

Entwicklung eines sensorbasierten Deichmonitorings

Verena Krebs¹ und Holger Schüttrumpf²

¹ RWTH Aachen University; Institut für Wasserbau und Wassermwirtschaft,

Verena.Krebs@wsv.bund.de

² RWTH Aachen University; Institut für Wasserbau und Wassermwirtschaft

Zusammenfassung

See- und Ästuardeiche zählen zu den wichtigsten Küstenschutzanlagen in Deutschland und ein Versagen dieser Bauwerke hat meist schwerwiegende Konsequenzen. Ein frühzeitiges Erkennen von Gefahren und das rechtzeitige Verhindern eines möglichen Deichversagens sind elementar, um einen zuverlässigen Küstenschutz zu ermöglichen. Bestehende Frühwarnsysteme für Sturmfluten und Hochwasserereignisse berücksichtigen den Zustand der Hochwasserschutzanlagen selbst nicht. Es ist jedoch bekannt, dass es durch Vorschädigungen des Bauwerks bereits vor Eintritt des Bemessungsereignisses zu einem frühzeitigen Versagen der Schutzanlagen kommen kann. Vor Gefährdungen infolge eines solchen Ereignisses kann derzeit nicht rechtzeitig gewarnt werden. Ziel des Arbeitspakets *Deichmonitor und -simulator* im Rahmen des Verbundvorhabens *EarlyDike* war die Entwicklung eines sensorbasierten Frühwarnsystems, welches in der Lage ist, Schäden im Deich frühzeitig zu erkennen und so die tatsächliche Widerstandsfähigkeit des Bauwerks zu berücksichtigen. Hierzu wurden am *Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University (ITA)* garnbasierte Sensoren in ein Geotextil integriert. Diese neuartigen, intelligenten Geotextilien wurden in der Versuchshalle des *Instituts für Wasserbau und Wassermwirtschaft der RWTH Aachen University (IWW)* in Deichmodellen auf unterschiedlichen Skalen getestet, validiert und in Zusammenarbeit mit dem *ITA* für den Einbau im Deich optimiert. Die Messsignale der entwickelten Sensorvliese wurden in eine Sensor- und Geodateninfrastruktur übermittelt und automatisiert ausgewertet. Über ein webbasiertes Deich-Dashboard sind die Daten sowie deren Auswertung abrufbar, wodurch eine internetbasierte Echtzeitüberwachung des Modelldeichs in der Versuchshalle des *IWW* realisiert wurde.

Schlagwörter

Sensorbasiertes Deichmonitoring, Frühwarnsystem für Seedeiche, intelligente Geotextilien, textile Sensorik, Modelldeich

Summary

Sea and estuarine dikes are among the most important coastal protection structures in Germany and potential sea dike failure has serious consequences. Therefore, an early detection of damages and the timely prevention of possible dike failures are fundamental for reliable coastal protection. Existing early warning systems for storm surges in the German Bight only take into account the prediction of water levels, while the condition of the coastal protection structure itself is not included. However, it is known that for instance a deteriorated structure might fail even before the design water level is reached. It is currently not possible to

give timely warnings of hazards due to such an event. The aim of work package 3 (dike monitor and simulator) within the framework of the joint project EarlyDike was the development of a sensor-based early warning system, which is able to detect damages in the dike at an early stage and thus take into account the actual resistance of the structure. For this purpose, yarn-based sensors are integrated into a geotextile at the Institute of Textile Technology of RWTH Aachen University (ITA). These smart geotextiles are tested in dike models of different scales at the Institute of Hydraulic Engineering and Water Management of RWTH Aachen University (IWW). There, in cooperation with ITA, the smart geotextiles are optimized for installation in a dike. By the use of conventional measurement technique, the smart geotextiles can be validated during long-term tests over several months. The measured signals of the developed smart geotextiles are transmitted to a sensor and spatial data infrastructure and analyzed automatically. Via a web interface ("dike monitor"), the data and its evaluation can be accessed online, yet enabling real-time monitoring of the model dike in the laboratory of IWW.

Keywords

Sensor-based dike monitoring, early warning system for sea dikes, smart geotextile, yarn-based sensor, dike model

1 Einleitung

Seit Menschen in Küstengebieten siedeln, müssen sie sich an die zerstörerischen Kräfte des Meeres anpassen, um die Küstenbewohner sowie ihre Lebens- und Wirtschaftsräume vor Sturmfluten zu schützen. Die Küstenschutzstrategien haben sich dabei im Laufe der Zeit weiterentwickelt und verbessert. Heutzutage setzt ein moderner Küsten- und Hochwasserschutz auf eine Kombination aus technischen und nicht-technischen Komponenten: Zum technischen Hochwasserschutz zählen alle Küstenschutzanlagen wie sie z. B. in Form von Wellenbrechern, Deckwerken, Mauern und Deichen gebaut werden. Die Küstenschutzanlagen sollen die Küstenlinie vor Erosion und die dahinterliegenden Tiefebenen vor Überschwemmungen schützen. Die nichttechnischen Maßnahmen des Küstenschutzes umfassen die menschliche Reaktion auf bzw. die Anpassung an mögliche Überschwemmungen. Sie gliedern sich in das Flächenmanagement sowie die Hochwasser- bzw. Katastrophenvorsorge. Die Katastrophenvorsorge umfasst dabei die Bestandteile Hochwasservorhersage, Warnung und schließlich das Ergreifen von entsprechenden Notfallmaßnahmen. Eine wesentliche Aufgabe kommt dabei dem Vorhandensein von funktionierenden und verlässlichen Frühwarnsystemen zu.

In Deutschland zählen Seedeiche zu den wichtigsten Küstenschutzanlagen (Schüttrumpf 2008 und EAK 2002). In den vergangenen Jahrzehnten trugen eine Vielzahl von durchgeführten Forschungsprojekten rund um das Thema Seedeiche zu einem vertieften Prozessverständnis, zu einer Beschreibung der wichtigsten Versagensmechanismen und vor allem zu einer sichereren Deichbemessung bei. Daraus resultierten neben einer Vielzahl von Veröffentlichungen Anpassungen in der Deichbemessung und -konstruktion sowie milliardenschwere Deichsanierungsprogramme (MELUND Schleswig-Holstein 2013, NLWKN 2007). Wesentliche Erkenntnisse zu den Themen Deichbemessung, -entwurf und -bau sind beispielsweise in den „Empfehlungen für Küstenschutzwerke“ (EAK 2002), im „EurOtop Manual“ (EurOtop 2016) und im „International Levee Handbook“ (CIRIA 2013) zusammengetragen.

Aber auch die bestentwickelten und vermeintlich sichersten Küstenschutzbauwerke können keine absolute Sicherheit garantieren: Durch den Klimawandel und den damit verbundenen Meeresspiegelanstieg werden Extremereignisse, die über die Bemessungswerte hinausgehen, wahrscheinlicher (MELUND Schleswig-Holstein 2013). Schäden oder Schwachstellen innerhalb der Bauwerke können unerkannt bleiben und den Widerstand der Anlagen verringern. Ferner zeigen Auswertungen vergangener Schadensereignisse, dass das gleichzeitige Auftreten mehrerer Belastungen bereits vor dem Überschreiten des Bemessungswasserstandes zu einem Versagen der Bauwerke führen kann (Vrijling 2001). In all diesen Fällen ist es wichtig, über effiziente Frühwarnsysteme zu verfügen, die Gefahren rechtzeitig erkennen und damit ein Versagen der Schutzanlagen verhindern sowie im Katastrophenfall bei der Steuerung von Notfallmaßnahmen helfen. Das Vorhandensein technisch ausgefeilter Frühwarn- und Monitoringsysteme ist folglich ebenso elementar für einen zuverlässigen Küstenschutz wie die ständige Verbesserung der Küstenschutzanlagen selbst.

