichte. Lediglich im Messpunkt H7, der am nächsten zum luftseitigen Böschungsfuß gelegen ist, wurde ein volumetrischer Wassergehalt im Bereich der Sättigung registriert. Rutschungserscheinungen konnten bei dieser Intensität und Länge der Beregnung nicht mehr beobachtet werden.

### **Einstau nach Beregnung**

In nachfolgenden Versuchen (Szenario 8 + 10) sollte der Einfluss erhöhter volumetrischer Wassergehalte im ungesättigten Bereich des Deiches auf die Stabilität und das Versagensauftreten/-erscheinungen bei einem Einstau im Anschluss an ein Regenereignis untersucht werden. Dazu erfolgte die Realisierung einer größeren Anzahl von Niederschlagsereignissen mit hundertjährigem Wiederkehrintervall und einer Dauer von 5 min gefolgt von einer 55-minütigen Pause. Problematisch war hierbei allerdings der schnell sinkende volumetrische Wassergehalt im beregneten Deichkörper (Abbildung 23).

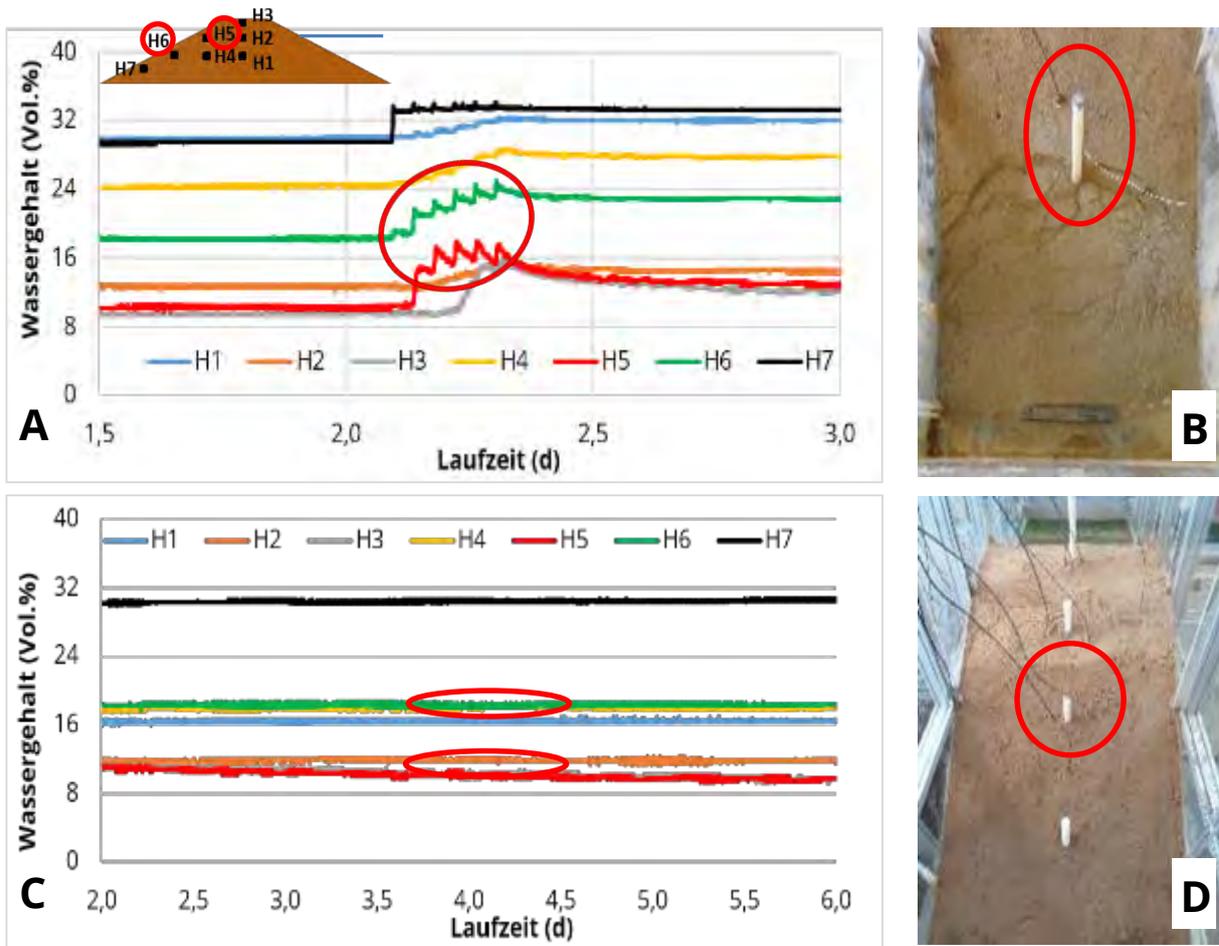
Aufgrund der Charakteristik von Boden 1 einhergehend mit einer geringen Wasserhaltekapazität, sanken die Wassergehalte im Deichkörper noch vor Erreichen der durch den Einstau verursachten Wasserfront auf Werte im Bereich des Ausgangsniveaus zurück. Somit war eine Untersuchung des Einflusses erhöhter volumetrischer Wassergehalte auf die Stabilität und das Versagensauftreten/-erscheinungen bei einem Einstau im Anschluss an ein Regenereignis mit diesem Boden nicht zielführend.



**Abbildung 23:** Volumetrischer Wassergehalt nach Beregnung mit einem Ereignis mit hundertjährigem Wiederkehrintervall und einer Dauer von 5 min gefolgt von einer 55-minütigen Pause mit nachfolgendem Einstau mit 40 cm

### ***Beregnung während Einstau***

Neben dem Einfluss erhöhter volumetrischer Wassergehalte im ungesättigten Bereich des Deiches auf die Stabilität und das Versagensauftreten/-erscheinungen bei einem nachfolgenden Einstau war es das Ziel, den Einfluss eines Niederschlagsereignisses bei einem bereits vorhandenem Einstau zu untersuchen (Szenario 12). Dazu wurde zunächst ein zweitägiger Einstau des Deichkörpers mit einer Wasserhöhe von 30 cm vorgenommen. Sowohl die volumetrischen Wassergehalte (Abbildung 24A) als auch die Wasserstände im Deichkörper pegelten sich bereits nach 12 h auf gleichbleibendem Niveau ein. Im Anschluss erfolgte die sechsmalige Beaufschlagung der Deichoberfläche mit einem Niederschlagsereignis mit hundertjährigem Wiederkehrintervall und einer Dauer von 5 min gefolgt von einer 55-minütigen Pause. Nach 24 h wurde der Deichkörper dreimal mit demselben Niederschlagsereignis beaufschlagt.



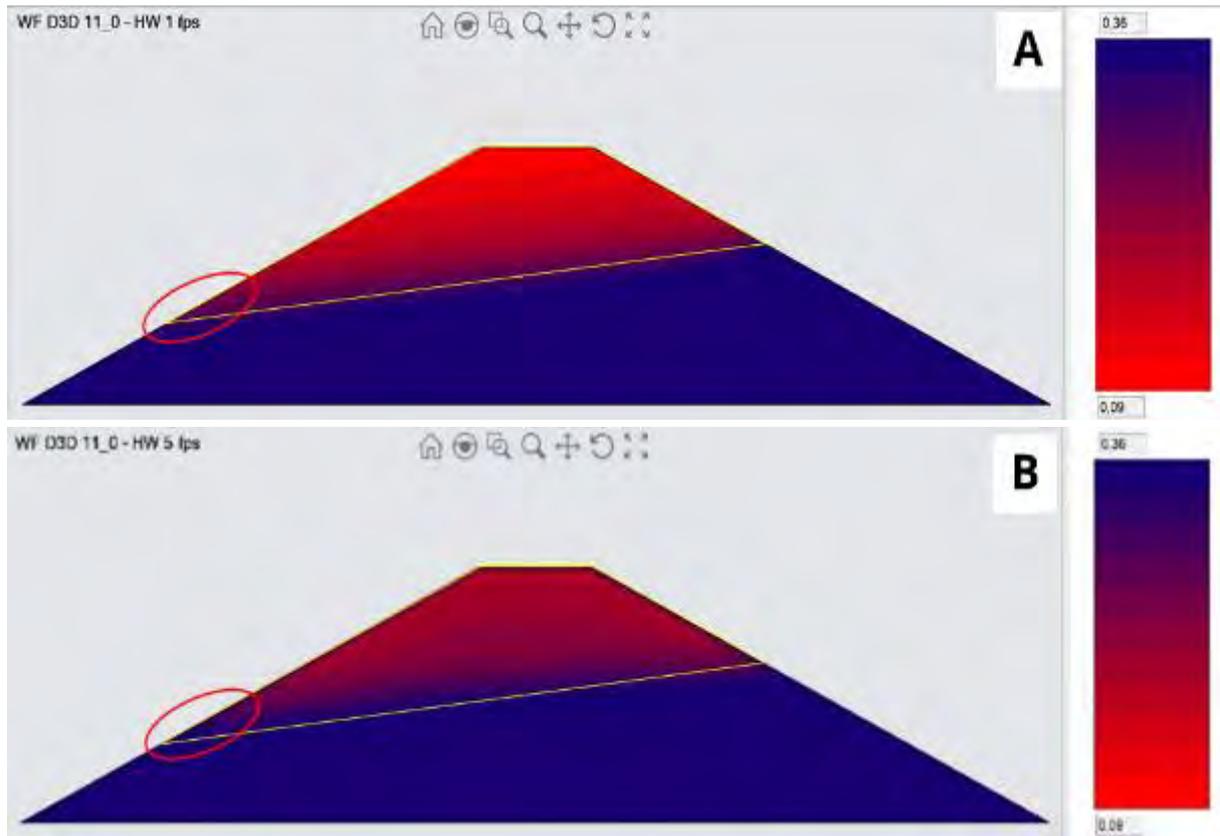
**Abbildung 24:** Effekt der Beregnung auf den Wassergehalt in der ungesättigten Zone des Deiches und die daraus resultierenden Rutschungserscheinungen – Einstau 30 cm + Beregnung: Wassergehalt (A), Böschungsverhalten (B) - nur Einstau 30 cm: Wassergehalt (C), Böschungsverhalten (D)

Anhand der beobachteten volumetrischen Wassergehalte lässt sich ein signifikanter Anstieg durch die Regenereignisse nachweisen (Abbildung 24A). Vor allem in den oberflächennahen Messpunkten (Abbildung 24A – H5, H6), die den ungesättigten Bereich des Deiches repräsentieren, war dies der Fall. Begünstigt durch die schon ausgebildete Sickerlinie im Deichkörper und den dadurch reduzierten vertikalen Abfluss des Niederschlagswassers, kam es zu einem sprunghaften Anstieg der Wassersättigung in diesen Bereichen (von 10 auf 16 % vol. Wassergehalt für H5 und von 17 auf 25 % vol. Wassergehalt für H6) und in dessen Folge zu Rutschungserscheinungen im Bereich von H6 (Abbildung 24B).

Im Vergleich dazu konnten im Einstauversuch ohne Beregnung (Szenario 1 + 2) bei einem konstanten vol. Wassergehalt von 10 bzw. 17 % im Bereich von H5 und H6 (Abbildung 24C) keine Rutschungserscheinungen im luftseitigen Böschungsbereich des Deiches beobachtet werden (Abbildung 24D).

Die veränderte Wassersättigung im oberflächennahen Bereich des Deiches an den Beobachtungspunkten H5 und H6 zwischen beiden Szenarien lässt sich sehr gut durch die durchgeführte numerische Simulation nachbilden (Abbildung 25). Die dargestellten erhöhten Auf-

sättigungen durch das Niederschlagsereignis im Betrachtungsgebiet (gelber Rahmen) können die Ergebnisse der Laborversuche bestätigen.



**Abbildung 25:** Verteilung des Wassergehaltes im Deichkörper bei nur Einstau (A) und bei Einstau mit zusätzlicher Beregnung (B)

Für die Simulation der Szenarien mit Niederschlagsereignissen wurde das ursprüngliche konzeptionelle Modell angepasst. Sowohl über die luft- als auch wasserseitige Böschung sowie über die Deichkrone erfolgt eine Infiltration des Niederschlags. Analog zu Szenario 1 ist dabei die Deichsohle bzw. Bodenplatte wasserundurchlässig.

Zusätzlich musste eine Möglichkeit bzw. eine Randbedingungsart in das numerische Modell implementiert werden, bei der Wasser aus dem Deichkörper herausströmen kann. Durch die Versickerung des infiltrierten Niederschlags kann es im Bereich der undurchlässigen Sohle zu einem Aufstau und damit gesättigten Verhältnissen kommen. Erreicht dieser Bereich die wasserdurchlässige Böschung, findet ein Wasseraustritt statt. Im Bereich der Böschungen musste daher eine Randbedingung (RB) implementiert werden, welche eine Infiltration (im Fall des noch teilgesättigten Materials) und ebenso ein Ausströmen (im Fall einer Vollsättigung des Materials) zulässt. Für diesen Fall besteht nun die Option, eine „atmosphärische RB“ (Code: -11) automatisch auf eine RB „Sickerfläche“ (Code: -2), unter der Bedingung einer auftretenden Vollsättigung (positives Matrixpotenzial), umzuschalten.

### ***Versuche mit verfestigten und stabilisierten Mineralstoffgemischen***

Für eine Stabilisierung und Verfestigung gefährdeter Deichbauwerke soll eine ökologisch verträgliche sowie wirtschaftlich realisierbare Methode entwickelt werden. Zu diesem Zweck erfolgte die Testung des Einsatzes verfestigter und stabilisierter Mineralstoffgemische incl. deren Anbindung an ein bestehendes Deichbauwerk (Szenario 15 + 17). In die, in den bisherigen Szenarien zum Einsatz gekommene, Deichkubator wurde ein Kern aus verfestigtem und stabilisierendem Mineralstoffgemisch integriert (Abbildung 26). Es handelt sich dabei um eine Flüssigbodenmischung, ein Mix aus Boden 1 und Ton- und Zementbestandteilen. Dieser Kern hatte die Abmessungen 15 cm lang, 100 cm breit und 55 cm hoch und wurde im Bereich der Deichkrone platziert. Die hydraulische Durchlässigkeit lag hier im Bereich von  $4 \cdot 10^{-9}$  m/s.

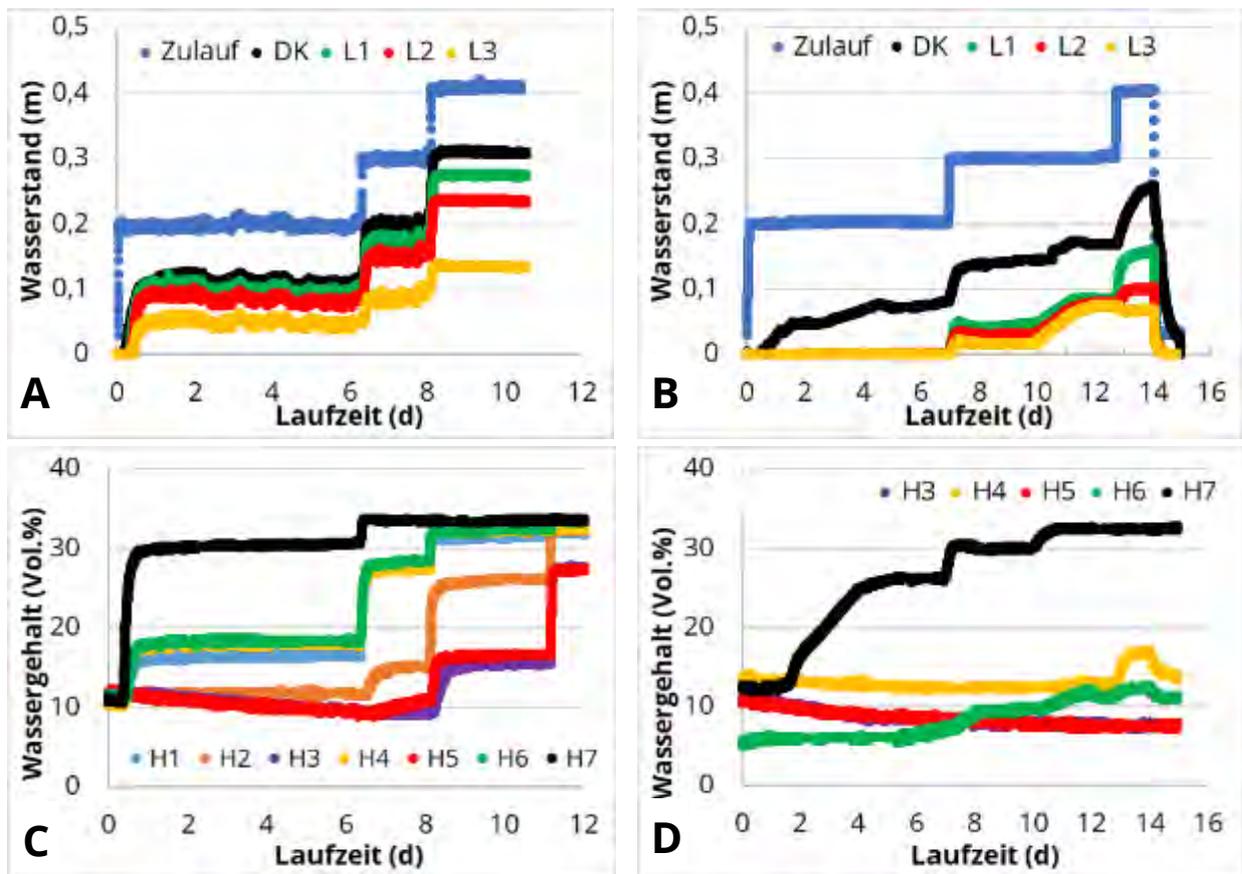


**Abbildung 26:** In den Deichkörper integrierter Kern aus verfestigtem und stabilisierendem Mineralstoffgemisch incl. Wassergehaltssensor und Pegelrohr

Um die Beeinflussung der hydraulischen Verhältnisse im Deichkörper durch den Einbau des gering durchlässigen Körpers aus verfestigtem und stabilisierendem Mineralstoffgemisch zu untersuchen, erfolgte hier der Einstau mit denselben Bedingungen wie in Szenario 1 und 2. Einstauhöhen von 20, 30 und 40 cm wurden im Anschluss an das Erreichen stationärer Zustände realisiert.

Anhand der Ergebnisse lässt sich sehr gut der Effekt des gering durchlässigen Körpers im Inneren des Deiches auf die Durchströmung nachweisen. Die Sickerlinie erreicht zwar den Bereich der Deichkrone (Abbildung 27B- DK), in den Messpunkten in luftseitige Richtung (Abbildung 27 B - L1, L2, L3) ist bei einer Einstauhöhe von 20 cm gar kein, bei den Einstauhöhen von 30 und 40 cm nur ein sehr geringer Wasseranstieg nachzuweisen.

Die sich normalerweise ausbildende Sickerlinie im Deichkörper wird durch den schlecht durchlässigen Kern aus verfestigtem und stabilisierten Mineralstoffgemisch gebrochen, lediglich im unteren Bereich des Deiches konnte ein stetig steigender Wasserstand nachgewiesen werden. Im Vergleich zu Szenario 1 (Abbildung 27A) liegen die Wasserstände in allen Messpunkten weit unter den dort gemessenen Werten.



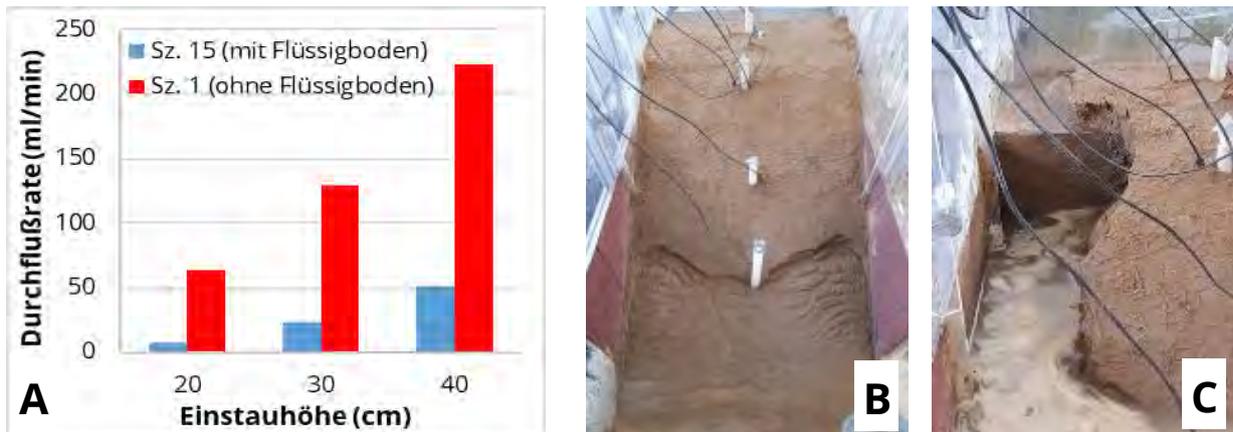
**Abbildung 27:** Wasserstand im Deichkörper während eines Szenarios mit einem stufenweisen Einstau ohne Flüssigbodenkerne (A) sowie mit Flüssigbodenkern (B), volumetrischer Wassergehalt im Deichkörper während eines Szenarios mit stufenweisem Einstau ohne Flüssigbodenkerne (C) und mit Flüssigbodenkern (D)

Die registrierten volumetrischen Wassergehalte können diese Beobachtungen bestätigen. Im oberen Bereich des Deichkörpers (Abbildung 27D – H3, H4, H5, H6) kann nahezu kein Anstieg während aller drei realisierten Einstauhöhen beobachtet werden.

Lediglich am luftseitigen Böschungsfuß konnte ein rasch ansteigender volumetrischer Wassergehalt registriert werden (Abbildung 27D – H7). Dieser Anstieg resultiert aus dem Wasser, welches den Flüssigbodenkern passiert und im unteren Teil des Deichkörpers entlang strömt.

Im Vergleich zu Szenario 1 (Abbildung 27C) liegen die volumetrischen Wassergehalte in allen Messpunkten, außer in Messpunkt H7, weit unter den dort gemessenen Werten.

Auch die gemessenen Durchflüsse waren hier stark reduziert im Vergleich zu Szenario 1 ohne Flüssigbodenkern (Abbildung 28A).

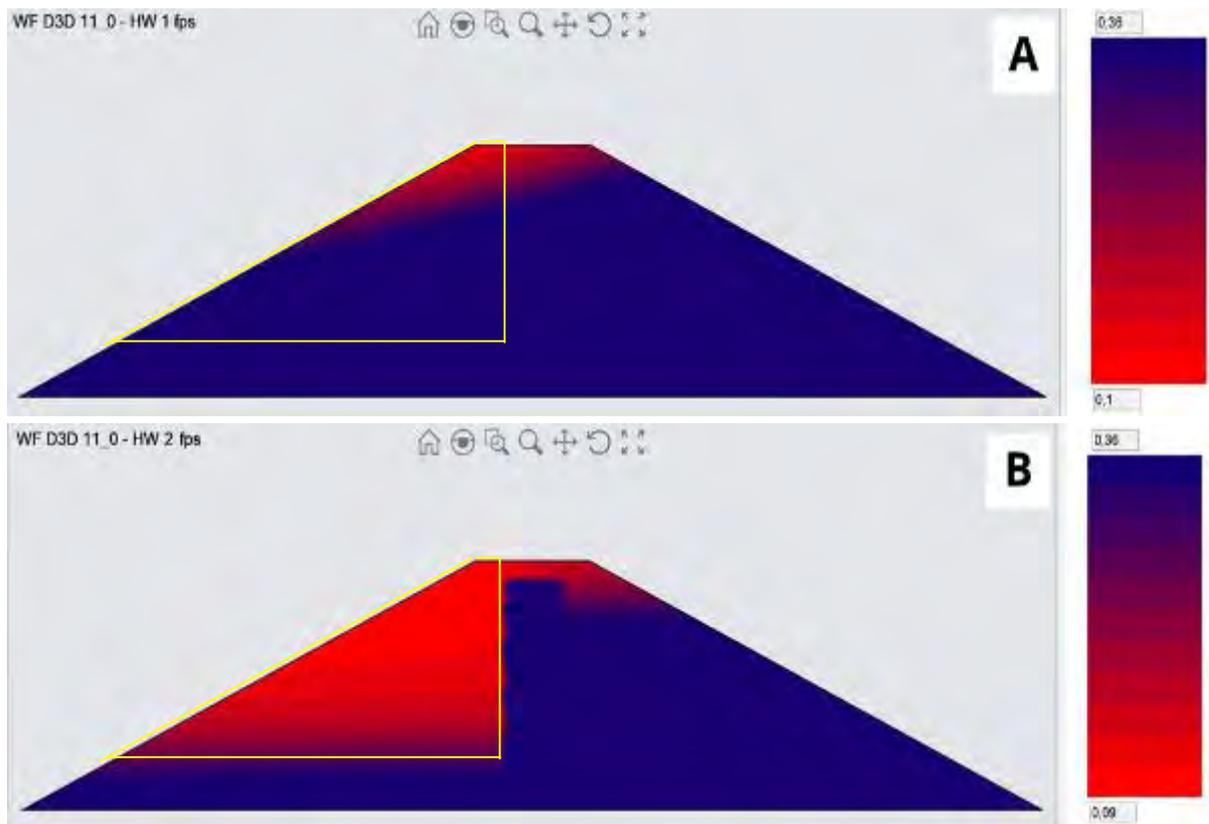


**Abbildung 28:** Gemessene Durchflüsse am Böschungsfuß auf der Luftseite in einem Szenario mit und ohne Flüssigbodenkern (A), Rutschungserscheinungen beim Einstau auf 48 cm mit Flüssigbodenkern (B), Versagenserscheinungen beim Überströmen mit Flüssigbodenkern (C)

Trotz der reduzierten Durchflußrate und der geringeren Aufsättigung kam es bei einem Einstau von 48 cm zu Rutschungserscheinungen auf der luftseitigen Böschungsseite (Abbildung 28B), ähnlich denen in den Szenarien 1 + 2 ohne Flüssigboden. Ein anschließendes Überströmen (Abbildung 28C) hat allerdings gezeigt, dass ein komplettes Wegspülen des Deiches durch den schlecht durchlässigen Kern aus verfestigtem und stabilisiertem Mineralstoffgemisch verhindert bzw. limitiert werden kann.

Die Ergebnisse der dazu durchgeführten numerischen Simulationen verdeutlichen sehr gut die veränderte Wassersättigung auf der luftseitigen Böschung (Abbildung 29). Die deutlich niedrigeren Wassergehalte im Betrachtungsgebiet (gelber Rahmen) bei einem Einstau von 40 cm zeigen dabei sehr deutlich den positiven Effekt des eingebauten Flüssigbodenkerns. Im Falle eines auftretenden Niederschlagsereignisses steht hier mehr luftgefülltes Porenvolumen zur Speicherung des versickernden Wassers zur Verfügung, so dass kritische Wassergehalte für die Hangstabilität vermieden werden können.

