



Sachbericht - Abschlussbericht 2022

Vorhabenbezeichnung:	Entwicklung eines Vorhersagesystems für Deichbrüche (VSDS), Teilprojekt: IWD (Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik)
Antrag vom:	28.02.2019
Antragsnummer :	100362353
Kontonummer :	3000738637
Kreisnummer :	612
Antragsteller :	Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden
Kundennummer :	2000374508
Clusternummer :	3773
Berichtszeitraum :	01.06.2019 – 31.12.2021

1. Erreichung der Projektziele

Das Gesamtziel des Vorhabens 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 wasserwirtschaftlicher Erdbaustauwerke. Ziel des FuE-Projektes war es, ein praxistaugliches Vorhersagesystem für Deichbrüche zu entwickeln, welches die Gefährdung von Deichbauwerken (wasserbauliche Erddämme) auf Basis experimenteller Ergebnisse und mathematischer Modelle und numerischer Simulation unter Berücksichtigung von Niederschlag und Vegetation bei sich ändernden Klimabedingungen zuverlässig prognostiziert. Die im Projektverbund zu entwickelnden umweltgerechten bautechnischen Lösungen zur Ertüchtigung waren dabei im Vorhersagesystem zu berücksichtigen.

Die Arbeitspakete wurden im Rahmen der gesetzten Zielstellung erfolgreich bearbeitet.

Die Kooperation zwischen den Projektpartnern, insbesondere mit den KMUs wird sowohl während der Projekttreffen (bisher 12) als auch in bilateralen Kontakten realisiert. Insbesondere wurden Abstimmungen zu den Schnittstellen zwischen dem AE-IWD 1 und AE-IWD 3 mit dem Partner IGW, KSI und M&S im AE-M&S 5 realisiert.

2. Umsetzung der geplanten Arbeitsschritte

Im Rahmen des Teilprojektes IWD sind im Zeitraum Q2/2019 bis einschließlich Q4/2021 Leistungen zu den Arbeitspaketen

- AE-IWD 1.2 Stabilitätsanalyse und -berechnung
- AE-IWD 1.3 Codeentwicklung von Stabilitätsmodellen und Implementierung
- AE-IWD 3.1 Konstruktiver Entwurf und Aufbau des Deichmodells

- AE-IWD 3.2 Szenarioanalysen des physikalischen großskalierten Deichmodells und Scherkraftbestimmung
- AE-IWD 7.2 Ergebnisbericht und Dokumentation

erbracht worden. Die im Bearbeitungszeitraum realisierten Arbeiten und erzielten Ergebnisse sind im Folgenden aufgeführt.

2.1. AE-IWD 1.2 Stabilitätsanalyse und –berechnung

Zunächst erfolgte eine umfangreiche Recherche zu gängigen Methoden bei der Stabilitätsanalyse gängiger Softwareanwendungen für Böschungsversagen wie z.B. GGU Stability [1] oder SLOPE-W [2; 3]. Da die Programmierung dieser kommerziellen Produkte nicht offen einsehbar ist und sie sich noch nicht ausreichend für Stabilitätsberechnungen auf Grundlage instationärer Sickerwasserhältnisse eignen, wurden anhand der in der Bedienungsanleitung beschriebenen Funktionen und weiterer Fachliteratur die verwendeten mathematischen Modelle nachvollzogen. Dabei wurden mögliche Funktionserweiterungen und Entwicklungspotentiale identifiziert, die in Verbindung mit der IGW-Entwicklung „PCSiWaPro“ zur Erreichung der gestellten Projektziele notwendig sind. Eine direkte Anbindung der bereits vorhandenen Software an PCSiWaPro wäre nur in Kooperation mit den Entwicklern dieser kommerziellen Produkte möglich, was aber aufgrund der zu erwartenden Nutzungseinschränkungen nicht weiterverfolgt wurde.

2.2. AE-IWD 1.3 Codeentwicklung von Stabilitätsmodellen und Implementierung

Um die Verknüpfung von PCSiWaPro mit den programmierten Stabilitätsmodellen zu ermöglichen sowie eine spätere separate Publikation des Codes zu vereinfachen, wurde die Open Source Programmiersprache Python zur Berechnung und Animation verwendet. Dabei stand die bewährte Methode zur Berechnung des Ausnutzungsgrades der Böschungsstabilität entlang des wahrscheinlichsten Bruchkörpers (hier ein modifizierter Gleitkreis) im Fokus. Nachfolgend wird auf die für die Projektbearbeiter definierten Anforderungen und die gewählte Umsetzung eingegangen.

Besonderen Wert wurde auf die breite Anwendbarkeit gelegt, d.h. verschiedene Deichgeometrien, Materialkomponenten, Bodenparameter und geohydraulische Zustände sollen über Eingabemasken in PCSiWaPro und Textdateien zum Datentransfer an das Programm übergeben werden. Damit ist das Programm über die anwendungsfreundliche GUI von PCSiWaPro bedienbar und die Kommunikation gewährleistet. Der offen zu haltende Quellcode des Stabilitätsmodells beinhaltet jedoch den Vorteil benutzerspezifische Anpassungen der Ausgabedateien und Funktionen vornehmen zu können. Insbesondere die automatisierte Adaptabilität der Bruchkörpergeometrie war ein Schwerpunkt der Programmierung, ermöglicht aber die gezielte Suche nach dem wahrscheinlichsten Bruchkörper und der Verteilung der Ausnutzungsgrade für beliebige Deichquerschnitte in einem festgelegten Suchbereich. Da die allgemeine Bruchkörperform auf der Widerstandsseite vom passiven Erddruck und dieser wiederum zumindest im genormten vereinfachten Ansatz nach DIN 4048 nur von der Scherfestigkeit abhängt, muss sich die Form auch an Materialien unterschiedlicher Scherfestigkeit anpassen können. Mit der Implementierung einer anpassungsfähigen Bruchkörpergeometrie in Abhängigkeit der Scherfestigkeit lässt sich ebenfalls die Veränderung der Scherparameter in Abhängigkeit des Sättigungsgrades in die Berechnung einbeziehen. Herkömmliche Software rechnet dabei in der Regel vereinfacht mit einer konstanten Scherfestigkeit je Material. Die hochaufgelösten geohydraulischen Daten von PCSiWaPro bieten die Chance, sättigungsabhängige Materialparameter wie die Kohäsion, den Porenwasserdruck und die Bodenschichten (teilgesättigt) nach selbst gewählten Vorgaben zu modifizieren. Darüber hinaus ist ähnliches Vorgehen auch mit weiteren zeitlich und örtlich variablen Parametern durchführbar. Die Ausgabe der Ergebnisse kann über einen in PCSiWaPro integrierbaren Plot erfolgen.

Im Bearbeitungszeitraum konnte somit eine einsatzfähige Version unter Beachtung der oben aufgeführten Anforderungen für ein mathematisches Modell zur Stabilitätsanalyse an Deichen und Dämmen erstellt und optimiert werden. Es basiert auf dem Nachweis gegen Böschungsbruch mit kreisförmiger Gleitfläche nach BISHOP. Der Open Source Code berechnet dabei über ein vorgegebenes, jedoch modifizierbares Raster die Lage, Geometrie (Mittelpunkt, Radius und Gleitfläche) und den Ausnutzungsgrad der wahrscheinlichsten Bruchkörper am jeweiligen Rasterknotenpunkt. Der Code ist einsetzbar für beliebige Böschungsgeometrien mit stetigem Verlauf und nutzt als Eingangsdaten die komplexen, hochaufgelösten geohydraulischen Simulationsergebnisse von PCSiWaPro, die in einem Raster definierbarer Detailtiefe eingelesen werden. Dabei können neben homogenen Deichen auch verschiedene Materialzonen, wie Drainageprismen, Oberflächenabdeckungen oder Dichtwände mit eigenen Bodenparametern (teilgesättigte Bodenwichte, Kohäsion oder undrainierte Scherfestigkeit und Reibungswinkel) berechnet werden. Hier besteht aber noch Optimierungspotential für eine Funktionserweiterung hinsichtlich des Einflusses von Trennflächen auf die Bruchkörperausbildung. Wichtig für mögliche Verkehrswege auf den Erdbaustauwerken oder akute Notfallmaßnahmen ist die Einbeziehung von temporären Auflasten in die Berechnung. Diese sind über PCSiWaPro implementierbar und werden in der Ausgabe visualisiert.

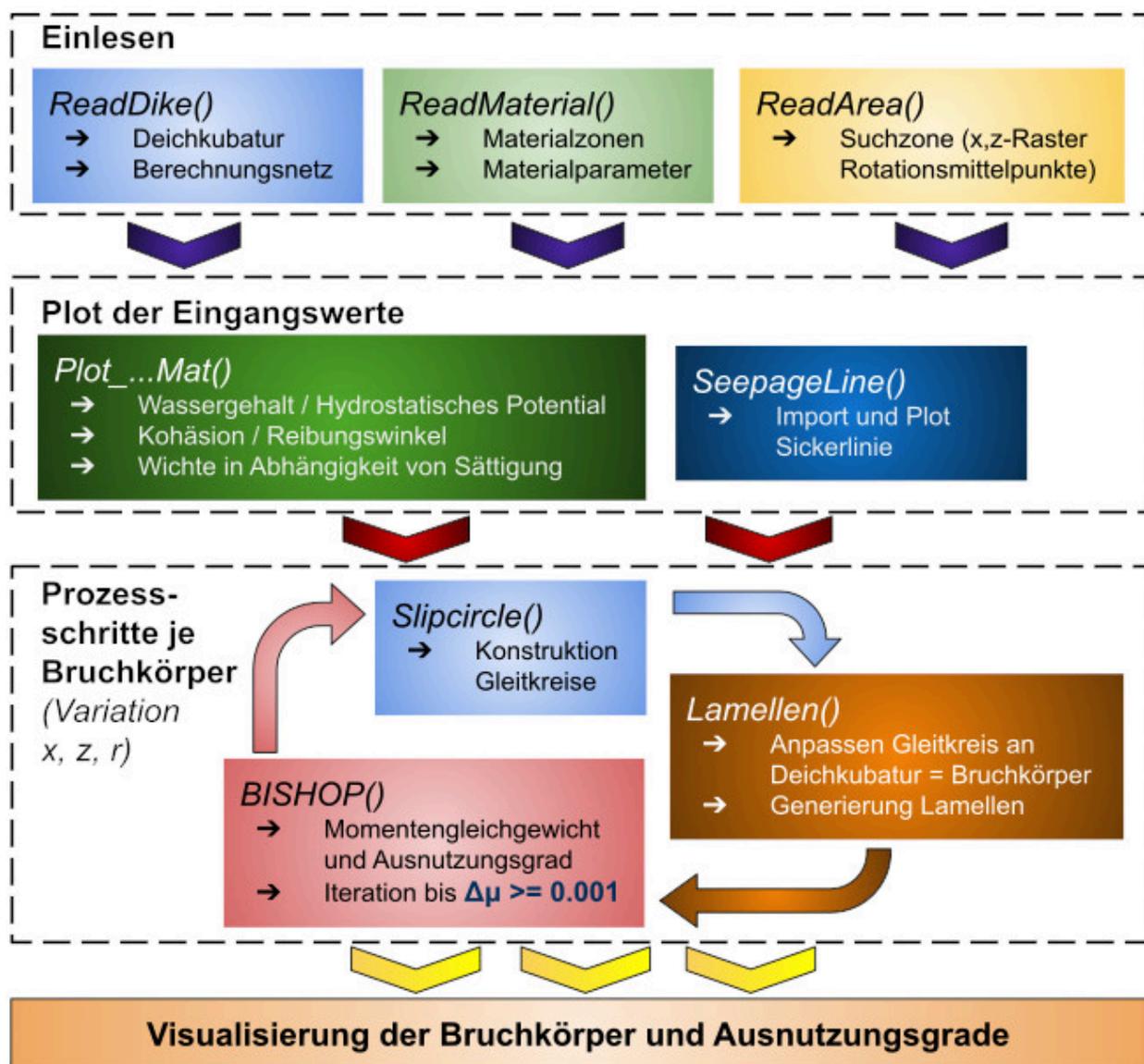


Abbildung 2.1 – Programmbestandteile der Stabilitätsanalyse nach BISHOP der Programmversion V7

Ebenfalls gelungen ist die Berücksichtigung des passiven Erddruckanteils über die Anpassung der Gleitfläche auf der Widerstandsseite an einen maximalen Gleitflächenneigungswinkel in Abhängigkeit der Scherfestigkeit. Die Programmbestandteile der aktuellen Version sind in Abbildung 2.1 aufgeführt. Mit den eingelesenen und verarbeiteten Eingangsdaten aus PCSiWaPro werden dann in einem für jeden möglichen Bruchkörper (bestehend aus Umrissgeometrie und Lamellen) durchzuführenden Iterationsalgorithmus die Ausnutzungsgrade berechnet.

Die Schnittstelle zu PCSiWaPro wird über eine Textdatei für jeden Zeitschritt einer instationären Sickerwasserberechnung realisiert, um die Verknüpfung möglichst effizient und automatisierbar zu gestalten. Die entsprechenden Informationen werden somit an eine Python-Routine übergeben, welche die Ergebnisse nach der Rechnung über Matplotlib visualisiert. Insbesondere bei bindigen Böden gibt es Berechnungsansätze, welche Scherfestigkeitsparameter in Abhängigkeit des Sättigungsgrades modifizieren können. Dies konnte am Beispiel der undrainierten Scherfestigkeit erfolgreich demonstriert werden. Dabei gilt der Ansatz der totalen Spannungen, wobei der Reibungswinkel gegen Null geht und die Kohäsion c durch die undrainierte Scherfestigkeit ersetzt wird. Zusätzlich werden dabei geotechnisch bestimmbare Parameter, wie Fließ- und Ausrollgrenze (w_L, w_P) zur Berechnung der Konsistenzzahl I_C (Glg. 2) sowie der jeweils dazu gehörende Wert der spezifischen undrainierte Scherfestigkeit $c_u(w_P)$ und $c_u(w_L)$ benötigt.

$$I_C = \frac{w_L - w}{w_L - w_P} \quad (1)$$

Die undrainierte Scherfestigkeit $c_u(w)$ in Abhängigkeit des jeweiligen Wassergehalts berechnet sich dabei nach Glg. 2. Der Wert für die Sättigung eines Knotenpunktes im Berechnungsnetz kann aber auch über empirische-bodenspezifische Ansätze zur Manipulation der jeweiligen Scherparameter am Knoten dienen.

$$c_u(w) = c_u(w_L) \left(\frac{c_u(w_P)}{c_u(w_L)} \right)^{I_C} \quad (2)$$

2.3. AE-IWD 3.1 Konstruktiver Entwurf und Aufbau des Deichmodells

Vor Beginn der Versuche wurden im Zusammenhang mit einem Testdeich aus einem weiteren Projekt [4] konkrete Anforderungen an das zu erstellende Deichmodell erarbeitet. Die geplanten Versuche erfordern die Simulierbarkeit vordefinierter Ganglinien, automatische Steuerung der Eingangsparameter, automatische und kontinuierliche Aufzeichnung der Messergebnisse über mehrere Tage bis Wochen aufgrund langer Durchlaufzeiten, die Messbarkeit der Sickerlinie- und Menge sowie der Bodenfeuchte im ungesättigten Bereich, ohne mit der Messtechnik die Ergebnisse zu verfälschen. Die Kubatur des Deiches wurde im ersten Versuch so gestaltet, um eine möglichst hohe Böschung mit realistischer Neigung analysieren zu können. Am Fuß der Böschung befindet sich eine Drainage, die anfallendes Sickerwasser ableitet, jedoch verschlossen werden kann, um einen undrainierten Deich zu simulieren. Abbildung 2.2 und Abbildung 2.3 zeigt den Versuchstand GS01 nach Fertigstellung der Deichkubatur, Ende August 2020. Rechts im Bild erfolgt die Aufnahme der Pegelstände der Sickerwasserlinie (Pegelharfe) in einem abgedunkelten, von innen künstlich beleuchteten Bereich.