Bestehende Frühwarnsysteme für den Küstenschutz in Deutschland basieren auf Wasserstandmessungen und -vorhersagen, die durch das *Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)* zur Verfügung gestellt werden (<http://www.sturmflutwarnungen.de/>). Informationen über den inneren Zustand der Küstenschutzanlagen selbst, die bei der Sicherheit eine wichtige Rolle spielen, fehlen bislang vollständig. Das Projekt *EarlyDike* versucht diese Lücke zu schließen: Am Beispiel von Seedeichen wird ein sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem entwickelt, das eine kontinuierliche Überwachung der Deichstrecken ermöglicht, sodass im Schadensfall durch die Generierung automatischer Warnungen rechtzeitige Instandsetzungs- sowie Notfallmaßnahmen eingeleitet werden können (Becker et al. 2021).

Der folgende Teilbericht im Rahmen von *EarlyDike* beschäftigt sich mit der Entwicklung und Umsetzung eines sensorbasierten *Deichmonitorings* für Seedeiche. Er beschreibt, wie intelligente Geotextilien als Sensoren in die Deichstruktur integriert werden können und wie die zusätzlichen Informationen, die die intelligenten Geotextilien generieren, dazu beitragen können, ein verbessertes Frühwarnsystem für Seedeiche aufzubauen. Die Arbeit hieran erfolgte in Kooperation mit dem *Institut für Textiltechnik (ITA)* sowie dem *Geodätischen Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme (gia)* der *RWTH Aachen University* (Schwab et al. 2021, Herle et al. 2021).

Die Entwicklung des sensorbasierten Deichmonitorings erfolgte in mehreren Arbeitsschritten (vgl. Abbildung 1). Es fanden Literaturstudien zu den Themen Deichaufbau und -bemessung, Deichversagensmechanismen sowie Deichmonitoring-Verfahren statt, aus denen relevante Informationen für die weitere Arbeit identifiziert wurden (Kapitel 2).

Nachdem auf Grundlage der Literaturrecherche die Anforderungen an ein umfangreiches Monitoring für Seedeiche ermittelt wurde, konnte hieraus ein Konzept für die Verwendung der intelligenten Geotextilien abgeleitet werden (Kapitel 3). In der Versuchshalle des IWW wurden die intelligenten Geotextilien in einen Modelldeich eingebaut und in physikalischen Versuchen getestet und validiert. Hierzu fanden vorerst kleinmaßstäbliche Untersuchungen mit Prototypen der Deichsensoren statt. Die Versuche am kleinen Modelldeich werden in Kapitel 4.2, deren Auswertung und Ergebnisse in Kapitel 5.1 beschrieben.

Im Anschluss erfolgten der Aufbau eines großmaßstäblichen Modelldeichs und die Untersuchung der entwickelten Sensorvliese in ebendiesem. Die Beschreibung des Versuchstandes, der eingesetzten konventionellen Messtechnik sowie der eingesetzten Sensorvliese

sind in Kapitel 4.2 zusammengestellt. Hierbei flossen wichtige Erfahrungen aus den kleinmaßstäblichen Untersuchungen in die Entwicklung der großmaßstäblichen Sensorvliese ein (Kapitel 5.2). Die großmaßstäblichen Sensoren wurden in einem umfangreichen Versuchsprogramm getestet, anhand der konventionellen Messtechnik validiert und die Sensorsignale schließlich in einer auf Grundlage der gesammelten Daten entwickelten Auswerterroutine analysiert (Kapitel 5.3).

Die aufgenommenen Daten der Versuche in der Versuchshalle des IWW werden bereits so analysiert und verarbeitet, dass sie in die im Rahmen von *EarlyDike* aufgebaute Geo- und Sensordateninfrastruktur eingespeist werden können und Rückschlüsse auf den Zustand des Modelldeiches zulassen. Hierzu wurden in Kooperation mit dem *gia* Schnittstellen entwickelt, über die die Daten aus den Messvorrichtungen am IWW in das Sensornetzwerk eingespeist und von der entwickelten Auswerterroutine „abonniert“ werden können. Eine Beschreibung des zugrundeliegenden Konzepts und des entwickelten Deich-Dashboards, welches schon jetzt ein Echtzeit-Monitoring des Modelldeichs erlaubt, findet sich in Kapitel 5.3.4.

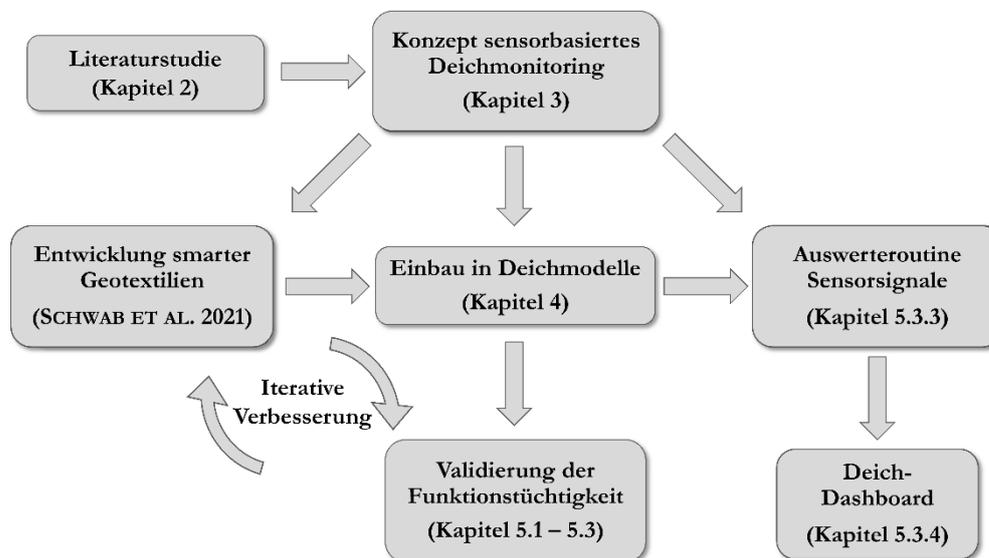


Abbildung 1: Vorgehensweise bei der Entwicklung des sensorbasierten Deichmonitorings.

2 Grundlagen zur Entwicklung des Deichmonitors

2.1 Typischer Seedeichaufbau

Deiche sind längs eines Gewässers aufgeschüttete Erddämme, die das tiefergelegene Hinterland im Fall einer Sturmflut oder eines Hochwassers vor Überflutungen schützen. Sie bilden eine Barriere zwischen Gewässern mit wechselnden Wasserständen, wie Flüssen oder Meeren, und dem Hinterland. Deiche sind im Gegensatz zu Dämmen keine ständig eingestauten Bauwerke, sondern erfahren nur im Hochwasser- oder Sturmflutfall einen vorübergehenden Einstau.

An der deutschen Küste schützen Seedeiche auf einer Länge von insgesamt 1.200 km die tiefergelegenen Küstengebiete vor Überschwemmungen (Schüttrumpf 2008). Seedeiche sind damit die in Deutschland bedeutendsten Küstenschutzbauwerke und vielfältigen Belastungen ausgesetzt, denen sie standhalten und dabei stets ihre wasserrückhaltende

Funktion aufrechterhalten müssen. Zu den Belastungen zählen vor allem hydrodynamische Belastungen durch Tide, Seegang und Strömungen, aber auch Einzelbelastungen infolge Eisgang oder Treibgut.