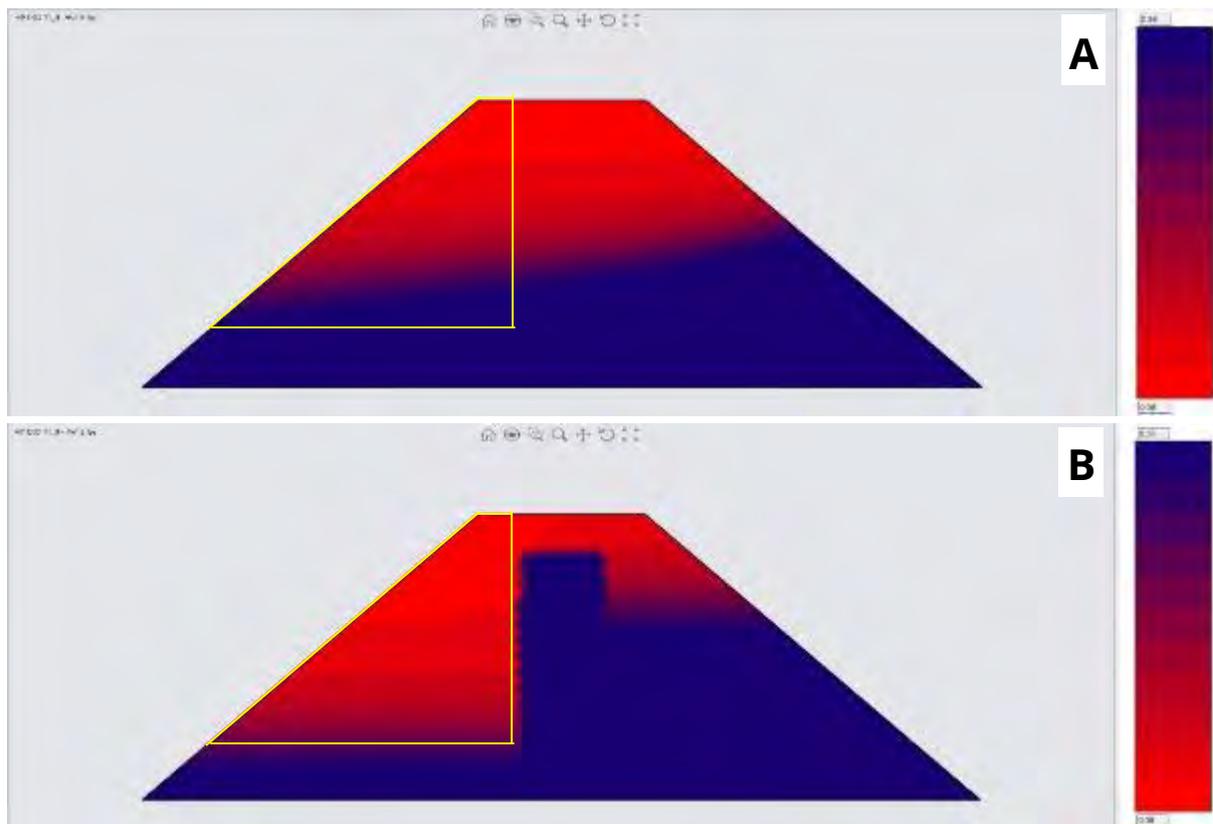
In zwei weiteren Szenarien (21 + 22) erfolgte die Untersuchung der Beeinflussung der Hangstabilität eines Deiches mit stärkerer Böschungsneigung durch einen eingebauten Flüssigbodenkern. Im Vergleich zu Szenario 15 und 17 erfolgte hier der Einstau des Deiches mit einer Böschungsneigung von 1:1 anstatt 1:2. Bei gleichbleibender Höhe der Deichkrone verkürzten sich die Böschungen somit von 1,2 auf 0,6 m.



**Abbildung 29:** Verteilung des Wassergehaltes im Deichkörper ohne (A) und mit (B) Flüssigboden bei einem Einstau von 40 cm

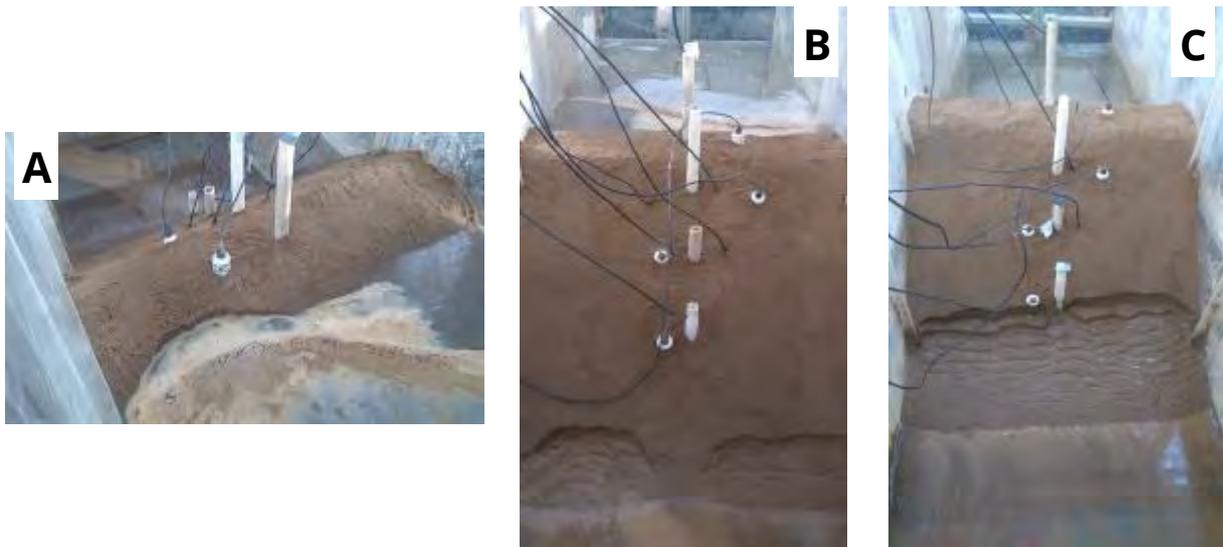
Die Ergebnisse zur Verteilung des Wassergehaltes bestätigen zunächst die gewonnenen Erkenntnisse aus dem vorherigen Versuch. Signifikant niedrigere Wassergehalte im luftseitigen Bereich des Deiches zeigen dabei sehr deutlich den positiven Effekt des im Bereich der Deichkrone eingebauten verfestigten und stabilisierten Mineralstoffgemisches.

Die Ergebnisse der dazu durchgeführten numerischen Simulationen verdeutlichen ebenso sehr gut die veränderte Wassersättigung auf der luftseitigen Böschung (Abbildung 30). Die deutlich niedrigeren Wassergehalte im Betrachtungsgebiet (gelber Rahmen) bei einem Einstau von 30 cm zeigen dabei sehr deutlich den positiven Effekt des eingebauten Flüssigbodenkerns.



**Abbildung 30:** Verteilung des Wassergehaltes im Deichkörper ohne (A) und mit (B) Flüssigboden bei einem Einstau von 30 cm

Im Gegensatz zu den Szenarien 15 und 17 zeigte sich hier zudem ein größerer Unterschied in der Hangstabilität. Aufgrund der stärkeren Böschungsneigung bei einer gleichzeitig hohen Wassersättigung kam es hier im Szenario ohne Flüssigbodenkern (Szenario 22) bereits bei einem Einstau von 30 cm zu massiven Rutschungen auf der luftseitigen Böschung (Abbildung 31C). Im Szenario 21 mit eingebautem Flüssigbodenkern ließen sich bei einem Einstau von 30 cm keinerlei Rutschungen beobachten. Selbst bei einem maximalen Einstau von 60 cm (Abbildung 31A) konnten nur geringfügige Rutschungen am luftseitigen Böschungsfuß beobachtet werden (Abbildung 31B).



**Abbildung 31:** Maximaler Einstau Deich mit Flüssigbodenkern (A) sowie Rutschungserscheinungen bei maximalem Einstau Deich mit Flüssigbodenkern (B) und ohne Flüssigbodenkern mit Einstau von 30 cm (C)

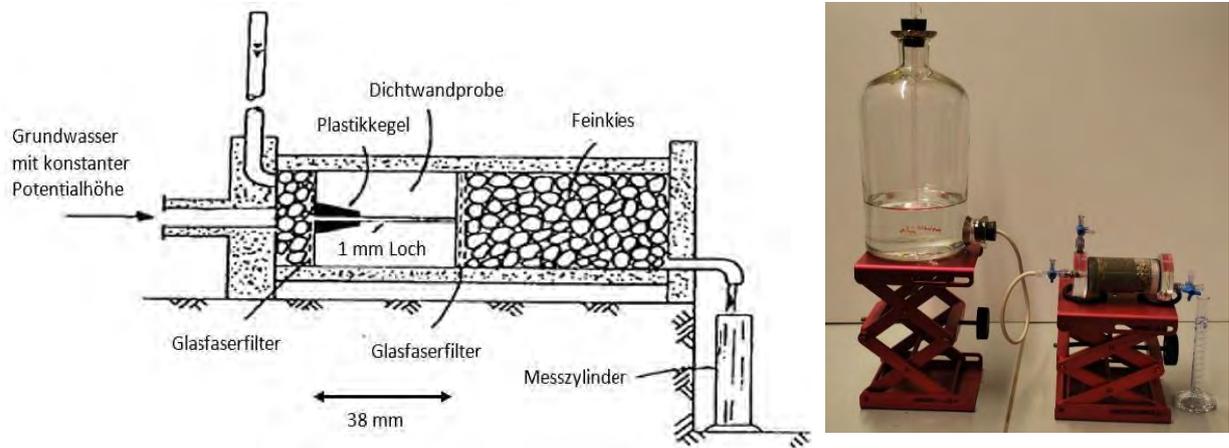
Die Ergebnisse verdeutlichen somit, dass einer Vermeidung kritischer Wassergehalte für die Hangstabilität bei einer stärkeren Böschungsneigung eine höhere Bedeutung beikommt. Die Untersuchungen haben darüber hinaus gezeigt, dass der Einsatz von verfestigten und stabilisierten Mineralstoffgemischen eine geeignete Möglichkeit sein kann, um diese kritischen Wassergehalte zu vermeiden. Durch den Bau von Deichen mit stärkerer Böschungsneigung unter Verwendung von Flüssigbodenkern kann somit eine hohe Hangstabilität bei gleichzeitiger Reduzierung des Flächen- und Materialbedarfes für den Deichbau erzielt werden.

### ***Geotechnische und geochemische Charakterisierung von potentiell einsetzbaren Mineralstoffgemischen***

Im Vorfeld des Einsatzes von verfestigten Mineralstoffgemischen kann es von Interesse sein, diese hinsichtlich des Dispersionsverhaltens (Suffusion, Erosion) unter gesättigten Verhältnissen zu charakterisieren. Dafür steht standardmäßig eine Vielzahl von potentiellen Testverfahren zur Verfügung.

Dazu zählt zum einen der Pinhole-Test, der üblicherweise zur Untersuchung der Erosionsstabilität von Dichtmaterialien, die im Damm- und Deichbau Anwendung finden, zum Einsatz kommt (ASTM D4647 / D4647 M-13 (2013b)). Zum anderen soll hier die Veränderung der hydraulischen Durchlässigkeit bei verschiedener Dynamik der Strömungsvorgänge untersucht werden. Zum anderen soll das Dispersionsverhalten der eingebrachten Mineralstoffgemische unter verschiedenen chemischen Randbedingungen charakterisiert werden. Hierbei wird die Probe in eine Versuchssäule (Abbildung 32) zwischen zwei Kies-Schichten eingebaut. In die Sedimentprobe ( $L = 38 \text{ mm}$ ,  $D = 35 \text{ mm}$ ) wird mit einer 1 mm starken Nadel o. ä. eine künstliche Stromröhre hergestellt. Während der folgenden Durchströmung für insgesamt 20 min mit destilliertem oder anderweitigem Wasser bei Standrohrspiegelhöhen von

$h = 5 \text{ cm}$ ,  $18 \text{ cm}$  und  $38 \text{ cm}$  wird die Entwicklung des Durchflusses und der Trübung überwacht.



**Abbildung 32:** Versuchsaufbau Pinhole-Test schematisch (A, nach Maharaj et al, 2015) und im Labor (B)

Darüber hinaus kommt häufig der Crumb-Test nach ASTM D6572 – 13 (2013a) zur Untersuchung der Dispersionsneigung zum Einsatz. Es erfolgt hier eine rein visuelle Bewertung der Dispersion. Hierzu wird ein würfelförmiges Stück (Kantenlänge ca. 1 cm) der Probe in 250 ml destilliertes Wasser gegeben und nach 2 min, 1 h und 6 h die Entwicklung der Trübung überprüft und fotografisch festgehalten. Abbildung 33 zeigt Beispiele für verschiedene Dispersionsgrade, wobei Grad 3 (dispersiv) nicht dargestellt ist.



**Abbildung 33:** Beispiele für verschiedene Dispersionsgrade nach ASTM D6572 – 13 (2013a) – Grad 1, nicht dispersiv (A), Grad 2, mittel dispersiv (B), Grad 4, stark dispersiv (C)

Im Rahmen der durchgeführten Versuche hat sich aber gezeigt, dass die Suffosion und innere Erosion bzw. das Dispersionsverhalten im gesättigten Bereich, insbesondere in dem Bereich der Flüssigbodenkerndichtung, nicht im Mittelpunkt der Untersuchungen bei der Beurteilung des Einflusses veränderlicher Wassergehalte im ungesättigten Teil der Deiche und Dämme auf die Hangstabilität sowie Erosionserscheinungen steht. Daher wurde auf die

Durchführung dieser Testverfahren verzichtet und das Augenmerk vielmehr auf die Untersuchung der Beeinflussung der hydraulischen Verhältnisse im Deichkörper durch den Einbau des gering durchlässigen Körpers aus verfestigtem und stabilisierenden Mineralstoffgemisch (Flüssigboden) und deren Anbindung an ein bestehendes Deichbauwerk gelegt.

### 3.2.3 Versuchsergebnisse Boden 2

Aufgrund der geringen Wasserhaltekapazität von Boden 1 war eine Realisierung stark erhöhter Wassergehalte im Deichkörper vor Erreichen der durch einen Einstau auftretenden Wasserfront nicht ohne weiteres möglich. Dadurch war eine vollumfängliche Untersuchung des Einflusses von Niederschlagsereignissen auf die Hangstabilität anhand von Boden 1 nicht realisierbar.

Aus diesem Grund bestand die Notwendigkeit einen alternativen Boden für die Beregnungsversuche einzusetzen. Hierfür kam eine Bodenmischung (Boden 2), bestehend aus einem Teil trockenem, fein gemahlenem Ton und 2,8 Teilen Boden 1 zum Einsatz. In Anlehnung an die Versuche mit Boden 1 erfolgte in Vorbereitung der weiteren Versuche mit Boden 2 und zum Nachweis der Reproduzierbarkeit zunächst die Durchführung von zwei Referenzszenarien mit einem stufenweisen Einstau von 20, 30 und 40 cm (Szenario 13 und 14, Tabelle 7). Dies diente der Gewinnung von Daten für eine anschließende Kalibrierung des mittels PCSi-WaPro aufgebauten numerischen Strömungsmodells.

**Tabelle 7:** Übersicht der im Rahmen des Berichtszeitraumes mit Boden 2 durchgeführten Szenarien

Sz.	Randbedingungen	Ziel
	<b>Boden 2</b>	
13	Stufenweiser Einstau	Realisierung stationäre Zustände (20, 30, 40, 48, 55 cm) bis zum Versagen
14	Stufenweiser Einstau	Wiederholung Szenario 13
18	Einstau 48 cm mit 5 min Beregnung (100-jährig) danach 55 min Pause	Einfluss Beregnung auf Versagen bei Vorrätsättigung durch Einstau
20	Einstau 48 cm mit 5 min Beregnung (100-jährig) danach 55 min Pause	Wiederholung Szenario 18

Aufgrund der nahezu trockenen Mischung des Bodens waren beim ersten Einstau (Szenario 13) die endgültigen Eigenschaften der Bodenmischung noch nicht final ausgeprägt. Durch den ersten Einstau und die damit verbundene Befeuchtung kam es hier nachweislich zu Quellungsprozessen der enthaltenen Tonpartikel. Die für die Charakterisierung des Materials herangezogenen Parameter veränderten sich noch, was schlussendlich auch die Kalibrierung beeinträchtigt hätte. Für die Kalibrierung wurden daher die Daten von Szenario 14 verwendet.

Als Ausgangswerte für die Charakterisierung von Boden 2 bzw. Grundlage für die inverse Anpassung der hydraulischen Parameter des homogenen Materials dienten laborativ bestimmte Materialparameter (Tabelle 2, Seite 23) für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, Residual- und Sättigungswassergehalt sowie die Formparameter der MUALEM-VAN-GENUCHTEN Retentionsfunktion.

Das aufgebaute numerische Modell hat die gleiche Geometrie und zeitabhängigen Randbedingungen wie in den Referenzszenarien für Boden 1. Es wurde ein einseitiger Einstau von 20, 30, 40, 48 und 55 cm realisiert. Vorhandene Beobachtungspunkte (4 x Druckhöhe, 7 x Wassergehalt) wurden ebenfalls in das Modell integriert, so dass die experimentell ermittelten Messdaten mit den simulierten Daten verglichen werden können. Diese dienen zusammen mit den registrierten Zu- und Abflüssen als Grundlage für die Modellkalibrierung und -validierung.

### **Kalibrierung anhand der Daten von Szenario 14**

Die ersten Ergebnisse haben gezeigt, dass die Wasserausbreitung im numerischen Modell auch hier, gegenüber dem experimentellen Versuch, deutlich überschätzt wurde, bzw. ein zeitlicher Versatz bei der Ausbildung der Sickerlinie auftritt. Die Übereinstimmung mit den Wassergehaltsmessungen ist auch nach Modifikation der Diskretisierung zur Darstellung des verwendeten feineren Bodenmaterials und der Festlegung der Randbedingungen mit den Ausgangsparametern nicht ausreichend.

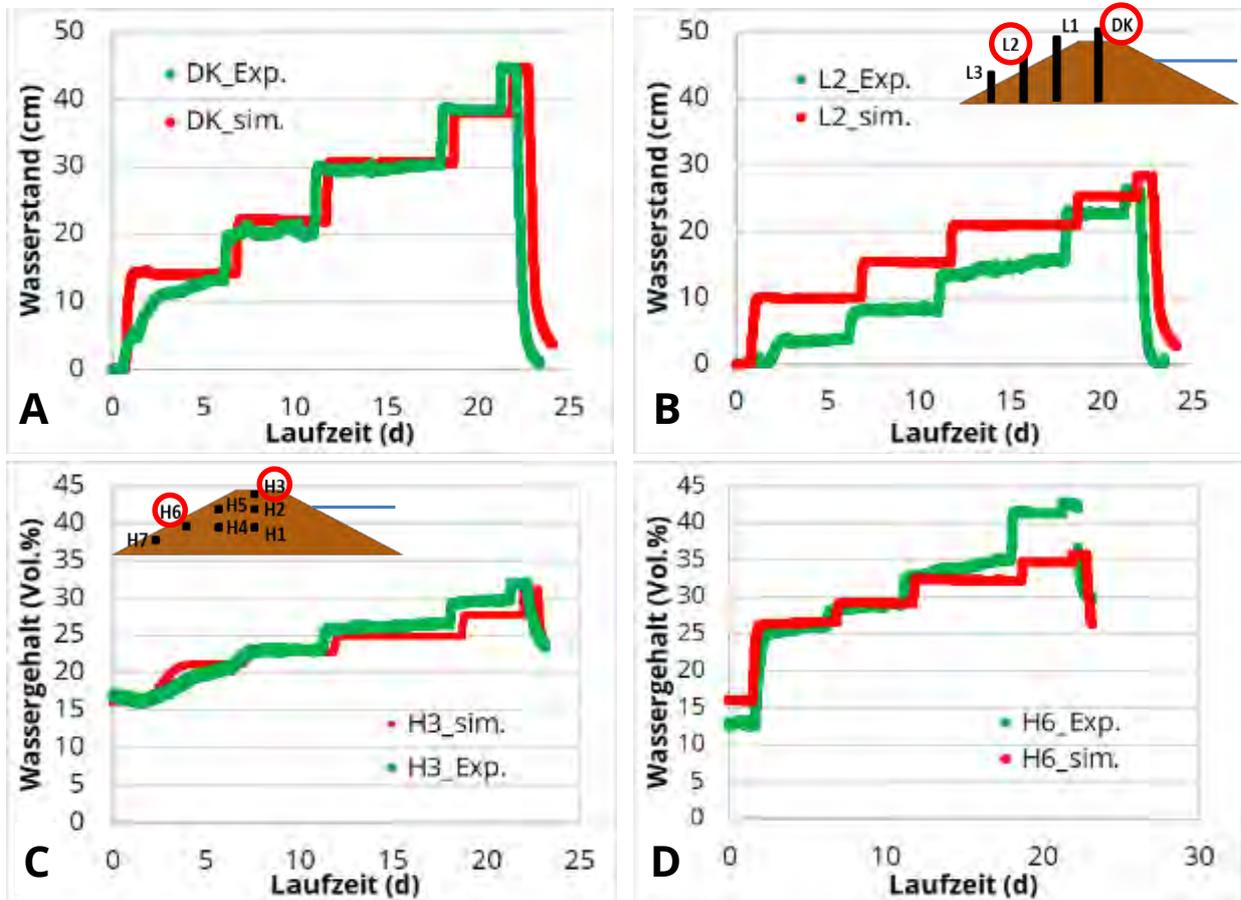
Daher wurde auch hier eine Anpassung der Parameter durchgeführt, wobei der K-Wert hauptsächlich durch den Abfluss in den stationären Zuständen der physikalischen Versuche bestimmt wurde. Die neu kalibrierten Bodenparameter sind in Tabelle 8 aufgeführt.

**Tabelle 8:** Materialparameter für den Boden 2 - Labormessung und Kalibrierung

	<b>Labormessung</b>	<b>Kalibrierung</b>
<b>Residualer Wassergehalt <math>\Theta_r</math> (-)</b>	0,152	0,133
<b>Gesättigter Wassergehalt <math>\Theta_s</math> (-)</b>	0,358	0,358
<b>Lufttrittsparameter <math>\alpha</math> (1/m)</b>	2,77	6,9
<b>Porengrößenverteilung <math>n</math> (-)</b>	2,008	1,90
<b>Gesättigte Hydraulische Leitfähigkeit <math>K</math> (m/s)</b>	$3 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$
<b>Tortuosität <math>\lambda</math> (-)</b>	-1,5	-2

Die Kalibrierung wurde mit Hilfe der neu in das Programm PCSiWaPro integrierten Parameteridentifikationsfunktion durchgeführt, die die Fuzzy-Logik nutzt. Dies wird durch die Bereitstellung eines geeigneten Wertebereichs in Kombination mit hoch korrelierten hydraulischen Parametern erreicht. Dies führte zu einer Verbesserung der Übereinstimmung der modellierten mit den gemessenen Wassergehalten (Abbildung 34C+D), während bei den

Druckhöhen vor allem für die Beobachtungspunkte L2 und L3 keine große Verbesserung zu verzeichnen war (Abbildung 34A+B).



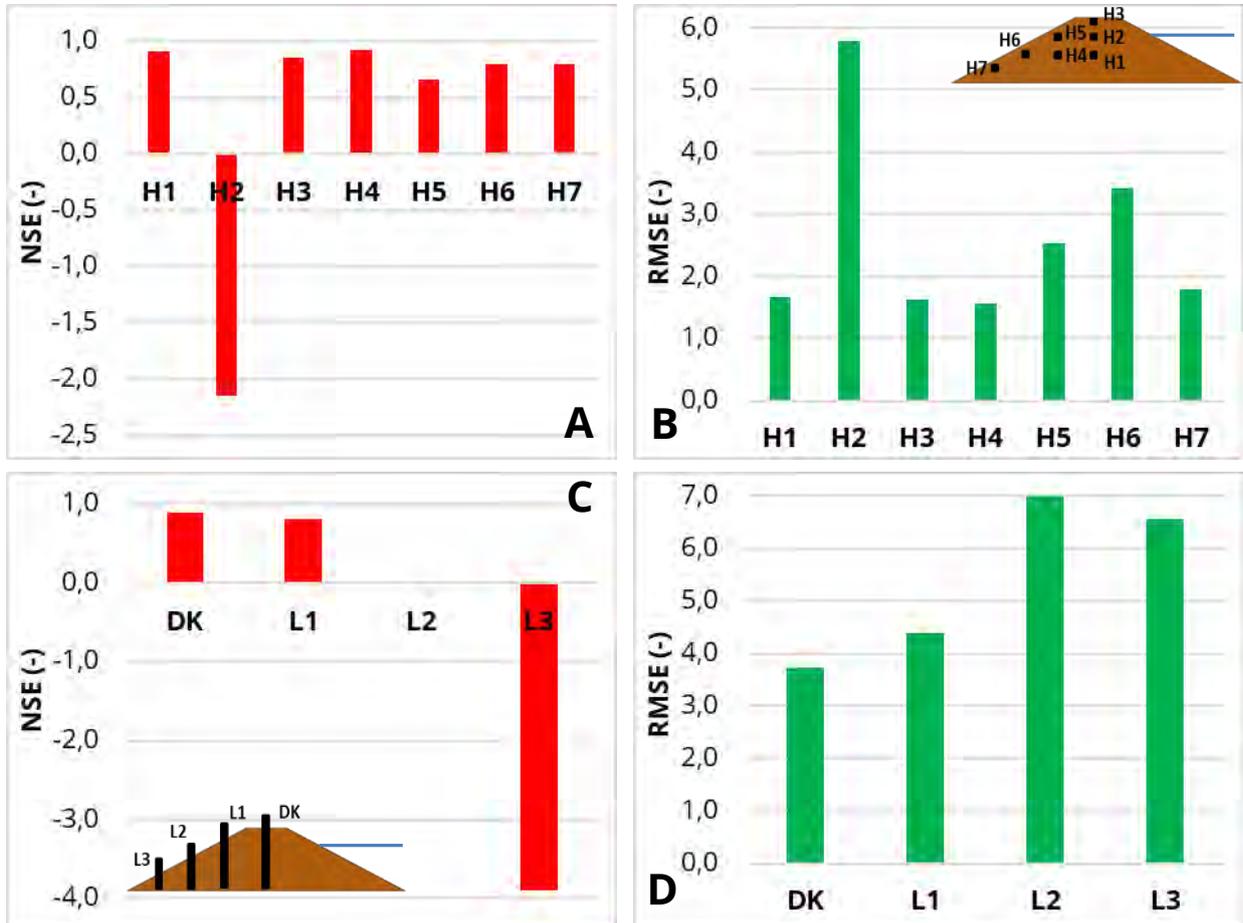
**Abbildung 34:** Vergleich von experimentell ermittelten und simulierten Druckhöhen in den Beobachtungspunkten DK (A) und L2 (B) sowie Wassergehalten in den Beobachtungspunkten H3 (C) und H6 (D) für Szenario 14

Die modellierten Wassergehalte an den Beobachtungspunkten zeigen allerdings eine leichte Unterschätzung der experimentell ermittelten Messwerte, wobei auch mit einer weiteren Anpassung der kalibrierten Parameter keine besseren Ergebnisse erzielt werden können.

### **Güte der Kalibrierung**

Die Quantifizierung der Abweichungen der simulierten von den gemessenen Werten hat trotz der leichten Unterschätzung der experimentell ermittelten Messwerte eine recht hohe Güte der Kalibrierung für den Wassergehalt ergeben. In den Beobachtungspunkten H1 und H3 bis H7 beträgt die durchschnittliche maximale Abweichung nach dem RMSE rund 3 Vol.% (Abbildung 35B). Lediglich in Punkt H2 gibt es sowohl nach dem NSE (Abbildung 35A) als auch nach dem RMSE (Abbildung 35B) eine weniger gute Übereinstimmung von Messwerten und

Simulation. Als Ursache konnte hier eine fehlerhafte Messung der Hydra Sonde ausgemacht werden.