Innerhalb einer studentischen Arbeit [5] wurde erfolgreich die Zeitreihengenerierung des Pegelverlaufs an der Pegelharfe zur Bestimmung der Sickerlinie an 6 Punkten entlang des Deichquerschnitts mittels Maschinellern Sehen realisiert. Damit stand eine weitere kostengünstige Aufzeichnungsmethode für die allgemeine Laboranwendung zur Verfügung.



Abbildung 2.2 – Versuchsstand nach Fertigstellung der Deichkubatur GS01

Das Material der von KSI neu zu entwickelnden Bodensensoren wurde ebenfalls zunächst im Deichmodell auf Dauerhaftigkeit und mechanische Belastung geprüft. Die Praktikabilität der Sensoren kann im großen Deichmodell unter ähnlichen Einbaubedingungen wie in realen Deichen und Dämmen untersucht und bei Bedarf optimiert werden.

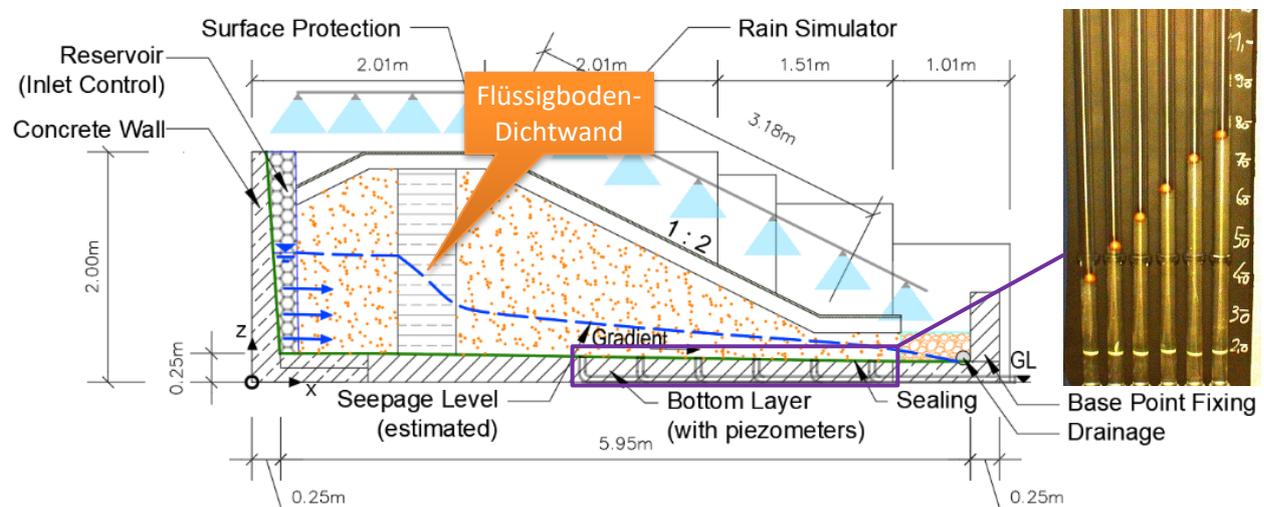


Abbildung 2.3 – Versuchsstand GS03 nach Einbau der Flüssigbodendichtwand

Die zweite messtechnische Neuerung war die Aufzeichnung 3-dimensionaler Veränderungen der Deichoberfläche während zweier kontrollierter Bruchversuche (GS01 und GS02). Dazu wurde vor Allem die kostengünstige Methode mittels Tiefenkamera zur Erfassung schneller Bewegungen erfolgreich angewendet. Die Abbildung 2.4 zeigt die Anordnung der Messtechnik und den Aufbau der verwendeten Tiefenkamera.



Aufbau:

- ① RGB-Kamera
- ② Laser
- ③ 2 x Infrarot Kameras

Abbildung 2.4 – Messtechnik zur 3D-Dokumentation des Deichversagens von GS02 (Tiefenkamera Intel RealSense d455 und eines Leica-Laserscanners)

Ein Laser der Fa. Leica diente dabei zur Überprüfung der Genauigkeit. Bei ca. 2m – 3m Entfernung zum Objekt (hier als Tiefe bezeichnet) betrug die Messabweichung $< 2\%$ und erfüllte somit die wesentlichen Anforderungen. Somit konnten Serien von Punktwolken über die Versagenszeit erstellt, anschließend ausgewertet und Rückschlüsse auf die Bruchkörpergeometrie gezogen werden. In Abbildung 2.5 ist die Eingabemaske (Depth Quality Tool) zur Bedienung der Tiefenkamera und Aufnahme des 3D-Streams der Dechoberfläche dargestellt. Es ist damit nun möglich, weitere mathematische Stabilitätsmodelle zu validieren.

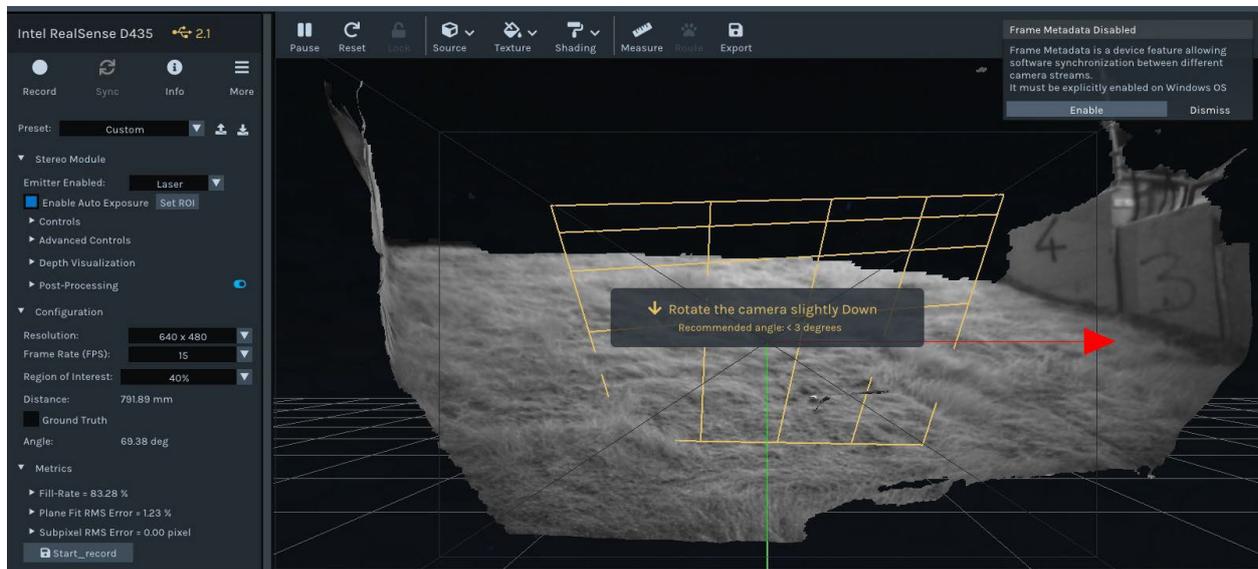


Abbildung 2.5 – Eingabemaske zur Aufnahme von Punktwolken und 3D-Streams mittels Tiefenkamera

Zur praxisnahen Erprobung der umweltfreundlichen Flüssigboden-Technologie zur bautechnischen Abdichtung von Bestandsdeichen wurde sich zunächst für einen möglichst realistischen Einbau im großen Modelldeich entschieden. Ende August 2021 erfolgte zunächst die Ausschachtung und Verbau eines ca. 1,80m tiefen, ca. 4m langen und 0,6 m breiten Grabens entlang der Deichkrone, welcher dann im nächsten Schritt über eine Betonpumpe verfüllt wurde (Abbildung 2.6). Der Verbau wurde danach mit dem Hallenkran aus dem noch flüssigen Material gezogen, wobei besondere Vorsicht beim Treten an den noch instabilen Rändern geboten war.

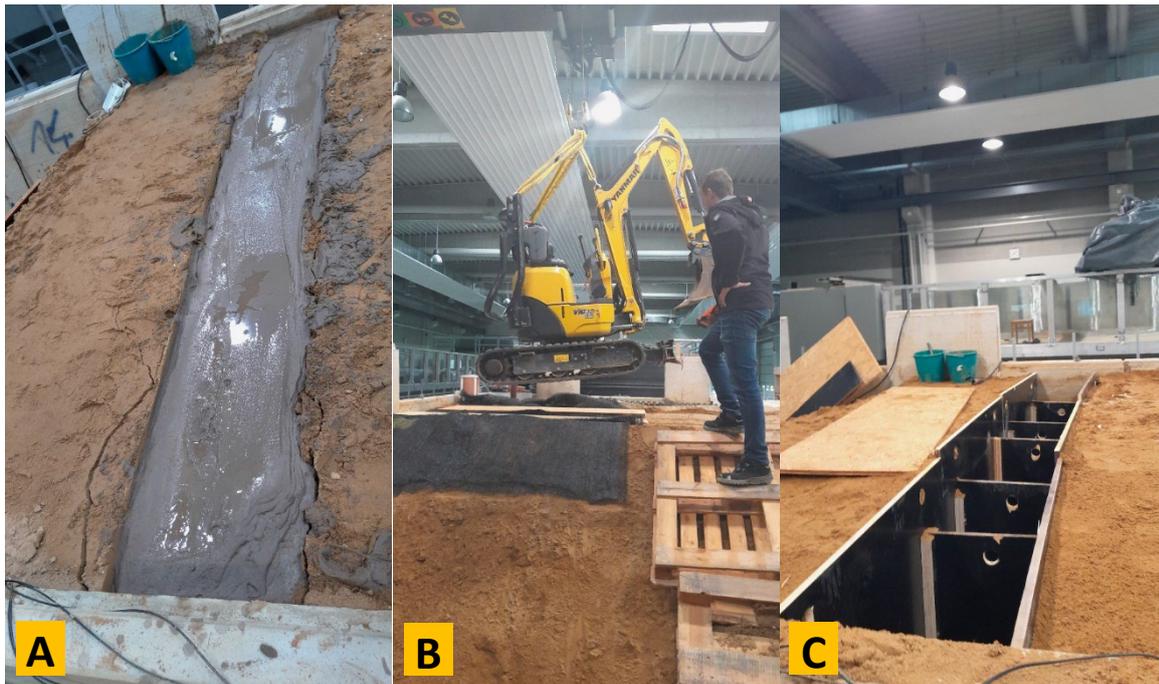


Abbildung 2.6 – Arbeitsschritte bei Herstellung der Flüssigbodendichtwand; A: Ausschachten, B: Verbau herstellen, C: Einfüllen und Verbau ziehen

Die konstruktive Umsetzung der Regenanlage ist in Abbildung 2.7 illustriert. Somit sollte eine versuchstechnische Simulation von Niederschlagsereignissen auf Damm- und Deichbauwerken über eine definierte Oberflächenbefeuchtung ermöglicht werden. Zur gleichmäßigen und repräsentativen Simulation eines Niederschlagsereignisses wurden in Vorversuchen geeignete Düsen, deren benötigte Anzahl und Anordnung ausgewählt.

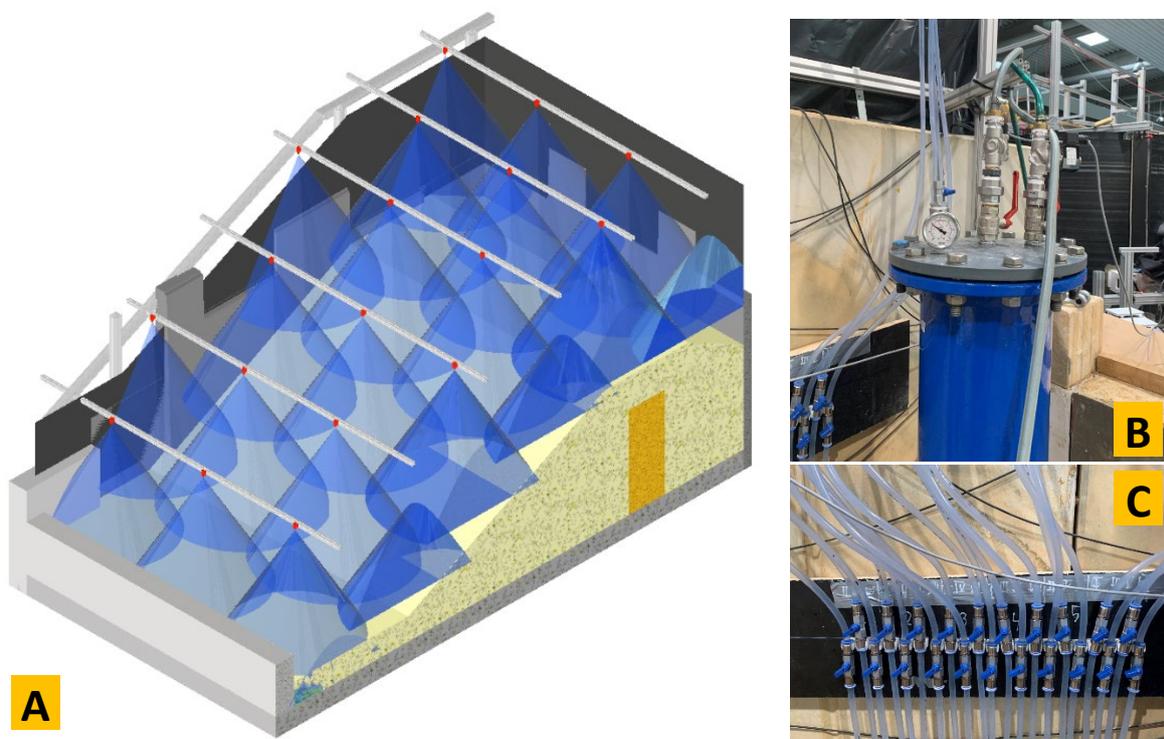


Abbildung 2.7 – Umsetzung der versuchstechnischen Simulation von Niederschlagsereignissen im Labor (A: Übersichtsskizze mit Düsenkegeln, B: Druckbehälter zum Einstellen einer gleichmäßigen Druckverteilung, C: Individuell einstellbare Düsenansteuerung mit Verteilungsschläuchen)

Hierbei kommt eine Anlage zum Einsatz, mit der flächig sowohl die Niederschlagsmenge als auch die Niederschlagsintensität variiert werden können. Damit lässt sich Feuchteverteilung im teilgesättigten Bereich gezielt einstellen und steuern. Zeitaufwendig war hierbei vor Allem das Testen und Einstellen der Düsen, die relativ homogene Sprühkegel ausbilden mussten. Zu beachten ist vor Allem die untere Grenze der einzustellenden Niederschlagsintensität, da sonst der Mindestdruck für die Düsen unterschritten wird. Alternativ lässt sich die Anlage aber auch intervallartig betreiben. Die Pausen zwischen den Beregnungsphasen können je nach Niederschlagsintensität verkürzt oder verlängert werden. Die Gleichmäßigkeit des Niederschlags lässt sich optimieren, wenn auch die Neigung der Düsenkegel zur Deichoberfläche justiert wird.