Während in der Vergangenheit homogene Deichquerschnitte aus bindigen Materialien mit steilen bis senkrechten Böschungsneigungen weit verbreitet waren, hat sich die Bemessungsphilosophie seit den schweren Sturmfluten des 20. Jahrhunderts verändert. Hierzu haben zum einen eine verbesserte Beschreibung der einwirkenden Belastungen und vor allem ein verbessertes Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Bauwerk und Belastung beigetragen (Waal und van der Meer 1992, Richwien 1996, Schüttrumpf 2001, EAK 2002). Zum anderen konnten aus der Analyse der während vergangener Sturmfluten aufgetretenen Deichschäden wichtige Handlungsempfehlungen abgeleitet werden (MELF Niedersachsen 1962, MELF Schleswig-Holstein 1962).

Gemäß der Regelbauweise werden Seedeiche heute meist mit einem Deichkern aus Sand, einer abdichtenden Klei- oder Mergelschicht von 0,5 bis 2 m Dicke und einer begrünten Deckschicht ausgeführt. In Sonderfällen ist auch die Ausführung erosionsfester Deckwerke (z. B. aus Asphalt) möglich. Während die Deichhöhen nicht zuletzt als Anpassung an den durch den Klimawandel prognostizierten Meeresspiegelanstieg immer weiter erhöht wurden, sind die Böschungsneigungen flacher geworden und liegen heutzutage bei Neigungen bis zu 1:10. Abbildung 2 zeigt den Querschnitt durch ein heute typisches Regelprofil eines scharliegenden Deiches. Die Bandbreite der angegebenen Abmessungen zeigt, dass Deichaufbau bzw. Deichprofil dabei jedoch je nach Lage, Baustoffvorkommen und Zuständigkeiten stark variieren können. Details zu Deichaufbau und -bemessung für Küstenschutzdeiche einschließlich der regionalen Unterschiede sind z. B. in den „Empfehlungen für Küstenschutzwerke“ (EAK 2002) festgehalten.

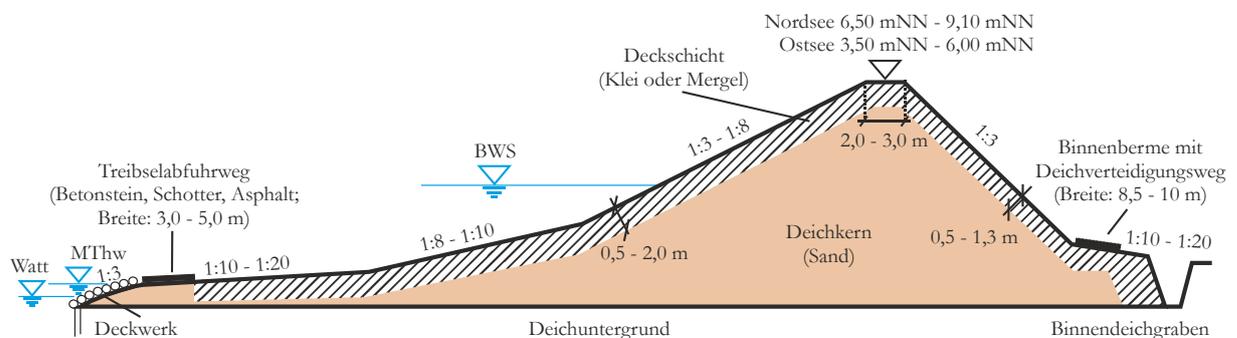


Abbildung 2: Querschnitt durch ein heute typisches Regelprofil eines scharliegenden Seedeichs (nach Schüttrumpf 2008 und EAK 2002).

2.2 Versagensmechanismen von Seedeichen

Für die Entwicklung eines sensorbasierten Deichmonitorings sind Kenntnisse über die während eines Deichversagens stattfindenden Prozesse unerlässlich, weshalb im Folgenden hierzu ein kurzer Überblick gegeben wird.

Deichversagen bezeichnet den Zustand, in dem ein Deich unter der einwirkenden Belastung nicht mehr in der Lage ist, seine wasserrückhaltende Funktion aufrecht zu erhalten (Allsop et al. 2007). Dabei kann nach Simm et al. 2013 zwischen drei verschiedenen Stadien unterschieden werden: einer Deichverschlechterung, einem Deichschaden und schließlich dem Deichbruch. Deichverschlechterungen (hierzu zählen z. B. Setzungen, Rissbildungen

oder Wühltierschäden) resultieren aus langfristigen Prozessen als Folge von Alterungerscheinungen und wiederkehrenden Belastungen, die den Zustand der Deichstruktur verändern und das Risiko eines Deichschadens erhöhen. Ein Deichschaden bezeichnet in diesem Zusammenhang einen Teilausfall der wasserrückhaltenden Funktion, der nach einem einzigen Lastereignis auftritt, und zwar meist insbesondere dann, wenn der Deich bereits über Vorschädigungen bzw. Verschlechterungen verfügt. In Kombination mit sehr hohen Belastungen können Deichverschlechterungen und -schäden schließlich zu einem totalen Deichbruch führen. Als Deichbruch versteht sich dabei ein strukturelles Versagen des Deiches vor Erreichen seiner Bemessungslast. Im Gegensatz zu den drei beschriebenen Mechanismen tritt ein operatives Versagen auf, sobald die Bemessungslast der Struktur überschritten wird. Ein typisches Beispiel für ein operatives Versagen ist eine Deichüberströmung infolge einer Überschreitung des Bemessungswasserstands.

Neben dieser Beschreibung der Stadien eines Deichversagens finden sich in der Literatur zahlreiche Zusammenstellungen von physikalischen Versagensmechanismen, meist gegliedert nach dem Ort ihrer Entstehung oder der zum Versagen führenden Belastung. Ohle et al. 2006 beispielsweise differenzieren nach den verursachenden Belastungen in Versagen infolge äußeren (Seegang, Wasserstand, Eis), inneren (Untergrund, Deichmaterial, Erosion, Suffosion) oder menschlichen Einflüssen (Bemessung, Bauausführung, Unterhaltung). Schüttrumpf und Oumeraci 2004 sowie Allsop et al. 2007 untersuchten Seedeichversagen vor allem auf Grundlage der Dokumentation schwerer Sturmflutschäden aus der Vergangenheit. Sie leiten daraus die wichtigsten Einwirkungs- und Widerstandsfaktoren ab, die Deichausfälle beeinflussten, und beschreiben die Hauptversagensmechanismen von Seedeichen getrennt für die seewärtige und landseitige Deichböschung.

Eine umfangreiche Zusammenstellung, Kombination und Ergänzung bestehender Arbeiten findet sich in Kortenhaus und Oumeraci 2002. Dort werden – unterschieden nach hydrodynamischen Versagensmechanismen, Versagensmechanismen an der Binnenböschung, der Außenböschung und im Inneren des Deiches, Deichbruch und sonstigen Versagensmechanismen – 25 unterschiedliche Versagensmechanismen definiert und mit Grenzzustandsgleichungen beschrieben.