**Abbildung 35:** Ermittelte Fehlerindikatoren für die Güte der Kalibrierung im Rahmen von Szenario 14 – NSE für die Wassergehalte von H1 bis H7 (A), RMSE für die Wassergehalte von H1 bis H7 (B), NSE für die Druckhöhen von DK bis L3 (C), RMSE für die Druckhöhen von DK bis L3 (D)

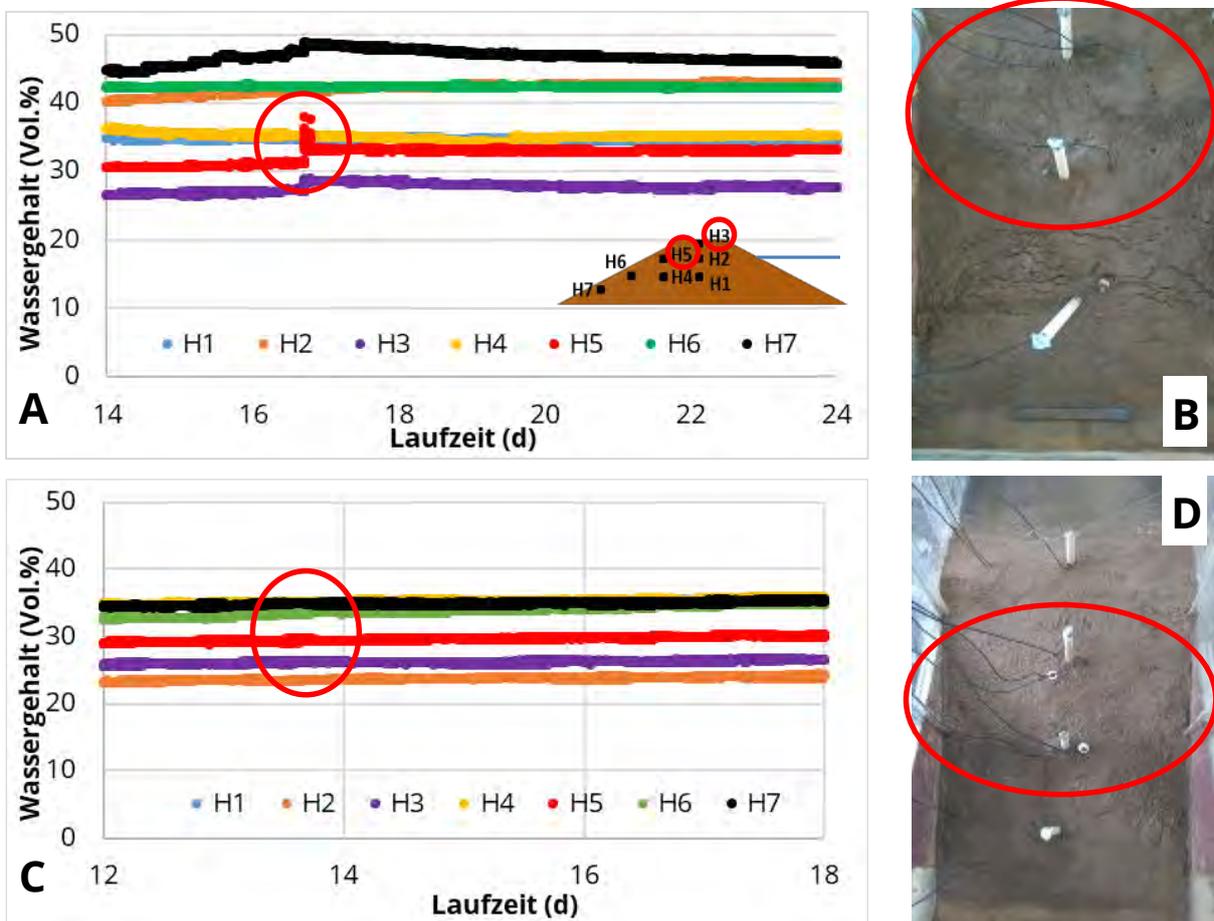
Im Falle der Druckhöhen konnten größere Unterschiede im Vergleich zu den Abweichungen der Wassergehalte ermittelt werden. Sowohl nach dem NSE (Abbildung 35C) als auch nach dem RMSE (Abbildung 35D) nimmt die Übereinstimmung von Messwerten und Simulation in Richtung des luftseitigen Böschungsfußes des Deiches ab. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass sich der Deichkörper in Bezug auf die Druckhöhen aufgrund des Einbaus nicht im Gleichgewicht befindet.

### **Berechnung während Einstau**

Durch die Realisierung von Niederschlagsereignissen bei einem bereits vorhandenen Einstau sollte auch hier der Einfluss der dadurch erhöhten volumetrischen Wassergehalte im ungesättigten Bereich des Deiches auf die Stabilität und die Versagenserscheinungen untersucht werden (Szenario 18/20).

Hierbei erfolgte in den durchgeführten Szenarien zunächst ein Einstau des Deichkörpers mit einer Wasserhöhe von 48 cm bis zum stationären Verhalten sowohl der volumetrischen Wassergehalte (Abbildung 36A) als auch der Wasserstände. Im Anschluss erfolgte die dreimalige Beaufschlagung der Deichoberfläche mit einem Niederschlagsereignis mit hundertjährigem Wiederkehrintervall und einer Dauer von 5 min gefolgt von einer 55-minütigen Pause.

Anhand der beobachteten volumetrischen Wassergehalte lässt sich ein signifikanter Anstieg durch die Regenereignisse nur für die oberflächennahen Messpunkte H3 und H5 verzeichnen (Abbildung 36A). Hier kam es zu einem sprunghaften Anstieg der Wassersättigung in diesen Bereichen von 27 auf 29 % vol. Wassergehalt für H3 und von 31 auf 36 % vol. Wassergehalt für H5. Allerdings war der Anstieg hier im Vergleich zu Boden 1 (Abbildung 24A), aufgrund der bereits durch den Einstau sehr hohen Wassergehalte, weniger stark ausgeprägt.



**Abbildung 36:** Effekt der Beregnung auf den Wassergehalt in der ungesättigten Zone des Deiches und die daraus resultierenden Rutschungserscheinungen – Einstau 30 cm + Beregnung: Wassergehalt (A), Böschungsverhalten (B) - nur Einstau 30 cm: Wassergehalt (C), Böschungsverhalten (D)

Ursache hierfür ist die unterschiedliche Matrix beider Böden. Boden 2 hat aufgrund des höheren Feinkornanteils einen höheren Anteil an Feinporen, wodurch eine stärkere Aufsättigung des Deichbereiches oberhalb der Sickerlinie durch Kapillarwasser erfolgt. Aus diesem Grund kann der Effekt der Beregnung in den weiteren oberflächennahen, aber auch näher

an der Sickerlinie gelegenen, Beobachtungspunkten H6 und H7 nicht nachgewiesen werden. Die Wassergehalte bewegen sich hier schon vor dem Niederschlagsereignis im Bereich der Vollsättigung.

Durch den erhöhten Wassergehalt im Bereich von H3 und H5 konnten zudem keine stärkeren Rutschungserscheinungen beobachtet werden (Abbildung 36B). Die in Abbildung 36B zu sehenden Rutschungserscheinungen im Bereich von H6 und H7 traten bereits vor dem Niederschlagsereignis bei einem Einstau von 48 cm aufgrund der hohen Wassergehalte in diesem Bereich auf. Allerdings waren diese Rutschungserscheinungen weniger stark ausgeprägt als bei Boden 1 (Abbildung 24B) unter den gleichen Bedingungen und niedrigeren Wassergehalten. Dies lässt sich mit den unterschiedlichen geomechanischen Eigenschaften der Böden erklären. Boden 2 besitzt eine größere Kohäsion und inneren Reibungswinkel als Boden 1, wodurch bei Boden 2 ein Auftreten von Versagenserscheinungen weniger stark ausgeprägt ist.

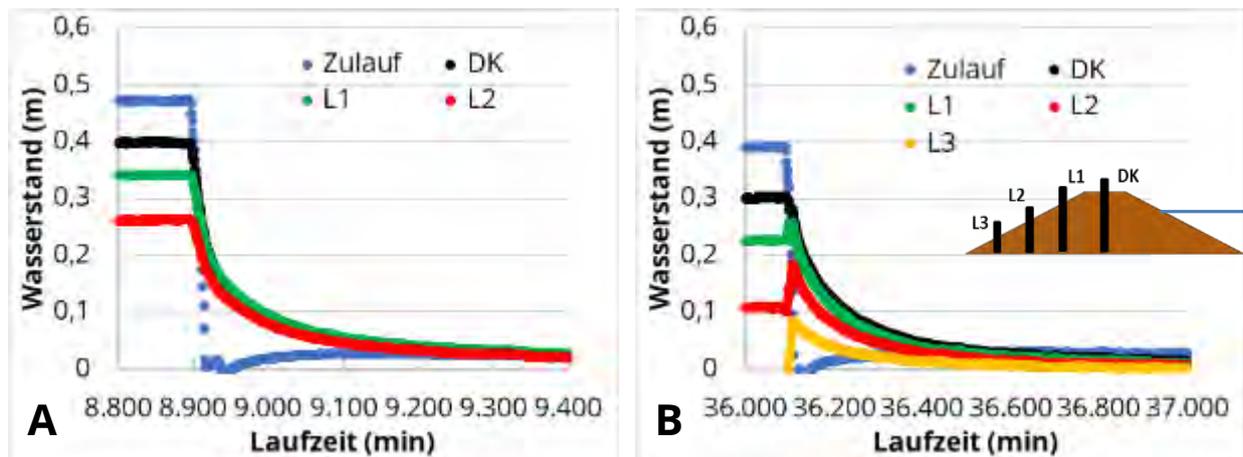
Beim Einstauversuch ohne Beregnung (Szenario 14) konnten durchgehend konstante vol. Wassergehalt von 26 bzw. 30 % im Bereich von H3 und H5 beobachtet werden (Abbildung 36C). Dabei waren auch hier im luftseitigen Böschungsbereich des Deiches nur geringfügige Rutschungserscheinungen zu registrieren (Abbildung 36D).

### **3.2.4 Einfluss schnell absinkender Wasserspiegel**

Bei einem schnellen Absinken des Hochwasserspiegels kann die Sickerlinie, die den Wasserstand im Deich widerspiegelt, langsamer absinken als der Wasserspiegel des Einstaus. Dadurch kann es zu einer hohen inneren Belastung der wasserseitigen Böschung und infolgedessen zu starker innerer Erosion sowie folgend zu Rutschungen dieser Böschungsseite kommen.

In den dazu mit beiden Böden durchgeführten Szenarien (1 und 20) erfolgte daher im Anschluss an einen Einstau ein rasches Absenken des Wasserspiegels (jeweils 16 min von 40 cm auf 0 cm). Aufgrund der unterschiedlichen Bodeneigenschaften konnte für die Absenkung des Wasserspiegels im Deich ein unterschiedliches Verhalten beobachtet werden. Während im durchlässigeren Boden 1 die Absenkung des Wasserspiegels von 40 auf 0 cm im Beobachtungspunkt „Deichkrone“ 87 Minuten benötigte, waren es im weniger gut durchlässigen Boden 2 für dieselbe Absenkung 141 Minuten (Abbildung 37A+B). Für Boden 2 konnten zudem Rutschungserscheinungen auf der Einstauseite des Deiches, verursacht durch das langsamere Absinken des Wasserspiegels im Deichkörper, beobachtet werden. Für Boden 1 konnten solche Effekte nicht registriert werden.

Die hier realisierte Absenkungsrate entspricht allerdings keiner Rate, die in der Realität anzutreffen ist. Dennoch zeigen die Untersuchungen, dass Deichkörper aus Materialien mit einem hohen Feinkornanteil bzw. einer geringen hydraulischen Durchlässigkeit im Falle eines schnellen Absinkens des Hochwasserspiegels gefährdeter hinsichtlich eines Stabilitätsversagens auf der Einstauseite des Deiches sind.



**Abbildung 37:** Zeitlicher Verlauf der Wasserstände nach Absenkung des Einstaus von 40 auf 0 cm – Boden 1 (A) und Boden 2 (B)

### 3.2.5 Zusammenfassung/Schlussfolgerung

Mittels der aufgebauten Versuchsanordnung konnte eine ausreichende Anzahl von Szenarien zur Beantwortung der unter Kapitel 3.2 aufgeworfenen Fragestellungen durchgeführt werden. Die dabei realisierte Durchfeuchtung des Deichkörpers und das Auftreten von entsprechenden Versagensbildern unter verschiedenen Randbedingungen konnte im Labormaßstab sehr gut nachvollzogen werden. Mit Hilfe der aufgebauten numerischen Modelle konnten die Messergebnisse aus den Laborversuchen gut reproduziert werden.

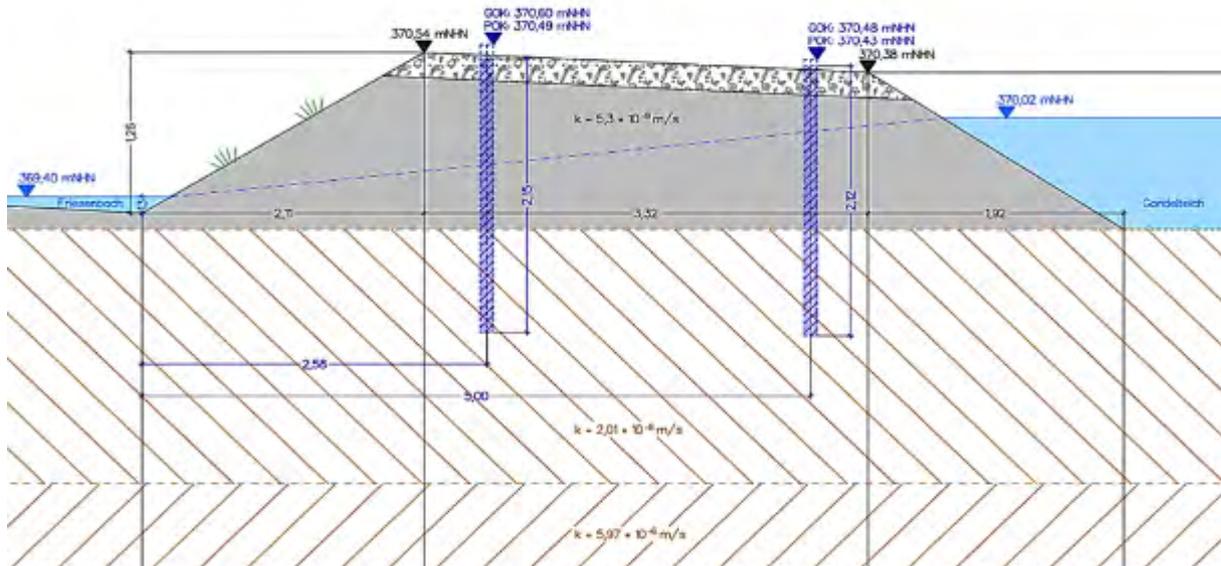
Beobachtet werden konnte, dass es durch Niederschläge bei einer Vorsättigung des Deiches zu einer starken Erhöhung der Versagenswahrscheinlichkeit auf der luftseitigen Seite des Deiches kommt. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass der Einsatz von verfestigten und stabilisierten Mineralstoffgemischen zu einer starken Verringerung der Versagenswahrscheinlichkeit führt.

## 3.3 Zusammenarbeit mit den Projektpartnern

### 3.3.1 M&S Umweltprojekt GmbH

#### **Numerische Simulation Feldstandort Gondelteich**

Zur Untersuchung des Einflusses von Niederschlagsereignissen, verbunden mit größeren Einstauhöhen, auf die Wasserbilanz und die Standsicherheit von Deichen, erfolgte ein Monitoring von Wasserständen außerhalb und innerhalb eines realen Deiches. Ausgewählt wurde hierfür der Standort Gondelteich in Plauen/Vogtland (siehe auch Endbericht des Projektpartners M&S Umweltprojekt GmbH). Der vorhandene Deich befindet sich hier zwischen dem Gondelteich, mit nahezu konstantem Wasserstand, und dem Friesenbach, der einen fluktuierenden Wasserstand in Abhängigkeit von Niederschlagsereignissen zeigt (Abbildung 38).

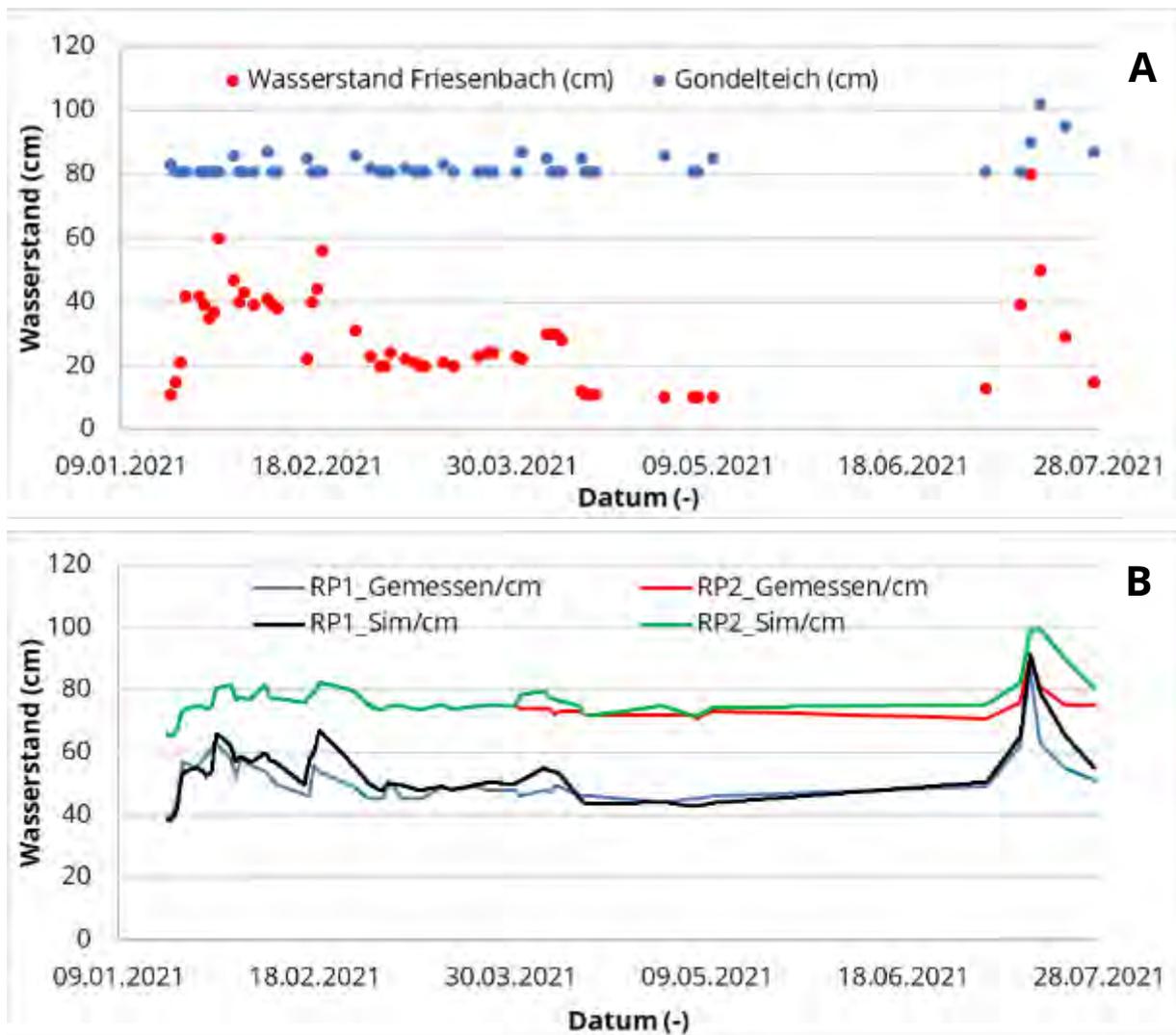


**Abbildung 38:** Darstellung der Geometrie und der Randbedingungen des Standortes Gondelteich.

Die Überwachung der Sickerlinie erfolgte mittels zwei installierten Rammpegeln (1 + 2). Ebenso wurden die Wasserstände des Gondelteichs und des Friesenbaches wochentags einmal gemessen. Die Daten zeigten, dass der Wasserstand im Friesenbach im Zeitraum der Messwerterfassung von Januar bis Juli 2021 Fluktuationen in Abhängigkeit von Niederschlagsereignissen unterlegen ist. Anhand der erfassten Wasserstände lassen sich Phasen mit Niedrig- (10 bis 20cm), Mittel- (20-50cm) und Hochwasser (50-80cm) definieren. Die Schwankungen des Wasserstandes im Gondelteich sind in den Phasen mit Niedrig- und Mittelwasser vernachlässigbar, lediglich bei Hochwasser im Friesenbach, einhergehend mit einer Überströmung des Deiches zwischen Friesenbach und Gondelteich, kann ein Anstieg um max. 20cm beobachtet werden (Abbildung 39A).

Die somit erfassten Daten dienen zur Kalibrierung eines aufzubauenden numerischen Modells. Mit Hilfe dessen sollten Worst-Case-Szenarien für den Standort gerechnet werden. Zudem soll das Modell dazu dienen, die durch die gegebenen Messintervalle entstehenden Datenlücken zu schließen.

Das konzeptionelle Modell des Deiches orientierte sich an der gegebenen Geometrie des Deiches (Abbildung 38). Für das zweidimensionale numerische Modell (2502 Berechnungsknoten, 4813 Dreieckselemente) wurde für den Deichkörper ein beidseitiger Einstau bei unterschiedlichen Wasserständen berücksichtigt. Dazu wurde auf der Seite des Friesenbaches ein zeitabhängiger Wasserstand als Potentialrandbedingung (Code: +8, definiert entsprechend des Wasserstandes) und für die Seite des Gondelteiches eine separate Wasserstandsganglinie implementiert. Die angenommene undurchlässige Sohle unter den Deichbodenschichten wird durch eine No-Flow Randbedingung (kein Durchfluss) dargestellt. Die Rammpegel-Beobachtungspunkte (2 x Wasserstand bzw. Druckhöhe im Deich) wurden ebenfalls in das Modell implementiert, so dass die Messdaten mit den simulierten Daten verglichen werden können.



**Abbildung 39:** Zeitlicher Verlauf der gemessenen Wasserstände im Friesenbach/Gondelteich (A) und der gemessenen und simulierten Wasserstände in den Rammpegeln RP1/RP2 (B)

Für die Charakterisierung der Bodeneigenschaften standen Messungen der hydraulischen Durchlässigkeit der drei unterschiedlichen Schichten (Deichkörper, Untergrund 1, Untergrund 2) zur Verfügung (Tabelle 9). Für die Abschätzung der restlichen Parameter kam die Pedotransferfunktion Rosetta (Van Genuchten, 2003) auf Basis der Bodentextur und der hydraulischen Durchlässigkeit zum Einsatz. Die Abschätzung der Bodenparameter über die im Programm PCSiWaPro implementierten DIN 4220 wurde verworfen, da diese Methode sehr niedrige und unrealistische Daten für den verwendeten K-Wertebereich lieferte.

Anhand von Abbildung 39B sind die zeitlichen Veränderungen der gemessenen und simulierten Wasserstände in den Beobachtungspunkten RP1 und RP2 dargestellt. Dabei lässt sich erkennen, dass ein Wasseranstieg des Friesenbachs zu einem stärkeren Anstieg des Wasserstandes im RP 1, dem näher zum Friesenbach installierten Rammpegel führt. Der vom Friesenbach weiter entfernte RP2 zeigt ebenfalls eine Reaktion auf den gestiegenen Wasserstand im Friesenbach, im Vergleich zu RP1 fällt diese jedoch geringer aus. Die Auswertung

der Simulationsergebnisse zeigt, dass die gemessenen Wasserstände im Modell geringfügig unterschätzt werden. Die Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Werten ist tendenziell stärker in Phasen mit Hochwasser und nimmt bei Niedrig- und Mittelwasserphasen ab. Mittels des simulierten Wasserstandes für RP2 konnte hier zudem die Datenlücke geschlossen werden, die durch die spätere Installation von RP2 entstanden ist.

**Tabelle 9:** Materialparameter für die drei unterschiedlichen Schichten am Standort Gondelteich

	Deichkörper	Untergrund 1	Untergrund 2
<b>Residualer Wassergehalt <math>\Theta_r</math> (-)</b>	0,0792	0,0792	0,0485
<b>Gesättigter Wassergehalt <math>\Theta_s</math> (-)</b>	0,4418	0,4418	0,39
<b>Lufttrittsparameter <math>\alpha</math> (1/m)</b>	1,58	1,58	3,47
<b>Porengrößenverteilung <math>n</math> (-)</b>	1,414	1,414	1,76
<b>Hydraulische Leitfähigkeit <math>K</math> (m/s)</b>	$5,3 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$5,9 \cdot 10^{-6}$
<b>Tortuosität <math>\lambda</math> (-)</b>	-0,77	-0,77	-0,77

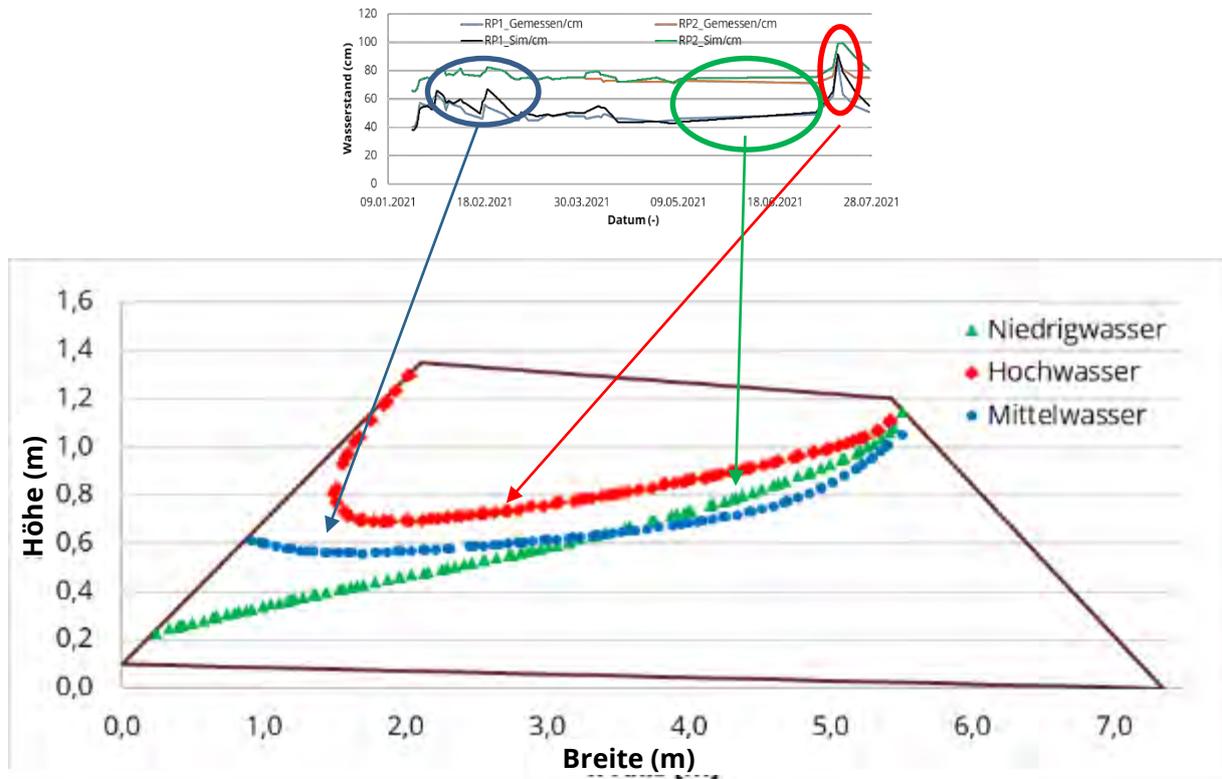
### **Veränderliche Sickerlinie im Bereich Gondelteich - Friesenbach**

Auf Basis der beobachteten Ganglinien des Friesenbaches (Abbildung 39A) konnten für den Bereich Gondelteich – Friesenbach Phasen mit Niedrig-, Mittel- und Hochwasser identifiziert werden. Für die einzelnen Phasen erfolgte die Simulation der Sickerlinie im Deich zwischen Friesenbach und Gondelteich (Abbildung 40).

Aus den beobachteten Sickerlinien lässt sich erkennen, dass es die größten Veränderungen in der Sickerlinie, wie zu erwarten, auf der Seite des Friesenbaches gibt. Die Veränderungen auf der Seite des Gondelteiches sind eher vernachlässigbar. Diese Ergebnisse spiegeln die gemessenen Wasserstände in RP1 und RP2 wider (Abbildung 39B). In Phasen mit Niedrigwasser fällt die Sickerlinie recht steil zum Friesenbach hin ab. Einige kleine Abflussspitzen im Friesenbach führen zu keiner Änderung des Verlaufes der Sickerlinie. Im Fall von Mittel- und Hochwasserphasen lässt sich ein Anstieg der Druckhöhe auf der Seite zum Friesenbach hin beobachten.

Die Dauer der am Standort beobachteten Mittel- und Hochwasserereignisse reicht allerdings nicht aus, um einen Anstieg der Sickerlinie über die komplette Deichbreite zu erreichen. Wie in Abbildung 40 zu sehen ist, ist der örtliche Verlauf der Sickerlinie sowohl von den aktuellen Wasserständen in den Randbedingungen (Friesenbach und Gondelteich) als auch von dem historischen Verlauf der Sickerlinien bzw. der Wassersättigung im Deich abhängig. Durch einen maximalen Einstau von 24 h und des relativ konstanten Wasserstandes im Gondelteich kann das Wasser aus dem Friesenbach aufgrund der geringen Durchlässigkeit des Deichmaterials ( $K = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s) nicht für einen Anstieg der Sickerlinie bis zum Gondelteich sorgen. Der elliptische Verlauf der Sickerlinie im Deich, vor allem bei einem Hochwasserereignis, ist das Ergebnis des langsamen linearen Druckhöhenaufbaus im schluffig-tonigen Boden unter

der Dechoberfläche. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bodencharakteristik dazu beiträgt, einen schnellen Druckanstieg zu verhindern und eine hohe Sättigung zu verursachen.



**Abbildung 40:** Darstellung der simulierten Sickerlinien im Bereich Gondelteich – Friesenbach während Phasen mit Niedrig- (Mai/Juni 2021), Mittel- (Januar/Februar 2021) und Hochwasser (Juli 2021) (siehe Abbildung 39) im Friesenbach

Das aufgebaute Modell wird in der restlichen Projektlaufzeit weiterhin als Prognoseinstrument für weitere Szenarien genutzt. Hierbei soll vor allem der Einfluss einer Kombination aus Vorsättigung bzw. Niederschlagsereignissen und Überflutungsszenarien auf den Verlauf der Sickerlinie untersucht werden.