Da die oberflächlichen Erosionserscheinungen auf einer geneigten Sandböschung zu berücksichtigen sind, wurde zunächst eine Kunstrasenschicht verlegt (jedoch ohne Unterboden). In weiteren Versuchen kam es trotzdem zu Erosionserscheinungen, da insbesondere Unterspülung des Kunstrasens auftrat (siehe auch Abbildung 3.12). Als am zweckmäßigsten hat sich die Bewehrung mit einer feinmaschigen Kokosmatte erwiesen, da eine alternative dicke Unterbodenschicht mit höherem Konstruktionsaufwand verbunden ist und wenig Wasser in den Deich eindringen kann.

2.4. AE-IWD 3.2 Szenarioanalysen des physikalischen großskalierten Deichmodells und Scherkraftbestimmung

Im Berichtszeitraum wurden seit Ende August 2020 ca. 40 Einstauszenarien an den Modelldeichen gefahren. Dabei galt ein Teil der Programmierung und Anpassung der Regelungstechnik, aber auch der Analyse der komplexen geohydraulischen Vorgänge im Deich. Im 2. Quartal 2021 konnten auch zwei kontrollierte Versagensvorgänge physikalisch simuliert und mittels Photogrammetrie über eine Tiefenkamera in 3D über die Zeit aufgezeichnet werden. Für das Szenario GS02 wurde ein Teil der beschädigten Deichböschung aus GS01 abgetragen und neu profiliert, womit GS02 eine deutlich schmalere Deichkrone, aber die gleiche Böschungsneigung aufwies wie GS01. Dabei wurden verschiedene Ganglinien verwendet, sowohl naturnahe Glockenkurven, als auch parametrisierte Hochwasser-Ganglinien, mit Vorsättigungsphase und stufenweisem Anstieg und Absenk. Die parametrisierten Ganglinien konnten besser analysiert werden, da die Übergänge auch am Abfluss oder in den Aufzeichnungen der Bodensensoren besser zu erkennen waren.

Der Versuchsdeich GS03 wurde zunächst aus homogenem Bodenmaterial (enggestufter Sand) neu errichtet und nachträglich mit einer kompletten Dichtwand versehen (Abbildung 2.3, Abbildung 2.6). Da diese fast wasserundurchlässig war, wurde sich entschieden in einem Szenario GS04 die Dichtwand um ca. 45 cm zu reduzieren. Dies wäre auch insofern näher an der Realität, da in situ auch eine Frostschutzzone eingehalten werden muss und Ergebnisse von M&S die hohe frostanfälligkeit des Flüssigbodens bestätigt haben.

Ebenfalls konnten einige Szenarien mit kombiniertem Einstau und Niederschlag realisiert werden. Dabei wurde der Versuchsdeich GS04 mit reduzierter Dichtwand verwendet. Die Herstellung erfolgte über das händische Abgraben der Dichtwand und anschließendem Verfüllen und Verdichten (diesmal per Handstampfer) des entstehenden Hohlraums. Der Nachteil der Methode lag in der Schwächung eines Teils der Deichkrone, was sich ggf. später negativ auf die Stabilität ausgewirkt hat. Bei GS04 kam es zu mehreren unkontrollierten Versagensprozessen, die mehr oder weniger auf die zusätzliche Belastung durch die Oberflächenbefeuchtung, damit verbundene Erosion und gesteigerte Sickerwassermengen zurückzuführen waren. Die Schadstellen wurden jedes Mal sorgfältig ausgebessert oder beseitigt, jedoch erfolgte kein kompletter Neuaufbau des Deiches mit maschineller Verdichtung. Aufgrund der großen Wassermengen und der Verstopfung der Drainage am Deichfuß (Filtervlies) durch abgeschlämmte Partikel, wurde die anfänglich höhere Niederschlagsmenge zum Ende hin reduziert.

Bei allen Szenarien erfolgte die Qualifizierung und Quantifizierung der Sickerwasserverhältnisse im vollgesättigten Bereich. Dazu gehört die Sickerwassermenge bzw. Abfluss (gemessen durch Kippwaage an der Landseite des Deiches), die Ausbildung der Spiegellinie und die Porenwasserdrücke. Dabei wurden Einstaudauer, Einstauhöhe auf der Wasserseite, der Niederschlag und im Fall der zusätzlichen Dichtwand die hydraulische Leitfähigkeit des Erdstoffs (Durchlässigkeit variiert).

Im teilgesättigten Bereich konnte über die Bodensensoren die räumliche und zeitliche Ausprägung der Feuchteverteilung in Abhängigkeit der Niederschlags- bzw. Kapillarverhältnisse gemessen werden. Dabei war insbesondere die Infiltrationsfähigkeit des Erdstoffs in Verbindung mit der Niederschlagsintensität relevant. Im Übergangsbereich zum wassergesättigten Bereich (Kapillar-saum) findet eine Überlagerung kurz oberhalb der Spiegellinie mit dem von oben infiltrierendem Oberflächenwasser statt.

Weiterhin waren die stabilitätsrelevanten, bodenmechanischen Kenngrößen in Abhängigkeit der jeweiligen Sickerwasserverhältnisse zu quantifizieren. Dazu wurde das eigens dafür entwickelte Stabilitätsmodell herangezogen (siehe Kapitel 2.2). Die Dichte wurde dabei anhand des Sättigungsgrades variiert, da diese je nach Porenfüllung höher oder niedriger ausfällt. Wird die Trockendichte erreicht, so geht der Sättigungsgrad gegen Null. Die Kohäsion und der Reibungswinkel hingegen sollten für die Stabilitätsberechnung nicht bindiger Böden in Abhängigkeit der Feuchte nicht verändert, bzw. eventuell temporär entstehende zusätzliche Scherkräfte nicht mit einbezogen werden. Bei bindigen Böden lässt sich aber die undrainierte Scherfestigkeit (ähnlich der Kohäsion) bei Bekanntsein weiterer Parameter berechnen. Eine Validierung der angenommenen Parameter kann nur über ein kontrolliertes Versagen des Deiches erfolgen.

3. Ergebnisse und Dokumentation

3.1. AE-IWD 1.2 Stabilitätsanalyse und –berechnung

Die Recherche zu bereits existierenden mathematischen Modellen für die Stabilitätsanalyse von Deichen ergab zahlreiche kommerzielle Angebote, wie GGU-Stability [1] oder SLOPE-W [2; 3], als auch frei nutzbare wie z.B. D-Stability [6; 7]. In Fachartikeln wird grob beschrieben, welche Methoden für wissenschaftliche Zwecke entwickelt und angewendet wurden, jedoch gibt es aktuell wenig frei zugängliches Material an brauchbaren Programmcodes für die hier fokussierte Gleitkreisberechnung mit Hilfe von in Lamellen unterteilter Bruchkörper mit kreisförmiger Gleitfuge (bestes Ergebnis: pyBIMstab [8]) als Nachweis der globalen Standsicherheit. Über ein Kräftegleichgewicht (Momentengleichgewicht bei klassischer Kreisform) zwischen den einwirkenden und stabilisierenden Kräften wird ein Ausnutzungsgrad iterativ berechnet, wobei die Kohäsion, die Bodenwichte, die Porenwasserdrücke in der Gleitfuge und der Reibungswinkel mitberücksichtigt werden. Im allgemeinen Fall werden die Scherkräfte zwischen den Lamellen nicht mit einbezogen, diese Option bietet aber SLOPE-W über die Morgenstern-Price-Methode [3]. Über den Ansatz von van-Genuchten wird dort ebenfalls rudimentär der Einfluss der ungesättigten Zone einberechnet. Ein interessanter aber rechenintensiver Ansatz (jedoch zu komplex für die Zielstellung) wäre die Bestimmung der wahrscheinlichsten Gleitfuge zwischen einem Ein- und Austrittspunkt nach SPENCER [7], wobei das Polygon der Gleitfuge über einen genetischen Algorithmus berechnet wird. Weitere, diverse numerische Verfahren zur Stabilitätsberechnung in 2D und 3D, die mittels KEM (kinematische Elemente-Methode) oder FEM (Finite-Elemente-Methode) arbeiten, gibt es in kommerziellen (z.B. PLAXIS), aber auch frei erhältlichen (TOCHNOG) Produkten, sind aber entweder nicht kompatibel mit PCSiWaPro oder zu aufwendig in der Bedienung [9]. Eine eigenständige Entwicklung z.B. eines FEM-Modells würde den praxisbezogenen Rahmen des Projekts überschreiten, kann nachfolgend und langfristig aber die bessere Lösung sein.

3.2. AE-IWD 1.3 Codeentwicklung von Stabilitätsmodellen und Implementierung

Der Mangel an frei zugänglichen und mit PCSiWaPro kombinierbaren Modellen zur Stabilitätsanalyse erforderte die Eigenentwicklung eines Codes zur Implementierung der recherchierten Ansätze zur Berechnung von Versagensmechanismen in einem Deichkörper. Um genug eigene Testfälle generieren zu können, wurde zunächst ein Algorithmus entwickelt, welcher unter Vorgabe eines Wasserstandes die stationäre Sickerlinie nach dem Verfahren von Pavlovsky-Dachler für beliebige Deiche berechnet und grafisch darstellt.

Daraufhin wurde zunächst ein eigenes Programm geschrieben, welches abhängig von der vorgegebenen Deichkubatur einen Gleitkreis in homogenen Material unter Vorgabe des Radius und des Mittelpunktes zeichnet und dabei den Gleitkreis unter Orientierung an einer vorgegebenen Lamellenbreite die Lamellen unter Beachtung von Böschungskanten konstruiert. Anhand der Parameter des Gleitkreises und des verwendeten Materials konnte nun der Algorithmus von Krey/Bishop implementiert und so die Berechnung des Ausnutzungsgrades für einen definierten Gleitkreis erfolgen (Abbildung 3.1).

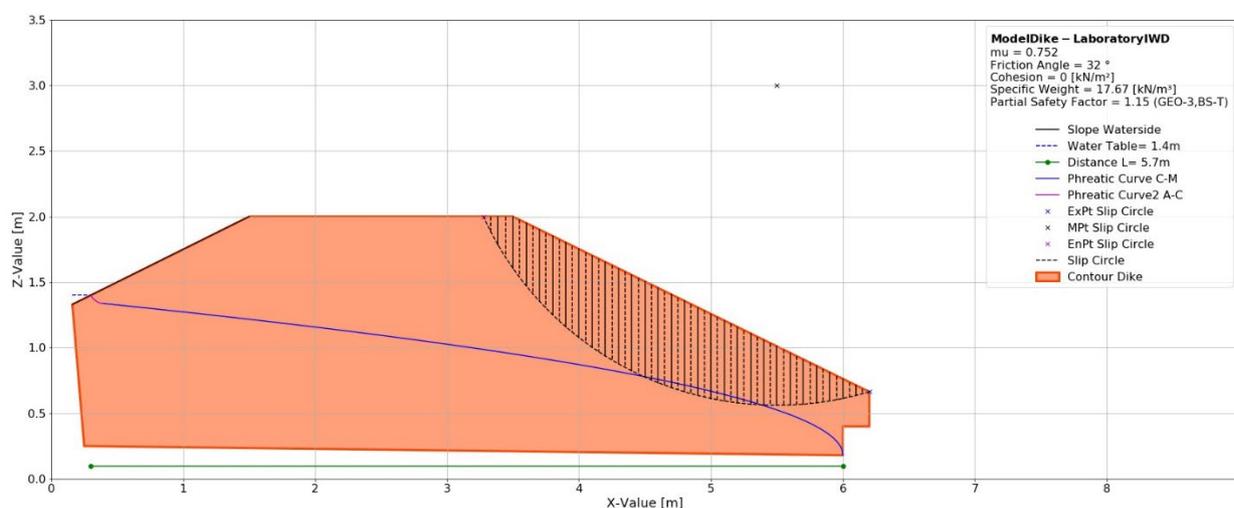


Abbildung 3.1 – Visualisierung der programmierten Stabilitätsanalyse nach KREY/BISHOP anhand einer vorgegebenen Sickerlinie

Im nächsten Schritt wurde eine Möglichkeit erarbeitet, über die Variation von Mittelpunkt und Radius des Gleitkreises entlang eines definierten Rasters viele verschiedene Gleitkreise zu konstruieren und deren Ausnutzungsgrad zu berechnen (in einem Durchgang beispielsweise 2000 mögliche Gleitkreise). Das Raster wird in der Grafik dargestellt und gibt für jeden Mittelpunkt den geringsten Ausnutzungsgrad aus den verwendeten Radien an. Dies lässt sich ebenfalls grafisch in einer Colormap veranschaulichen (Abbildung 3.2).

Im folgenden Abschnitt wird zunächst der Prototyp (Version 7) des Stabilitätsmodells vorgestellt. Dieser arbeitet noch mit einem Excel-File als Eingabedatei für Deichgeometrie, Bodenparameter, Material- und Suchraster für die Stabilitätsanalyse auf Böschungsbruch. Darin befinden sich auch die Ergebnisse der geohydraulischen Berechnung mittels PCSiWaPro, welche an den Berechnungsknoten (hier ca. 8000) die geohydraulischen Parameter ausgibt. Ein realistisches Szenario ist in Abbildung 3.2 veranschaulicht.

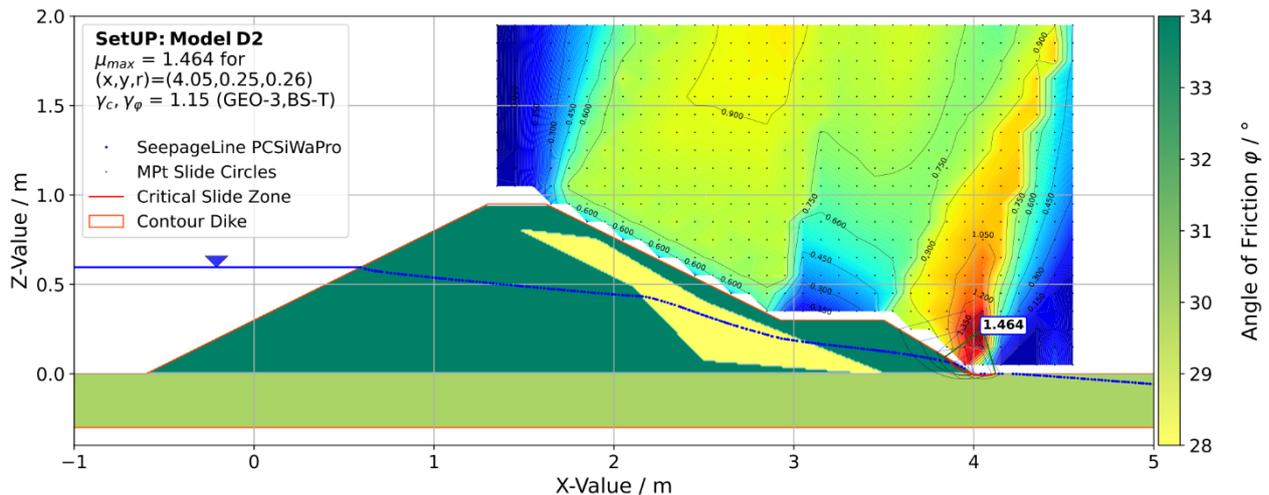


Abbildung 3.2 – Visualisierung der programmierten Stabilitätsanalyse nach KREY/BISHOP anhand einer durch PCSiWaPro berechneten Sickerlinie mit dem Prototyp V7

Mit den angegebenen Scherparametern (Abbildung 3.3) wird es im Bereich des Sickerwasseraustritts zu einem Teilversagen kommen, da dort der Ausnutzungsgrad deutlich über 1 liegt. In diesem Beispiel wurde mit 3 Materialien gerechnet: Ein eher schluffiger Untergrund (hellgrün), ein sandiges Deichmaterial (dunkelgrün) und eine Art Dichtungskern aus tonigem Material mit einer geringeren Durchlässigkeit (gelb). Gut zu beobachten ist dabei der Aufstau der Sickerlinie vor dem Dichtungskern und der Abbau des Gradienten im weiteren Verlauf.