Hydrodynamische Versagensmechanismen sind dabei als diejenigen Versagensmechanismen definiert, „die direkt aus dem Wasserstand vor dem Deich oder den Seegangsparemtern am Deichfuß ableitbar sind“ (Kortenhaus und Oumeraci 2002). Hierzu gehören neben Wellenüberlauf, Druckschlägen und Infiltration auch das Überströmen und die Durchströmung. Da Deiche in der Regel nicht für Überströmungen konzipiert sind, ist jeder Anstieg des Wasserstands über die Kronenhöhe bzw. Freibordhöhe nicht gewollt und wird in vielen Ansätzen bereits als Versagen bewertet. Tatsächlich ist mit einer Beschädigung des Deiches jedoch erst dann zu rechnen, wenn weitere Voraussetzungen wie eine ausreichend große Überströmrte gegeben sind. Eine intakte Begrünung als Deckschicht bietet einen gewissen Schutz, bei fehlender Grasnarbe oder intensiver bzw. langanhaltender Überströmung wird die Böschung jedoch schnell beschädigt. Es kann zu einem lokalen Versagen wie Erosion der Binnenböschung und des Böschungsbewuchses und schließlich zum Abtrag des Deichkörpers kommen. Hydrodynamisches Versagen führt dann zum Eintritt konstruktiver Versagensmechanismen, also der Beschädigung von Binnen-, Seeböschung oder dem Inneren des Deichs.

Durchströmung liegt vor, wenn Wasser einen Deich durchsickert und an der Luftseite austritt. Dies tritt bei langanhaltendem Einstau, hohem Feuchtezustand des Deiches oder

einer beschädigten Dichtungsschicht ein. Wenn das Sickerwasser nicht am Deichfuß, sondern weiter oben auf der Böschung des Deiches austritt, ist dort ein typischer Entstehungsort für rückschreitende Erosion. Deichmaterial wird an der Deichoberfläche ausgespült und abgetragen, entlang der Fließwege entstehen Kanäle parallel zur Böschung und in den Deichkörper hinein. Strömt Wasser durch einen mehrschichtigen Deichaufbau, kann zusätzlich Kontakterosion zwischen verschiedenen Schichtgrenzen auftreten. Feinkörniges Material bindiger Böden kann in Richtung der Strömungskraft in die grobkörnigeren Schichten einer durchlässigeren Schicht gelangen. Das Porenvolumen des feinkörnigen Materials nimmt an der Schichtgrenze ab, man spricht von einer Matrixerosion.

Bereits an den nun beschriebenen Beispielen des Überströmens und der Durchströmung wird deutlich, wie verschiedene meist unbekannt Parameter (Zustand der Grasnarbe, Zustand der Deck- und Dichtungsschichten, Vorfeuchte des Deiches, etc.) das tatsächliche Eintreten eines Deichbruchs beeinflussen.

Alle im Schrifttum beschriebenen Mechanismen beschädigen den Deich zunächst lokal, breiten sich aber schnell großflächig aus und können schließlich zu einem Teil- oder sogar Gesamtdeichbruch führen. Ferner ist es in der Regel das Zusammenspiel mehrerer Parameter, welches ein Versagen verursacht: Das Versagen wird nicht nur durch die tatsächliche Belastung auf den Deich, sondern auch durch meteorologische, geometrische und biologische Faktoren, durch die lokale Bodenbeschaffenheit und Vorschädigungen ausgelöst, die allesamt den Widerstand des Deichs beeinflussen. Der tatsächliche Widerstand eines Seedeiches gegen Wellen- und Strömungsangriff während Sturmfluten ist dementsprechend zeitabhängig und nicht zwingend identisch mit dem Bemessungswiderstand (Kortenhaus und Oumeraci 2002, Schüttrumpf und Oumeraci 2004).

2.3 Deichmonitoring

Deichmonitoring dient dazu, Anomalien in der Deichgeometrie oder der Deichbeschaffenheit frühzeitig zu erkennen, sodass durch Reparaturen einem Deichversagen vorgebeugt werden kann. Da die Verantwortung für Seedeiche in Deutschland auf Landesebene liegt, gibt es keine einheitlichen Richtlinien bezüglich des Monitorings deutscher Seedeiche. In den jeweiligen Generalplänen für Küstenschutz der Länder sind Details zur Instandhaltung und Überwachung der Küstenschutzbauwerke niedergeschrieben (MELUND Schleswig-Holstein 2013, NLWKN 2007). In §18 des Niedersächsischen Deichgesetzes (NDG) ist eine zweimal jährlich (im Frühjahr und im Herbst) durch die untere Deichbehörde gemeinsam mit den Deichverbänden durchzuführende Deichschau vorgeschrieben. Die Pflicht zur Deicherhaltung, -instandhaltung und -verteidigung (bis zur Feststellung des Katastrophenfalls) obliegt dabei den verantwortlichen Deichverbänden (Niedersachsen) bzw. dem Regiebetrieb (Schleswig-Holstein). Für Flussdeiche werden entsprechende Sicherheitsstandards deutschlandweit in DWA Merkblatt 507-1 empfohlen (DWA 2011).

Die Grundlagen des Deichmonitorings bilden sowohl für Fluss- als auch für Seedeiche Höhenmessungen und eine (visuelle) Inspektion der Deichoberfläche durch Deichbegehungen. Eine intakte Deichoberfläche ist integraler Bestandteil eines funktionstüchtigen Deiches und daher regelmäßig auf sichtbare Schäden, auf Spuren von Wühltieren und den Zustand der Vegetation zu untersuchen. Die Sichtkontrollen (Deichschau) werden jährlich bis halbjährlich durchgeführt sowie zusätzlich nach jedem Extremereignis. Unter

Normalbedingungen werden Höhenmessungen alle zehn Jahre durchgeführt, um eventuelle Setzungen oder Absenkungen zu erkennen. Hinzu kommen in Schleswig-Holstein die seit dem Jahr 2001 im „Generalplan Küstenschutz“ festgeschriebenen Sicherheitsüberprüfungen, mit denen in einem zehn- bis fünfzehnjährigen Intervall der Sicherheitsstatus aller Deiche zu überprüfen ist (MELUND Schleswig-Holstein 2013). Hierbei wird auf Grundlage des maßgebenden Sturmflutwasserstandes entlang der gesamten Küste jeweils für Deichabschnitte mit einer Länge von je 500 m die zu erwartende Wellenüberlaufhöhe berechnet. Diese darf zur Erfüllung des Sicherheitsstandards maximal 2 l/s m betragen.

Während Extremereignissen verschiebt sich der Fokus der Deichinspektion, zusätzlich erfolgen geotechnische Sicherheitseinschätzungen. Zur Bewertung der Deichstabilität werden nun weitere Indikatoren visuell aufgenommen: Hierzu zählen Freibord, Erosionsschäden, Eisstau und Böschungsrutschungen auf der wasserseitigen Böschung sowie ein erhöhter Sickerwasseranfall, Bodenhebungen, Trichterbildung und große Bodenrisse auf der Binnenseite (DWA 2011).

Die Deichschau bzw. Deichwacht durch geschultes Personal stellt folglich nach wie vor das Hauptwerkzeug bei der Überwachung von Deichen dar. Schlechtes Wetter und die Länge der Deiche machen es jedoch schwierig, alle Indikatoren durch visuelle Kontrolle zu erfassen. Und auch unter idealen Bedingungen bietet eine rein visuelle Bewertung keine vollständig verlässlichen Daten, da einige Versagensmechanismen (z. B. ein Versagen durch einen Erosionsgrundbruch) in ihren anfänglichen Stadien nicht visuell erkennbar sind (Bersan et al. 2015). Eine kontinuierliche und zuverlässige Überwachung der Deiche ist zurzeit folglich nicht möglich, wird jedoch beispielsweise in DWA M 507-1 zumindest als Sicherheitsverbesserungsmaßnahme für Deiche mit hoher Sicherheitsklassifikation oder besonderen Sicherheitsbestimmungen empfohlen (DWA 2011).