### 3.3.2 Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik e.V. (KSI)

#### **Messtabletten zur Bestimmung des volumetrischen Wassergehaltes**

Die vom Projektpartner KSI entwickelten Messtabletten (Abbildung 41) sollten alternativ zur Erfassung des volumetrischen Wassergehaltes im Deichkörper eingesetzt werden (siehe auch Abschlussbericht des Projektpartners Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik e.V.)

Die Messtabletten arbeiten nach dem Verfahren der Impedanzspektroskopie, das heißt, es wird die Frequenzabhängigkeit der Impedanz des wasserhaltigen Bodens zwischen der Deck- und Bodenmatte untersucht. Detailliertere Angaben sind in der Literatur (Kanoun et al. (2004), Tetyuev (2009)) und in dem Abschlussbericht des Projektpartners KSI zu finden.



**Abbildung 41:** Konfektionierte Messtablette im Mineralgemisch

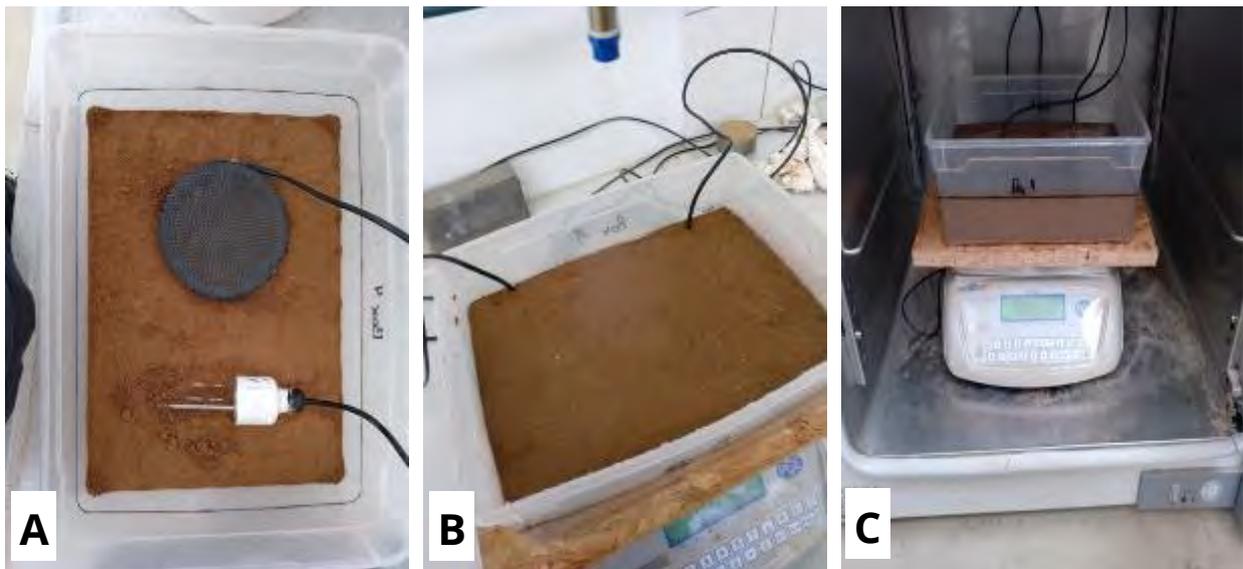
Im Folgenden wird zur Vereinfachung des Messverfahrens die Impedanz bei nur eine Frequenz untersucht.

Es wird davon ausgegangen, dass die Impedanz signifikant in Abhängigkeit zum volumetrischen Wassergehalt des Bodens steht. Im Zuge des Verfahrens wird zunächst die Impedanz bzw. der Widerstand als Realteil der Impedanz erfasst, welcher dann mittels Kehrwertbildung in den Leitwert umgerechnet wird. Der Leitwert ist entsprechend der Theorie proportional zu den Ionen in der wässrigen Bodenmatrix. Um den Leitwert in belastbare volumetrische Wassergehalte umzurechnen, war es nötig, eine Kalibrierung durchzuführen.

Hierzu wurde die Messtablette, gefüllt mit Boden 1, zusammen mit einer nach dem TDR-Prinzip arbeitenden Wassergehaltssonde (Hydra-Sonde, Firma Stevens Water, USA) in einer mit Boden 2 gefüllten Box (L 33 x B 24 x H 7 cm<sup>3</sup>) installiert (Abbildung 42A). Die Realisierung verschiedener volumetrischer Wassergehalte erfolgte nach zwei verschiedenen Prinzipien:

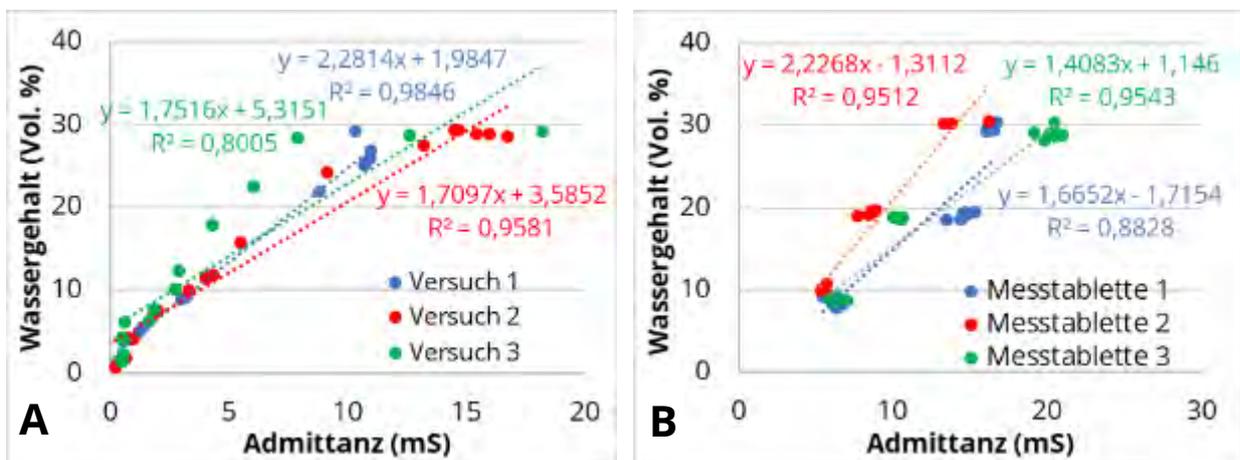
- Beregnung eines komplett trockenen Bodens 2 mit einer definierten Wassermenge, so dass sich ein gewünschter volumetrischer Wassergehalt einstellt, Einstellung der Wassergehalte 10, 20 und 30 Vol.% in drei verschiedenen Boxen mit jeweils unterschiedlichen Messtabletten (Abbildung 42B)
- Austrocknung eines gesättigten Bodens durch Platzierung in einem Wärmeschrank mit fester Temperatur, Erfassung des ganzen Spektrums an Bodenfeuchte in einer Box bei dreimaligem Austrocknen (Abbildung 42C)

Die veränderliche bzw. konstante Bodenfeuchte wurde parallel durch beide Messverfahren erfasst, der Leitwert durch die Messtablette und der volumetrische Wassergehalt durch die Hydra-Sonden. Somit konnte die Beziehung Leitwert – volumetrischer Wassergehalt erfasst werden. Um die Streubreite der Ergebnisse zu bestimmen, erfolgte die Durchführung der einzelnen Versuche in dreifacher Ausführung. Die einzelnen Boxen wurden allerdings dazu nur einmal befüllt, um eine gleichbleibende Lagerungsdichte zu gewährleisten.



**Abbildung 42:** Bodenbox mit installierter Messtablette und Hydra-Sonde (A), Beregnungsmethode (B), Austrocknungsmethode (C)

Auf Basis der ermittelten Leitwerte und parallel gemessenen volumetrischen Wassergehalte konnten schlussendlich Regressionsfunktionen bzw. Kalibrierfunktionen bestimmt werden, mit deren Hilfe eine Umrechnung von gemessenem Leitwert in einen volumetrischen Wassergehalt möglich ist (Abbildung 43A+B). Der Parameter  $y$  definiert dabei den Leitwert und  $x$  den volumetrischen Wassergehalt.



**Abbildung 43:** Ermittelte Kalibrierfunktionen für die Austrocknungsversuche (A) und die Bewässerungsversuche (B)

Die Streubreite der mittels der einzelnen Kalibrierfunktionen ermittelbaren volumetrischen Wassergehalte für einen gemessenen Widerstand von  $75 \Omega$  bzw. einem Leitwert von  $13,33 \text{ mS}$  zeigt Tabelle 10.

Anhand der Streubreite der Ergebnisse lässt sich nachweisen, dass eine ausreichende Reproduzierbarkeit mit dem derzeit eingesetzten Messverfahren noch nicht gegeben ist. Eine

Übertragbarkeit von ermittelten Kalibriergeraden auf andere Messtabletten ist bisher nicht möglich, da es durch minimale Unterschiede in der Bauweise bzw. Füllung zu signifikanten Änderungen der Übertragungsfunktionen und damit der gemessenen Impedanzen bzw. Leitwerte kommt.

**Tabelle 10:** Mittels der einzelnen Kalibriergeraden ermittelter volumetrischer Wassergehalt für einen gemessenen Widerstand von 75  $\Omega$

	Kalibriergerade	Wassergehalt (Vol.%)
<b>Bewässerung - Messtablette 1</b>	$y=1,6652x-1,7154$	20,5
<b>Bewässerung - Messtablette 2</b>	$y=2,2268x-1,3112$	28,4
<b>Bewässerung - Messtablette 3</b>	$y=1,4083x+1,1460$	17,6
<b>Austrocknung Messtablette 4 - Versuch 1</b>	$y=2,2814x+1,9847$	28,4
<b>Austrocknung Messtablette 4 - Versuch 2</b>	$y=1,7097x+3,5852$	19,2
<b>Austrocknung Messtablette 4 - Versuch 3</b>	$y=1,7516x+5,3151$	18,0

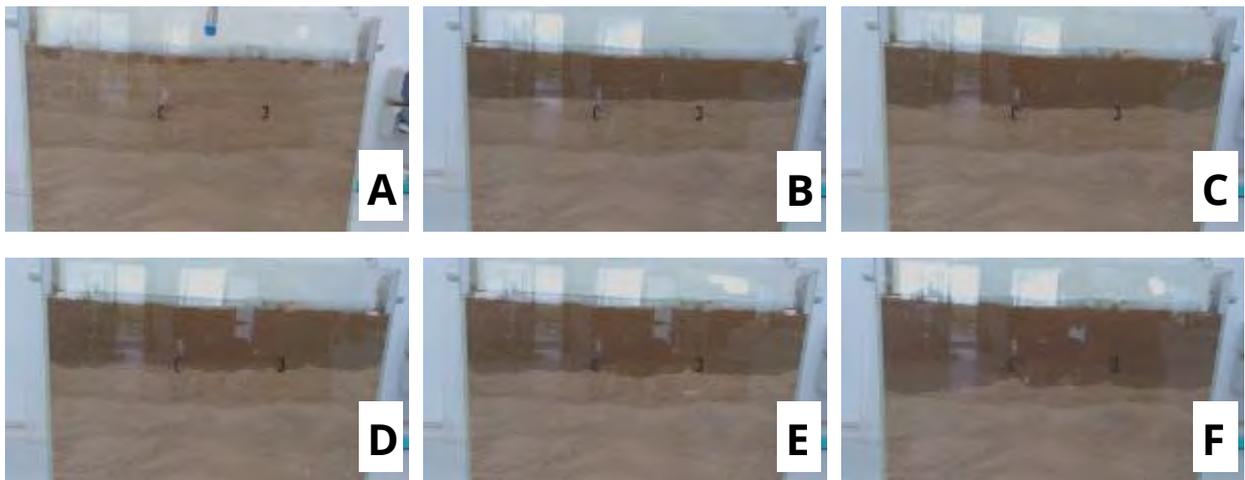
Hinzu kommt, dass die Versuche zur Kalibrierung nur mit einer Bodenart durchgeführt wurden, eine Übertragbarkeit der ermittelten Kalibriergeraden auf andere Bodenarten ist bisher nicht möglich. Zudem sind die vor allem im gesättigten und trockenen Bereich mittels Kalibriergeraden berechneten volumetrischen Wassergehalte kritisch zu sehen, da in diesen Bereichen kleinste Änderungen des Widerstandes bzw. des Leitwertes zu starken Änderungen des volumetrischen Wassergehaltes und damit zum Teil zu unrealistisch hohen Wassergehalten führen. Um die bisher existierenden Unsicherheiten zu minimieren, ist eine boden- und messtablettenspezifische Kalibrierung nötig.

### ***Evaluation der hydraulischen Anbindung der Messtabletten an das umgebende Material***

Im Zuge der durchgeführten Versuche zur Kalibrierung bestanden Unsicherheiten bezüglich der sowohl generellen als auch der zeitlichen Abfolge der Verteilung von infiltriertem Wasser zwischen der Messtablette und dem umgebenden Bodenmaterial aufgrund der unterschiedlichen Bodencharakteristik.

Diesbezüglich erfolgten zunächst Versuche in einem kleinskaligen Glasgerinne mit einer Dicke von 4 cm. In dieses wurden ein Streifenstück der Messtablette (mit schwarzen Klammern markiert) sowie, um die Messtablette herum, der Boden 2 im komplett trockenen Zustand eingebaut. Im Anschluss erfolgte die Beregnung der Bodenoberfläche für 5 Minuten mit einer definierten Wassermenge, die einen volumetrischen Wassergehalt von 20 % entsprach (Abbildung 44A). Die Verteilung der infiltrierenden Wasserfront wurde daraufhin visuell dokumentiert.

Die Ergebnisse (Abbildung 44B bis F) zeigen recht anschaulich, dass die Wasserfront sowohl um die Messtablette herum, aber auch im Bereich der Messtablette gleichmäßig versickert. Ein eventuelles nicht Durchströmen der Messtablette konnte hier nicht beobachtet werden.



**Abbildung 44:** Zeitliche Ausbreitung der durch eine Beregnung verursachten Wasserfront in der Messtablette und dem Boden 2

Um die visuell beobachteten Strömungsprozesse zu validieren bzw. zu quantifizieren, erfolgte zusätzlich die Nachbildung dieses Versuches in einer Box, in welche eine komplette Messtablette und, um die Messtablette herum, der Boden 2 im komplett trockenen Zustand eingebaut wurden. Die Beregnung wurde identisch dem Versuch im kleinskaligen Glasgerinne durchgeführt. Die Quantifizierung der in der Messtablette und im Boden 2 nach der Beregnung enthaltenen Bodenfeuchte erfolgte über Wägung.

2 Stunden nach der Beregnung konnte so in der Messtablette ein volumetrischer Wassergehalt von 18,4 % und im umgebenden Boden 2 von 18,8 % bestimmt werden. Anhand der Ergebnisse ließ sich hier eindeutig nachweisen, dass die Durchströmung der Messtablette durch die horizontal angeordneten Kohlenmatten nicht negativ beeinflusst wird.

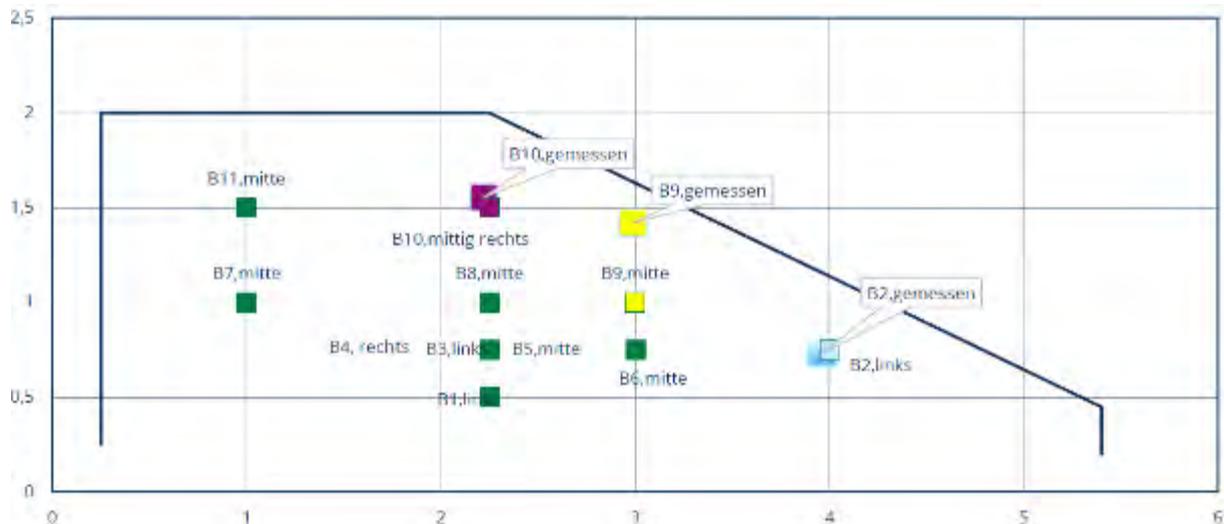
Mittels numerischer Modelle sind diese Prozesse nicht abbildbar, da eine ausreichende Parametrisierung der Messtablette nicht möglich war. Außerdem ist die Dicke der Kohlefaser-matten kleiner als die Diskretisierungsweite der FEM-Netze. Andererseits sind die Dreieckselemente der FEM-Netze nicht beliebig verkleinerungsfähig, da dann die makroskopische Beschreibung des Strömungsprozesses in der teilgesättigten Bodenmatrix (z.B. die RICHARDS-Gleichung) nicht mehr gilt.

### 3.3.3 Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik

Das Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden (IWD) hat im Rahmen des Projektes ein großskaliges Experiment zur Deichstabilität mit Boden 1 (Rossendorfer Sand) durchgeführt (siehe Abschlussbericht des Projektpartners IWD). Für den in Abbildung 45 dargestellten Deichkörper erfolgte der Aufbau eines numerischen Modells zur Simulation des Abflusses, der Druckhöhen und der Wassergehalte in den Beobachtungspunkten.

Das dabei aufgebaute numerische Modell hat die folgenden Abmessungen: Breite (Deichquerschnitt): 5,6 m, Höhe Deichkrone: 1,75 m, Breite Deichkrone: 2,1 m, Hangneigung: 1:2.

Für das zweidimensionale numerische Finite-Elemente-Modell (19519 Dreiecksknoten mit 38221 Elementen) wurde zunächst ein einseitiger Aufstau bei unterschiedlichen Wasserständen betrachtet, bis im physikalischen Modell Versagenserscheinungen auftraten.



**Abbildung 45:** Modellgeometrie des vom IWD verwendeten großräumigen Deiches incl. der Beobachtungspunkte

Dazu wurde auf der Wasserseite eine zeitabhängige potentielle Druckhöhe als Randbedingung (RB) (Code: +8, definiert entsprechend der Staunässe) und auf der Luftseite eine Sickerfläche (Code: -2, Abfluss möglich ab einer Druckhöhe von 0 m) implementiert. Die undurchlässige Bodenplatte wird durch eine No-Flow RB (keine Strömung) dargestellt.

Vorhandene Beobachtungspunkte (12 x Wassergehaltsmessung, Abbildung 45) wurden ebenfalls in dem Modell nachgebildet, so dass Messdaten mit den simulierten Daten verglichen werden können. Diese dienen zusammen mit den erfassten Zu- und Abflüssen als Grundlage für die Modellkalibrierung und -validierung. Die in Tabelle 4 (Seite 26) dargestellten hydraulischen Bodenkennwerte dienten dabei zur ersten Parametrisierung von Boden 1 im Modell.

Im Rahmen einer durchgeführten Kalibrierung erfolgte eine inverse Anpassung der hydraulischen Parameter des homogenen Materials anhand der bestimmten Wassergehalte in den 12 Beobachtungspunkten und des gemessenen Abflusses.

Im Zuge einer anschließenden Validierung erfolgte zudem eine Sensitivitätsanalyse, um die Auswirkung der veränderlichen bodenhydraulischen Parameter auf die Ausgabedaten zu verstehen. Hierbei wurden die fünf hydraulischen Parameter (gesättigter Wassergehalt  $\theta_s$ , Restwassergehalt  $\theta_r$ , gesättigte hydraulische Leitfähigkeit  $K$ , Lufteintrittsparameter  $\alpha$  und Maß für die Porengrößenverteilung  $n$ ) in vorgegebenen Bereichen variiert. Für ein besseres Verständnis der Sensitivität der einzelnen Parameter erfolgt eine Variation der hydraulischen Parameter sowohl unabhängig voneinander als auch in Kombination mit anderen Parametern. Die Ergebnisse sowohl der Kalibrierung als auch der Sensitivitätsanalyse werden im Abschlussbericht des Institutes für Wasserbau und Technische Hydromechanik diskutiert.

## **4 Verwertung**

### **4.1 Verwertungspotenzial**

Die deutliche Häufung von extremen Hochwasserereignissen auf Grund der stattfindenden Klimaänderung erfordert zwingend eine kritischere vorausschauende Untersuchung der Stabilität von Hochwasserschutzerdämmen. Die Gewährleistung der geohydraulischen Eigenschaften der Baumaterialien sowie die Zustandsgrößen (Niederschlag und Vegetation) sind entscheidende Faktoren für die Standsicherheit und Stabilität derartiger Erdbauwerke im Fall eines Hochwassers. Dabei ist die Ermittlung von Deichbruchkriterien unter dynamischen, hydraulischen und meteorologischen Einflüssen von großer Bedeutung.

Aufgrund der steigenden Deponierungspreise und der stark zunehmenden Sensibilität der betroffenen Anwohner von Deichbauwerken werden die bisherigen konventionellen Methoden der Deichsanierung (Rückbau und Entsorgung der Bestandsdämme, Neubau von Dämmen, häufig mit Einsatz von Beton- und Stahlelementen) immer häufiger kritisch hinterfragt. Die ökologisch und wirtschaftlich nachhaltige Sanierung der bestehenden Dämme mit verfestigten und stabilisierten Mineralstoffgemische unter Verwendung der in den Bestandsdämmen enthalten mineralischen Materialien kann dieses europaweit bestehende Problem lösen.

Mit dem vorliegenden Abschlussbericht „Entwicklung eines Vorhersagesystems für Deichbrüche auf Basis experimenteller und mathematischer Modelle unter Berücksichtigung von Niederschlag und Vegetation bei sich ändernden Klimabedingungen sowie von umweltgerechten bautechnischen Lösungen zur Ertüchtigung vorhandener Dämme und Deiche (VSDS), Teilprojekt: Simulation und Laborversuche des Projektpartners TU Dresden, Institut für Grundwasserwirtschaft wird ein Beitrag geliefert, die Stabilität von Deichen und Erddämmen mit modernsten mathematischen Simulationsmethoden prognostisch sowohl für Bestandsbauwerke als auch für Neubauten und Rekonstruktionen zu untersuchen. Im Zusammenhang mit den Ergebnissen der anderen Projektpartner ist damit ein entsprechendes Vorhersagesystem entstanden.

### **4.2 Marktanalyse/-abschätzung**

Allein in Sachsen sind Fließgewässer I. Ordnung mit einer Gesamtlänge von ca. 3.300 km Länge vorhanden und es existieren im Zuständigkeitsbereich der Landestalsperrenverwaltung (LTV) Sachsen 84 Stauanlagen, ca. 690 km Hochwasserschutzdeiche und ca. 60 km Hochwasserschutzwände sowie viele weitere Hochwasserschutzbauwerke in kommunaler und privatrechtlicher Verantwortung. Mehr als 90% der wasserbaulichen Anlagen bestehen seit mehr als 30 Jahren. Die Sanierung dieser Anlagen wird trotz Bereitstellung erheblicher finanzieller Mittel (500 Mio. € allein bis 2020) noch mehrere Jahrzehnte andauern. Vergleichbare Verhältnisse und damit entsprechende Einsatzgebiete des entwickelten Vorhersagesystems bestehen sowohl in ganz Deutschland als auch europa- und weltweit. Vorbereitende Gespräche gibt es insbesondere schon mit Polen (Wroclaw University of Environmental and

Life Sciences) und in den wasserreichen baltischen Republiken, speziell in Litauen. Aber auch mit der Tischrin University in Lattakia/Syrien werden diese Methoden diskutiert.

Mit den Ergebnissen des Projektes verbessern die wirtschaftlichen Projektpartner ihre Marktfähigkeit und erhöhen ihre Alleinstellungsmerkmale, die zur wirtschaftlichen Stärkung und zur vermehrten nationalen und internationalen Vermarktung von Ingenieurleistung, Verfahren und Anlagen beiträgt. Dies wird den am Projekt beteiligten sächsischen Unternehmen die Möglichkeit bieten, ihre Produkte und Dienstleistungen zu exportieren und die sächsische Wirtschaft damit in einem Zukunftsfeld zu stärken.

### **4.3 Verwertungskonzept und Kalkulationsansätze**

Durch das industrielle Forschungsprojekt sollen Kenntnisse und Fertigkeiten gewonnen werden, die es gestatten, neue Verfahren zur Überwachung des geohydraulischen Verhaltens von Erddämmen und Deichen sowie neue Technologien zur ökologisch und wirtschaftlich nachhaltige Sanierung der bestehenden Dämme mit verfestigten und stabilisierten Mineralstoffgemische unter Verwendung der in den Bestandsdämmen enthalten mineralischen Materialien zu entwickeln. Allein in Sachsen betrifft dies mehr als 3.500.000 m<sup>3</sup> mineralische Materialien vorhandener Dämme, die sich im Zuständigkeitsbereich der LTV Sachsen befinden sowie viele weiterer Mio. m<sup>3</sup> mineralische Materialien vorhandener Dämme die sich im Zuständigkeitsbereich von Kommunen, Firmen und Privatpersonen befinden. Bereits die Entsorgungskosten für die Materialien der Bestandsdämme liegen bei mehr als 17 Milliarden Euro. Darüber hinaus würde die Materialentsorgung die vorhandenen Deponiekapazitäten erheblich überschreiten. Basierend auf der Entwicklung der grundlegenden wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse zur Lösung dieser Probleme innerhalb von 33 Monaten kann nach weiteren maximal 36 Monaten die Entwicklung marktreifer wettbewerbsfähigen Vorhersagesystemen sowie von praktischen einsetzbaren Dammsanierungstechnologien mit verfestigten und stabilisierten Mineralstoffgemische der bestehenden Dämme abgeschlossen werden.

Das Verwertungskonzept der TU Dresden, Institut für Grundwasserwirtschaft, besteht vor allen darin, die Qualität der umwelttechnischen/wasserwirtschaftlichen Lehre (incl. Aus- und Weiterbildung) sowie des Forschungspotential zu erhöhen. Die Ergebnisse (sowohl die eigenen Leistungen als auch die der Projektpartner) des Forschungsprojektes fließen direkt in die Lehrtätigkeit des Institutes ein und verbessern diese sofort. Das betrifft die Wissensvermittlung in Form von Vorlesungen/Übungen/Seminaren als auch die aktive Wissensaneignung der Studierenden in Form von Praktikums-, Projekt- und Abschlussarbeiten (siehe auch Tabelle 13). Es können damit der sächsischen Wirtschaft gut ausgebildete Absolventen zur Verfügung gestellt werden. Durch Einbeziehung von Studenten der verschiedenen Gradueinstufen (Bachelor, Master, Promotion) erhielten die Studierende eine vertiefte Ausbildung in den Prozessen der ungesättigten Bodenzone, die in der Tiefe und Umfang an deutschen Universitäten eine Spitzenposition einnimmt und international mit Ausbildungen in den USA konkurrieren kann. Sie erhielten auch die Möglichkeit Teile der Projektergebnisse in ihren akademischen Qualifizierungsprozessen zu verwenden.

Die Ergebnisse liefern aber auch Grundlage für weitergehende Forschungen seitens der TU Dresden, insbesondere als Basis aufbauender Forschungsanträge, die über Drittmittel eingeworben werden müssen. Dies ist Grundlage für den Erhalt und weiteren Aufbau von personellen Forschungsressourcen als auch materieller Ausstattung. Weiterhin bilden die Ergebnisse die Grundlage für die Beantragung weiterer BMBF-Projekte zum Thema „Grundwasserbewirtschaftung“ und „Nahe-Mittlerer-Osten“ sowie einem ZIM-Projekt zur nachhaltigen Wasserverwendung in der Agrarwirtschaft (Feldbau) aber auch zum Thema nachhaltige Grundwassersteuerung bei Verkehrsflächen mit einem geplanten Budget von mehr als 1 Mio. EUR. Durch die neubeantragten Forschungsprojekte werden ca. 10 neue Arbeitsplätze für die Dauer von 3 Jahren geplant.