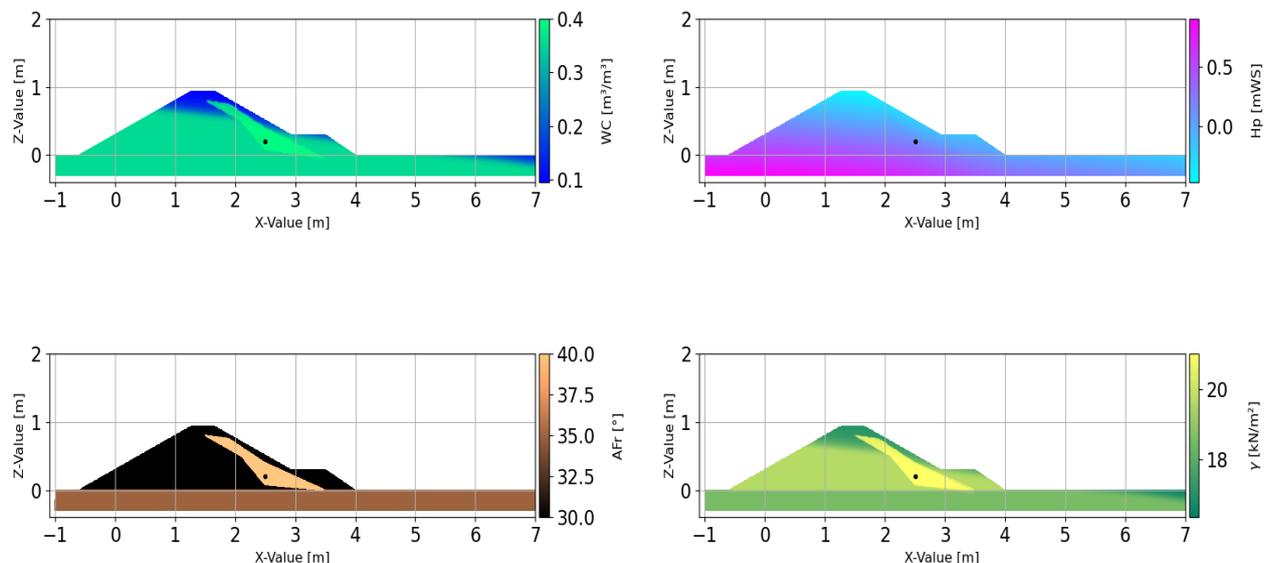


Abbildung 3.3 – Plot der Parameterverteilung im Deichkörper (Teil der Stabilitätsanalyse)

Eine steile Böschung und der unmittelbare Austritt der Sickerlinie aus der Böschung führen zu einer vollständigen Ausnutzung des Scherkraftwiderstands. Ohne böschungsbefestigende Maßnahmen würde es in diesem Fall zu einem langsamen, rückschreitenden Teilversagen kommen. Es wird später anhand der physikalischen Modellversuche gezeigt, dass sich mit Abflachung der Böschung durch abrutschendes Material über einen kürzeren Zeitraum eine Art Gleichgewichtszustand einstellen wird, wenn die Sickerlinie eine bestimmte Höhe nicht überschreitet.

Durch Profiling wurde der Code außerdem rechentechnisch optimiert, da insbesondere die feine Auflösung bei der Parametereingabe mit Aufwand verbunden ist. Für eine erste Analyse sind ca. 2000 – 5000 Bruchkörper durchzurechnen (Zeit ca. 30 sec). Bei einer feinen Auflösung, wie für oberflächennahe Bruchkörper bei sandigem Material teilweise notwendig, wurden auch schon in

einer Rechnung 500.000 Geometrien in weniger als 1 h berechnet. Dies konnte durch konsequente Verwendung von C++ - Bibliotheken in Python erreicht werden (Numpy).

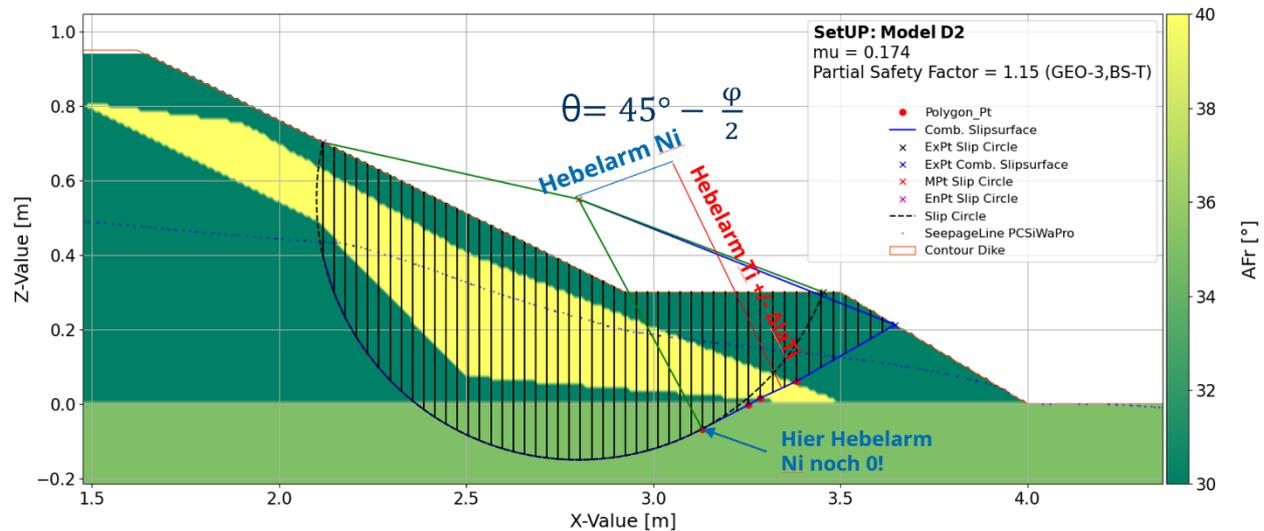


Abbildung 3.4 – Implementierung des passiven Erddrucks auf der Widerstandsseite in die Berechnung

In den ersten Programmversionen traten bei der Code-Entwicklung insbesondere auf der Widerstandsseite noch unrealistisch hohe Gleitflächenwinkel auf, da der Reibungswinkel des passiven Erddrucks noch nicht berücksichtigt worden ist. Dies wurde mittlerweile durch die Einbindung des in Abbildung 3.4 dargestellten Zusammenhangs bei einem angenommenen Gleitflächenwinkel θ in Abhängigkeit des Reibungswinkels ϕ nach DIN 4048 auch für veränderliche Reibungswinkel gelöst. Dafür müssen die zusätzlichen Hebelarme N_i und $T_i + \Delta a_i T_i$ in die Berechnung des Momentengleichgewichts aus stabilisierenden und antreibenden Momenten im BISHOP-Ansatz integriert werden. Verändert sich im Laufe der Gleitfläche der Reibungswinkel, ist dies durch einen Knick am Materialübergang erkennbar (rote Punkte in Abbildung 3.4). Die Lamellen werden dementsprechend an die neue Gleitfläche angepasst.

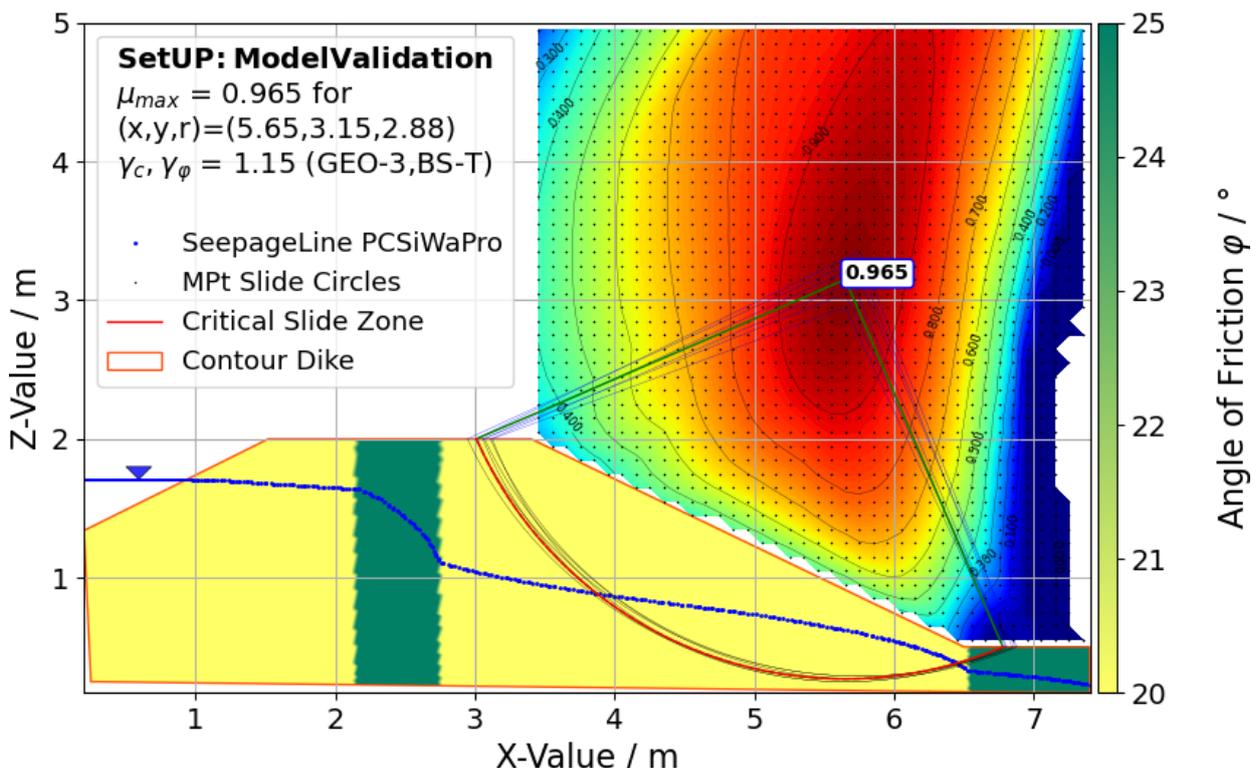


Abbildung 3.5 – Grafische Auswertung des Stabilitätsanalysetools PyStAna-D

Der voll optimierte Code des auf geohydraulischen Simulationsdaten aus PCSiWaPro basierenden Stabilitätsanalyse-Tools wird im Folgenden mit „PyStAna-D“ bezeichnet und die Validierung sowie Funktionsweise erläutert. Nahezu sämtliche Eingangsdaten, wie Deichgeometrie, Materialparameter, Sickerwasserlinie, Sättigungsverteilung und Auswertebereiche können nun in PCSiWaPro über eine leicht zu bedienende Benutzeroberfläche eingegeben werden. Diese wird im Abschlussbericht des IGW-TUD beschrieben. Im offenen Code von PyStAna-D können dann bei Bedarf insbesondere Genauigkeits-, Simulations- oder Ausgabeparameter definiert werden.

Die Abbildung 3.5 steht beispielhaft für die grafische Ausgabe der Ergebnisse der Stabilitätsanalyse. Grundlage bildete hierbei die Deichgeometrie GS03 mit vollständiger Dichtwand. Die Gleitkreise werden nur im farblich markierten Bereich über dem Deich analysiert, um Berechnungszeit zu sparen. Die Sickerlinie bildet sich qualitativ realistisch im Deichquerschnitt ab (Reduzierung an der weniger durchlässigen Dichtwand, sowie vor der Drainage am Deichfuß). Der Gleitkreis mit maximalem Ausnutzungsgrad befindet sich ebenso an der farblich am stärksten hervorgehobenen Stelle. Die Kohäsion wurde hierbei jedoch auf 1.0 kN/m^2 gesetzt, was für das verwendete Material zu hoch ist. Damit entwickeln sich aber nicht nur oberflächennahe, sondern auch tiefliegende Gleitkreise.

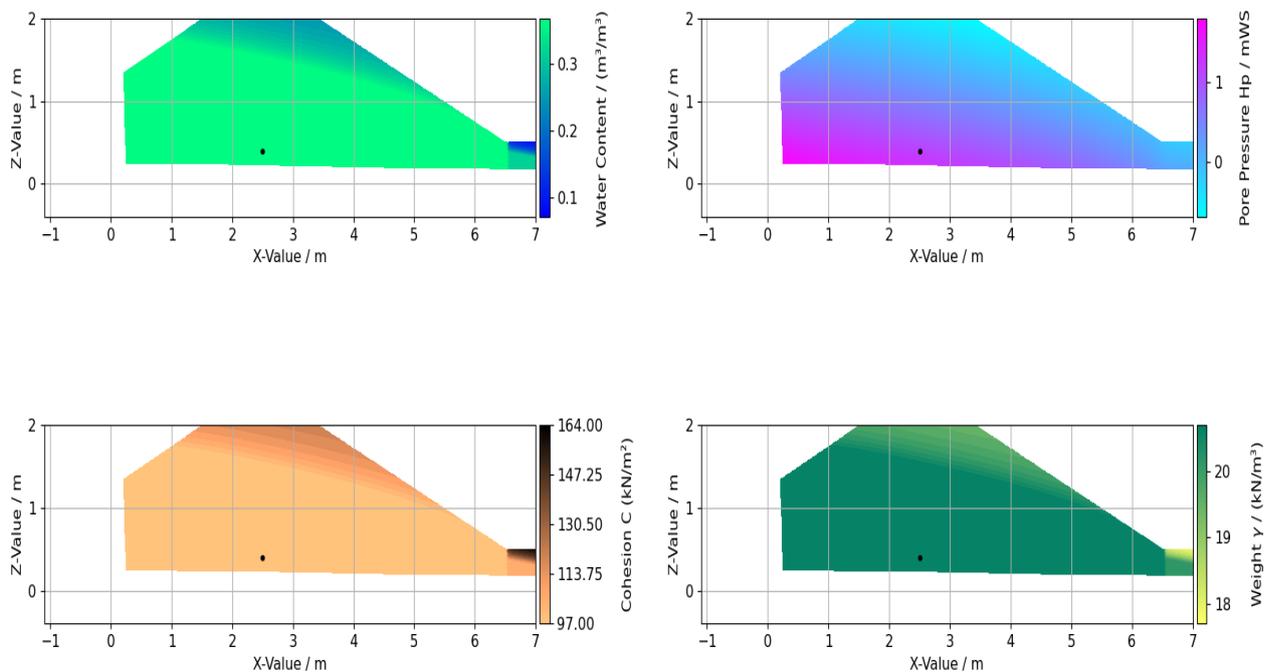


Abbildung 3.6 – Manipulation der Scherparameter in Abhängigkeit der Feuchteverteilung für bindige Böden (undrainierte Scherfestigkeit)

Weiterhin wurden empirische Ansätze zur Manipulation der Scherparameter in Abhängigkeit der Sättigung recherchiert, um damit noch realistischere Gleitflächen nachstellen zu können. Dabei gelang es den optionalen Ansatz der undrainierten Scherfestigkeit zu implementieren. Die Abbildung 3.6 zeigt dabei die veränderliche Kohäsion in Abhängigkeit des Wassergehalts. Dies erfordert jedoch die zusätzliche Angabe von Fließ- und Ausrollgrenze des jeweiligen Materials. Insbesondere bei gemischtkörnigen Böden mit Übergang zum Ton und anderen Versagensarten als Böschungbruch ist das eine mögliche Methode zur Untersuchung der teilgesättigten Zone. Allgemein gibt es dann für diese bindigen Böden jedoch geringere Ausnutzungsgrade mit tiefen Gleitkreisen. Das Ergebnis einer beispielhaften Berechnung lässt sich aus Abbildung 3.7 entnehmen. Dabei wurde ebenso berechnet. Der Einfluss der teilgesättigten Zone ließ sich durch Ausbildung der 2. Schwachstelle nahe der Dechoberfläche nachweisen.