Da der Schutz vor Überflutungen und die Verbesserung der Hochwasserschutzanlagen ein globales Thema sind und die sensorgestützte Überwachung in allen Lebensbereichen zunimmt, lassen sich weltweit Arbeiten zur Entwicklung neuartiger, sensorgestützter Deichmonitoring-Verfahren finden. Als Ergänzung zur klassischen Deichschau kann der Einsatz sensorgestützter Verfahren ein kontinuierliches Deichmonitoring ermöglichen. Neuartige Deichmonitoring-Verfahren lassen sich grundsätzlich in drei Kategorien unterteilen (Cundill 2016):

- Fernerkundungsmethoden
- Nicht-intrusive bzw. geophysikalische Messmethoden
- Intrusive Messmethoden

Durch Fernerkundungsverfahren wird die von der Erdoberfläche reflektierte elektromagnetische Strahlung gemessen und ausgewertet. Die elektromagnetische Strahlung kann dabei aktiv von den luft- oder weltraumgestützten Trägersystemen (z. B. Flugzeugen, Drohnen oder Satelliten) ausgesandt werden oder es wird die von den Objekten reflektierte Sonnen- oder Eigenstrahlung gemessen. Auf Grundlage des Anteils der reflektierten Strahlung lassen sich Informationen über die Eigenschaften der untersuchten Geländeoberflächen ableiten. So können Bodenarten unterschieden, Rückschlüsse auf den Zustand der Vegetation gezogen, aber auch Änderungen in der Bodenfeuchte oder Anomalien in der Geländeoberfläche erkannt werden (Ohle et al. 2006). Hinsichtlich ihrer Eignung zum Deichmonitoring wurden bereits Verfahren mit Wellenlängen im Bereich der Infrarot-,

Mikro- und Radiowellen untersucht. Hierzu zählen die Verwendung von Radar- und Lidarverfahren sowie der Einsatz von Infrarot- und Multispektralkameras sowie photogrammetrische Verfahren (Ohle et al. 2006, Royet et al. 2013, Naumann et al. 2014, Cundill 2016).

Auf Grundlage der Daten kann der Ist-Zustand der Deiche für eine mögliche Gefährdung der Standsicherheit in gewissen Grenzen gut erfasst werden. Der Einsatz von Fernerkundungsmethoden kann die Katalogisierung weiter Teile eines Deiches verbessern, jedoch sind einige Verfahren, insbesondere optische und thermale Verfahren, stark von meteorologischen Bedingungen abhängig (Ohle et al. 2006, Royet et al. 2013). Methoden der Fernerkundung ermöglichen zwar ein vergleichbar schnelles und flexibles, jedoch diskontinuierliches Deichmonitoring, da sie ähnlich einer visuellen Inspektion der Deiche nur eine Momentaufnahme zum Zeitpunkt der Befliegung liefern können.

Geophysikalische Messmethoden bezeichnen hier Verfahren, die von der Oberfläche des Deiches physikalische Eigenschaften des Deichkörpers und -untergrundes erfassen. Dabei ist das Einbringen von Messtechnik in den Deichkörper nicht erforderlich, die Messungen finden jedoch im Gegensatz zur Fernerkundung direkt am Deich statt. Eine Übersicht über geeignete und bereits eingesetzte Verfahren findet sich in Royet et al. 2013 und Cundill 2016. Der Einsatz von geophysikalischen Messmethoden liefert detaillierte Informationen über den inneren Zustand des Deiches und kann eine Deichinspektion sinnvoll ergänzen. Er ist allerdings personal-, zeit- sowie materialaufwendig und für ein kontinuierliches Deichmonitoring ungeeignet.

Für intrusive Monitoringverfahren werden Sensoren unmittelbar in den Deich eingebaut, um Parameter wie Temperatur, Porenwasserdruck, Neigung, Vibration oder Spannungen direkt zu messen. Die Sensoren messen kontinuierlich und können zeitlich hochaufgelöste Daten zum Deichzustand bereitstellen. Falls Anomalien der Messwerte einen definierten Schwellenwert überschreiten, können Beziehungen zwischen Messwerten und Sicherheitsrisiken mit geo-historischen Daten kombiniert und eine Sicherheitsberechnung durchgeführt werden (Ponziani und Bachmann 2016, Krzhizhanovskaya et al. 2011).

Bislang entwickelte Sensoren zum intrusiven Deichmonitoring lassen sich grundsätzlich in sogenannte Microelectromechanical Systems (MEMS) und Faseroptische Sensoren (FOS) unterteilen. MEMS werden als ein Netzwerk bestehend aus verschiedenen Sensor-knotenpunkten (z. B. Piezometern, Temperatursensoren, Neigungsmessern, Drucksensoren) in den Deich eingebracht. Das Sensornetzwerk erstreckt sich über große Bereiche des Deiches und kann so ein umfassendes und räumlich hoch aufgelöstes Bild des Deichzustands liefern. In der Literatur lassen sich einige vielversprechende Anwendungsfälle finden (Desrosiers et al. 2013, Peters und van der Vliet, P. P. 2011, Abdoun et al. 2007, Pyayt et al. 2013), jedoch erweist sich die detaillierte Untersuchung der Deichabschnitte mittels MEMS mit Kosten im Bereich von bis zu 5.000 \$/10 m als kostspielig (Zeghal et al. 2013).

Faseroptische Sensoren agieren über ihre gesamte Länge als Sensor. Hierzu wird ein definiertes optisches Signal eines energiereichen Lasers durch ein Glasfaserkabel gesendet. Die zurückgestreuten Signale können hinsichtlich ihrer Frequenzverteilung analysiert werden und erlauben Rückschlüsse auf die Temperatur am Punkt der Reflexion (Dornstädter 2015). Auswertungen der Laufzeitlänge wiederum erlauben eine lokale Bestimmung des Orts der gemessenen Temperatur, sodass sich Veränderungen in der Umgebungstemperatur des Sensors ortsaufgelöst messen lassen, dieses Verfahren wird als verteilte faseroptische Temperaturmessung (VFTMS) bzw. distributed temperature sensing (DTS) bezeichnet. Bei

einem Einbau in Stauanlagen kann durch die Messung von Temperaturveränderungen indirekt auf einen erhöhten Sickerwasserfluss und damit auf bevorzugte Sickerwege innerhalb des Bauwerks geschlossen werden (Aufleger et al. 2007). Die Reflexion des Lasersignals wird zusätzlich durch Verformungen der Glasfaser beeinflusst, wodurch bei entsprechender Frequenzanalyse auch Informationen über die Spannungsverteilung am Sensor abgeleitet werden können (DTSS = distributed temperature and strain sensing).

Faseroptische Sensoren finden seit den 1990er Jahren vielfach Anwendungen bei der Leckage-Ortung in Wasserbauwerken sowie dem Monitoring von geotechnischen Anlagen (Aufleger et al. 2007 und Pei et al. 2014). Hierzu zählen auch einige testweise Einsätze in Deichbauwerken: Im Rahmen des *IjkDijk* Projekts wurden Faseroptische Sensoren parallel zur Längsachse eines Versuchsdeiches an der Grenzfläche einer Sand- und einer Ton-schicht eingebaut. Mittels der Sensoren ließen sich Piping-Prozesse bereits einige Stunden vor Versagen des Deiches erkennen. Durch detaillierte Analysen war es im Nachhinein sogar möglich, erste Anzeichen der Versagensmechanismen mehrere Tage im Voraus zu identifizieren. Damit ließ sich zeigen, dass Temperaturmessungen mittels FOS effektiv Anzeichen von Versagen erkennen lassen und für ein kontinuierliches Monitoring in Echtzeit geeignet sind (Bersan et al. 2015, Vries et al. 2014).