Gleichzeitig stellen die Ergebnisse eine Grundlage für Vorträge und Veröffentlichungen in nationalen und internationalen Fachzeitschriften bzw. auf nationalen und internationalen Kongressen und anderen Veranstaltungen dar (siehe Tabelle 11 und Tabelle 12). Die entsprechenden Kopien sind Bestandteil des Abschlussberichtes. Damit erhalten sowohl die beteiligten Projektmitarbeiter als auch die TU Dresden eine Vergrößerung ihres Renommées.

## 5 Veröffentlichungen

**Tabelle 11:** Konferenzteilnahmen im Projekt

Konferenzname	Datum	Art der Veröffentl.	Autoren und Titel der Veröffentlichung
19. Talsperrensymposium	26.-28. April 2022	Vortrag	Dirk Fleischer, Ulf Helbig, Thomas Fichtner, Rene Blankenburg, Marwan El Masri, Peter-Wolfgang Gräber, Bernd Märtner, Michael Mertig – <b>„Verbesserter Stabilitätsansatz bei Dämmen unter Einbeziehung der teilgesättigten Zone“</b>
FHDGGV	23.-26. März 2022	Poster	Thomas Fichtner, Marwan El Masri, Peter-Wolfgang Gräber, Rene Blankenburg – <b>„Methode zur indirekten Bestimmung von Bodenparametern für die numerische Simulation von Deichen und Erddämmen“</b>
European Geoscience Union (EGU)	19. - 30. April 2021	-	-

**Tabelle 12:** Liste der Peer-Reviewed Veröffentlichungen im Projekt

Journalname	Art der Veröffentlichung	Autoren und Titel der Veröffentlichung
Tagungsband 19. Tal-sperrensymposium	Extended abstract	Dirk Fleischer, Ulf Helbig, Thomas Fichtner, Rene Blankenburg, Marwan El Masri, Peter-Wolfgang Gräber, Bernd Märtner, Michael Mertig – „ <b>Verbesserter Stabilitätsansatz bei Dämmen unter Einbeziehung der teilgesättigten Zone</b> “
<b><u>In Arbeit</u></b>		
Environmental Sciences Europe	Artikel	Thomas Fichtner, Marwan El Masri, Peter-Wolfgang Gräber, Rene Blankenburg – “ <b>Method for indirect determination of soil parameters for numerical simulation of dikes and earth dams</b> ”

**Tabelle 13:** Liste der studentischen Arbeiten

<b><u>Masterarbeit</u></b>		
Marwan El Masri	2020	Investigation of the relation between water saturation and slope stability in earth dikes under changing climate conditions
Andreas Kürschner	2021	Entwicklung einer geeigneten Methode zur Abschätzung von Bodenfeuchtegehalten mittels Impedanzmessungen
<b><u>Bachelorarbeit</u></b>		
Hannes Hünersen	2020	Einfluss von Fluiden und (Schad-)Stoffen auf die Stabilität/Versagensmechanismen von Deichen und Dämmen im ungesättigten Bereich
Lee-Ann Kalaidjew	2020	Bewertung verschiedener Apparaturen zur Simulation einer Beregnung von Labordeichmodellen
<b><u>Projektarbeit</u></b>		
Steve Pallmer, Gisa Jakob	2021	Analyse der Sensitivität von Sickerlinie und Wassergehalt in Deichkörpern bei Variation von Modellrandbedingungen

## 6 Verbesserung der Umweltbedingungen

Das Projekt ist in das thematische Zukunftsfeld „Nachhaltige Entwicklung - Umwelt und Ressourcen“ sowohl der Innovationsstrategie des Freistaates Sachsen als auch in die EU-Strategie „EUROPA 2020“ für ein intelligentes, nachhaltiges und integratives Wachstum eingeordnet. Gleichzeitig stellt das Projekt wichtige Ergebnisse zum Erreichen der Vorgaben der EU-Wasserrahmenrichtlinie (nachhaltige Verbesserung der Qualität von ober- und unterirdischen Gewässern) sowohl für den Freistaat Sachsen und als auch darüber hinaus bereit. Das

Projekt ist insbesondere für die nachhaltige Wasserwirtschaft relevant, da eine Erhöhung der Deichstabilität hilft, größere Umweltschäden, wie sie z.B. auch bei dem August Hochwasser im Eifelkreis/Ahrtal zu verzeichnen war, zu minimieren. Dabei sind nicht nur die baulichen Schäden zu betrachten, sondern auch die Umweltschäden, die durch auslaufende und versickernde Schadstoffe in den Wasserkreislauf eingedrungen sind.

Die ökologisch und wirtschaftlich nachhaltige Sanierung der bestehenden Dämme mit verfestigten und stabilisierten Mineralstoffgemische unter Verwendung der in den Bestandsdämmen enthalten mineralischen Materialien kann den Rückbau und die Entsorgung bestehender Bestandsdämme und die damit verbundene Umweltbelastung minimieren.

## **6.1 Risikoprävention, Katastrophenresistenz**

Die Hochwasserereignisse in 2002 und 2013, aber auch kleinere, wie 2005 und 2010, in Sachsen und in anderen Bundesländern entlang der Elbe und ihrer Nebenflüsse verursachten enorme Schäden. So entstanden durch das Juni-Hochwasser von 2013 allein in Sachsen Schäden von ca. 2 Mrd. EUR. Ein wesentlicher Teil der Schäden sind Folgen von Deichbrüchen. Beispielsweise wurde durch den Bruch des Elb-Deiches bei Fischbeck in Sachsen-Anhalt der Ort Fischbeck überflutet und die ICE-Verbindung Berlin-Hannover unterspült, sodass diese für 6 Monate gesperrt werden musste.

Besonders frisch und nachhaltig sind die Schäden durch das Augusthochwasser in 2021 im Ahrtal noch in Erinnerung, mehr als 130 Tote, Tausende sind obdachlos, hunderte Gebäude sind weggerissen, schätzungsweise fast 200 Hektar Fläche entlang der Ahr wurden überflutet, Schäden in Rekordhöhe von 29,2 Milliarden Euro wurden verursacht.

Oberflächenerosion, z. B. infolge Deichüberströmung, und Anstieg der Wassersättigung im Deichkörper und wasserbaulichen Erddämmen, z. B. infolge zunehmender Durchsickerung oder auch Niederschlag, stellen die Hauptursachen der Gefährdung der Stabilität bis hin zum Bruch dar.

Während die Oberflächenerosion relativ einfach festzustellen und zu minimieren ist, ist das Risiko eines Deichbruches auf Grund einer Erhöhung der deichinneren Bodenfeuchte (auch weit unterhalb der 100%-Sättigungsgrenze) unsichtbar und komplizierter zu identifizieren. Deswegen unterliegen diese Wasserbauwerke einem höheren Risiko des Durchsickerns durch Bodenwasser und von Hangrutschungen als Ursache eines Deichbruches. Neben der Gefahr des Durchsickerns und den damit auftretenden Suffosions- und Erosionsprozessen (z. B. infolge Pipings u. a.) gelten der Böschungs- und Grundbruch als weitere wassergehaltsabhängige Versagensmechanismen.

Die Ergebnisse des Verbundprojektes aller Projektpart können dazu beitragen, dass durch eine gezielte Untersuchung der Bestandsdeiche derartiger Schäden (siehe oben) minimiert werden können. Insbesondere die neuen Möglichkeiten der prognostischen Szenarienanalyse hinsichtlich der Wassergehaltsverteilung in Erdstauwerken und deren Stabilitätsabschätzungen sowie die Möglichkeit der ökologischen und ökonomischen Ertüchtigung von

Bestandsdeichen ermöglicht künftige Auswirkungen des Klimawandels in Form von Starkniederschlagsereignissen zu minimieren.

## 6.2 Umweltrelevante Ziele

Gegenstand des Projektes ist die Entwicklung eines Vorhersagesystems für Deichbrüche auf Basis experimenteller und mathematischer Modelle unter Berücksichtigung von Niederschlag und Vegetation bei sich ändernden Klimabedingungen, die vor allem durch länger anhaltende Trockenperioden und Starkniederschlagsereignisse gekennzeichnet sind.

Durch das Vorhersagesystem soll ein wesentlicher Beitrag zur Sicherung des Hinterlandes bei Hochwasserereignissen erzielt werden. Mit Hilfe der prognostischen Risikoabschätzung möglicher bruchgefährdeter Deichabschnitte kann prophylaktisch eine Sanierung bzw. Ertüchtigung erfolgen. Dabei kann der Sanierungsaufwand aufgrund der Risikobewertung gezielt angepasst und minimiert werden. Der Vorteil des Vorhersagesystems besteht auch darin, dass die Risikobewertung weit vor dem Hochwasserereignis erfolgen und jederzeit mit neuen Informationen aktualisiert werden kann. Dabei können auch die notwendig werden und bereits durchgeführten Sanierungsstrategien und -maßnahmen in Szenarioanalysen untersucht werden.

Ein weiteres umweltrelevantes Ziel stellt die, über sehr lange Zeiträume nachhaltige zu gewährleistende Funktionsfähigkeit solcher wasserbaulichen Erdbauwerke dar.

Auch die möglichst vollständige Verwertung der vor Ort vorhandenen mineralischen Materialien der Bestandsdämme stellt ein wesentlich zu erreichendes Umweltziel dar.

## 6.3 Umweltentlastung

Deichbrüche stellen insofern enorme Umweltbelastungen dar, da infolge der eintretenden Überflutung des Hinterlandes entsprechende vielschichtige Umweltschäden entstehen. Im Einzelnen können dazu z. B. der Austrag von Schadstoffen aus Industrieanlagen, Altlastenflächen, Deponien; die Verunreinigung von Wasserversorgungssystemen (z. B. Grundwasserleiter, Förderbrunnen, Wasserbehandlungssysteme bis hin zu den komplexen Rohrnetzen) oder die Verunreinigung von landwirtschaftlich genutzten Flächen genannt werden.

Neben der Umweltentlastung durch die Verhinderung von Deichbrüchen entsteht auch eine solche durch die Optimierung des Materialeinsatzes bei Neubau und Ertüchtigung von wasserbaulichen Erddämmen unter ökologischen (z. B. auch Stoffaustrag aus Erdbaustoffen) und ökonomischen Gesichtspunkten. Darüber hinaus trägt die angestrebte Verwertung der vor Ort befindlichen mineralischen Materialien zu einer erheblichen CO<sub>2</sub>- Reduzierung bei, die bisher aus dem erforderlichen Abtransport der Alt- und dem Antransport der Neumaterialien resultieren.

## 6.4 Stoffströme

Ursachen von Deichbrüchen sind oft Materialumlagerungen (Suffosion) und Materialtransport (Erosion) innerhalb des Deichkörpers. Dabei kommt es zu Hohlräumbildungen und in

der Folge zur verstärkten Durchströmung aufgrund des geringeren Strömungswiderstandes und der zunehmenden hydraulischen Leitfähigkeit. Diese können zu einer Kettenreaktion führen und den Deich als Hochwasserschutzbauwerk zerstören. Die dabei mit dem Wasser transportierten Materialien breiten sich aus und werden verlagert.

Neben der Überflutung von großen Flächen durch das Wasser und den darin enthaltenen Stoffen kommt es im Nahbereich eines Deichbruches zur Verlagerung großer Erdmassen, oftmals auf Flächen mit hoher ökologischer Wertigkeit (z. B. Auengebiete) oder auf landwirtschaftlich genutzten Flächen.

Durch die Optimierung des Materialeinsatzes bei Neubau und Ertüchtigung von wasserbaulichen Erddämmen lassen sich sowohl die Mengen der Erdbaustoffe, die transportiert werden müssen, als auch der Schadstoffaustrag aus diesen und somit die Gefährdung von Wasserressourcen verhindern, zumindest erheblich minimieren.

Die angestrebte möglichst vollständige Verwertung der vor Ort vorhandenen mineralischen Materialien der Bestandsdämme führt darüber hinaus zu einer erheblichen Entlastung der sonst erforderlichen Deponieverfüllkapazitäten, zu einer maßgeblichen Verringerung der benötigten Entnahmemengen für mineralische Neumaterialien sowie zu einer deutlichen Verringerung des Einsatzes von Beton- und Stahlmaterialien.

## 7 Finanzierungs- und Zeitplan

Ziel des FuE-Verbundprojektes war die Entwicklung eines praxistauglichen Vorhersagesystems für Deichbrüche, welches die Gefährdung von Deichbauwerken auf Basis experimenteller und mathematischer Modelle unter Berücksichtigung von Niederschlag und Vegetation bei sich ändernden Klimabedingungen zuverlässig prognostiziert, sowie von umweltgerechten bautechnischen Lösungen zur Ertüchtigung vorhandener wasserwirtschaftlicher Erdbaustauwerke. Dabei werden die Prognosen unter Berücksichtigung der standortspezifisch gegebenen hydrogeologischen und ökologischen Rahmenbedingungen erfolgen.

Durch die erfolgreiche Bearbeitung der Arbeitseinheiten (AE) im Teilprojekt TU Dresden/IGW (Details siehe **Tabelle 16**)

AE-IGW-1     Softwareentwicklung

AE-IGW-2     Kleinskalige Laborversuche

wurden die angestrebten Projektziele voll umfänglich erreicht. Die Ergebnisse wurden sowohl innerhalb des Verbundprojektes fortschreibend dokumentiert als auch über Publikationen (siehe Tabelle 11 und Tabelle 12) und Vorträge sowohl national als auch international den Fachkollegen offeriert.

Die Ergebnisse des Teilprojektes der TUD dienten sowohl direkt als auch indirekt den Projektpartnern bei der Erbringung der Ergebnisse deren Arbeitspaketen. Diese Transferleistungen sind im Abschnitt 3.3 „Zusammenarbeit mit den Projektpartnern“ (Seite 53) detailliert dokumentiert. Als Beispiele seien die Arbeitseinheiten MUS-AE4 – Bestandsdeiche und MUS-AE5- Mineralstoffgemischdeiche des Partners M&S-Umweltprojekt GmbH, IWD-AE3 – Physi-

kalisches Deichmodell (Großversuch) des Institutes für Wasserbau und Technische Hydro-mechanik der TU Dresden sowie KSI-AE4.1 – Entwurf des Messaufbaues des Kurt-Schwabe-Institutes für Mess- und Sensortechnik e.V., in denen die methodischen Arbeiten zur Simulation und Szenarienanalyse des IGW, TU Dresden ausgewertet und eingeflossen sind, zu nennen.

Der Finanzierungs- und Zeitplan konnte im Wesentlichen so realisiert werden, wie dieses beantragt wurden. Die um 3 Monate, gegen über der ursprünglichen beantragten Laufzeit, verkürzte Bearbeitungszeit ging nicht zu Lasten der Quantität und Qualität der Projektergebnisse. Durch eine strenge Arbeitsorganisation und umfangreichere Einbeziehung von studentischen Arbeitsleistungen konnten trotz der Corona-Bedingungen alle geplanten Projektziele erreicht werden.

Der endgültige detaillierte Verwendungsnachweis wird separat geliefert.

**Tabelle 14:** Kosten (€) (Personal, Investitionen/Gegenstände, Materialien, Gemeinkosten usw.) und Personalkapazität (h) pro Arbeitsetappe

AE	Bezeichnung	IGW	
<b>1</b>	<b>Softwareentwicklung</b>		
1.1	Erstellung mathematisches Modell der Wasserbilanz	18.000	390
1.2	Stabilitätsanalyse und -berechnung	15.000	325
1.3	Codeentwicklung von Stabilitätsmodellen und Implementierung	37.000	801
1.4	Implementierung der Unschärfemodellierung	15.000	325
1.5	Entwicklung und Implementierung der GUI	43.000	931
1.6	Testung der Alpha-Version	52.000	1.126
<b>2</b>	<b>Kleinskalige Laborversuche</b>		
2.1	Geotechnische Charakterisierung von Mineralstoffgemischen	32.000	693
2.2	Geochemische Charakterisierung von Mineralstoffgemischen	42.000	910
2.3	2D-Gerinneversuch	52.000	1.126

**Tabelle 15:** Finanzierungsplan laut Zuwendungsbescheid

Kostenart	Gesamtausgaben in EUR	Zuwendungsfähige Ausgaben in EUR
Gemeinkostenpauschale	94.239,00	94.239,00
Investitionen	10.285,00	10.285,00
Personalkosten	361.674,00	361.674,00
Materialkosten	5.000,00	5.000,00
<b>Summe</b>	<b>471.198,00</b>	<b>471.198,00</b>

**Tabelle 16:** Ablaufplan der einzelnen Arbeitsetappen, quartalsgebunden

AE	Jahr Bezeichnung	2019		2020				2021			
		III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
<b>1</b>	<b>Softwareentwicklung</b>			M1			M2		M3		
1.1	Erstellung mathematisches Modell der Wasserbilanz										
1.2	Stabilitätsanalyse und -berechnung										
1.3	Codeentwicklung von Stabilitätsmodellen und Implementierung										
1.4	Implementierung der Unschärfemodellierung										
1.5	Entwicklung und Implementierung der GUI										
1.6	Testung der Alpha-Version										
<b>2</b>	<b>Kleinskalige Laborversuche</b>										
2.1	Geotechnische Charakterisierung von Mineralstoffgemischen										
2.2	Geochemische Charakterisierung von Mineralstoffgemischen										
2.3	2D-Gerinneversuch										

## 8 Referenzen

- Aigner (2004). Auswertung von Untersuchungen über den Einsatz einer Gummispundwand sowie einer Sickerleitung an einem durchströmten Modelldeich, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik Dresden, Technische Universität Dresden.
- ASTM INTERNATIONAL (2013a). Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by the Crumb Test. ASTM International, 2013a. D6572 – 13.
- ASTM INTERNATIONAL (2013b). Standard Test Methods for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test. ASTM International, 2013b. D4647/D4647M – 13.
- BAW-Merkblatt - Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD). Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe, Deutschland, 2011.
- BDZ (2002). Hochwasserschutz und zementgebundene Baustoffe – Hinweise für Planung und Ausführung / Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e. V., Köln; Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf.
- Blankenburg, R.; Holthaus, B.; Gräber, P.W. (2010). Ausweisung von Parameter- und Randbedingungsunsicherheiten in den Berechnungsergebnissen von Simulationsprogrammen – APIS: Schlussbericht Teil TU Dresden / Fachbereich Hydrowissenschaften. - Technische Universität Dresden.
- DIN 1054 - Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1. Deutsches Institut für Normung e.V.: Berlin, Deutschland, 2010.
- DIN 4017 - Baugrund – Berechnung des Grundbruchwiderstands von Flachgründungen. Deutsches Institut für Normung e.V.: Berlin, Deutschland, 2006.
- DIN 4084 - Baugrund – Geländebruchberechnungen. Deutsches Institut für Normung e.V.: Berlin, Deutschland, 2009.

- DIN 19700-10 - Stauanlagen – Teil 10: Gemeinsame Festlegungen. Deutsches Institut für Normung e.V.: Berlin, Deutschland, 2004.
- DIN 19700-12 - Stauanlagen – Teil 12: Hochwasserrückhaltebecken. Deutsches Institut für Normung e.V.: Berlin, Deutschland, 2004.
- DIN 19712 - Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern. Deutsches Institut für Normung e.V.: Berlin, Deutschland, 2013.
- Drabek, U. (2010). Anwendungsbezogene Aspekte der operationellen Durchflussvorhersage (Bd. 221). (I. f. o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Günter Blöschl, Hrsg.) Wien, Österreich: TU Wien
- DWA Merkblatt M 507-1 - Deiche an Fließgewässern, Teil 1: Planung, Bau und Betrieb. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, Deutschland, 2011.
- DWA-Merkblatt M 512-1 - Dichtungssysteme im Wasserbau, Teil 1: Erdbauwerke. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, Deutschland, 2012.
- EU-HWRM-RL (2007). Richtlinie 2007/60/EG des europäischen Parlaments und Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken.
- Civilserve GmbH (2021). GGU-Softwarelösungen für Umwelttechnik, Grundbau und Bodenmechanik. <https://www.ggu-software.com/>
- GeoStudio (2019). Heat and mass transfer modelling with GeoStudio - User manual. GeoSlope International Ltd., Calgary, Canada.
- Gräber, P.-W.; Blankenburg, R.; Kemmesies, O.; Krug, S. (2006). SiWaPro DSS-Beratungssystem zur Simulation von Prozessen der unterirdischen Zonen. [Buchverf.] Jochen Wittmann und Mike Müller. [Hrsg.] Mike Müller. Simulation in Umwelt-und Geowissenschaften. Leipzig: Shaker Verlag.
- Janczura, S. (2021). Steinbachtalsperre, Wann ein Damm bricht – ingenieure.de, <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/steinbachtalsperre-wann-bricht-ein-damm/>
- Kanoun, O., Tetyuev, A., Tränkler, H.-R. (2004). Bodenfeuchtemessung mittels Impedanz-spektroskopie (Soil Moisture Measurement with Impedance Spectroscopy). tm - Technisches Messen, Vol. 71, no. 9, 2004, pp. 475-485. <https://doi.org/10.1524/teme.71.9.475.42751>.
- KOSTRA-DWD (2010). Software KOSTRA-DWD 2010, Version 3-1, Koordinierte Starknieder-schlags-Regionalisierungs-Auswertungen. Deutscher Wetterdienst (DWD), Vertrieb Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH.
- Lu, N.; Wayllace, A.; Chen, P. (2019). The Slope Cube Module for HYDRUS (2D/3D): Simulating Slope Stress and Stability in Variably-Saturated Hillslopes, Hydrus Software Series 3.02.0290, PC-Progress.
- Lu, N.; Godt, J. W. (2013). Hillslope Hydrology and Stability. Cambridge University Press.
- Lu, N.; Kaya, M. (2013). A drying cake method for measuring suction stress characteristic curve, soil-water retention, and hydraulic conductivity function. Geotech. Test. J., 36, 1– 19. <https://doi.org/10.1520/GTJ20120097>.
- Lu, N.; Kaya, M. (2014). Power law for elastic moduli of unsaturated soil. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 140(1), 46–56. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000990](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000990).
- Maharaj, A., van Rooy, L., Paige-Green, P. (2015). Revised test protocols for the identification of dispersive soils. Journal of the South African Institution of Civil Engineering. 2015, Bde. 57(1), 31–37. <http://dx.doi.org/10.17159/2309-8775/2015/v57n1a3>.
- Moriasi, D.N.; Arnold, J.G.; Van Liew, M.W.; Bingner, R.L.; Harmel, R.D.; Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Am. Soc. Agric. Biol. Eng. 50, 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.

- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513–522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>.
- Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V. (1970). River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1—A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- Richards, L.A. (1931). Capillary Conduction of Liquids through Porous Mediums. *Journal of Applied Physics* 1(5), 318-333.
- Šejna, M.; Šimůnek, J.; van Genuchten, M.T. (2018). The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media; User Manual Version 3.01; PC-Progress: Riverside, CA, USA; Rio de Janeiro, Brazil; Utrecht, Netherlands; Prague, Czech Republic, 324 p.
- Šimůnek, J.; van Genuchten, M. Th.; Šejna, M. (2016). Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages, *Vadose Zone Journal*, 15(7), pp. 25. <https://doi/10.2136/vzj2016.04.0033>.
- Šimůnek, J.; van Genuchten, M.T.; Šejna, M. (2018). The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media; Technical Manual 3.0; PC-Progress: Riverside, CA, USA; Rio de Janeiro, Brazil; Utrecht, Netherlands; Prague, Czech Republic, 258 p.
- Schittkowski, Klaus. 2006. NLPQLP: A Fortran implementation of a sequential quadratic programming algorithm with non-monotone line search - user's guide. Bayreuth: University of Bayreuth, 2006.
- Tetyuev, A. (2009). Bodenartunabhängige Bodenfeuchtemessung mittels Impedanzspektroskopie. 1. Aufl. – München, Dr. Hut, 159 S., ISBN/ ISSN: 9783868532067.
- Van Genuchten, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.

## **9 Anlagen - Veröffentlichungen**

Blick-Lokalanzeiger-31-07-2019: 2,4 Millionen Euro für mehr Hochwasserschutz

Blick-Lokalanzeiger-16-01-2020: Wenn der Bach zum Strom wird

FH-DGGV Fachtagung 2021: Methode zur indirekten Bestimmung von Bodenparametern für die numerische Simulation von Deichen und Erddämmen

Deutsches Talsperrensymposium: Verbesserter Stabilitätsansatz bei Dämmen unter Einbeziehung der teilgesättigten Zone

In Vorbereitung: Method for indirect determination of soil parameters for numerical simulation of dikes and earth dams

## 2,4 Millionen Euro für mehr Hochwasserschutz

**AUFTAKT** Es wird an neuem Vorhersagesystem für Deichbrüche gearbeitet



Isabel Schulze vom M&S Umweltprojekt gehört zur Projektgruppe.

Foto: Karsten Repert

**Plauen.** Die Zahl der Überschwemmungen ist in Sachsen stark gestiegen. Im Vogtland traf es Ortschaften wie Weischlitz und Straßberg oder Städte wie Oelsnitz und Adorf, um nur einige zu nennen. In Plauen formierte sich am Montag eine Mannschaft von Wissenschaftlern. Diese wird unter Federführung der M&S Umweltprojekt GmbH ein Forschungsvorhaben vorantreiben, das den Menschen mehr Schutz vor dem Wasserdurchbruch bieten soll. Es geht konkret um die „Stabilitätserhöhung von Hochwasserschutzdämmen und Deiche“, lassen die Akteure wissen. Der Projektumfang beträgt rund 2,4 Millionen Euro für einen

Zeitraum von drei Jahren“, bestätigt Prof. Dr. Bernd Märtnier. Der M&S-Geschäftsführer hat in seinem Haus unter anderem die Mikrobiologin Isabel Schulze an die Projektspitze gestellt. Ziel ist die „Entwicklung eines Vorhersagesystems für Deichbrüche auf Basis experimenteller und mathematischer Modelle unter Berücksichtigung von Niederschlag und Vegetation bei sich ändernden Klimabedingungen sowie von umweltgerechten bautechnischen Lösungen zur Ertüchtigung vorhandener Dämme und Deiche“, lassen die Akteure wissen. Die versuchspraktische Bauausführung hat dabei das Un-

ternehmen WTU in Weischlitz übernommen, WTU-Kalkulator Wolfram Demuth betont: „Wir werden mit den Projektpartnern versuchen, die wissenschaftlichen Erkenntnisse bautechnisch zu nutzen, um besseren Hochwasserschutz zu erreichen.“ Begleitet wird das Projekt durch die TU Dresden und das Forschungsinstitut KSI. Damit wird ein größeres von der SAB gefördertes Forschungsprojekt nicht in Dresden, Leipzig oder Chemnitz, sondern in Plauen angesiedelt. Eingesetzt hatte sich dafür der Landtagsabgeordnete Frank Heidan (CDU), der zur Projektgruppe gehört. *kare*

# Wenn der Bach zum Strom wird

Hochwasserschutzmaßnahmen sind in Straßberg seit mehreren Jahren ein Thema. Seit 2005 sind bauliche Veränderungen in einer Konzeption vorgesehen. Umgesetzt wurde davon bisher – nichts.

**Straßberg** – Das große Wehr sowie die Weiße Elster unterliegen dem Verantwortungsbereich der Landestalsperrenverwaltung. Auch für das vergangene Jahr waren Baumaßnahmen angekündigt, doch Fortschritte blieben nach wie vor Fehlangeize. Nachdem der Plauener Ortsteil im Sommer 2013 massiv mit Hochwasser zu kämpfen hatte, nahm sich die Stadt Plauen des Problems an. Zwei Millionen Euro wurden und werden in Baumaßnahmen an der Possig investiert. Der größte Teil ist inzwischen abgeschlossen. Noch offene Baumaß-

nahmen sind inzwischen an Unternehmen vergeben und werden zeitnah umgesetzt. Fast überall, ob am Nußertweg, der Brücke am Zottnerweg, dem Weg ins Grüne oder an der Rehtränke, bestand Handlungsbedarf, auch an der Hauptstraße.