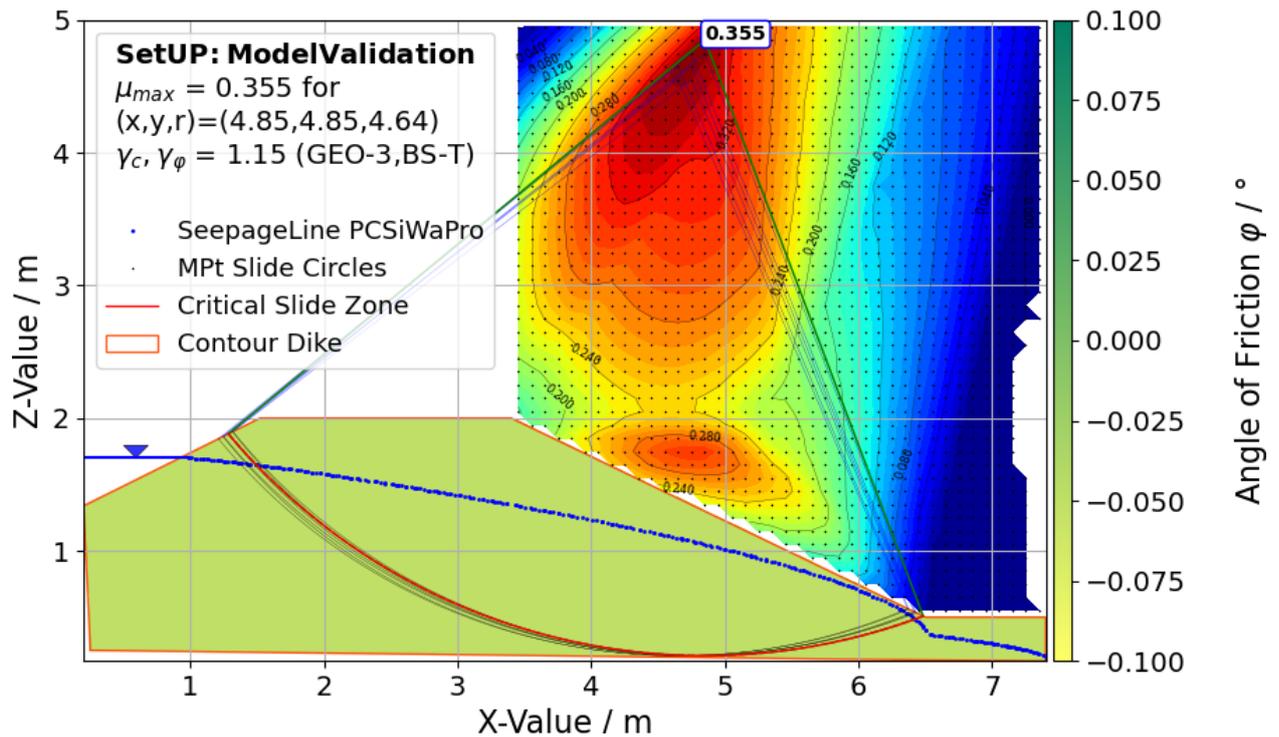


Abbildung 3.7 – Stabilitätsanalyse durch Manipulation der undrainierten Scherfestigkeit bei bindigen Böden

Es besteht außerdem die Option der Definition von Auflasten auf die Deichgeometrie, um beispielsweise Verkehrslasten oder zusätzliche Deckschichten berücksichtigen zu können. Dies wird beispielhaft in der Abbildung 3.8 demonstriert, wo durch die Auflast im Randbereich der Deichkrone ein lokales Versagen (Überschreitung des Ausnutzungsgrades $\sim 1.7 \gg 1.0!$) forciert wird.

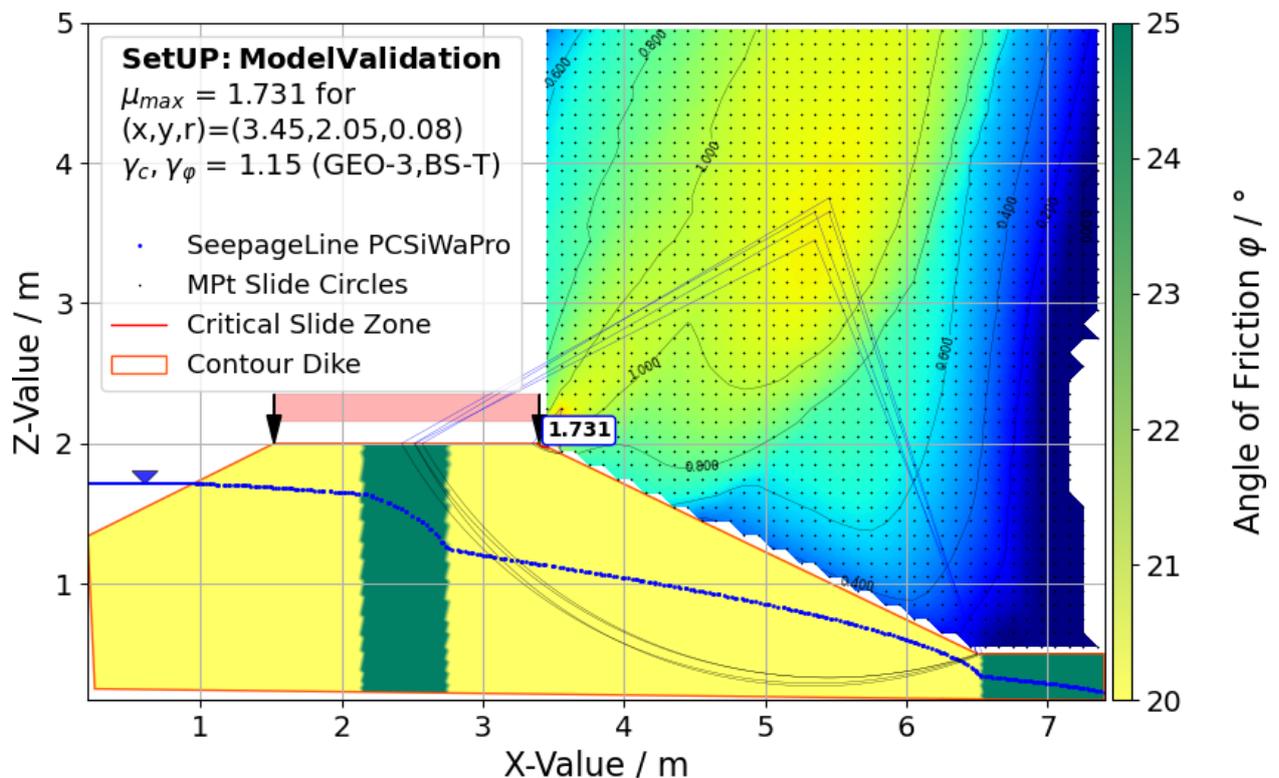


Abbildung 3.8 – Definition und Analyse von Auflasten in PyStAna-D

In Verbindung mit kosteneffizienten Sensornetzwerken sollten besonders gefährdete Bereiche oder Bereiche mit hohem Schadensrisiko im Falle eines Deichversagens mit einem Frühwarnsystem (Early Warning System = EWS) versehen werden. PCSiWaPro und PyStAna-D sind grundsätzlich integrierbar in solche Systeme, deren wichtiger Bestandteil eine Standsicherheitsbeurteilung ist. Dabei werden idealerweise in Echtzeit aufgezeichnete Messwerte als Eingangsdaten in laufende Stabilitätsberechnungen des Realbauwerks integriert und mit dem virtuellen Modell (Digitaler Zwilling) verglichen. Dieser „virtuelle Deich“ hat den Vorteil, auch ausgehend von aktuellen Daten, mögliche Szenarien in der nahen Zukunft simulieren zu können, wie z. B. das zusätzliche Auftreten von Niederschlägen. Über ein Entscheidungsfindungs-System kann dann die Risikobeurteilung stattfinden und frühzeitig Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Das niederländische Verbundprojekt UrbanFlood (2009-2012) hat bereits gute Ergebnisse liefern können. Die Abbildung 3.9 zeigt das dort entwickelte Schema eines EWS.

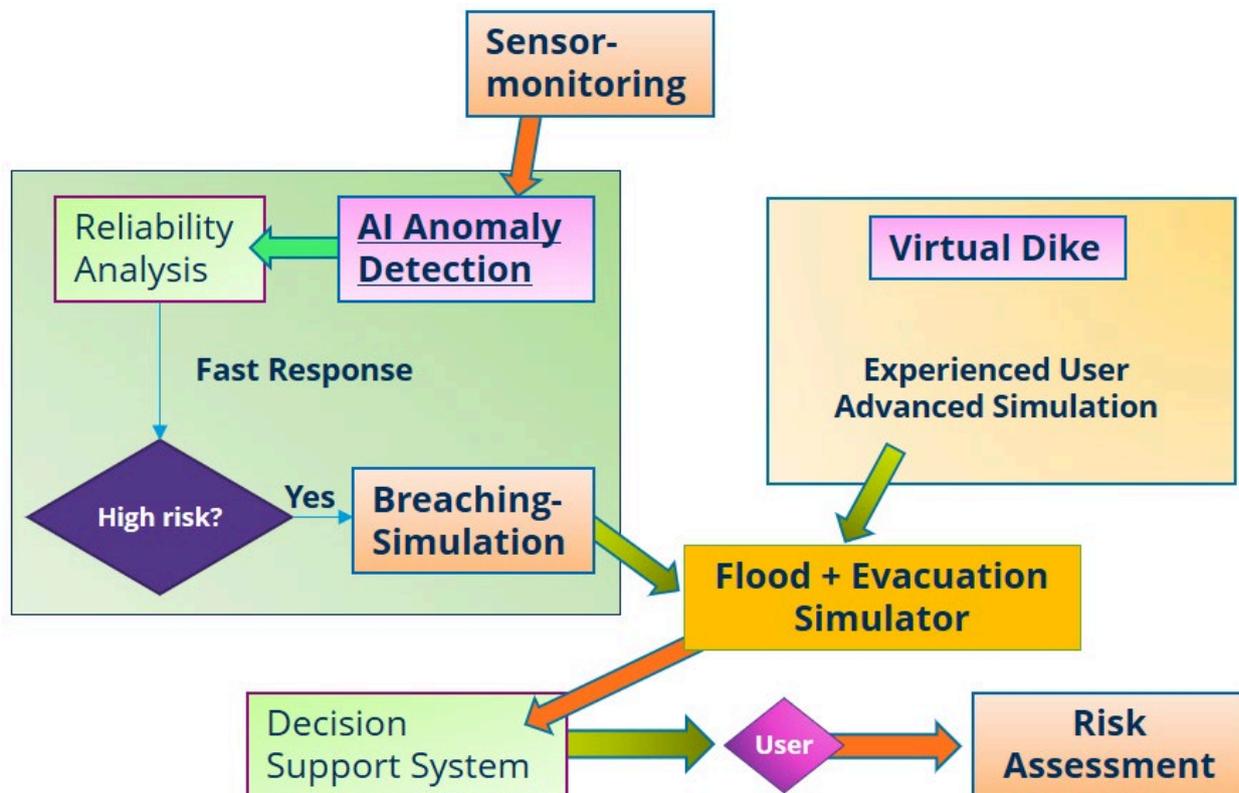


Abbildung 3.9 – Schema eines Frühwarnsystems (EWS) aus dem Projekt UrbanFlood

3.3. AE-IWD 3.1 Konstruktiver Entwurf und Aufbau des Deichmodells

Umfangreiche Vorversuche, zuletzt in einem Projekt zur Detektion von Biberbauten an den Oderdeichen [4], haben geholfen, den Optimierungsbedarf für den Großversuchsstand für Modelldeiche in der Wasserbauhalle zu identifizieren und die Anpassung für das VSDS-Projekt durchzuführen. Der größte Unterschied zu den bisherigen Versuchen besteht in der Möglichkeit, nun automatisch eine im Vorhinein definierte Hochwasserganglinie über die gesamte Höhe des Versuchsstandes zu simulieren. Damit kann ein Zu- und Abfluss von 0-4 l/s mit einem leistungsstarken Regelsystem, bestehend aus einer Drainagewand auf der Wasserseite, welche mit einem Filterflies zum Deichkörper abgetrennt ist, einer Pumpe für den Wassereinlass in die Drainagewand mit einstellbarem Durchfluss sowie 2 Magnetventilen im Abfluss, realisiert werden (Abbildung 3.10). Die hohen Zuflüsse kommen insbesondere bei Zuständen kurz vor dem Versagen zum Einsatz. Durch die Absinkregelung können ebenfalls Erosionsprozesse durch schnell sinkende Wasserstände an der wasserseitigen Böschung untersucht werden.



Abbildung 3.10 – Funktionsweise der Einstauregelung mit Drainagewand (hier ohne vorgesetztes Filtertextil, Zulauf über Pumpe im rückwärtigen Bereich)

Bei niedrigeren Wasserständen entwässert der Deich langsamer, daher wird die korrekte Entwässerung zur Einhaltung der eingestellten Ganglinie durch die Ventile unterstützt. Die Messsysteme sind auf Langzeitversuche ausgelegt und erfordern normalerweise kein Eingreifen bei laufendem Szenario. Dazu muss eine korrekte Einstellung der Regelparameter erfolgen und die Abweichung von den Sollwerten gering sein, um ein Überregeln der hier verwendeten Zweipunktregelung zu verhindern. Schaltet die Pumpe nicht rechtzeitig ab, kann direkt im Anschluss ein Öffnen der Ventile erfolgen, was wiederum zum direkten Anschalten der Pumpe führt. Das Resultat ist ein schnell hintereinander folgendes An- und Abschalten der Pumpe und der Magnetventile, was zu hohem Verschleiß führen kann. Ein Notfallmechanismus verhindert das Überströmen der Deichkrone bei Fehlfunktion des Regelsystems, wobei die Pumpe abgeschaltet wird. Die Anforderungen an die Mess- und Regelungstechnik erforderten einen hohen Installationsaufwand und waren mit langen Lieferzeiten verbunden, weshalb die Versuche erst August 2020 begonnen werden konnten.