2.4 Forschungsbedarf

Da sich der tatsächliche, zeitabhängige Widerstand eines Seedeiches und damit auch die Versagenswahrscheinlichkeit des Deiches schwer berechnen lässt, kann ein sensorgestütztes Frühwarnsystem helfen, eine Deichverschlechterung oder einen Deichschaden frühzeitig zu erkennen. Bislang verfügen nur FOS-basierte Systeme über das Potenzial ökonomisch sinnvolle Lösungen für die Überwachung langer Deichabschnitte zu bieten. Die oben vorgestellten Praxisbeispiele zeigen, dass diese Systeme in einigen Anwendungen bereits verlässliche Resultate geliefert haben.

In den bislang vorgestellten Fällen müssen die Sensoren als zusätzlicher Bestandteil in das Bauwerk eingebaut werden, ferner findet ihr Einbau linienhaft und nicht über die gesamte Deichböschung statt. Glasfaserkabel lassen sich jedoch auch in im Wasserbau übliche Filtervliese integrieren, erlauben so ein flächenhaftes Monitoring und machen einen zusätzlichen Sensoreinbau obsolet (Thiele et al. 2008). Ein Forschungsvorhaben im Rahmen des *rimax*-Programms konzentrierte sich auf die Detektion von Deformationen im Deich. Erste Feldversuche verliefen problematisch, da es beim Einbau zum Bruch der Glasfaserkabel kam. Weitere Testeinbauten konnten zufriedenstellende Ergebnisse, in denen die Ausbildung einer Bruchmuschel durch das System detektiert wurde, erlangen.

Weitere erfolgreiche Praxistests zur Integration von Sensoren auf Geotextilien fanden erneut im Rahmen des *IjkDijk*-Projekts in den Niederlanden statt. In einem Testdeich wurden vier mit Sensoren bestückte Geotextilstreifen von je 100 m Länge an der Deichkrone, mittig des Deichkörpers, am Deichfuß und vor dem landseitigen Deichfuß installiert. Die genutzten Fasern messen laut Herstellerangaben Temperatur und Belastung mit hoher Präzision über eine Ausdehnung von bis zu 20 km. Mithilfe der Sensoren war es möglich, einen instabilen Bereich bereits mehr als einen Tag vor dem tatsächlichen Versagen zu erkennen, erste Anzeichen von Deformationen konnten bereits zweieinhalb Tage vor dem eigentlichen Versagen identifiziert werden (Artières et al. 2011). Auch hier schlussfolgern

die Autoren, dass der Einsatz des Systems eine Reduzierung der Risiko- und Instandhaltungskosten bewirken und als Frühwarnsystem funktionieren kann.

Dennoch, der Einsatz von FOS-basierten Messsystemen birgt einige Herausforderungen: Die Auswertung der Messsignale ist komplex und die Ausbildung der Anschlussstellen zwischen Faser und Messeinheit kritisch. Ferner kann die Messung von Feuchtigkeitsänderungen im Deich – falls überhaupt verfolgt – nur indirekt über die Messung von Temperaturänderungen erzielt werden. Zu einem flächenhaften Einsatz von in Geotextilien integrierten Sensoren ist es trotz der vielversprechenden Ergebnisse bislang nicht gekommen und die damals beteiligten Hersteller bieten die entwickelten Produkte nicht mehr an.

Aus diesen Gründen ist die Entwicklung neuer Verfahren interessant, welche bei möglichst kostengünstiger Herstellung eine einfache und flächenhafte Integration der Sensoren in den Deichkörper erlauben. Diese Sensoren müssen ausreichend robust und für einen langjährigen Einsatz im Deichkörper geeignet sein. Der Betrieb der Sensoren sollte autark und unabhängig vom Stromnetz erfolgen und die Signalübertragung ist so umzusetzen, dass eine stabile und kontinuierliche Datenübertragung gewährleistet wird. Ferner sollte die Auswertung der Sensorsignale automatisch erfolgen, sodass die Ergebnisse einfach verständlich und für Verantwortliche direkt einsehbar sind, um zeitnah Warnungen zu generieren bzw. Instandsetzungsmaßnahmen zu veranlassen.

3 Konzept des entwickelten Deichmonitorings

Wie vorab beschrieben, erfolgt die Überwachung von Seedeichen während sowie nach Sturmfluten zurzeit vor allem auf Grundlage visueller Überprüfungen. Um jedoch gemäß dem Ziel des Projekts *EarlyDike* ein verbessertes Frühwarnsystem für Seedeiche zu entwickeln, ist ein Deichmonitoring erforderlich, mithilfe dessen kontinuierlich und möglichst entlang der gesamten Deichlinie gleichzeitig, Informationen über den Zustand der Deiche gewonnen werden können. Hierzu ist ein sensorbasiertes Deichmonitoring zu entwickeln, das flächendeckend eingesetzt werden kann und das dem im Rahmen des Projekts entwickelten GeoPortal Echtzeitdaten zum inneren Zustand der Deiche zur Verfügung stellt.

Ursache oder Auswirkung aller im Schrifttum identifizierten Versagensmechanismen ist im Letzten ein erhöhter Wassereintritt in Teile des Deiches, die unter normalen Bedingungen nicht wassergesättigt sind. Sensoren, die einen Wassereintritt im Deich detektieren, können dazu beitragen, Deichverschlechterungen und beschädigte Deichabschnitte, die zu schwach für extreme Sturmfluten geworden sind, rechtzeitig zu erkennen. Aber auch während einer Sturmflut können die Sensoren dazu beitragen, besonders gefährdete Deichabschnitte zu identifizieren und im schlimmsten Fall Warnungen für einen drohenden Deichbruch zu generieren, damit entsprechende Notfallmaßnahmen eingeleitet werden können (vgl. Abbildung 3).

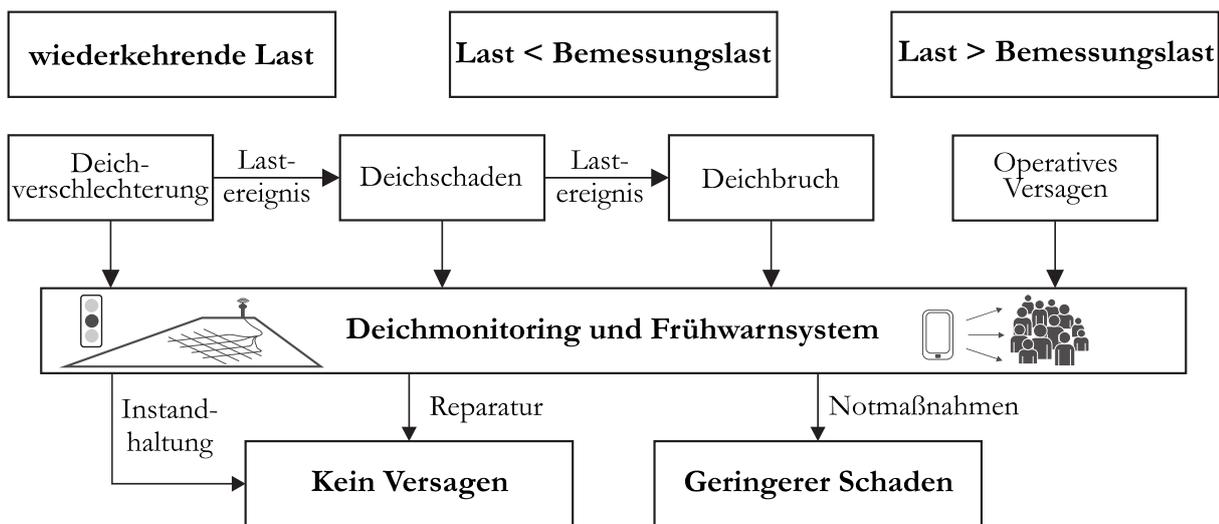


Abbildung 3: Möglichkeit eines Frühwarnsystems, den Prozess, der zur Entwicklung eines Deichbruchs führt, zu unterbrechen.