Dass Wasser sich immer einen Weg sucht, erlebten die Straßberger dann 2018 nochmals, als die Straßen diesmal aus anderer Richtung geflutet wurden. Kerstin Wolf, Dezernentin Bau/Umwelt der Stadtverwaltung, informierte in dieser Woche zur Ortschaftsratssitzung über den aktuellen Stand. „Ein wenig sind uns momentan noch die Hände gebunden, da unsere Zuständigkeit nur bei Rosenbach und Mühlgraben liegt und die Landestalsperrenverwaltung bisher keine Entscheidung über das große Wehr getroffen hat“, berichtete die Fachfrau. Der Fördermittelbescheid sei eingetroffen – doch ohne konkrete Berechnung auf welchen Pegel gebaut werden müsse, fließe auch

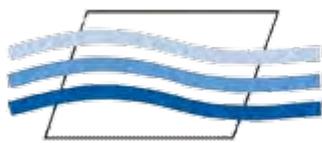
kein Geld. Nach wie vor gibt es Wolf zufolge zwei Möglichkeiten. Zum einen könnte man das Wehr belassen und müsste eine Fischaufstiegstreppe bauen oder man würde es abreißen und den Grundwasserstand um 2,34 Meter absenken. Die Entfernung sei laut Wolf nicht der

„Ein wenig sind uns momentan noch die Hände gebunden.“

**Kerstin Wolf**

Favorit der Stadt, da so kein Wasser mehr in den Teich fließen würde und man aus einer Feuchtwiese eine Trockenwiese machen würde. Auch hinsichtlich des Rosenbachs sei noch keine Entscheidung getroffen. Die Alternative zur einer festen Bauweise und der Erhöhung des Uferbereichs sei eine mobile Anlage. „Die mobile Version ist eher nicht unser Ansinnen, da dies viele Probleme von der Wartung bis zum problemlosen Einsatz bei Bedarf be-

deuten kann“, erklärt die Fachbereichsleiterin und spricht damit nicht nur im Sinne des Ortschaftsrates, sondern vor allem der Feuerwehr aus dem Herzen. „Wir haben uns bei der Messe solche mobilen Anlagen angeschaut. Das ist bei den entsprechenden Bedingungen super, die liegen bei uns hier jedoch nicht vor“, gibt Rico Gerstner, Chef der Freiwilligen Feuerwehr Straßberg zu bedenken. Die Straßberger Mühle will sich laut Ortschaftsrats zwischenzeitlich um eine eigene Lösung für den Notfall bemühen, da dort bei Hochwasser ein besonders hoher Schaden eingetreten war. Am Mühlgraben steht die Stadt jedoch quasi in den Startlöchern. 90.000 Euro sind dort eingeplant um Rohre zu verlegen, den Zugang zum Teich zu schaffen und damit das kleine Wehr zu schließen. Etwa zwei Monate soll das Bauvorhaben in Anspruch nehmen. Jedoch sei dies nur ein Teilbereich der eigentlichen Maßnahmen.



**FH-DGGV**  
 Fachsektion Hydrogeologie e.V.  
 in der DGGV (e.V.)



**FH-DGGV**  
 Fachsektion Hydrogeologie e.V.  
 in der DGGV (e.V.)

[Kontakt](#) | [Impressum](#) | [Datenschutz](#)

## Infos zur nächsten FH-DGGV Tagung

Die 28. Tagung der FH-DGGV findet vom 23.-26.03.2022 in Jena statt. Die Tagungshomepage ist inzwischen online und erreichbar über den Eintrag im Menü links oder den nachfolgenden Link. Neben Infos zur Tagung ist über die Tagungshomepage auch die Einreichung von Beiträgen sowie die Anmeldung möglich.

[>> TAGUNGSHOME PAGE JENA 2022](#)

## Tagungsarchiv

Über einige der bisher stattgefundenen Tagungen der FH-DGGV erhalten Sie auf den weiteren Seiten zusätzliche Informationen. Die bisherigen von der FH-DGGV veranstalteten Tagungen sowie die Themen sind:

Ort	Jahr	Thema
Leipzig	2020	Grundwasser und Flusseinzugsgebiete - Prozesse, Daten und Modelle
Bochum	2018	Grundwasser im Umfeld von Bergbau, Energie und urbanen Räumen
Karlsruhe	2016	Grundwasser – Mensch – Ökosysteme

## **Methode zur indirekten Bestimmung von Bodenparametern für die numerische Simulation von Deichen und Erddämmen**

Vorschlag Session 16: Freie Themen

**Autoren:** Fichtner, Thomas<sup>1</sup>; El Masri, Marwan<sup>1</sup>; Gräber, Peter-Wolfgang<sup>1</sup>; Blankenburg, Rene<sup>2</sup>

1 Technische Universität Dresden, Institut für Grundwasserwirtschaft, Bergstraße 66, 01069 Dresden

2 Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH, Nonnenstraße 9, 04229 Leipzig

Einer der wichtigsten Schritte bei der numerischen Simulation eines hydrogeologischen Systems ist die genaue Festlegung von Anfangs- und Randbedingungen des aufzubauenden Modells. Je besser diese das gesamte Modell charakterisieren, desto effizienter erfolgt die Berechnung und genauer ist das Simulationsergebnis. Eine große Bedeutung kommt dabei den hydraulischen Eigenschaften von Böden zu. Im Falle der ungesättigten Bodenzone werden diese durch die Saugspannungs-Sättigungskurve, insbesondere die Beziehungen zwischen volumetrischem Wassergehalt und Matrixpotenzial sowie zwischen Saugspannung und ungesättigter hydraulischer Leitfähigkeit, beschrieben. Eine Parametrisierung der ermittelten Saugspannungs-Sättigungskurve erfolgt über empirische Modelle, wie z.B. nach van Genuchten.

Standardmäßig werden Messgeräte wie das HYPROP-System verwendet, um die Saugspannungs-Sättigungskurve des Bodens zu bestimmen. Die so ermittelten Retentionsparameter geben jedoch nur punktuell Auskunft über die hydraulischen Eigenschaften des ungesättigten Bodens. Insbesondere bei Labor- und Felduntersuchungen treten häufig Inhomogenitäten in dem ungesättigten Bodenkörper auf, die durch die Variabilität oder die unterschiedliche Verdichtung des Bodens bedingt sind. Daher führt die punktuelle Bestimmung der Saugspannungs-Sättigungskurve häufig zu einer unzureichenden Charakterisierung des Bodens bzw. zu einer Über- oder Unterschätzung der Parameter, die das Verhältnis zwischen Matrixpotenzial und Wassergehalt beschreiben. Diese Parameterunsicherheit führt zunächst zu einer schlechteren Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Daten und in der Folge zu einem höheren Kalibrierungsaufwand.

Günstiger ist es daher, diese Bodenparameter direkt aus dem realen Bodenkörper zu identifizieren und mögliche Unsicherheiten durch die Verwendung globaler Informationen über die Bodenparameter des Systems zu vermeiden. Aus diesem Grund wurde im Rahmen eines Experimentes zur Durchströmung von Deichen anhand von zwei unterschiedlichen Bodenmaterialien untersucht, wie sich punktuell und global ermittelte Bodenparameter unterscheiden und wie diese die Simulation des Systems beeinflussen.

Beim Vergleich der Simulationsergebnisse der numerischen Modelle konnte eine bessere Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Wassergehalten und Druckhöhen bei Verwendung der identifizierten Bodenparameter aus dem simulierten System beobachtet werden. Bei einer anschließenden Kalibrierung des Modells konnte für diesen Fall auch eine höhere rechnerische Effizienz sowie eine höhere Übereinstimmung zwischen Simulation und Messwerten nachgewiesen werden.



**Deutsches  
Talsperren  
Komitee e.V.**  
German COLD

**19. Deutsches  
Talsperrensymposium**  
Mit Talsperren nachhaltig  
in die Zukunft

**26.–28. April 2022**  
Inselhalle Lindau  
[www.talsperrensymposium.de](http://www.talsperrensymposium.de)



conventus

© Hainberg, Luftbild, Hajo Diätz

Dirk Fleischer, Ulf Helbig, Thomas Fichtner, Rene Blankenburg, Marwan El Masri, Peter-Wolfgang Gräber

## **Verbesserter Stabilitätsansatz bei Dämmen unter Einbeziehung der teilgesättigten Zone**

### **Vorspann**

Die Beurteilung wasserbaulicher Erdbauwerke lässt teilgesättigte, oft instationäre Sickerprozesse mit erheblichem Einfluss meist außer Acht und bedarf einer methodischen Erweiterung. Zeitgleich verstärken meteorologische Extremereignisse die damit verbundenen Unsicherheiten, z. B. aus Trockenheit und Starkregen. Ein Verbundprojekt zur Entwicklung von Vorhersagesystemen für Deichversagen adressiert diese Prozesse auf Basis experimenteller sowie hier vorgestellter mathematischer Modelle.

### **Advanced stability analysis for dykes by implementation of vadose geohydraulic processes**

### **Abstract**

The assessment of hydraulic engineering structures based on soil material is incomplete due to vadose and often transient seepage processes that have a significant effect and requires a methodical upgrade. At the same time, extreme meteorological events are amplifying the uncertainties associated with these processes that arise from long periods of draughts or heavy rainfall. A joint research project to develop a prediction system for dam and levee failures deals with these effects. Their influence on geohydraulics and soil mechanics is analyzed using experimental and mathematical models. This article presents the combination and expansion of a FEM-software for holistic geohydraulics with an independent, Open-Source stability module.

### **Kompakt**

- Unsicherheiten teilgesättigter, instationärer Sickerprozesse in wasserbaulichen Erdbauwerken bedürfen der Integration in die Stabilitätsbetrachtung
- Ein Verbundvorhaben adressiert diese Prozesse mittels experimenteller und mathematischer Modelle zur Entwicklung ganzheitlicher Stabilitätsprognosen

# 1 Einführung

Staudämme oder Deiche als Anlagen des präventiven Hochwasserschutzes sind oft als gegliederte Erdbauwerke ausgeführt und im Gegensatz zu Ingenieurbauwerken nicht für begrenzte Nutzungsdauern ausgelegt. Sie müssen ihre Funktion daher für sehr lange Zeiträume erfüllen. Hydraulische Gradienten, hervorgerufen durch Einstau, Hochwasser oder Niederschlag verursachen eine Durchsickerung, d. h. eine Teil- bis Vollsättigung des Porenraums. Evaporation und Drainage führen wiederum zur Entwässerung des Erdkörpers. Der Sättigungsgrad beeinflusst maßgeblich den Versagenswiderstand eines solchen Bauwerks. Aktuell finden Prozesse innerhalb der teilgesättigten Zone weder bilanziell noch stabilitätstechnisch eine maßgebliche Berücksichtigung.

Untersuchungen am Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden (IWD) zeigten, dass es auch bei Wassertransport im teilgesättigten Bereich (oberhalb der Sickerlinie) v. a. luftseitig zu starken Böschungsinstabilitäten kommen kann. Der derzeitige Stand der Technik berücksichtigt derartige Stabilitätsprobleme in wasserbaulichen Erdbauwerken nicht oder nur unzureichend. Die zurzeit national und international angewendeten klassischen ingenieurtechnische Verfahren bei der Bewertung der Standsicherheit und deren Gewährleistung bedürfen daher einer Überarbeitung.

Der fortschreitende Klimawandel mit lokal stark differenzierten, jedoch in Summe deutlicher Häufung von meteorologischen Extremereignissen, erfordert umso dringlicher eine kritischere, vorausschauende Stabilitätsbetrachtung von Deichen und Dämmen. Aber auch die zunehmende Akkumulation von zu schützenden Werten erhöht das Schadensrisiko. Die sättigungsabhängigen, teils dynamischen, geotechnischen Eigenschaften der Baumaterialien, geprägt durch Einstau-, Niederschlags-, Evaporations- und oberseitigen Vegetationszustand spielen bei der Ermittlung von Bruchkriterien eine große Rolle.

Ein FuE-Verbundprojekt (Laufzeit: 06/2019 – 12/2021) zielte daher auf die Entwicklung eines praxistauglichen Vorhersagesystems für Damm- und Deichversagen unter Berücksichtigung von variablen Einstau-, Niederschlags- und Vegetationszuständen ab. Dabei wird die Gefährdung wasserbaulicher Erddämme auf Basis experimenteller Untersuchungen und mathematischer Modelle prognostiziert.

## 2 Methodik

Aufgrund instationärer Sickerwasserverhältnisse wird die Geohydraulik im Dammkörper mittels der FEM-Software *PCSiWaPro* numerisch modelliert. Sie berücksichtigt neben der Vegetation auch zeitabhängige hydraulische und meteorologische Verhältnisse (Einstau, Niederschlagsituation) im teilgesättigten Bereich. Im nächsten Schritt werden die

geohydraulische und andere Bodenparameter an ein Stabilitätsanalysemodul *PyStana-D* übergeben. Die verwendeten Berechnungsansätze basieren auf dem Verfahren nach *Bishop* und wurden erweitert, um die Manipulation sättigungsabhängiger Stabilitätsparameter und realistische Bruchkörper zu ermöglichen. Die mathematischen Modelle als Komponenten eines computergestützten Vorhersagesystems werden anhand von mittel- bis realmaßstäblichen Laboruntersuchungen und auch Feldmonitoring in der Region Vogtland (Sachsen) validiert und verifiziert. Innovative Messmethoden, wie Bilderkennung, Tiefenkameras und impedimetrische Sensoren kommen hierbei zum Einsatz [1], [2]. Für die Berücksichtigung von Unsicherheiten der verschiedenen Parameter, Zustandsgrößen, Randbedingungen und Strukturen werden moderne Methoden zur Unschärfemodellierung (Fuzzy-Logik) eingesetzt.

## 2.1 Berechnungsgrundlagen der FEM-Anwendung PCSiWaPro

Im Simulationsprogramm *PCSiWaPro* [3] wird sowohl für den Wasserhaushalt als auch für die Strömung die Richards-Gleichung (Gl. 1) mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode für 2D-Probleme in vertikaler Ebene oder rotationssymmetrisch gelöst [4]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} [K (K_{ij}^A \frac{\partial H}{\partial x_j} + K_{iz}^A)] - S \quad (1)$$

Dabei stellen  $K_{ij}^A$  die Komponenten des dimensionslosen Tensors der Anisotropie von  $K$ ,  $x_i$  die Raumkoordinaten,  $H$  die gesamte hydraulische Förderhöhe,  $S$  den angewandten Grenzfluss-Quellen/Senken-Term und  $\theta$  den Wassergehalt dar. Verschiedene Retentionsmodelle (z. B. Mualem-van Genuchten) zur Charakterisierung der Bodenmaterialien sind wählbar [5], [6]. Die Beziehung zwischen Wassergehalt und Matrixpotential wird am besten mittels Gl. (2) auf Basis des *Van Genuchten-Luckner-Modells* [7] beschrieben.

$$\theta = \theta_r + \frac{\Phi - \theta_r + \theta_{r,l}}{[1 + (\alpha \cdot h_c)^n]^{1-\frac{1}{n}}} \quad (2)$$

Dabei definieren  $\theta_r$  den Restwassergehalt,  $\Phi$  die Bodenporosität,  $\theta_{r,l}$  den Restluftgehalt sowie  $\alpha$  und  $n$  empirische *Van-Genuchten*-Parameter. Die Größe  $h_c$  charakterisiert die Druckhöhendifferenz zwischen benetzender und nicht benetzender Phase. Somit kann die Sickerströmung auch in der teilgesättigten Zone oberhalb der Sickerlinie, einschließlich z.B. eines Kapillaranstiegs, betrachtet werden. Außerdem lassen sich alternierende zeitabhängige atmosphärische Randbedingungen definieren, womit z. B. die Einbeziehung von Niederschlägen auf temporär eingestauten Flächen (z.B. instationäres Hochwasserereignis) erlaubt wird.

## 2.2 Stabilitätsmodelle und erweiterter Ansatz zur teilgesättigten Zone

Etablierte Software-Lösungen zur Stabilitätsanalyse sind aufgrund folgender Nachteile im Projekt nur eingeschränkt nutzbar:

- geringe Automatisierbarkeit (z. B. wegen manueller Eingabe)
- keine Schnittstelle zu *PCSiWaPro*, keine instationäre Stabilitätsbetrachtung
- Berechnung berücksichtigt nur ungesättigten / vollgesättigten Porenraum
- Urheberrechtskonflikte, da kaum Open-Source-Programme
- Implementierung eigener Ansätze, z. B. Manipulation sättigungsabhängiger Parameter nur mit direktem Codezugriff möglich

Daher wurde ein eigenständiger Code "*PyStana-D*" (basierend auf *Python 3.7*) zur Suche wahrscheinlicher Bruchkörper über die Methode von Bishop (LEM-Verfahren) entwickelt und um den Ansatz zur Berücksichtigung des passiven Erddruckwiderstands bei der Gleitflächenneigung erweitert (DIN 4048). Am Modelldeich im Hubert-Engels-Labor des IWD besteht die Möglichkeit zur praxisnahen Validierung [1].

Die Einbindung und Steuerung der Stabilitätsanalyse mit *PyStana-D* erfolgt mittels der FEM-Anwendung *PCSiWaPro*. Die Daten werden dabei über eine Textdatei kommuniziert und im Ergebnis Bruchkörper und Ausnutzungsgrade visualisiert (**Bild 1**, linke Seite). *PyStana-D* gliedert sich in vier wesentliche Arbeitsschritte (Einlesen, Aufbereitung der Eingangswerte, Bruchkörperberechnung und Visualisierung), mit den jeweiligen Programmfunktionen (**Bild 1**, rechte Seite). Unrealistische Gleitflächenwinkel  $\vartheta_i$  auf der Widerstandsseite (vgl. passiver Erddruck), werden durch die Bedingung  $\vartheta_i = 45^\circ - \varphi/2$  nach DIN 4048 unterbunden und in Abhängigkeit des Reibungswinkels  $\varphi$  abgeflacht. Dabei entstehen zusätzlich Momente und Normalkräfte an den Lamellen, die in das Gleichgewicht der Kräfte (Gl. (3), *Bishop*) einbezogen werden müssen.

$$\mu = \frac{r \sum_i^n T_i}{r \sum_i^n R_i(\mu)} \rightarrow \mu = \frac{r \sum_i^n T_i + \sum_i^n MTP_i}{r \sum_i^n R_i(\mu) + \sum_i^n MRP_i} \quad (3)$$

**Bild 2** demonstriert die resultierende Veränderung der Kräfte und Hebelarme auf die Lamellen. Zusätzlich wirken dabei treibende ( $MTP_i$ ) und stabilisierende Momente ( $MRP_i$ ).

## 2.3 Unschärfemodellierung mittels Fuzzy-Logik

Um Unsicherheiten der Eingangsparameter, Zustandsgrößen sowie der Randbedingungen und Strukturen des Modells zu berücksichtigen und darzustellen, verfügt *PCSiWaPro* über die Unschärfemodellierung mittels der Fuzzy-Logik-Methode [8]. Über die  $\alpha$ -Level-Zuordnung von Parametern lässt sich der Grad der Unschärfe einzelner Parameter (bzw.

Randbedingungswerte) nutzerseitig über ein Dialogfeld definieren (**Bild 3**, rechts). Auf diese Weise können geschätzte Eingangsdaten, die höheren Unsicherheiten unterliegen, differenzierter behandelt werden als gemessene Eingangsdaten meist höherer Genauigkeit. Die Unsicherheiten in den bodenhydraulischen Parametern wirken sich sehr sensitiv auf die Zielfunktion und somit das Ergebnis aus.

Die Anwendung der Fuzzy-Analyse-Theorie, übertragbar auf die Intervallarithmetik, ist im Flussdiagramm in **Bild 3** dargestellt. Hauptanwendungen der Fuzzy-Logik-Theorie in *PCSiWaPro* sind:

- Extremwertsuche einer Funktion (z.B. Wassergehalt, Druckhöhe) unter vorgegebenen Intervallen der Eingangsparameter
- Optimierung nichtlinearer, untersuchter Prozesse (z.B. Strömung aber auch Stofftransport) als auch der Parameterfunktionen (Rückhaltefunktion)

## **3 Ergebnisse**

### **3.1 Mathematische Modellierung der instationären Sickerwasserverhältnisse**

Durch kleinmaßstäbliche Laborversuche wurde anhand sandiger Bodenmaterialien der Einfluss variierender Wassergehalte in der teilgesättigten Deichzone auf die Deichstabilität sowie Erosionserscheinungen bei Hochwasser- und Niederschlagsereignissen untersucht. Ausgangswerte für die Modellierung bilden experimentell gewonnene Materialparameter für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, den Rest- und Sättigungswassergehalt sowie die Formparameter der Mualem-van Genuchten-Retentionsfunktion.

Für die ermittelten Bodenparameter wird die Wasserausbreitung im simulierten Modell deutlich überschätzt (d. h. simulierter Wasserstand ist höher als physikalisch gemessener). Außerdem verzögert sich die volle Ausbildung der Sickerlinie, d. h. die Permeabilität ist höher als im physikalischen Modell. Auch ist die Übereinstimmung mit den Wassergehaltsmessungen für die Anfangsparameter nicht ausreichend. Es wird angenommen, dass bei der durch *HYPROP*-Sonden ermittelten Bodenparameter Unsicherheiten auftreten, da es sich um räumlich lokale Stichproben und nicht um eine räumlich globale Bestimmung handelt. Die Kalibrierung erfordert daher eine Anpassung der Materialparameter mit Hilfe der Fuzzy-Logik-Methode.

### **3.2 Stabilitätsmodelle und erweiterter Ansatz zur teilgesättigten Zone**

Der LEM-Ansatz nach *Bishop* ist erfolgreich implementiert und mit *PCSiWaPro* kombiniert worden, wodurch die Einbeziehung einer hochaufgelösten Geohydraulik in die Berechnung der Ausnutzungsgrade und deren Visualisierung ermöglicht wurde [1]. Der Python-Code ist

flexibel hinsichtlich der Böschungsgeometrie, eingebauter Materialien (Erdstoffe) und des Untergrunds. Die Parameter lassen sich in Abhängigkeit der Sättigung manipulieren (z. B. Bodenwichte) und eine große Anzahl an Bruchkörpern kann schnell berechnet werden (500.000 Gleitkreise < 1 h Rechenzeit). Das Modul lässt sich somit nicht nur mit *PCSiWaPro* sondern auch in Kombination mit anderen Programmen einsetzen, ggf. nach geringer Anpassung der Eingabe- und Ausgabealgorithmen, z. B. im Rahmen eines Vorhersagesystems für Deichbrüche. Die Laborversuche am Modelldeich bestätigten die errechneten Ergebnisse.

### **3.3 Unschärfemodellierung mittels Fuzzy-Logik**

Zur Aufwertung des numerischen Modells erfolgte mittels *Marquardt-Levenberg-Algorithmus* [9] eine Parameteroptimierung in einem vorgegebenen Wertebereich. Die Parameteridentifikationsfunktion arbeitet dabei auf der Grundlage einer inversen Anpassung der hydraulischen Parameter des homogenen Materials. Das Ergebnis der Parameteroptimierung zeigt eine gute Korrelationsbeziehung zwischen den freien Bodenparametern. Es wird eine 80%ige Korrelation zwischen den ausgewählten Bodenparametern mit einem Konfidenzintervall von  $\pm 1 \cdot 10^{-2}$  beobachtet.

Mit den angepassten Materialparametern im numerischen Modell konnte eine gute Übereinstimmung für die Ausbildung der Sickerlinie mit dem physikalischen Modell erreicht werden (**Bild 4**). Die simulierten Wassergehalte an den Messpunkten weichen etwas stärker von den gemessenen Daten ab, und auch mit weiteren Anpassungen können keine besseren Ergebnisse erzielt werden. Nach einer Optimierung der Materialparameter sollten die erstellten Modelle zur Versuchsüberwachung bzw. -steuerung und als Prognoseinstrument an weiteren Szenarien validiert werden.

## **Autoren**

Dipl.-Ing. Dirk Fleischer (dirk.fleischer1@tu-dresden.de)

Dr.-Ing. Ulf Helbig (ulf.helbig@tu-dresden.de)

Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, TU Dresden

D-01062 Dresden

Dipl.-Ing. Thomas Fichtner (thomas.fichtner@tu-dresden.de)

Dipl.-Ing. Rene Blankenburg (rene.blankenburg@tu-dresden.de)

M.Sc. Marwan El Masri (marwan.el\_masri@tu-dresden.de)

Prof. Dr.-Ing. Peter-Wolfgang Gräber (Peter-Wolfgang.Graeber@tu-dresden.de)

Institut für Grundwasserwirtschaft, TU Dresden

D-01062 Dresden

## Literatur

- [1] **Fleischer, D.; Helbig, U.; Stamm, J.:** Hybrid Systems in Modelling of Flood Protection Embankments Using a Real-Scale Experimental Set-Up in the Hydraulic Engineering Laboratory of TU Dresden. In: CIGOS 2021, Emerging Technologies and Applications for Green Infrastructure (2022). [https://doi.org/10.1007/978-981-16-7160-9\\_30](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7160-9_30).
- [2] **Fichtner, W. et al.:** Impedimetrische Sensoren zur Überwachung von Deichbauwerken. In: 26. Interdisziplinäre Wissenschaftliche Konferenz Mittweida (2021). <https://doi.org/10.48446/opus-12301>.
- [3] **Gräber, P.-W. et al.:** SiWaPro DSS-Beratungssystem zur Simulation von Prozessen der unterirdischen Zonen. [Buchverf.] Jochen Wittmann und Mike Müller. [Hrsg.] Mike Müller. Simulation in Umwelt-und Geowissenschaften. Leipzig: Shaker Verlag (2006).
- [4] **Richards, L.A.:** Capillary conduction of liquids through porous mediums. J. Appl. Phys. 1931, 1(5), 318–333, <https://doi.org/10.1063/1.1745010>.
- [5] **Mualem, Y.:** A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 1976, 12(3), 513-522, <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>.
- [6] **Van Genuchten, M. Th.:** A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 1980, 44, 892-898, <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.
- [7] **Luckner, L., Van Genuchten M. Th., Neilsen, D.R.:** A consistent set of parametric models for the flow of water and air as immiscible fluids in the subsurface. Water Resourc (1989). Res. 25:2187–218.
- [8] **Blankenburg, R.; Holthaus, B.; Gräber, P.W.:** Ausweisung von Parameter- und Randbedingungsunsicherheiten in den Berechnungsergebnissen von Simulationsprogrammen – APIS: Schlussbericht Teil TU Dresden / Fachbereich Hydrowissenschaften. - Technische Universität Dresden (2010).
- [9] **Marquardt, D. W.:** An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, SIAM J. Appl., Math. (1963), 11, 431-441.