Die Pegelharfe, welche über das Prinzip der kommunizierenden Röhren an 6 Stellen unterhalb des Deichkörpers den Wasserdruck abgreift, kann nun ebenfalls maschinell abgelesen werden. Im Rahmen einer Bachelorarbeit [5] wurde ein Code entwickelt, welcher die einzelnen Pegelstände über markierte Schwimmer erfasst und über eine Serie an Bildern daraus Zeitreihen der Pegelschwankungen generieren kann (siehe auch Abbildung 3.17). Die Anzahl der Pegel ist dabei variabel und wird mittels eines vortrainierten neuronalen Netzes erkannt. Die Algorithmen werden ebenfalls von Bildverarbeitungsprogrammen zur Mustererkennung eingesetzt.

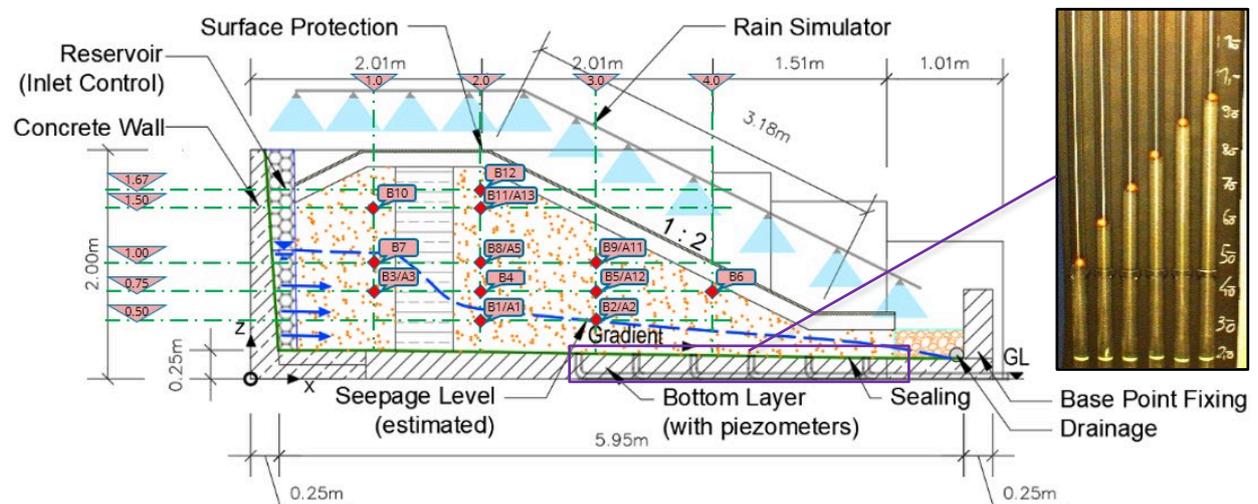


Abbildung 3.11 – Deichmodell mit Flüssigbodendichtwand (GS03) und Skizzierung der Regenanlage, Dokumentation der Bodensensoren (KSI = A, IWD = B) und analoger Pegelstandsanzeige

Die von KSI entwickelten Kohlefasermatten konnten auf Ihre Beständigkeit gegenüber Verdichtungsarbeit erfolgreich getestet werden. Aus den Erfahrungen des Einbaus in das Deichmodell wurde ebenfalls eine praktische Tablettenform für die Bodensensoren entwickelt.

Der Einbau der KSI-Bodensensoren auf Basis von Kohlefasermatten unter „Baustellen-Bedingungen“ war ein wichtiger Praxistest. Angefangen bei der Lagedokumentation der ca. 20 Sensoren bei gleichzeitig großen Massenbewegungen (pro Einbau 30-40 to Material) über den Widerstand der teils fragilen Kabelverbindungen gegen Verdichtungsarbeiten bis zur optimalen Kabelführung selbst, konnten so wichtige Erkenntnisse gesammelt werden. Neben der prinzipiellen Funktionalität ist der nachträgliche, effiziente Einbau der Sensorik in Bestandsdeiche als wichtige Herausforderung identifiziert wurden, um ein Deichvorhersagesystem wirtschaftlich installieren zu können. In Abbildung 3.11 ist die Dokumentation der Bodensensoren für die Szenarien GS02 und GS03 dargestellt. Dabei wurden die KSI-Sensoren teils paarweise mit den IWD-Sensoren verlegt.

Im Zusammenhang mit der Niederschlagssimulation kam es mehrfach zu einem ungewollten, jedoch nur partiellem Deichversagen. Aufgrund einer Fehlfunktion der Magnetventile wurde der kontrollierte Abfluss aus dem Modell seitens der Einstauwand unterbrochen. Durch die Dichtwand und die hohe Intensität der Beregnung wurde das Wasser trotz Abschalten der Pumpe über den Notfallmechanismus im hinteren, schwer einzusehbaren Bereich weiter angestaut. In Folge dessen erreichte der Pegel die Deichkronenhöhe und es kam zum Überspülen des Deiches, sowie einer Breschenbildung im linken Teil des Deiches (links in Abbildung 3.12) mit viel Materialabtrag. Die Flüssigbodendichtwand verhinderte jedoch ein Totalversagen und blieb nahezu intakt. Zur Dokumentation wurde ein 3D-Oberflächenmodell mittels Photogrammetrie erstellt.



Abbildung 3.12 – Partielles Deichversagen im Zusammenhang mit der Niederschlagssimulation

Ebenfalls ist in Abbildung 3.12 die stattfindende Oberflächenerosion trotz des verlegten Rollrausens zu erkennen, welcher sich nicht an die dunklen Laborbedingungen anpassen konnte. Er löste sich mit der Zeit auf und verdorrte. Die entstehenden Risse führten zum Eindringen von Niederschlagswasser und daraufhin auch zur Unterspülung noch intakter Flächen (siehe rechts im Bild). Ausgeschwemmtes, sehr feinkörniges bzw. organisches Material verstopfte daraufhin die Drainage und der Betrieb des Versuchsstandes musste eingestellt werden. Deutlich besser hat die Stabilisierung der Oberfläche mit einer engmaschigen Kokosfasermatte funktioniert. Hier ist darauf hingewiesen, dass auf eine dickere Deckschicht absichtlich verzichtet wurde, um ausreichend infiltrierendes Niederschlagswasser für eine Analyse der Infiltrationsvorgänge messen zu können. Nach DIN 19712:2013 ist für nichtbindige Böden eine Deckschicht von mindestens 30 cm vorgesehen.

3.4. AE-IWD 3.2 Szenarioanalysen des physikalischen großskalierten Deichmodells und Scherkraftbestimmung

Die technischen Möglichkeiten der Wasserbauhalle wurden genutzt, um maßstabsgetreue Laborversuche an einem Modelldeich (Material: SU) durchzuführen. Die im Projektzeitraum durchgeführten ca. 40 Versuche (1 Versuch ist eine simulierte Hochwasserganglinie) verteilen sich auf 4 Deichkubaturen (GS01, GS02, GS03, GS04). Die 2. Kubatur wurde nach dem ersten Teilversagen des 1. Versuchs durch Abtrag eines Teils der landseitigen Böschung hergestellt. Ein hoher Automatisierungsgrad und ein dichtes Sensornetz (Abbildung 3.11) ermöglichten die Aufzeichnung umfangreicher geohydraulischer Datensätze. Gekoppelt mit effizienten Auswertalgorithmen konnte so ein tiefes Verständnis für die geohydraulischen Prozesse in sandigen Deichen und Dämmen aufgebaut werden.

Insbesondere im Austausch mit den anderen Projektpartnern war es möglich, beobachtete Daten zu diskutieren und über verschieden-skalige Modellversuche abzugleichen. Der kleinskalige Modelldeich am IGW diente dabei als Vorversuch für die Anpassung der Leistungsfähigkeit des IWD-Versuchsstands, bspw.:

- Einstellung beliebiger Ganglinien, siehe Abbildung 3.13
- Zeitlicher Verlauf der Sickerwassermenge (Abbildung 3.13)
- und der Sickerlinie (Abbildung 3.17)

und zur frühzeitigen Erkennung von Umsetzungsproblemen:

- Anforderungen an Regenanlage (Druckhöhen, Verteilung und Art der Düsen)
- Beschaffenheit der Dechoberfläche (Erosionsschutz notwendig)

Die reale Ganglinie schwingt um den Sollwert im Bereich des programmierten oberen und unteren Grenzwertes der Abweichung, was aus dem Regelbetrieb mit Pumpe und Magnetventilen resultiert, die entweder nur ein- oder ausgeschaltet werden können. Für zukünftige Projekte sollte daher eine Durchlaufregelung diskutiert werden, die den Zustrom stufenlos regeln kann. Denkbar wäre auch eine Potentialregelung, die über die Variation der Druckhöhen arbeitet.

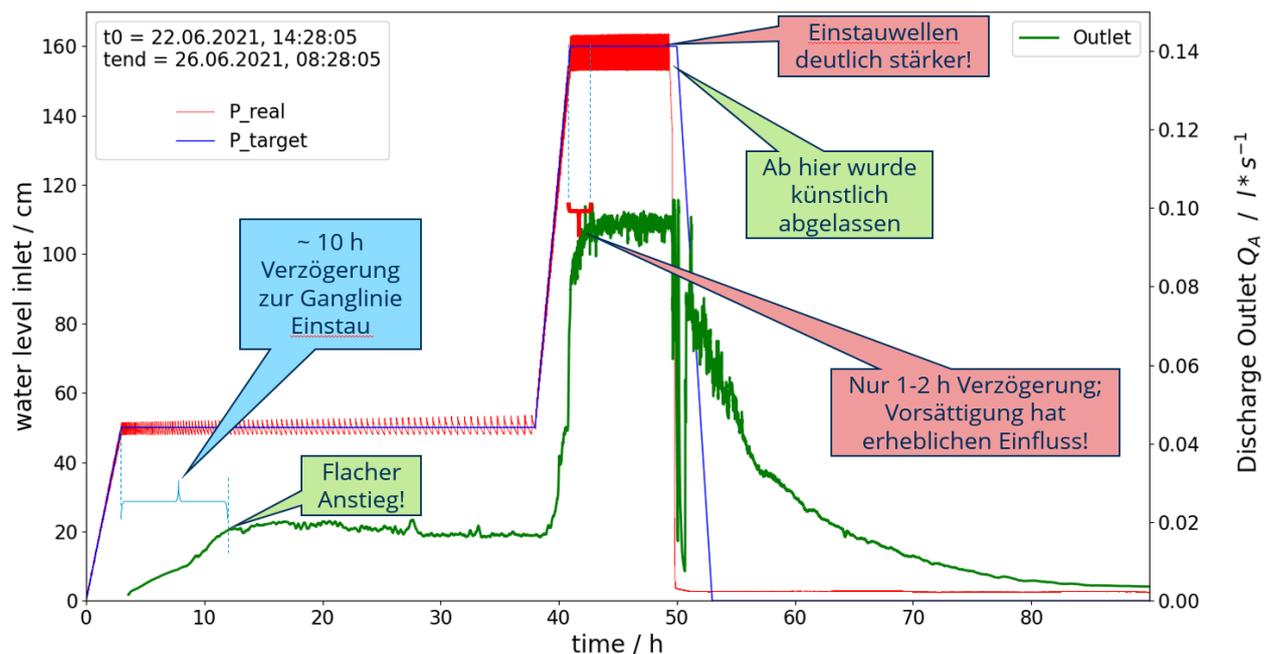


Abbildung 3.13 – Soll (blau) – und Ist (rot) – Ganglinie des Hochwasserszenarios im 2. Bruchversuch sowie die durch die Kippwaage aufgezeichnete Abflussganglinie in grün (Skala auf rechter Seite)

Die Abflussganglinie weist eine ähnliche Form wie die Ganglinie beim Einstau auf, es ist jedoch eine gewisse Zeitverzögerung zu beobachten. Der stationäre Zustand im Abfluss wird für die erste Stufe bei 0,5 m Wasserstand ca. 10 h später erreicht, für die zweite Stufe bereits nach 1,5 h. Dies ist auf den starken Einfluss der Vorsättigung zurückzuführen. Die Einstauwellen weisen aufgrund der erhöhten Durchflüsse bei höherem Einstau auch höhere Amplituden auf. Durch eine inverse Analyse mit PCSiWaPro lassen sich so auch die geohydraulischen Parameter des eingebauten Materials näherungsweise ermitteln. Die Schwankungen am Einstaupegel pflanzen sich auch durch den Deich fort, womit die Sickerlinie sich wellenförmig ausbildet (Abbildung 3.14). Je kürzer der Sickerweg, umso besser sind die einzelnen Wellen zu erkennen. Bei längeren Sickerwegen überlagern sie sich zunehmend, da durch die schwankende Durchlässigkeit unterschiedliche Fließzeiten über den Querschnitt auftreten. Es ist denkbar, dass somit Rückschlüsse auf die Häufigkeitsverteilung der Durchlässigkeit im Deichkörper gezogen werden können, was eine Bemessung des Deiches mit probabilistischen Werten vereinfachen würde.