Das entwickelte Monitoringsystem basiert daher primär auf der Messung eines veränderten Wassergehalts innerhalb der Deichstruktur, darüber hinaus wird auch die Entwicklung von Sensoren zur Bestimmung von Verformungsänderungen verfolgt. Die Identifizierung dieser Parameter erfolgt durch intelligente Geotextilien, die in Zusammenarbeit mit dem ITA entwickelt werden. Im Folgenden wird das Funktionsprinzip der intelligenten Geotextilien beschrieben und im Anschluss skizziert, wie die mithilfe der Sensoren gewonnenen Daten zur Detektion von Schäden in der Deichstruktur genutzt werden können. Für eine detaillierte technische Beschreibung der Sensorentwicklung wird auf Schwab et al. 2021 verwiesen.

Zur Herstellung der intelligenten Geotextilien werden Carbonfaserbündel mittels Sticktechnik auf ein textiles Trägermaterial (z. B. ein Wasserbauvlies) aufgebracht. Der Einsatz hocheffizienter Stickmaschinen erlaubt dabei die schnelle und kostengünstige Integration der Sensoren in das Textil (vgl. Abbildung 4). Beide Sensortypen (Feuchtesensoren und Dehnungssensoren) basieren auf der Detektion von Änderungen in der Leitfähigkeit. Die Detektion von Feuchtigkeit im Deich erfolgt mittels eines Sensorpaars: Zwei nicht isolierte Carbonfaserbündel werden mit einem Abstand von wenigen Zentimetern auf ein wasserdurchlässiges Trägermaterial (Geotextil) aufgebracht. Zwischen den beiden Faserbündeln wird ein geringes elektrisches Potential angelegt und anschließend der Potentialabbau zwischen den beiden Sensoren gemessen. Die Carbonfasern selbst weisen eine hohe elektrische Leitfähigkeit auf. Die Sensorumgebung bei Einbau des Sensortextils im Deich wiederum verfügt bei geringem Wassergehalt über eine geringe elektrische Leitfähigkeit. Damit geht der elektrische Widerstand zwischen den beiden Fasern gegen unendlich, sodass nahezu das komplette Potenzial zwischen den Sensorfasern abfällt. Steigt der Wassergehalt in der Sensorumgebung stark an, so fungiert das umgebende Wasser als Dielektrikum, der Widerstand zwischen den Sensorpaaren sinkt und es kommt zu einem kleinen Stromfluss zwischen den Faserbündeln, was sich wiederum in einem abfallenden Potenzialunterschied am Faserpaar messen lässt. Je feuchter die Umgebung der Fasern wird, desto höher ist die Leitfähigkeit und desto geringer ist der gemessene Potenzialunterschied. Abbildung 5 skizziert das Messprinzip für die Feuchtigkeitsdetektion.



Abbildung 4: Aufsticken der Sensoren (Carbonfasern) auf Wasserbauvlies unter Einsatz einer achtköpfigen Stickmaschine (Foto: Schwab 2018).

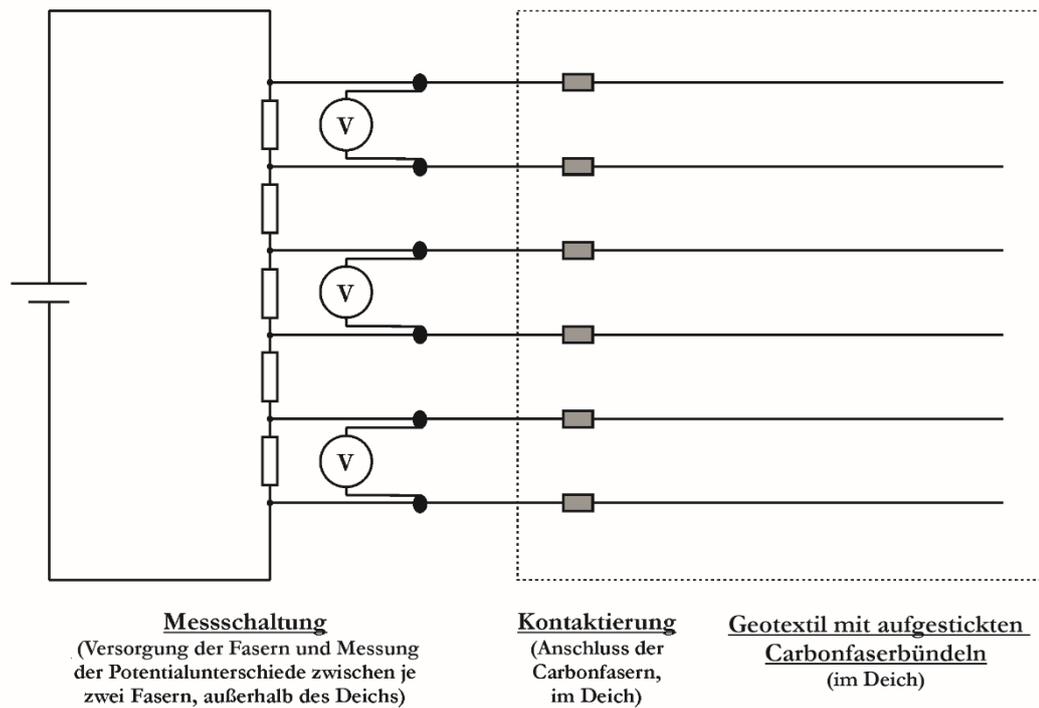


Abbildung 5: Vereinfachte Skizze zum Funktionsprinzip der entwickelten Feuchtesensoren (hier für drei Feuchtesensoren dargestellt).

Die Bestimmung der Dehnung soll auf Grundlage der Spannungsmessung entlang eines isolierten Carbonfaserrovings erfolgen. Hierbei wird die Eigenschaft genutzt, dass sich die Leitfähigkeit der Carbonfasern mit der Dehnung der Faser verändert. Untersuchungen hierzu fanden bislang lediglich im Rahmen von Labortests am ITA statt und werden im vorliegenden Beitrag nicht weiter diskutiert (s. hierfür Schwab et al. 2021). Das im folgenden beschriebene Monitoringsystem fußt auf der Detektion von Wassergehaltsänderungen

im Deichkörper, während die Detektion von Dehnungsänderungen (die das System weiter verbessern kann) außer Acht gelassen wird.

Abbildung 6 skizziert schematisch den vorgeschlagenen Einbau des neuentwickelten Sensortextils auf der Binnenböschung eines Deiches. Die Carbonfaserpaare verlaufen in regelmäßigen Abständen entlang der Deichböschung parallel zur Deichlinie. Das mit den Fasern bestickte Textil wird dabei zwischen Deichkern und Außendichtung (Kleischicht) eingebaut. Solange Grasnarbe und Kleischicht des Deiches an allen Stellen intakt sind, liegen die Fasern entlang der Böschung außerhalb der wassergesättigten Zone des Deiches und Sickerwasser erreicht das Sensortextil nicht.