## **Verzeichnis der Bildunterschriften und Tabellenüberschriften**

Bild 1: Prozessabläufe im Zusammenspiel von PCSiWaPro und PyStana-D © *Fleischer*

Bild 2: Einfluss des passiven Erddrucks (DIN 4048) auf die Bruchkörperberechnung © *Fleischer*

Bild 3: Ablaufschema der Fuzzy Analyse und Dialogfeld zur Eingabe der gewählten unteren und oberen Grenzwerte für die bodenhydraulischen Parameter © *Blankenburg*

Bild 4: Vergleich von experimentell gemessenen und simulierten Parametern (Druckhöhen und Wassergehalte) an vier Beobachtungspunkten nach Anpassung der Bodenparameter © *Fichtner*

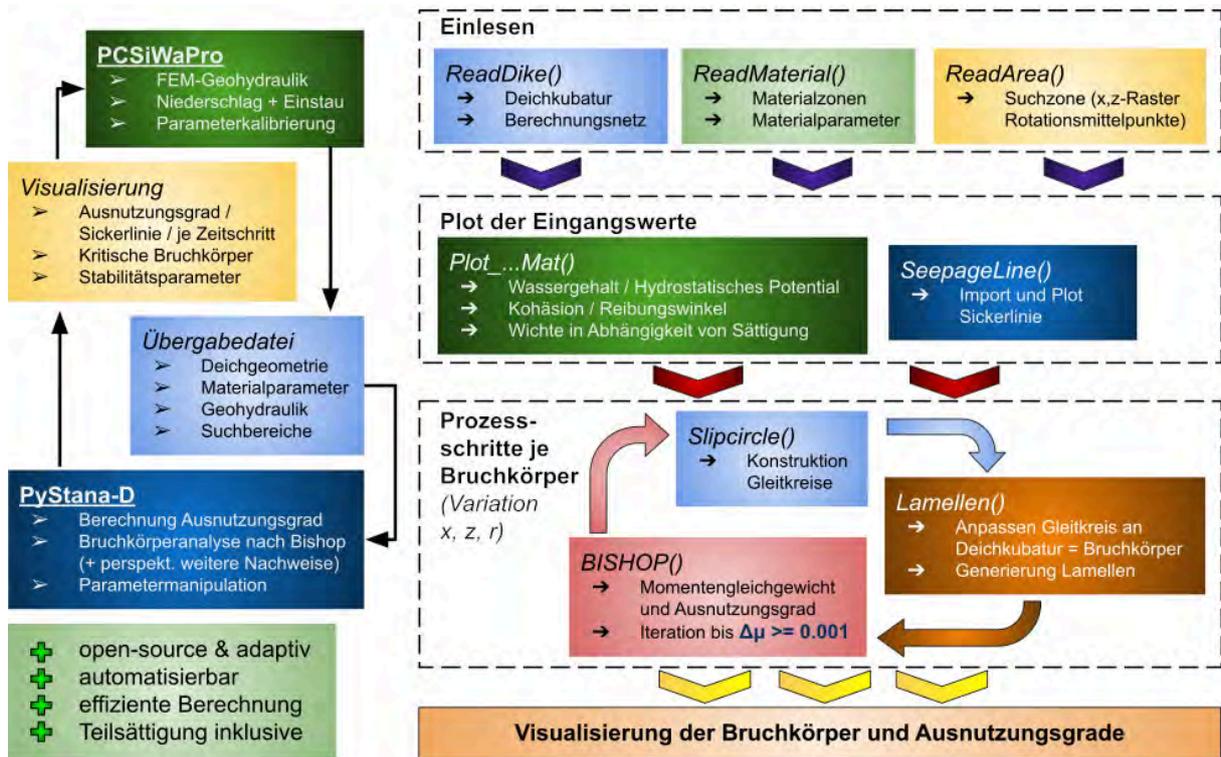


Bild 1: Prozessabläufe im Zusammenspiel von PCSiWaPro und PyStana-D © Fleischer

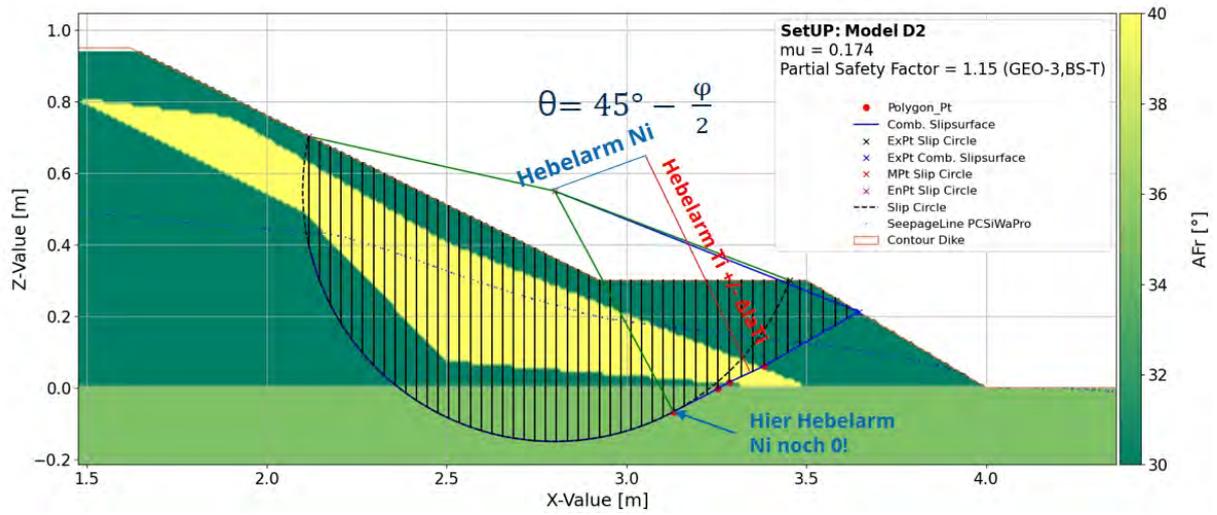


Bild 2: Einfluss des passiven Erddrucks (DIN 4048) auf die Bruchkörperberechnung © Fleischer

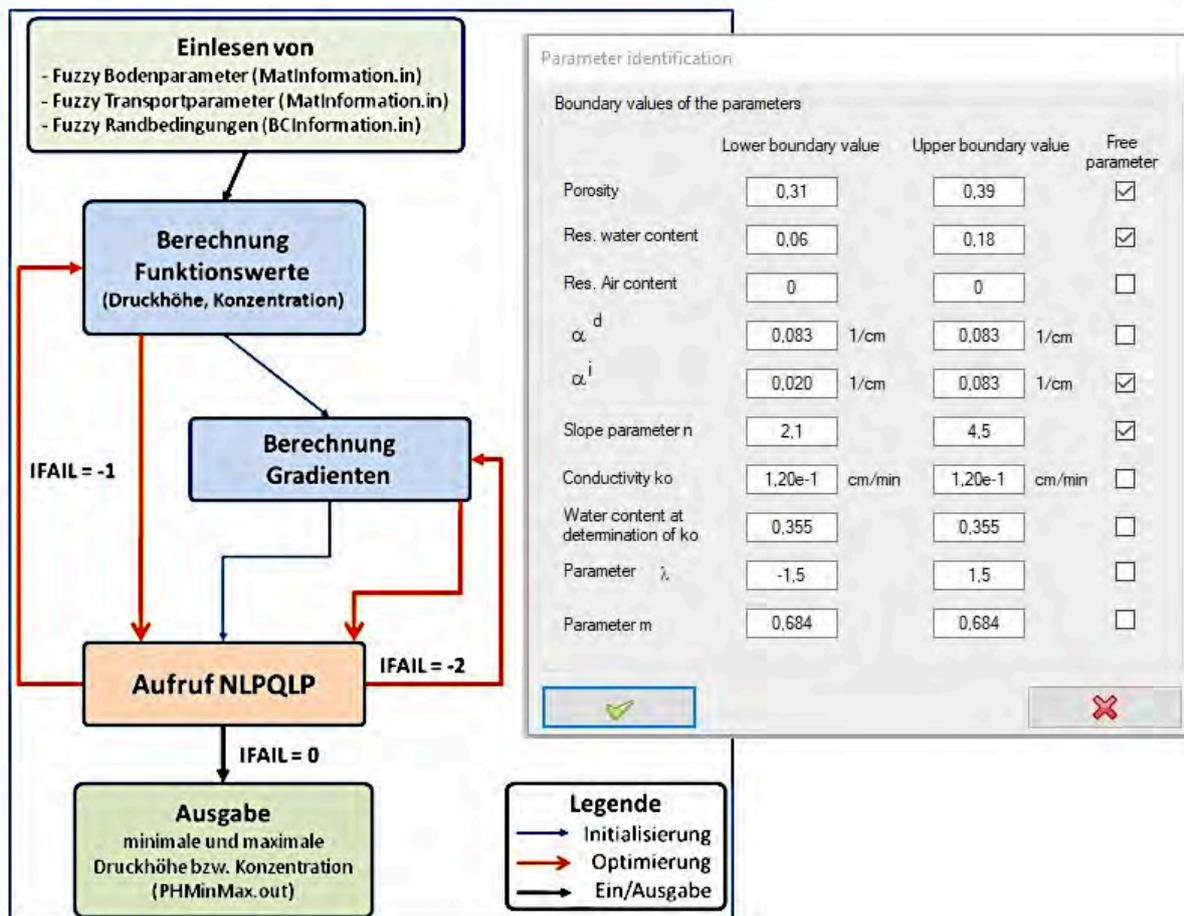


Bild 3: Ablaufschema der Fuzzy Analyse und Dialogfeld zur Eingabe der gewählten unteren und oberen Grenzwerte für die bodenhydraulischen Parameter © Blankenburg

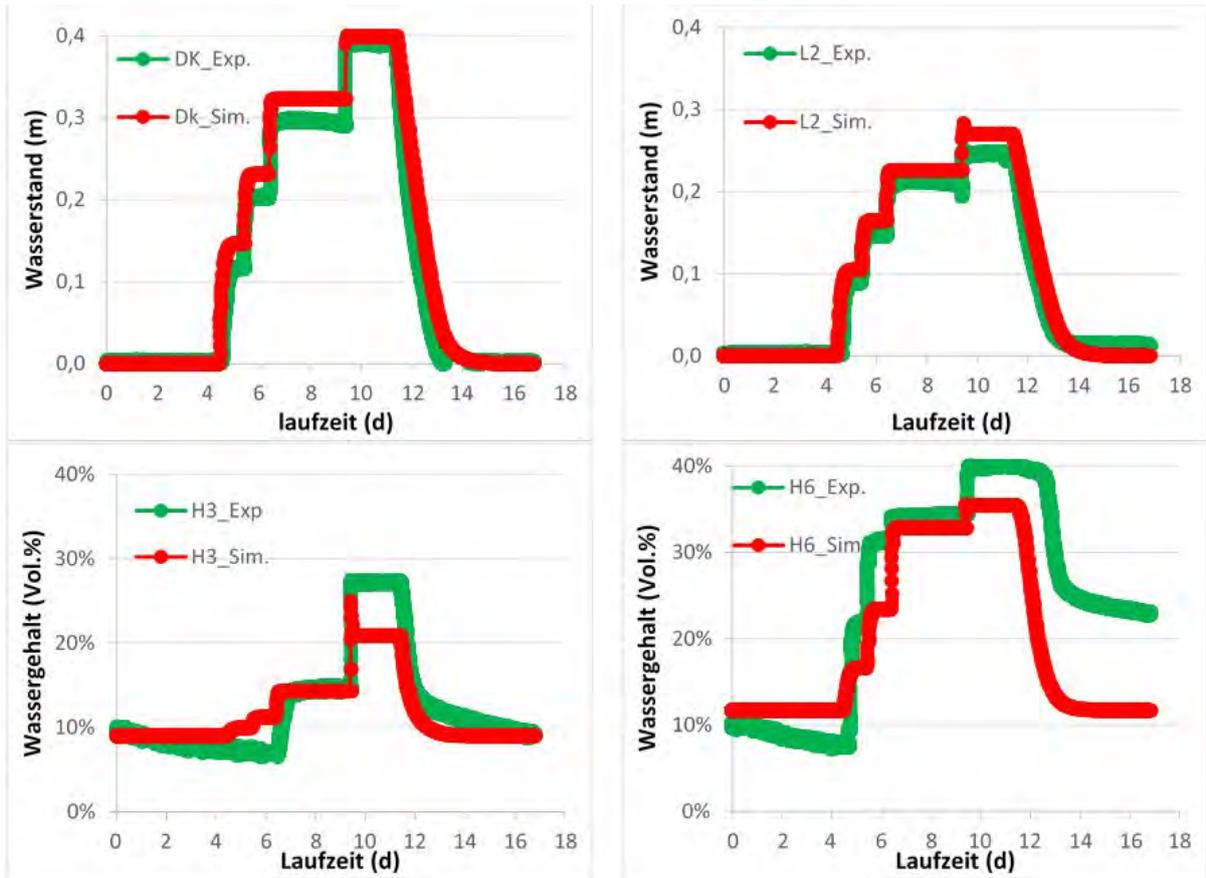


Bild 4: Vergleich von experimentell gemessenen und simulierten Parametern (Druckhöhen und Wassergehalte) an vier Beobachtungspunkten nach Anpassung der Bodenparameter © Fichtner

# Method for indirect determination of soil parameters for numerical simulation of dikes and earth dams.

Fichtner, Thomas<sup>1\*</sup>; El Masri, Marwan<sup>1</sup>; Dilshad, Ghilman<sup>1</sup>; Gräber, Peter-Wolfgang<sup>1</sup>; Blankenburg, Rene<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden, Institute of Groundwater Management, Dresden, Germany

<sup>2</sup> Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH, Leipzig, Germany

\*Correspondence: [thomas.fichtner@tu-dresden.de](mailto:thomas.fichtner@tu-dresden.de), Tel.: +49 351 463 42560

## Abstract

One of the most important steps in the numerical simulation of a hydrogeological system is the precise definition of initial and boundary conditions of the model to be simulated. The better these are characterized, the more efficient the calculation and the more accurate are the simulation result. The hydraulic properties of soils are of great importance, in the case of the unsaturated soil zone. These are described by the soil water retention curve, in particular the relationships between volumetric water content and matric potential, and between suction stress and unsaturated hydraulic conductivity. A parameterization of the determined soil water retention curve is carried out via empirical models, such as according to van Genuchten.

Standard measuring devices such as the HYPROP system are used to determine the soil water retention curve of the soil. However, the retention parameters determined in this way provide only selective information about the hydraulic properties of the unsaturated soil. Especially in laboratory and field investigations, inhomogeneity's often occur in the unsaturated soil body due to variability or different compaction of the soil. Therefore, the punctual determination of the soil water retention curve often leads to an inadequate characterization of the soil or to an over- or underestimation of the parameters describing the relationship between matrix potential and water content. This parameter uncertainty initially leads to a poorer agreement between measured and simulated data and subsequently to a higher calibration effort.

Therefore, it is more favorable to identify these soil parameters directly from the real soil body and to avoid possible uncertainties by using global information about the soil parameters of the system. For this reason, an experiment on the flow through dikes was conducted using two different soil materials to investigate how soil parameters determined punctual and global differ and how they affect the simulation results of the system.

When comparing the simulation results of the numerical models, a better agreement of measured and simulated water contents was observed by using the identified global soil parameters. A subsequent calibration of the model also demonstrated higher computational effort for this case to reach a good fit between simulation and measured values.

**Keywords:** soil water retention curve, unsaturated soil zone, dike experiment, numerical simulation, parameter uncertainty

## Introduction

The unsaturated soil zone (vadose zone) refers to the area between the land surface and the groundwater table, within which the water content is lower than at full saturation, and the pressure is lower than atmospheric pressure (Stephens et al., 1996). This region of the soil is of great importance both for the vertical transport of water in the course of groundwater recharge or the saturation of dikes, and for the retention of substances in the course of adsorption and degradation processes (Matlan et al., 2014).

The hydraulic properties of unsaturated soil, specifically the relationships between volumetric water content and matric potential and between tension and unsaturated hydraulic conductivity, can be described by soil hydraulic characteristic curves such as the soil water retention curve (SWRC) respectively the pF curve (Plate

45 and Zehe, 2008). The relationship between soil water tension and soil moisture is characteristic of the pore size  
46 distribution and is a crucial tool in simulating the water flow in the vadose zone as it contains important  
47 information related to the water that can be held in the pores.

48 The determination of the SWRC can be done by different methods in laboratory and field scale. The most  
49 commonly used tests are the evaporation method (saturated soil samples are drained by evaporation, ample  
50 weight and matrix potential are recorded (Peters and Durner (2008), Schindler and Müller (2006), Wind (1966)),  
51 the overpressure method (a positive pressure is applied to the air phase compared to the atmospheric water  
52 pressure, the soil samples are dewatered (Delage & Cui, 2008), dew point method (determination of water  
53 potential by equilibrating water phase in the soil sample and vapor pressure in the air (Maček et al., 2013) and  
54 suction plate method (saturated soil samples placed on porous plates are dewatered to a certain negative  
55 pressure by means of hanging water column (Osinski et al., 2016).

56 A parameterization of the determined SWRC is performed using empirical models. For example, a well-  
57 known model for parameterizing in sandy soils is according to Brooks and Corey (Brooks and Corey, 1964).  
58 However, the most widely used empirical-statistical approach for determining retention parameters is that of van  
59 Genuchten (Van Genuchten (1980), Abkenar et al. (2019)) according to the following equation:

60

$$61 \quad \theta(\psi) = \theta_r + \frac{(\theta_s + \theta_r)}{[1 + (\alpha * \psi)^n]^m} \quad \text{(eq. 1)}$$

62

63  $\theta(\psi)$  = volumetric water content depending on tension ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )

64  $\psi$  = tension (m)

65  $\theta_r$  = residual water content ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )

66  $\theta_s$  = saturated water content ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )

67  $n$  = van Genuchten shape parameter, measure of pore size distribution (-)

68  $\alpha$  = van Genuchten shape parameter, air entry parameter ( $\text{m}^{-1}$ )

69  $m$  = transformation parameter (-)

70

71 The parameters determined on the basis of the SWRC are the basis for any calculations of water  
72 movements in the unsaturated soil zone. For example, these parameters are the starting point for numerical  
73 simulations of the time variable water content and matric potential in the vadose zone (Ket et al., 2018). However,  
74 the performance of the numerical simulations relies on the accuracy of the information from hydrological  
75 parameters. The better these are characterized, the more efficient the calculation and the more accurate the  
76 simulation result.

77 However, the determined SWRC often provides only punctual information about the hydraulic properties of  
78 the unsaturated soil. Especially in laboratory and field investigations on a larger scale, inhomogeneity's over the  
79 complete unsaturated soil body are often encountered due to the variability of soil pore structure. This  
80 inhomogeneity's are more pronounced in soils with higher content of fine particles (Iiyama, 2016).

81 Therefore, the punctual determination of the soil water retention curves often leads to an over- or  
82 underestimation of the parameters describing the matric potential - water content relationship. Since these  
83 parameters are often the starting point for numerical simulations, this parameter uncertainty leads initially to  
84 worse fit between measured and simulated data and following to greater effort for calibration (McNamee, 2016).

85 Model made on the basis of van Genuchten and Mualem provides the SWRC with less effort and  
86 comprehensively van Genuchten model has confirmed its superiority for estimating the SWRC (Abkenar et al.,

87 2019) over other methods time and time again in miscellaneous research works. Numerical solutions and models  
88 nowadays are much more elegant than before, but their fate strongly relies on the accuracy of the information  
89 from hydrological parameters. Finding a method to improve the parameters suggested in the van Genuchten will  
90 eventually lead towards a better fit for the model.

91 Therefore, it is more optimal to obtain these input parameters directly from the system to be simulated and  
92 to overcome this issue by using more global information about the soil parameters. For this reason, an  
93 experiment on the flow through dikes was run to show how laboratory and experimentally determined input  
94 parameters, characterizing soil, differ and how they influence the simulation. The following questions should be  
95 answered by the results of this investigation:

- 96 - How big is the variance between the hydraulic soil parameters determined by punctual and global  
97 measurement characterizing soil water retention function in an unsaturated soil system?
- 98 - Is there a difference depending on the soil type?
- 99 - What is the influence of these parameters on the calibration procedure?

## 100 **Methods**

### 101 **Experimental setup**

102 The overall objective of the performed dike experiments is to investigate the influence of changing water  
103 contents in the unsaturated part of dikes, mainly influenced by precipitation events, on the slope stability as well  
104 as erosion phenomena during occurring flood events. Therefore, a rectangular-shaped, Plexiglas tank with  
105 dimensions (L × W × H) of 3.4 m × 1.0 m × 1.3 m) was constructed to address the study aims (figure 1A+2B).  
106 Different scenarios with different flooding and precipitation events were realized.

107



108 **Figure 1.** Sketch of the experimental setup including the positions of soil moisture sensors and pressure head sensors (A)  
109 and picture of the dike experiment exemplary with 20 cm flooding (B)

110

111 For answering the questions regarding the soil water retention curves the following experimental setup was  
112 used:

- 113 - A dike with extends (L × W × H) of 2.7 m × 1.0 m × 0.6 m was built on the bottom of the tank (figure 1A  
114 and 2B), the slope gradient is 1:2.
- 115 - Two dikes with different soil material were built (for characterization see table 1).
- 116 - In the course of the experiments flooding in stages from one side occurred, the water level was raised  
117 after reaching steady-state conditions, the heights of the stages were 20, 30, 40 cm.

- 118 - For the estimation of spatial and temporal distribution of soil moisture, the dyke body was equipped with  
 119 FDR-probes (Hydraprobes, Co. Stevenswater, Portland, OR, USA) at seven different observation points  
 120 (figure 1A).
- 121 - To record qualitative changes in the seepage line, gauge pipes were installed at four positions (figure  
 122 1A), in which the water level was measured using water level loggers (Levellogger, Co. Solinst,  
 123 Georgetown, Canada); in addition, the water level in the inflow was measured.

## 124 **Determination of the Soil Water Retention Curve**

### 125 *Punctual measurement*

126 The determination of the soil water retention curve, respectively the pF curve, is carried out by retention  
 127 behavior laboratory experiments (Hyprop, Co. METER Group, Munich, Germany). The principle is based on the  
 128 laboratory evaporation method according to Wind/Schindler. In this method, the unsaturated hydraulic  
 129 conductivity and water retention properties are determined as a function of tension and water content of soil  
 130 samples (Peters and Durner (2008), Schindler and Müller (2006), Wind (1966)).

131 Several soil samples are taken from the dike body using a soil sample ring and subsequently saturated with  
 132 water. The saturated soil samples are dewatered by evaporation, the changing sample weight of the soil sample,  
 133 open to the top, is recorded by means of a balance and the matrix potential is recorded by means of two  
 134 tensiometers installed in the soil samples. The parameterization of the hydraulic characteristic curves was  
 135 carried out by means of the van Genuchten model (Abkenar et al., 2019).

### 136 *Global measurement*

137 The aim of the global measurement is to determine a soil water retention curve directly from measured data  
 138 of the laboratory dike experiment without disturbing the soil properties. Since both the water contents at certain  
 139 observation points and the matric potential at these points are recorded, a soil water retention curve can be  
 140 generated.

141 The water content data required for this is obtained directly through the FDR-probes installed at seven  
 142 locations in the dike. For the determination of the matrix potential  $\psi$ , the use of an indirect measurement is  
 143 necessary. The binding of water to the soil matrix, the matric potential  $\psi$ , represents the pressure head difference  
 144 between the soil water and the free water table and thus corresponds to a negative hydrostatic pressure. If the  
 145 influence of evaporation and possibly other source or sinkage terms is neglected, the matric potential  $\psi$  at an  
 146 observation point depends only on the vertical distance to the free water level, in this case, the seepage line.  
 147 This distance corresponds in hydrostatic equilibrium to pressure in e.g. m water column and can then be  
 148 converted into a matric potential according to:

$$149 \quad -\Delta(\text{OP-SPL}) = 98.0638 * \Psi \quad (\text{eq.2})$$

152  $\Delta(\text{OP-SPL}) =$  vertical distance from observation point (OP) to the free water level (SPL) (m)

153  $\Psi =$  matric potential (hPa)

154

155 and

156

$$157 \quad \text{pF} = \log_{10} (\Psi) \quad (\text{eq.3})$$

158

159 pF = decadic logarithm of the matric potential (-)

160  $\Psi =$  matric potential (hPa)

161 These conditions are fulfilled in the dike experiment carried out with different, constant flooding levels so  
162 that steady state conditions are formed after sufficient time according to the prevailing flooding. The level of the  
163 seepage line is obtained directly through the gauge pipes installed at four positions in the dike.

## 164 Numerical investigation - set up

165 A two-dimensional model has been realized while using PcSiWaPro (Gräber, 2006), applying Richards-  
166 equation (Richards, 1931) for unsaturated flow and Mualem-van-Genuchten retention and relative hydraulic  
167 conductivity model (Mualem (1976), Schaap & Genuchten (2006)).

168 The numerical model is conceptualized based on the given geometry of the tank experiment (figure 1A).  
169 For the two-dimensional numerical model (3488 calculation nodes with 6649 elements), a one-side flooding at  
170 different water levels (20, 30, 40 cm) was considered for the dike body. For this purpose, a time-dependent  
171 potential head as boundary condition (code: +8, defined according to the water level) on the "water side" and a  
172 seepage surface (code: -2, discharge possible from a pressure head of 0 m) on the "air side" was implemented.  
173 The impermeable bottom is represented by a no-flow boundary condition. Existing observation points (4 x  
174 pressure head, 7 x water content) were also integrated into the model so that every 2 minutes measured data  
175 for pressure head and water content can be compared with the simulated data. Together with the balanced  
176 inflow and outflow, these serve as the basis for model calibration and validation.

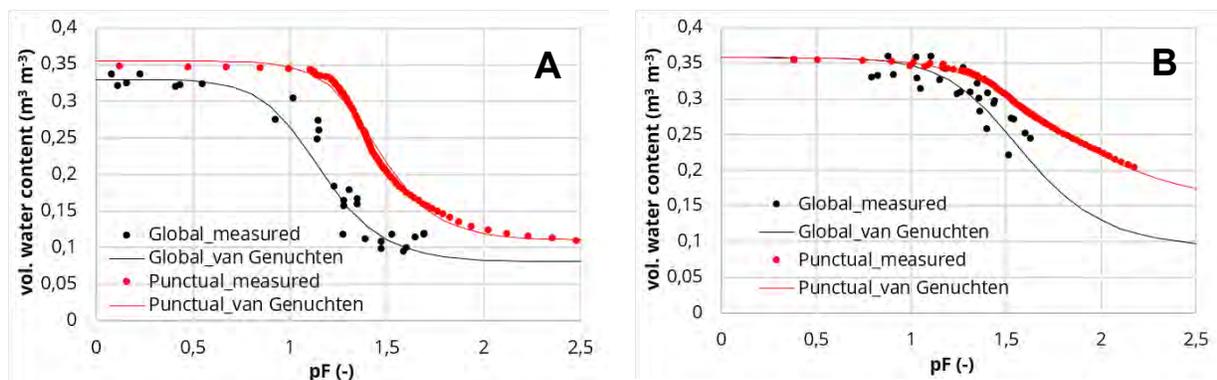
177 Within the calibration process, an inverse analysis based on observed pressure heads and water contents  
178 during the flooding of the dike was performed by PcSiWaPro internally to optimize the initial soil parameters  
179 determined by punctual and global measurement (table 1). This serves for the minimization of a suitable  
180 objective function, which expresses the discrepancy between the observed values and the predicted system  
181 responses. The system response was represented here by the numerical solution of the Richards equation,  
182 augmented with single porosity hydraulic model (Mualem-van-Genuchten) and used boundary conditions. Initial  
183 estimates were then iteratively improved during the minimization process until the desired degree of precision  
184 was obtained. For the optimization of the objective function, a weighted least-squares approach based on the  
185 Levenberg–Marquardt nonlinear method is used in PcSiWaPro (Marquardt, 1963).

186 Initial hydraulic parameters for the modelling and as a basis for the inverse adjustment were extracted by  
187 different laboratory tests (table 1).

## 188 Results and Discussion

### 189 Determination of the soil water retention curve

190 For both soils, a clear difference between the punctual and global determined soil water retention curve  
191 respectively the related van Genuchten function was observed (figure 2A+B).



192 **Figure 2.** Punctual and global determined soil water retention curves - measured (dots) and by means of the van  
193 Genuchten model (lines) for soil1 (A) and soil 2 (B)

194 Especially the different values of  $n$  and  $\alpha$  in the van Genuchten function lead to a shift of the curves in the  
 195 diagram. The residual water contents also show differences, especially in soil 2 with higher content of fine  
 196 particles (table 1).

197 In the case of soil 2, no data points for the calculated global soil water retention curve are available for  $pF$   
 198  $> 1.6$  respectively water content  $< 0.22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . The reason for this is the relatively high water saturation up to  
 199 the area of the upper observation points due to the strongly pronounced capillary rise of water in soil 2.