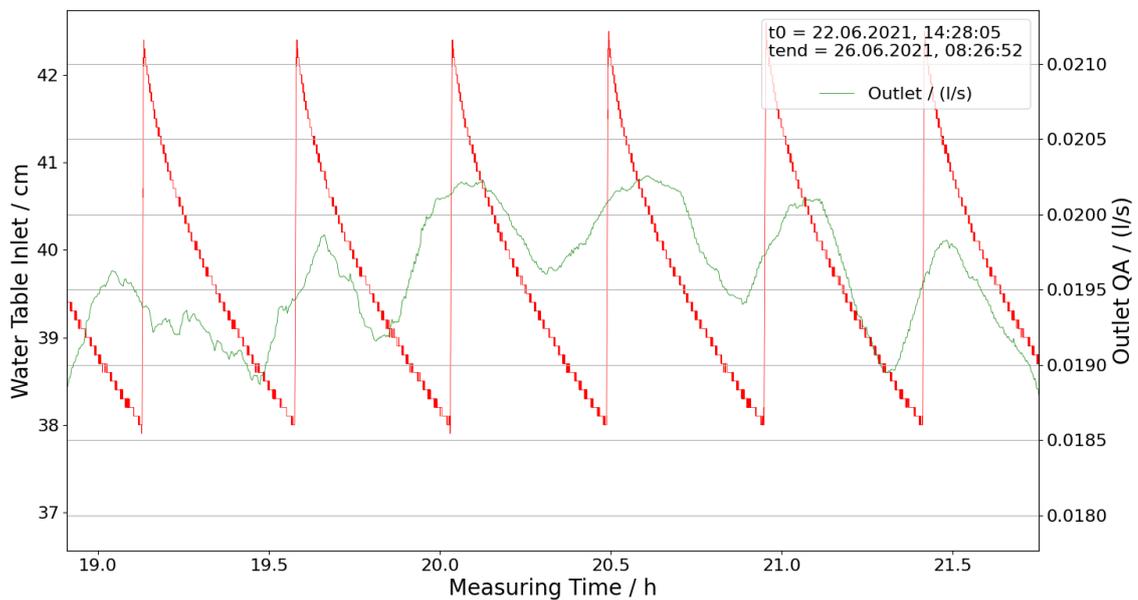


Abbildung 3.14 – Vergleich der Schwankungen am Sickerwasserabfluss sowie am Einstaupegel

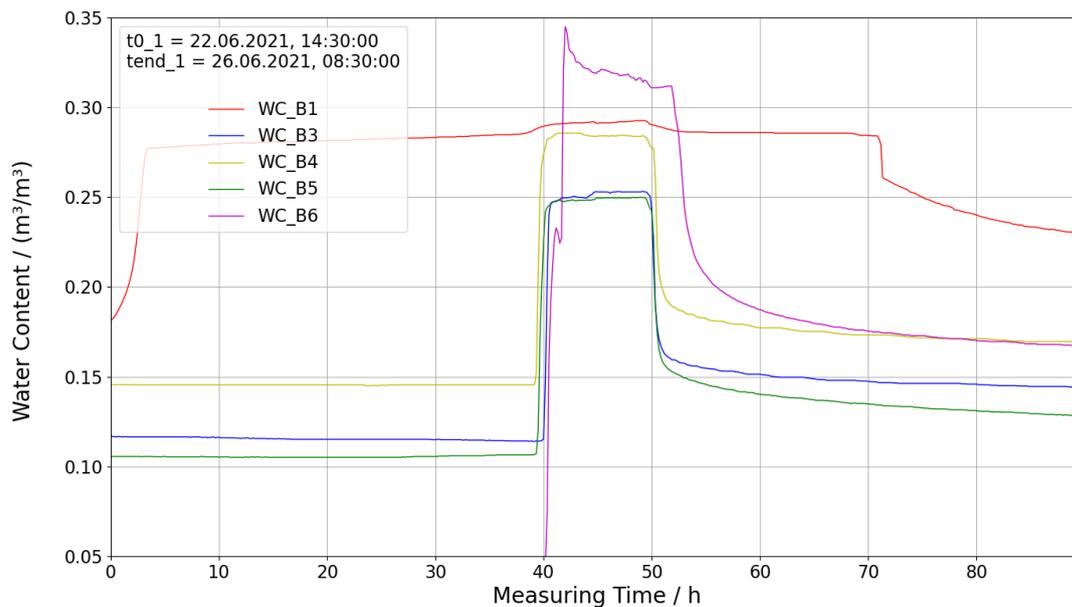


Abbildung 3.15 – Gemessene Wassergehalte einiger IWD-Bodensensoren im 2. Bruchversuch

Die in Abbildung 3.15 beispielhaft aufgezeichneten Verläufe des mit den IWD-Bodensensoren gemessenen Wassergehaltes helfen bei der Entwicklung der KSI-Sensorik. Die charakteristische Plateauform ist ein Zeichen für das Erreichen des vollgesättigten Zustands im Messbereich. Dieser liegt aber für jeden Sensor bei einem anderen Wassergehalt, was auf die unterschiedliche Porosität im Deich zurückzuführen ist. Der Sensor B6 stellt hier eine Besonderheit dar, da sich dieser im Bruchkörper befunden und sich mit dem Material bewegt hat. Die leichte Abnahme des Wassergehalts nach Erreichen des Maximas lässt sich mit Konsolidierung und Verdichtung nach dem Abbruch in der Akkumulationszone erklären.

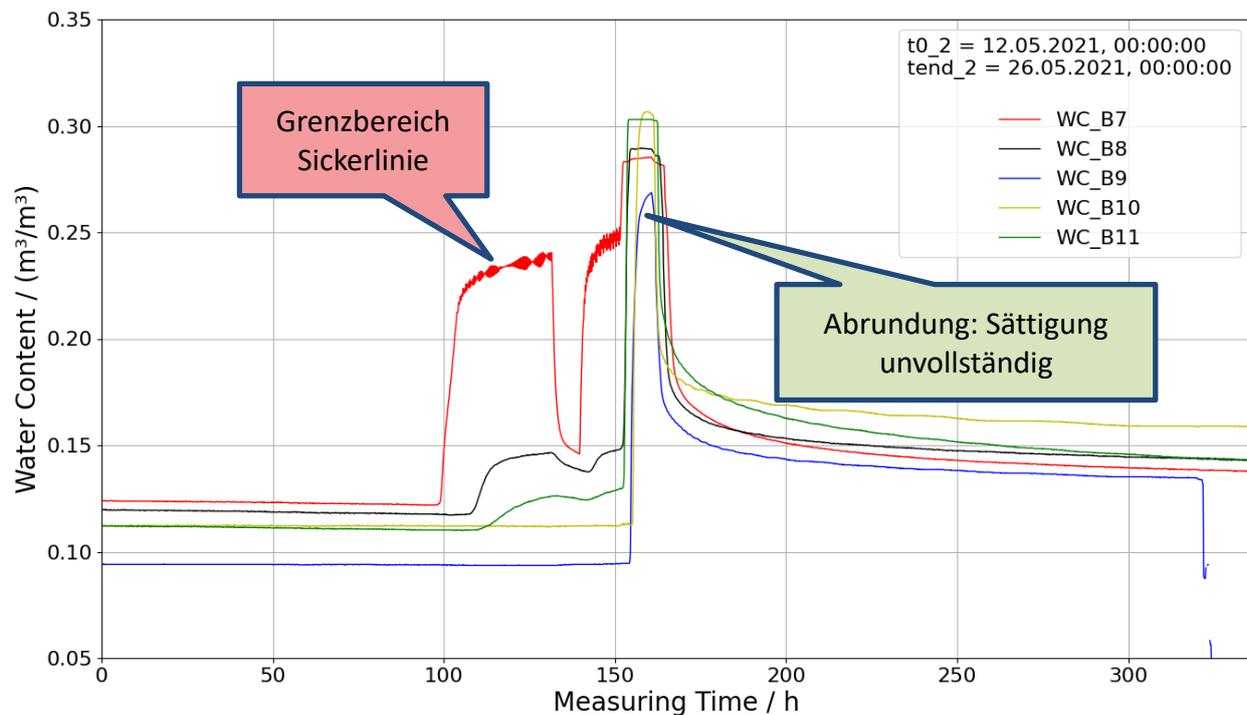


Abbildung 3.16 – Verlauf der Wassersättigung an den Bodensensoren im Versuch GS01

Die Bodensensoren waren neben visueller Begutachtung die beste Möglichkeit, die Vorgänge in der teilgesättigten Zone zu begutachten. In Abbildung 3.16 sind zwei Prozesse zu beobachten, die sich in dieser Zone abspielen. Zum einen (rot markiert) ist an der Übergangszone (gesättigt-ungesättigt) am Sensor B7 ein ähnliches Schwanken, wie im Einstaupegel zu erkennen. Weiter oben oder weiter unten entlang der Sättigungsverteilung findet das nicht statt. Ist bekannt, wo der Sensor liegt, lässt sich der Grenzbereich somit gut lokalisieren. Grün markiert ist der Sensor B9, der relativ weit oben liegt. Die charakteristische Haifischflosse am Maximum lässt darauf schließen, dass an dieser Stelle die Sättigung unvollständig war und nur im Bereich des kapillaren Aufstiegs stattgefunden hat. Der Sensor 11 beispielsweise erreicht, erkennbar am ausgebildeten Plateau, bereits Vollsättigung im Maximum. Die unterschiedlichen Höhen sind zum einen auf unterschiedliche Wasserdrücke (je tiefer, umso höher der Druck, umso höher die Zusammenpressung der verbleibenden Luftbläschen und damit die Sättigung) zurückzuführen, aber auch auf die Unterschiede in der Bodenverdichtung und damit der Porosität im Messbereich der Sensoren.

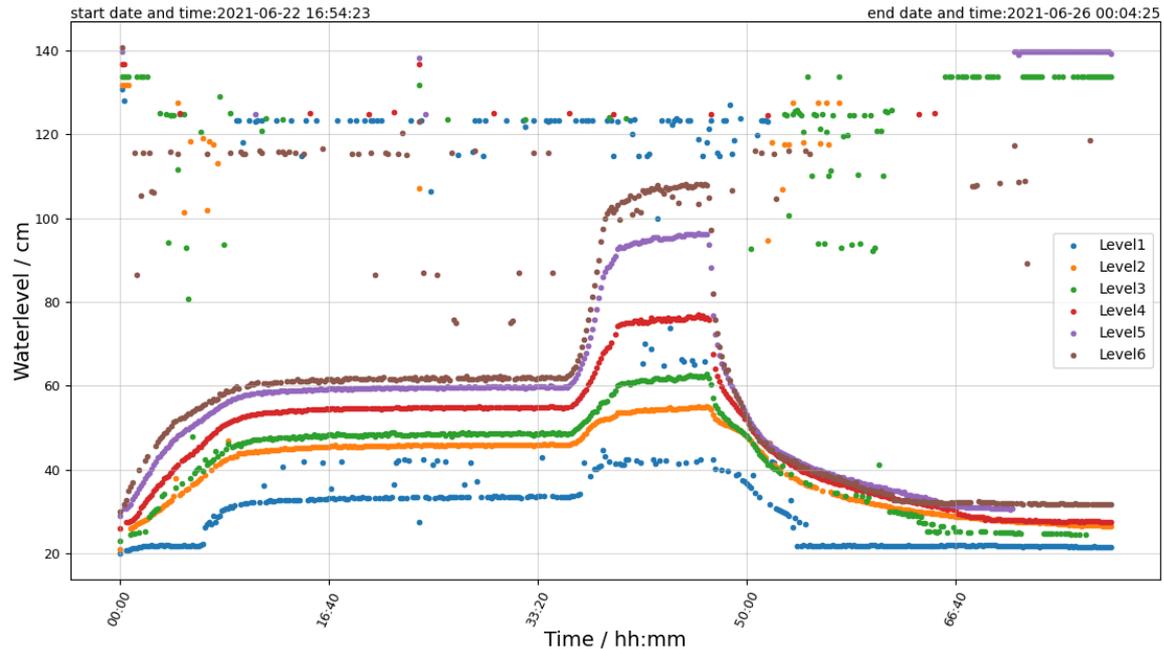


Abbildung 3.17 – Ergebnisse des 2. Bruchversuchs mit dem Programm AWL zur Pegelstandsanalyse

Die erstmalige Implementierung innovativer Messmethoden beinhaltete zunächst die Entwicklung eines Programms zur automatischen Erfassung der Pegelstandsverläufe der analogen Pegelharfe, welche an 6 Punkten entlang der Bodenplatte den hydrostatischen Wasserdruck (und damit näherungsweise die Sickerlinie) anzeigt. Aus einer Serie von Bildaufnahmen der Pegel werden durch Bilddifferenzen und Farbwerterkennung die Bewegungen der Schwimmer registriert, in Ganglien transformiert und visualisiert (Abbildung 3.17).

Gute Ergebnisse lieferte auch die bei den kontrollierten Versagensversuchen zur Dokumentation der Oberflächenveränderung eingesetzte Tiefenkamera (Intel RealSense). In der Abbildung 3.18 sind links die absoluten Differenzen zur ursprünglichen Dechoberfläche farblich hervorgehoben. Blau ist dabei die Abbruchkante und Rot die Zone mit der größten Akkumulation von Material. Die als 3D-Stream aufgezeichneten Punktwolken wurden programmtechnisch analysiert und die rechts dargestellten Böschungsprofile dabei extrahiert. Dadurch lässt sich mit hoher Genauigkeit die Charakteristik des zeitlichen Versagensprozesses feststellen. Dabei handelt es sich nicht um das gleitkreisförmige Abrutschen entlang der Böschung, sondern eher für sandige, verdichtete Materialien typische rückschreitende Erodieren aufgrund des Austritts der Sickerlinie an der Oberfläche. Die Erosionsgeschwindigkeit hat sich im zeitlichen Verlauf deutlich abgeschwächt, da sobald entlang der Abbruchkante die Gradienten abnehmen (also wenn die Abbruchkante die Böschung hinaufwandert), ebenso die treibenden Porenwasserdrücke abnehmen. Mit der Methode nach BIS-HOP lässt sich nur der Beginn und Ort des ersten Versagens berechnen, nicht der gesamte Versagensprozess an sich.

Die eingesetzte Messmethode „3D-Stream der Geländeoberfläche mittels Tiefenkamera“ ließe sich jedoch auch in der Grundlagenforschung für die Validierung numerischer Stabilitätsmodelle einsetzen, wie beispielsweise die *Material-Point-Methode* (MPM).

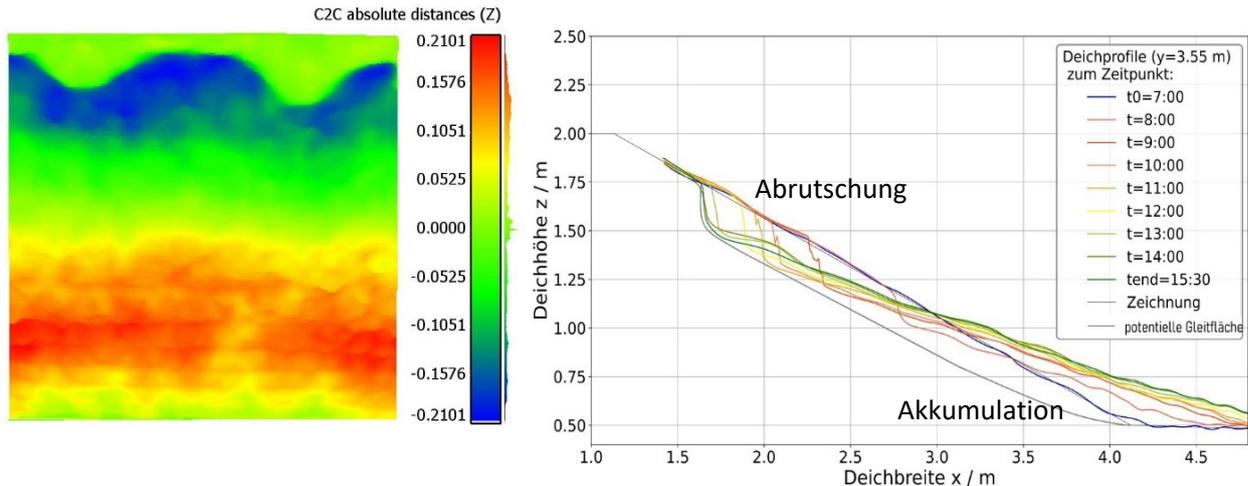


Abbildung 3.18 – Dokumentation der Volumenveränderungen während der Versagensversuche von GS02 (links: Absolute Differenzen zur originalen Oberfläche, rechts: Zeitliche Entwicklung der Böschungsprofile entlang der landwärtigen Böschung)

Weiterhin wurden auch Szenarienanalysen mittels des Stabilitätsanalysetools PyStAna-D durchgeführt, wobei die Geometrie des physikalischen Großversuchs als Vorlage diente. Dabei sollte die Wirkung der Flüssigbodendichtwand, aber auch von Kombinationen verschiedener Einstau- und Niederschlagszenarien auf den Ausnutzungsgrad der landseitigen Böschungsstabilität analysiert werden. Abbildung 3.19 fasst die Ergebnisse mit Fokus auf die Variation von Niederschlag und Hochwasserszenarien zusammen. Dabei wurde der Scherkraftparameter Kohäsion variiert, da sich dieser Wert am ehesten in Abhängigkeit der Feuchte ändert. Geringe Kohäsion, wie z. B. in sandigem Material, geht einher mit besonders hohen Ausnutzungsgraden, aber auch stärkeren Abweichungen der Einflüsse aus Variation der Feuchteverteilung. Die geringste Auslastung hat das Szenario, wo nur 2x über 24h ein Regenereignis simuliert wurde.