200  
 201 **Table 1.** Hydraulic parameters of the used soil materials - determined by punctual and global measurement

Parameter	Soil 1		Soil 2		Method
	Punctual	Global	Punctual	Global	
Classification	Ss	Ss	SI2	SI2	DIN 4220
Saturated hydraulic conductivity $K$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	$9 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	Permeameter (DIN 17892-11, 2021)
Bulk density $\rho$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )	1.64	1.64	1.76	1.76	DIN 11272 (2017)
Residual water content $\Theta_r$ ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )	0.11	0.08	0.152	0,09	SWRC (Hyprop)
Saturated water content $\Theta_s$ ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )	0.355	0.33	0.358	0.358	SWRC (Hyprop)
van Genuchten shape parameter $n$ (-)	4.07	8.3	2.77	3.50	SWRC (Hyprop)
van Genuchten shape parameter $\alpha$ ( $\text{m}^{-1}$ )	3.35	3.16	2.008	2.5	SWRC (Hyprop)

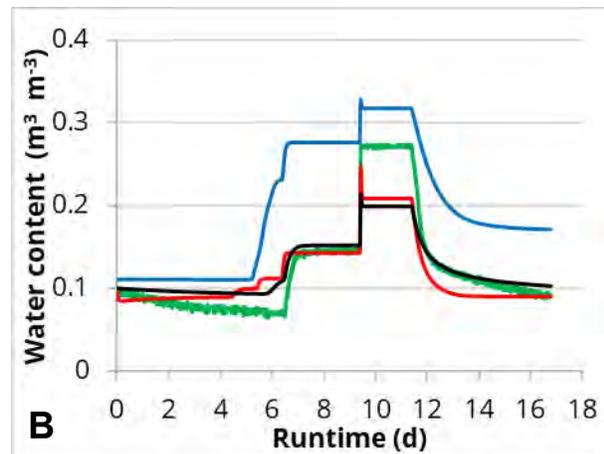
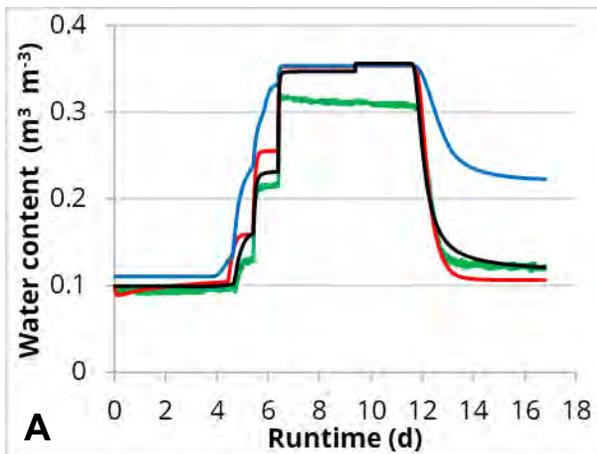
202

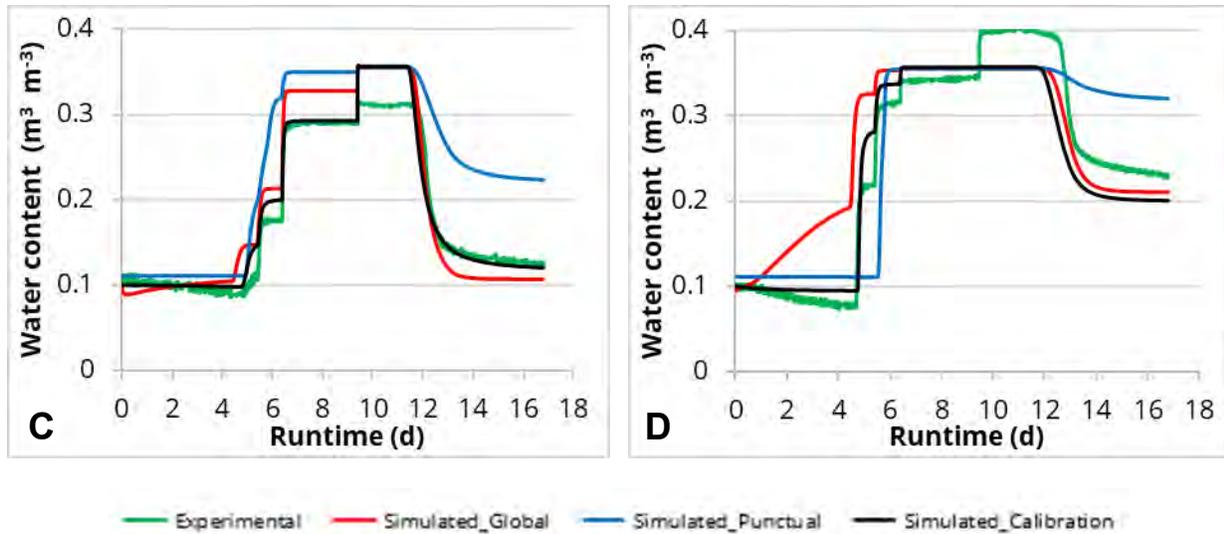
## 203 Simulation results

### 204 Hydraulic soil parameters originating from punctual and global measurement - soil 1

205 The visual comparison of measured and simulated water contents in the dike body (figure 3) is clearly  
 206 showing that the use of the hydraulic soil parameters determined by the global measurement compared to those  
 207 determined by the punctual measurement leads to a better agreement between measured (green line) and  
 208 simulated (global - red line, punctual - blue) water contents. Furthermore, it could be found that both for the  
 209 temporal course of the variable water contents through the realisation of different water levels and the level of  
 210 the water content itself the fit of the simulated to the measured water contents is better in most observation  
 211 points in case of usage the global determined soil parameters.

212





213 **Figure 3.** Observed (green) and simulated water content for soil 1 at the observation points H1 (A), H3 (B), H4 (C) and H7  
 214 (D) by using basic hydraulic soil parameters originating from punctual (blue) and global (red) measurement as well  
 215 as after calibration process (black)  
 216

217 To evaluate the model performance besides visual comparison, two error indicators were calculated to  
 218 assess the quality of the conformity between observed and simulated water contents (Golmohammadi et al.,  
 219 2014) (table 2).

220 Root Mean Square Error (RMSE), one of the commonly used error indicators (Gupta et al., 2009; Wöhling  
 221 et al., 2013), shows how well the simulated data represent the pattern of the observed data. In principal  
 222 applications, the lower the RMSE, the better the model performance (Matlan et al., 2014). One of the drawbacks  
 223 of using RMSE is that it does not differentiate between over- or underestimated values. If there are some values  
 224 which possess large error due to any faulty instrument or any wrong technical procedure it will trigger an overall  
 225 large RMSE value (Chai & Draxler (2014), Willmott & Matsuura (2005)).

226 In addition, NSE (Nash–Sutcliffe) error indicator was used to assess the quality of the conformity between  
 227 observed and simulated water contents. It is a proven method to depict model performance specially for  
 228 hydrological related operations (Knoben et al. (2019a), (Bai et al., 2009), (Krause et al., 2005), (Pachepsky et  
 229 al., (2016)). The optimal value of NSE is 1, indicating that both the simulated and observed values are 100% in  
 230 unity. In the case of values > 0 it shows a coherence between the simulated and observe values and can be  
 231 considered as good to moderate fit. If the NSE < 0 it means the simulated values are no way near the observe  
 232 values (Knoben et al., 2019b), (Houska et al., 2014), (Schaefli & Gupta, 2007).

233 The results can confirm the findings obtained from the visual observation (table 2). In all observation points,  
 234 except for point H7, the determined error indicators show a better agreement between measured and simulated  
 235 water contents when using the global determined soil parameters. Especially for the observation points H1 to  
 236 H5, a significant difference between the simulation results based on the different hydraulic soil parameters can  
 237 be demonstrated.

238 The calibration performed on the basis of the hydraulic soil parameters determined by the punctual and  
 239 global method resulted in an improved adaptation of the simulated to the measured water contents in almost all  
 240 observation points (table 2). However, the improvement for almost all observation points (H1 to H5) was much  
 241 higher for the model based on the punctual determined hydraulic soil parameters. The bigger the deviation of  
 242 the simulated from the measured water values, the greater the change in the error indicators due to the  
 243 performed calibration.

244

245 **Table 2.** Model fit to observation regarding water content by using hydraulic soil parameters originating from punctual,  
 246 global and calibration measurements - soil 1

Observation points	Punctual		Global		Calibrated		Change of RMSE	
	RMSE (-)	NSE (-)	RMSE (-)	NSE (-)	RMSE (-)	NSE (-)	Punctual – Calibrated (%)	Global – Calibrated (%)
H1	0.0717	0.4124	0.0271	0.9157	0.0239	0.9348	66.7	11.8
H2	0.0762	0.1004	0.0158	0.9614	0.0123	0.9766	83.9	22.2
H3	0.0834	-0.8293	0.0270	0.8087	0.0291	0.7778	65.1	-7.8
H4	0.0701	0.3456	0.0251	0.9164	0.0197	0.9485	71.9	21.5
H5	0.0731	0.4410	0.0246	0.9187	0.0203	0.9412	72.2	17.5
H6	0.0577	0.4701	0.0527	0.5585	0.0458	0.6666	20.6	13.1
H7	0.0375	0.8971	0.0807	0.5232	0.0346	0.9121	7.7	57.1

247

248 Thus, reduction of RMSE up to 84 percent could be recorded compared to the initial simulation. In contrast,  
 249 the reduction of RMSE by the performed calibration for the model based on global determined hydraulic soil  
 250 parameters was only up to 57 percent (H7), whereby for most of the observation points the reduction was much  
 251 smaller (H1 to H6). The final hydraulic soil parameter set is presented in table 3; noticeable differences in  
 252 residual and saturated water content can be identified as compared to the laboratory data.

253 These results show quite clearly that the initial global determined hydraulic soil parameters were quite close  
 254 to the best fit hydraulic soil parameters (table 3). Looking at the RMSE values, the fit can be rated as good, when  
 255 compared to the general accuracy of the FDR probes ( $\pm 0.025 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  as given by the manual (StevensWater,  
 256 2021). The simulated water contents based on the initial hydraulic soil parameters determined by the punctual  
 257 method are much further away from agreement with the measured water contents.

258

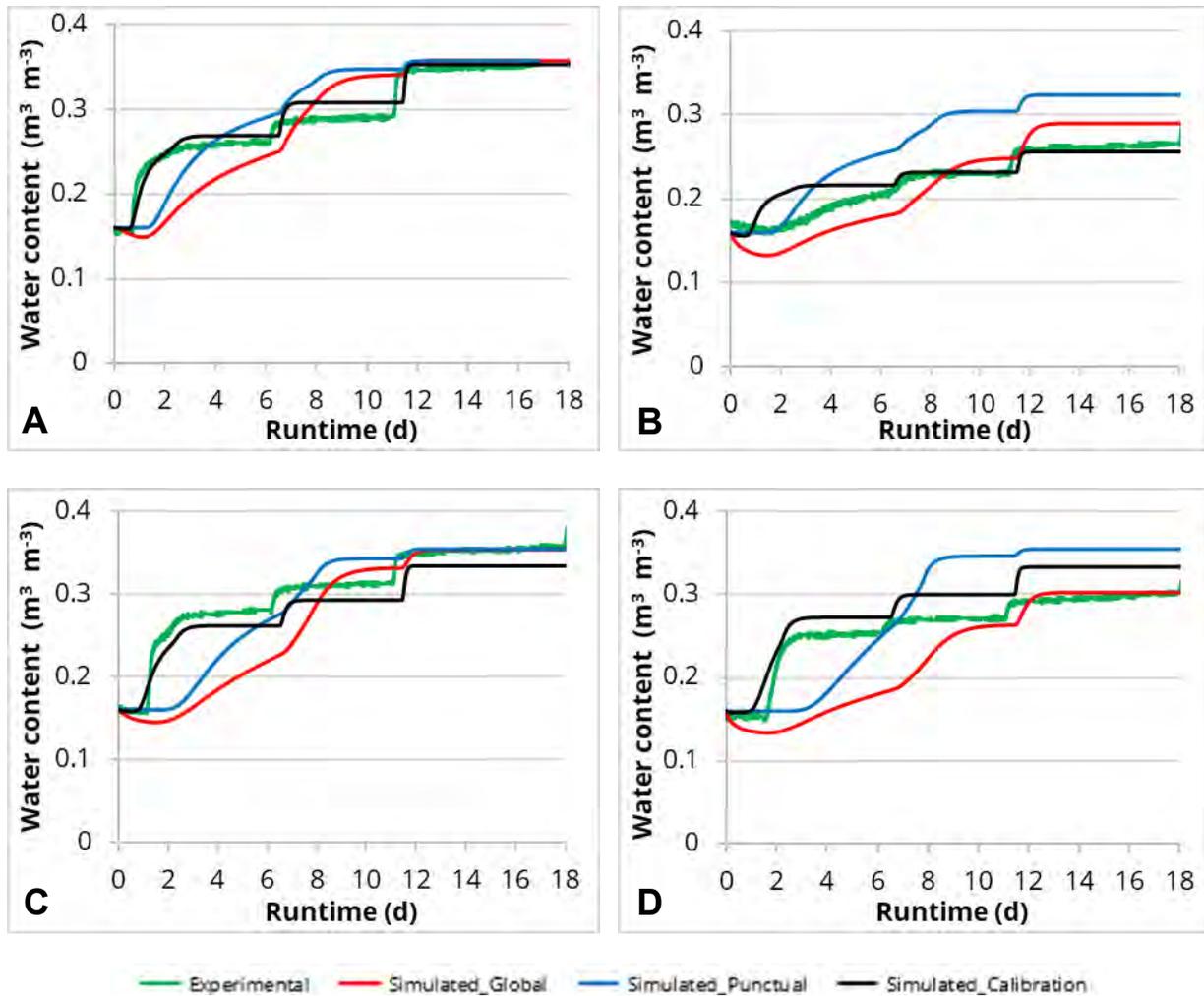
259 **Table 3.** Final hydraulic soil parameter set for soil 1 based on calibration performance

	Saturated hydraulic conductivity K	Residual water content $\Theta_r$	Saturated water content $\Theta_s$	van Genuchten shape parameter n	van Genuchten shape parameter $\alpha$
	( $\text{m s}^{-1}$ )	( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )	( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )	(-)	( $\text{m}^{-1}$ )
Initial punctual	$9 \cdot 10^{-4}$	0.11	0.355	4.07	3.35
Initial global	$9 \cdot 10^{-4}$	0.08	0.33	8.3	3.16
Calibrated					

260

261 *Hydraulic soil parameters originating from punctual and global measurement - soil 2*

262 When comparing the simulation results for the water content based on the hydraulic soil parameters  
 263 determined by the global (figure 4, red line) and punctual (figure 4, blue line) measurement, the differences in  
 264 relation to the measured values (figure 4, green line) in comparison to soil 1 is very small. Both for the temporal  
 265 course of the variable water contents and the level of the water content itself the behaviour for the simulation  
 266 results respectively fit of the simulated to the measured water contents is similar.



267 **Figure 4.** Observed (green) and simulated water content for soil 2 at the observation points H1 (A), H3 (B), H4 (C) and H6  
 268 (D) by using basic hydraulic soil parameters originating from punctual (blue) and global (red) measurement as well  
 269 as after calibration process (black)  
 270

271 The results of the statistical analysis can confirm these findings (table 4). In all observation points, except  
 272 for point H3, the determined error indicators are showing similar agreement between measured and simulated  
 273 water contents when using the punctual and global determined hydraulic soil parameters. Even the opposite  
 274 effect can be observed for point H4 and H5, the fit is here a little bit better when using the punctual determined  
 275 hydraulic soil parameters.

276 The calibration performed on the basis of the hydraulic soil parameters determined by the punctual and  
 277 global method also resulted in an improved fit of the simulated to the measured water contents in all observation  
 278 points (table 4). There was a greater adaptation of the simulated to the measured water contents both for the  
 279 water contents determined on the basis of the punctual and for the water contents determined on the basis of  
 280 the global method due to the greater deviations of the simulated water contents from the measured water  
 281 contents in the initial simulation.

282 Thus, reduction of RMSE up to 68 respectively 66 percent (H7) could be recorded compared to the initial  
 283 simulation, whereby for most of the observation points the reduction was smaller (H2, H3 - global, H4 - punctual,  
 284 H5, H6).

285

286 **Table 4.** Model fit to observation regarding water content by using hydraulic soil parameters originating from punctual,  
 287 global and calibration measurements - soil 2

Observation points	Punctual		Global		Calibrated		Change of RMSE	
	RMSE (-)	NSE (-)	RMSE (-)	NSE (-)	RMSE (-)	NSE (-)	Punctual – Calibrated (%)	Global – Calibrated (%)
H1	0.0320	0.6287	0.0348	0.5587	0.0142	0.9264	55.6	59.2
H2	0.0855	-2.8781	0.0713	-1.7021	0.0534	-0.5127	37.5	25.1
H3	0.0524	-0.4566	0.0270	0.6134	0.0172	0.8426	67.2	36.3
H4	0.0351	0.5816	0.0479	0.2192	0.0211	0.8480	39.9	55.9
H5	0.0331	0.3919	0.0461	-0.1780	0.0308	0.4741	6.9	33.2
H6	0.0465	0.6153	0.0496	0.5625	0.0322	0.8164	30.8	35.1
H7	0.0803	-4.2481	0.0752	-3.6061	0.0256	0.4655	68.1	66.0

288  
 289  
 290 The final hydraulic soil parameter set is presented in table 5; noticeable differences in residual and saturated  
 291 water content can be identified as compared to the laboratory data (table 5).

292 These results are indicating that in case of soil 2 it cannot be demonstrated that the initial global determined  
 293 hydraulic soil parameters are quite closer to the best fit soil hydraulic parameters than the initial global  
 294 determined hydraulic soil parameters (table 5).

295  
 296 **Table 5.** Final hydraulic soil parameter set for soil 2 based on calibration performance

	Saturated hydraulic conductivity K	Residual water content $\Theta_r$	Saturated water content $\Theta_s$	van Genuchten shape parameter n	van Genuchten shape parameter $\alpha$
	( $\text{m s}^{-1}$ )	( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )	( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )	(-)	( $\text{m}^{-1}$ )
Initial punctual	$3 \cdot 10^{-6}$	0.152	0.358	2.77	2.008
Initial global	$3 \cdot 10^{-6}$	0.09	0.358	3.50	2.5
Calibrated					

297  
 298  
 299 **Discussion**

300 The results presented are indicating that a punctual determination of the soil water retention function cannot  
 301 always sufficient represent the soil hydraulic parameters of a larger soil system. The reason for this is a varying  
 302 pore size distribution and heterogeneity of the soil pore structure, which have a decisive influence on the water  
 303 movement in the unsaturated soil zone. In addition to the size, the continuity of the pores and their arrangement  
 304 also play an important role.

305 There is a decrease in local soil heterogeneities with an increasing proportion of fine particles in the soil  
 306 material, due to a broader distribution of pore sizes. This is resulting in a reduction of the heterogeneity of  
 307 hydraulic soil parameters (Kuckelkorn, 2005). Here, the shape parameter n represents the pore size distribution  
 308 in the case of the van Genuchten model (table 1). The smaller the value of n, the broader the pore size

309 distribution in the soil (van Genuchten, 1980). Therefore, when using a soil with a higher proportion of fine  
310 particles, a more homogeneous distribution of the hydraulic soil parameters over the whole dike body can be  
311 expected. Thus, the determined retention function based on a soil sample obtained punctual can better represent  
312 the hydraulic soil parameters of the whole dike body.

313 In the case of the used soils, this effect can be seen quite clearly in the determined shape parameter. For  
314 soil 1, the high value for the shape parameter (8.03) determined by the global method indicates that a relatively  
315 uniform pore size distribution and thus an increased heterogeneity of hydraulic soil parameters is present in the  
316 dike body. The value for the shape parameter (4.07) determined on the basis of the punctual method, which  
317 deviates quite strongly from this, indicates that the hydraulic soil parameters for the whole dike body cannot be  
318 sufficiently represented by punctual sampling in this case. In terms of the calibration, it means a higher effort for  
319 adapting the simulated to the measured values when using soil hydraulic parameters determined by the punctual  
320 method. More simulation time and a higher demand for computing power is necessary due to the strong deviation  
321 of the hydraulic soil parameters from the best fit parameters. Using the parameters determined by the global  
322 method cuts down the need of computation power and simulation time, especially for large scale models,  
323 because these parameters are closer to the best fit parameters.

324 In the case of soil 2, the shape parameter (3.5) determined by the global method is significant lower, which  
325 demonstrates a broad distribution of pore sizes and thus of hydraulic soil parameters. The shape parameter  
326 (2.77) determined by the punctual method, which is relatively close to this value, can confirm the assumption of  
327 a more homogeneous distribution of the hydraulic soil properties for the whole dike body. In this case, the  
328 hydraulic soil properties over the whole dike body can be sufficiently represented by punctual sampling.  
329 Therefore, using soil hydraulic parameters determined by the punctual method for the calibration process is here  
330 sufficient due to almost the same soil hydraulic parameters determined by the global method.

## 331 **Conclusion + Outlook**

332 The results of the performed experiments are showing that a punctual determination of the soil hydraulic  
333 parameters based on the soil water retention function cannot always sufficient represent the hydraulic properties  
334 of a larger soil system. In case of increased local heterogeneity of the soil pore structure, as they occur more  
335 often in soils with a low proportion of fine particles, it leads to uncertainties or incorrect assumption of hydraulic  
336 soil parameters. This was proven by the simulation results and the performed statistical analysis obtained on the  
337 basis of the different soil hydraulic parameters. The use of the hydraulic soil parameters determined by the  
338 punctual measurement leads to much worse fit between simulated and measured values compared to those  
339 determined by the global measurement. These differences between punctual and global determined hydraulic  
340 soil parameters cannot be observed for soils with higher content of fine particles due to the strong decrease in  
341 local soil heterogeneities in such soils.

342 Based on the study results, it is preferable to use hydraulic soil parameters based on the global method for  
343 soils with increased local heterogeneity of the pore structure, because they are describing better the soil  
344 characteristics in a larger soil system. Especially, when using the parameters for following numerical simulations  
345 inclusive calibration process, their use can reduce computation power and simulation time, in particular for large  
346 scale models. In case of soils with higher proportion of fine particles, the use of the parameters determined by  
347 the punctual method is sufficient due to the relatively good agreement of the hydraulic soil parameters  
348 determined by both methods.

349 Repeated measurements with the same boundary conditions have shown that the measured water contents  
350 and pressure heads are subject to fluctuations. Therefore, the parameterisation of the soils is underlying to some  
351 uncertainties. For this reason, further experiments should be performed to validate the results and to discuss the  
352 observed deviations between individual experiments in the course of an uncertainty or sensitivity analysis.

353 In addition, the influence of the fine particles on the determined hydraulic soil parameters obtained on the  
354 basis of punctual measurement should be checked by conducting further experiments with other soil types.

355 Furthermore, it is certainly useful to apply the gained knowledge when obtaining data from other large soil  
356 systems.

## 357 **References**

358 Abkenar, F.Z., Rasoulzadeh, A., Asghari, A. Performance evaluation of different soil water retention functions  
359 for modeling of water flow under transient condition. *Soil and plant nutrition* **2019**, 78 (1), 119-130.  
360 <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2017406>.

361 Bai, Y., Wagener, T., & Reed, P. A top-down framework for watershed model evaluation and selection under  
362 uncertainty. *Environmental Modelling & Software* **2009**, 24(8), 901–916.  
363 <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.12.012>.

364 Brooks, R.H., Corey, A.T. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University, Fort Collins,  
365 Colorado, **1964**.

366 Chai, T., Draxler, R.R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against  
367 avoiding RMSE in the literature. *Geosci. Model Dev.* **2013**, 7, 1247–1250. [https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-](https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014)  
368 [2014](https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014).

369 Delage, P., Cui, Y.J. An evaluation of the osmotic method of controlling suction. *Geomechanics and*  
370 *Geoengineering* **2008**, 3(1), 1-11. <https://doi.org/10.1080/17486020701868379>.

371 Bgbl. DIN 4220. Pedologic site assessment - Designation, classification and deduction of soil parameters  
372 (normative and nominal scaling). *DIN Deutsches Institut für Normung e.V.*, Berlin, Germany, **2010**, p. 50.

373 Bgbl. DIN EN ISO 11272. Soil quality - Determination of dry bulk density. *DIN Deutsches Institut für Normung*  
374 *e.V.*, Berlin, Germany, 2017, p. 23.

375 Bgbl. DIN EN ISO 17892-11. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 11:  
376 Permeability tests. *DIN Deutsches Institut für Normung e.V.*, Berlin, Germany, 2021, p. 31.

377 Golmohammadi, G., Prasher, S., Madani, A., Rudra, R. Evaluating Three Hydrological Distributed Watershed  
378 Models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. *Hydrology* **2014**, 1, 20-39. <https://doi.org/10.3390/hydrology1010020>.

379 Gräber, P.-W., Blankenburg, R., Kemmesies, O., Krug, S. SiWaPro DSS-Beratungssystem zur Simulation von  
380 Prozessen der unterirdischen Zonen. [Buchverf.] Jochen Wittmann und Mike Müller. [Hrsg.] Mike Müller.  
381 Simulation in Umwelt-und Geowissenschaften. Leipzig: Shaker Verlag. **2006**.

382 Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., Martinez, G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE  
383 performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* **2009**, 377(1-2), 80-  
384 91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.

385 Houska, T., Multsch, S., Kraft, P., Frede, H.-G., & Breuer, L. Monte Carlo-based calibration and uncertainty  
386 analysis of a coupled plant growth and hydrological model. *Biogeosciences* **2014**, 11(7), 2069–2082.  
387 <https://doi.org/10.5194/bg-11-2069-2014>.

388 Iiyama, I. Differences between field-monitored and laboratory-measured soil moisture characteristics. *Soil*  
389 *Science and Plant Nutrition* **2014**, 62(5–6), 416–422. <https://doi.org/10.1080/00380768.2016.1242367>.

390 Ket, P., Oeurng, C., & Degré, A. Estimating Soil Water Retention Curve by Inverse Modelling from Combination  
391 of in Situ Dynamic Soil Water Content and Soil Potential Data. *Soil Systems* **2018**, 2(4).  
392 <https://doi.org/10.3390/soilsystems2040055>.

393 Knoben, W. J. M., Freer, J. E., Woods, R. A. Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–  
394 Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences* **2019a**, 23(10), 4323–4331.  
395 <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>.

- 396 Knobon, W. J. M., Freer, J. E., & Woods, R. A. Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–  
397 Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences* **2019b**, 23(10), 4323–4331.  
398 <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>.
- 399 Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment.  
400 *Advances in Geosciences* **2005**, 5, 89–97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>.
- 401 Kuckelkorn, J.M. Strukturuntersuchungen zur Charakterisierung der ungesättigten Wasserströmung in porösen  
402 Medien. Dissertation, LMU München: Fakultät für Geowissenschaften, **2005**.
- 403 Marquardt, D. W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *Journal of the Society for*  
404 *Industrial and Applied Mathematics* **1963**, 11(2), 431–441.
- 405 Plate, E.J., Zehe, E. Hydrologie und Stoffdynamik kleiner Einzugsgebiete. Prozesse und Modelle. *Journal of*  
406 *plant nutrition and soil science* **2008**, 171(6), 945.
- 407 Maček, M., Smolar, J., Ana, P. Extension of measurement range of dew-point potentiometer and evaporation  
408 method. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*  
409 **2013**, Paris.
- 410 Mualem, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources*  
411 *Research* **1976**, 12, 513-522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>.
- 412 Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *J.*  
413 *Hydrol.* **1970**, 10, 282–290.
- 414 Osinski, P., Toll, D., & Koda, E. Comparison of Soil Water Retention Curves for sandy clay, obtained using  
415 different laboratory testing methods. *E3S Web Conf.* **2016**, 9, 11008.  
416 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160911008>.
- 417 Pachepsky, Y. A., Martinez, G., Pan, F., Wagener, T., Nicholson, T. Evaluating Hydrological Model Performance  
418 using Information Theory-based Metrics [Preprint]. Catchment hydrology/Modelling approaches. **2016**.  
419 <https://doi.org/10.5194/hess-2016-46>.
- 420 Peters, A., Durner, W. A simple model for describing hydraulic conductivity in unsaturated porous media  
421 accounting for film and capillary flow. *Water Resour. Res.* **2008**, 44, W11417.  
422 <https://doi.org/10.1029/2008WR007136>.
- 423 Richards, L.A. Capillary Conduction of Liquids through Porous Mediums. *Journal of Applied Physics* **1931**, 1(5),  
424 318-333.
- 425 Schaap, M.G., van Genuchten, M.T. A Modified Mualem–van Genuchten Formulation for Improved Description  
426 of the Hydraulic Conductivity Near Saturation. *Vadose Zone Journal* **2006**, 5, 27-34.
- 427 Schaefli, B., Gupta, H. V. Do Nash values have value? *Hydrological Processes* **2007**, 21(15), 2075–2080.  
428 <https://doi.org/10.1002/hyp.6825>.
- 429 Schindler, U., Müller, L. Simplifying the evaporation method for quantifying soil hydraulic properties. *J. Plant*  
430 *Nutr. Soil Sci.* **2006**, 169, 623–629.
- 431 Stephens, D.B., Kron, A.J., Kron, A. *Vadose Zone Hydrology* (1st ed.). CRC Press. **1996**. p. 347.  
432 <https://doi.org/10.1201/9780203734490>.
- 433 Stevens Water Monitoring Systems, Inc. *HydraProbe Soil Sensor, User's Manual*, Stevens Water Monitoring  
434 Systems, Inc.: Portland, OR, USA, **2018**, p. 63.
- 435 Van Genuchten, M.Th., A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils.  
436 *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1980**, 44, 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.

- 437 Willmott, C.J., Matsuura, K. Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) over the Root Mean Square Error  
438 (RMSE) in Assessing Average Model Performance. *Climate Research* **2005**, 30, 79-82.  
439 <http://dx.doi.org/10.3354/cr030079>.
- 440 Wind, G.P. Capillary conductivity data estimated by a simple method, in: Rijtema, P.E., Wassink, H. (Eds.),  
441 Water in the Unsaturated Zone, 1. Institute for land and water management research, Wageningen, Netherlands,  
442 pp. 181–191, **1966**.
- 443 Wöhling, T., Samaniego, L., Kumar, R. Evaluating multiple performance criteria to calibrate the distributed  
444 hydrological model of the upper Neckar catchment. *Environmental Earth Sciences* **2013**, 69(2), 453–468.  
445 <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2306-2>.