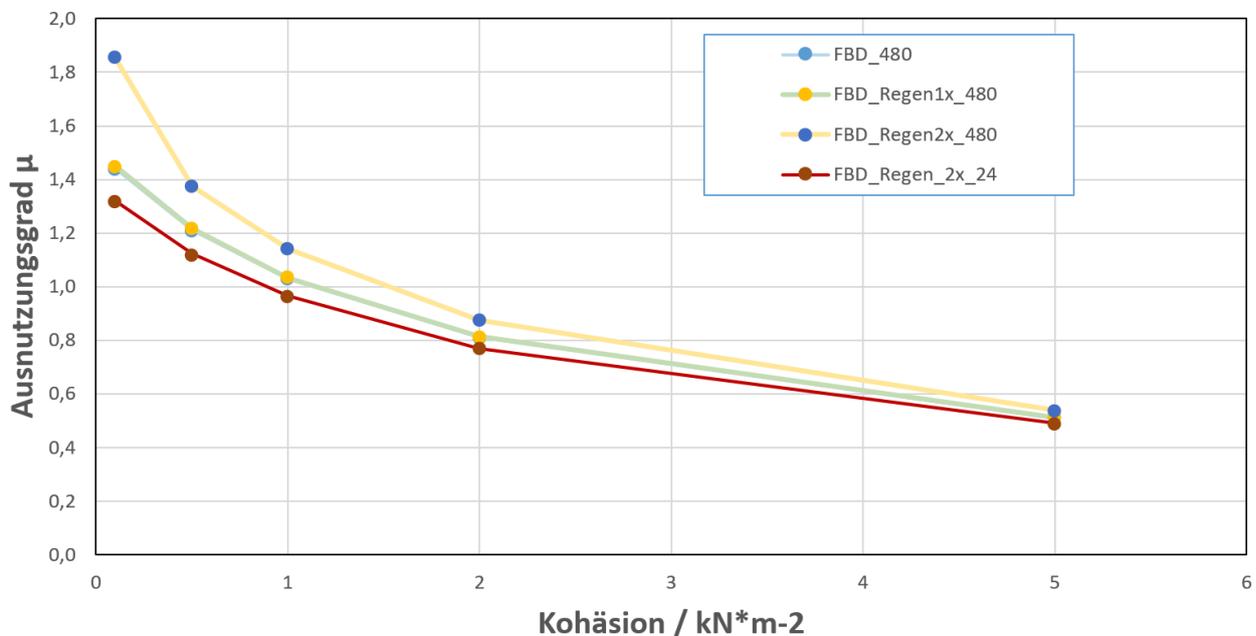


Abbildung 3.19 – Vergleich verschiedener Regenszenarien und Einstauganglinien mittels PyStAna-D

Der alleinige Einstau (FBD_480 = 480h Einstau) hat den zweitniedrigsten Wert, knapp gefolgt von einem mit Einstau und anfänglichem Niederschlagsereignis, was sich ohne Vorsättigung kaum auf die Stabilität auswirkt. Am höchsten liegen die Werte für zwei aufeinanderfolgende Niederschläge kombiniert mit dem Einstauereignis (FBD_Regen2x_480). Dabei wird deutlich, welche Rolle das zeitliche Aufeinandertreffen von Hochwasser und starken Niederschlägen bewirkt. Hat

sich die Sickerlinie durch Einstau bereits nahezu voll ausgebildet, führen zusätzliche Niederschläge zu einer deutlichen Überschreitung des Ausnutzungsgrades. Dies ist ein wichtiger Hinweis darauf, für die Deichbemessung kombinierte Niederschlags- und Einstauszenarien heranzuziehen, bzw. mit Deckschichten zu arbeiten, die die Durchsickerung von oben verhindern.

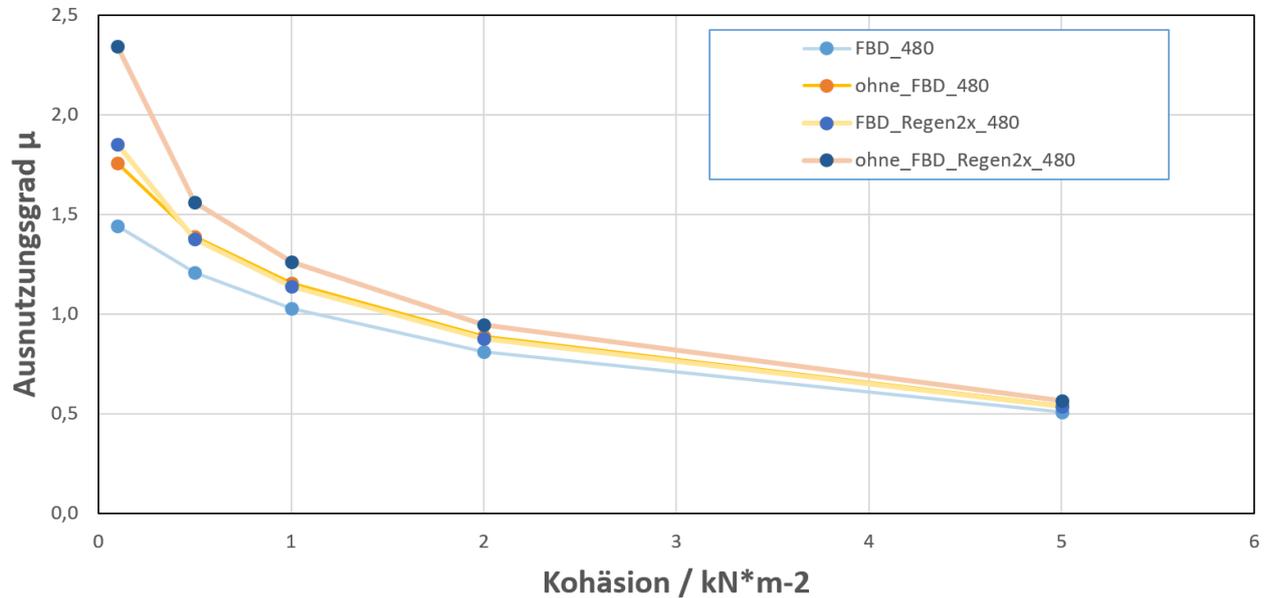


Abbildung 3.20 – Vergleich verschiedener Regenszenarien und Einstauganglinien mit/ohne Flüssigbodendichtwand (FBD) mit PyStAna-D

Die Untersuchungen mit und ohne Flüssigbodendichtwand (FBD) demonstrieren die effiziente Wirkungsweise einer intakten Dichtwand mit nachhaltig angewandten Konstruktionsverfahren. Die geringste Ausnutzung findet sich bei Werten mit FBD und alleinigem Einstau. Diese erhöht sich um etwa 20% ohne FBD und noch einmal geringfügig, wenn intensive Niederschlagsereignisse hinzukommen (jedoch mit FBD). Die höchsten Ausnutzungsgrade weist der Deich ohne FBD auf, wenn Niederschlag und Hochwasser kombiniert auftreten. Insbesondere bei Verwendung von Materialien geringer Kohäsion, die gleichzeitig eine Gefährdung gegen ungünstige Kombinationen aus Niederschlags- und Hochwasserereignissen aufweisen, kann die FBD erheblich zur Minimierung des Versagensrisikos beitragen. Die nachhaltige Anpassung an steigende Risiken durch die sich verschärfenden klimatischen Rahmenbedingungen kann also durch den Einsatz der Flüssigbodentechnologie gefördert werden.

3.5. Publikationen, Berichte und Studentische Arbeiten zum Projekt

Publikationen:

- [10] Fleischer, D., Kostkanová, V., Helbig, U., Tintelnot, G., Hohlfeld, T.: Digitale Chancen in der Messtechnik: LowCost-Ansätze für komplexe Messaufgaben am Beispiel des Modelldeichs der TU Dresden; **erschienen in:** Wasserbauliche Interdisziplinärer Wasserbau im Digitalen Wandel, 2020 (verbunden mit einem Vortrag im Dresdner Wasserbaukolloquium 2020)
- [11] Fichtner, W.; Mertig, M.; Fleischer, D.; Helbig, U.: Impedimetrische Sensoren zur Überwachung von Deichbauwerken; **erschienen in:** Hochschule Mittweida (Hg.) 14.-15.04.2021 – 26. Interdisziplinäre Wissenschaftliche Konferenz Mittweida
- [12] 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; **erschienen in:** Ha-Minh, C., Tang, A. M., Bui, T. Q., Vu, X. H., Huynh, D. V. K. (Hrsg.): CIGOS 2021, Emerging Technologies and Applications for Green Infrastructure. Singapore: Springer Singapore, 2022, S. 305–314.
- [13] Fleischer, D., Helbig, U., Stamm, J.: Towards an Impact Based Forecasting System of Flood Protection Dikes Using Hybrid Modelling Technologies in a Real-Scale Experimental Setup in the Hydraulic Engineering Laboratory of TU Dresden; **erschienen in:** Proceedings of the 39th IAHR World Congress 19-24 June 2022, Granada, Spain.

Abgeschlossene studentische Berichte:

- [5] Kramer, L.-K.: „Entwicklung einer Open-Source-Software-Lösung zur automatischen Pegelstandserfassung mittels innovativer Bilderkennungsmethoden“, Bachelorarbeit 2020
- [14] Bartl, L.: „Labortechnische Großversuche aus kombinierten Niederschlags- und Einstau-Szenarien am Modelldeich – Entwurf einer Beregnungsanlage“, Projektarbeit 2021
- [15] Ninnemann, D.: „Stabilitätsanalyse an Deichen – Physikalische Untersuchungen zum Deichversagen am Großstand“, Diplomarbeit 2021
- [16] Wöllner, E.: „Nachhaltige Lösungen zur Deichertüchtigung – Untersuchung einer Flüssigboden-dichtwand am labortechnischen Großversuch“, Projektarbeit 2022
- [17] Bartl, L.: „Versagensprozesse an Deichen in der ungesättigten Zone – Kombinierte Niederschlags- und Einstausimulation am labortechnischen Großversuch“, Diplomarbeit 2022

4. Beachtung von Grundsätzen

Das Projekt entspricht dem Bereich der „Industriellen Forschung“ und 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. Das Projekt ist insbesondere für den nachhaltigen Hochwasserschutz relevant. Der entwickelte und optimierte Versuchsstand, die Programmierung eigener Stabilitätsmodelle sowie die enge Vernetzung und der Erkenntnisaustausch mit den Projektpartnern stärken die Kompetenzen des IWD als überregionale wissenschaftliche Institution und Ansprechpartner zur Entwicklung komplexer Systeme im nachhaltigen Hochwasserschutz.

5. Literatur

- [1] *GGU-Stability*: User Manual - Böschungsbruchberechnungen und Berechnungen von Bodenvernagelungen und Bewehrte-Erde-Wänden nach DIN 4084 und EC 7, 2020.
- [2] *Geostudio*: SEEP/W und SLOPE/W - User Manual, 2012.
- [3] *Krahn, J.*: Stability Modelling with SLOPE/W: An engineering methodology. Calgary, Alberta, Canada, 2004.
- [4] *Fleischer, D., Steidl, J., Heyer, T., Lehr, C.*, 2020: Untersuchungen zur Detektion vom Biber angelegter Hohlräume an der Oder Brandenburgs: Laboruntersuchungen zur Bewertung von Messverfahren. Leibniz-Zentrum für Agrarforschung (ZALF) e. V., Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik, Müncheberg.
- [5] *Kramer, L.-K.*, 2020: Entwicklung einer Open-Source-Software-Lösung zur automatischen Pegelstandserfassung mittels innovativer Bilderkennungsverfahren. Bachelorarbeit. Technische Universität, Dresden.
- [6] *Rijkswaterstaat*, 2017: WBI2017 Code Calibration: Reliability-based code calibration and semi-probabilistic assessment rules for the WBI2017.
- [7] *van der Meij, R.*: D-Stability: Installation manual, tutorial and scientific manual, 2020.
- [8] *Montoya-Araque, E. A., Suarez-Burgoa, L. O.*: pyBIMstab: Application software for 2D slope stability analysis of block-in-matrix and homogeneous materials. *SoftwareX* 7 (2018), S. 383–387.
- [9] *Wolffersdorff, P.-A.*: Informationen und Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“. *geotechnik* 42 (2019), H. 2, S. 88–97.
- [10] *Fleischer, D., Kostkanová, V., Helbig, U., Tintelnot, G., Hohlfeld, T.*: Digitale Chancen in der Messtechnik: LowCost-Ansätze für komplexe Messaufgaben am Beispiel des Modelldeichs der TU Dresden. In: Stamm, J., Graw, K.-U. (Hrsg.): *Wasserbauliche Mitteilungen: Interdisziplinärer Wasserbau im Digitalen Wandel*, 2020, S. 245–254.
- [11] *Fichtner, W.*, 2021: Impedimetrische Sensoren zur Überwachung von Deichbauwerken.
- [12] *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: Ha-Minh, C., Tang, A. M., Bui, T. Q., Vu, X. H., Huynh, D. V. K. (Hrsg.): *CIGOS 2021, Emerging Technologies and Applications for Green Infrastructure*. Singapore: Springer Singapore, 2022, S. 305–314.
- [13] *Fleischer, D., Helbig, U., Stamm, J.*: Towards an Impact Based Forecasting System of Flood Protection Dikes Using Hybrid Modelling Technologies in a Real-Scale Experimental Setup in the Hydraulic Engineering Laboratory of TU Dresden. In: : *Proceedings of the 39th IAHR World Congress 19-24 June 2022, Granada, Spain*.
- [14] *Bartl, L.*, 2021: Labortechnische Großversuche aus kombinierten Niederschlags- und Einstau-Szenarien am Modelldeich – Entwurf einer Beregnungsanlage. Projektarbeit. Technische Universität, Dresden.
- [15] *Ninnemann, D.*, 2021: Stabilitätsanalyse an Deichen – Physikalische Untersuchungen zum Deichversagen am Großstand. Diplomarbeit. Technische Universität, Dresden.
- [16] *Wöllner, E.*, 2022: Nachhaltige Lösungen zur Deichertüchtigung – Untersuchung einer Flüssigbodendichtwand am labortechnischen Großversuch. Projektarbeit. Technische Universität, Dresden.

- [17] *Bartl, L., 2022: Versagensprozesse an Deichen in der ungesättigten Zone – Kombinierte Niederschlags- und Einstausimulation am labortechnischen Großversuch. Diplomarbeit. Technische Universität, Dresden.*