Unter Sturmflutbedingungen kann der Deich durch Wellenauf- und Wellenüberlauf belastet werden. Beginnender Wellenaufbruch kann zu einer Erosion der Grasnarbe führen, die sich unter anhaltendem Wellenangriff zu großräumiger Erosion ausweiten kann. Wellendruckschläge können zu Kleiausbrüchen führen und bei langanhaltender Belastung kann es schließlich zu Böschungsabbrüchen und der Ausbildung von Abbruchkanten kommen (Schüttrumpf und Oumeraci 2004). All diese Prozesse haben eine starke Beschädigung bis hin zur vollständigen Zerstörung der Außendichtung der seeseitigen Böschung zur Folge, was das Eindringen von Wasser in den Deichkörper ermöglicht und zu einem Anstieg der Sickerlinie bzw. wassergesättigten Zone an der Binnenböschung des Deiches führt: Die Sensorfasern würden einen Wasserspiegelanstieg vom Deichfuß her detektieren (1). Durch Einbau der Sensortextilien auf der Binnenböschung ließen sich Schäden an der Außenböschung folglich indirekt detektieren.

Kommt es zu einem Wellenüberlauf, kann dies auf der Binnenböschung eine Erosion der Grasnarbe und später der Kleischicht verursachen. Es kann ferner zur Infiltration von Wasser in Risse oder Hohlräume der Kleischicht kommen, die eine Schwächung des Bodens zur Folge hat und schließlich zu Hangrutschungen und Rasenverlegung der landseitigen Böschung führt (Schüttrumpf und Oumeraci 2004). In diesem Fall unterscheidet sich das Sensorsignal von Fall (1), da zu Beginn nur einzelne Sensoren, sehr bald darauf aber alle Sensoren auf der Binnenseite des Deiches Wassereintritte detektieren werden. Hier erfolgt die Detektion von Schäden direkt (2).

Sobald die Kleischicht abgetragen ist und eine Erosion des Sandkerns beginnt, wird der Deich schnell zerstört. Daher ist es unter Sturmflutbedingungen notwendig, eine kontinuierliche Überwachung der Sensoren und eine automatische Datenanalyse zu gewährleisten, sodass Auffälligkeiten und Schäden sofort erkannt werden und die Generierung von rechtzeitigen Warnungen ermöglicht wird. Aber auch unter Nicht-Sturmflutbedingungen sollten die vom intelligenten Geotextil generierten Daten regelmäßig abgerufen und analysiert werden. Auf diese Weise können entstandene Schäden in der Kleischicht (z. B. als Folge von Wühltierangriffen, Trittschäden, Frost oder Trockenheit siehe MELF Niedersachsen 1962) durch eine erhöhte Infiltration von Regenwasser in den Deich bereits vor dem Auftreten einer Sturmflut detektiert und der Deich kann rechtzeitig in Stand gesetzt werden. Für ein zuverlässiges Monitoring der seeseitigen Außendichtung ist hierfür allerdings zusätzlich der Einbau des Textils unterhalb der seeseitigen Kleischicht empfehlenswert.

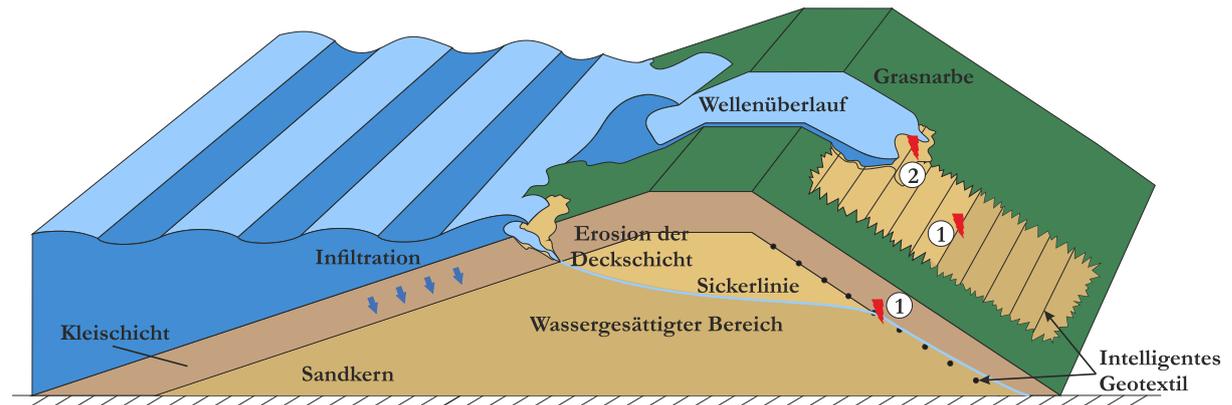


Abbildung 6: Monitoringkonzept unter Verwendung der geotextilen Sensoren: Bei Einbau des Sensortextils zwischen Kleischicht und Deichkern auf der Binnenböschung lassen sich Schäden an der Außenböschung des Deiches durch einen Anstieg der wassergesättigten Zone indirekt erkennen (1), während Schäden auf der Binnenböschung des Deiches direkt identifizierbar sind (2).

Während die Prozesse im Sturmflutfall sehr schnell vonstattengehen und auch bei sofortiger Schadensdetektion ein größerer Deichschaden vermutlich kaum verhindert werden kann, bietet insbesondere das kontinuierliche Monitoring unter normalen Witterungsbedingungen die Möglichkeit, nach außen nicht sichtbare Schwachstellen im Deich frühzeitig zu detektieren und in Stand zu setzen, sodass Deichschäden infolge geschwächter Deichquerschnitte, wie sie in den Schadensanalysen während vergangener Sturmfluten beschrieben wurden (siehe z. B. MELF Niedersachsen 1962, MELF Schleswig-Holstein 1962), deutlich reduziert werden können.

4 Material und Methoden

4.1 Konzeption der Modellversuche

Die Entwicklung des in Kapitel 3 beschriebenen sensorbasierten Deichmonitorings ist eng mit der Entwicklung der intelligenten Geotextilien bzw. Sensorvliese verbunden. Die technische Entwicklung und Herstellung der Sensortextilien erfolgen am *ITA*. Die Prüfung der Funktionsfähigkeit der Sensoren, die Entwicklung einer Auswerterroutine zur Interpretation der Messsignale und schließlich die Beurteilung, ob sich das eingesetzte Messprinzip zum Deichmonitoring eignet, können jedoch nur durch Einbau und Test der Sensorvliese in einer möglichst realitätsnahen Umgebung erfolgen. Physikalische Modellversuche, die in der Versuchshalle des *IWW* durchgeführt werden, leisten hier den entscheidenden Beitrag. Ein zum Test der Sensorvliese geeigneter Versuchsstand muss dabei die folgenden Kriterien erfüllen:

- Aufbau eines typischen Deichprofils unter Verwendung geeigneter, in der Natur verwendeter Materialien
- Möglichkeit zur Einstellung von definierten und reproduzierbaren Belastungen
- Möglichkeit zur Simulation naturnaher Belastungen
- Möglichkeit zur Abbildung und Provokation von Deichversagensmechanismen
- Einsatz herkömmlicher Messtechnik zur kontinuierlichen messtechnischen Überwachung aller Vorgänge

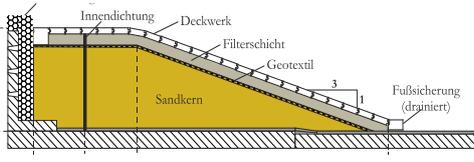
Aus den genannten Aspekten, die bei der Planung eines geeigneten Versuchsstands zu beachten sind, resultieren wiederum konkrete Anforderungen an

- die Größe des Modelldeichs,
- die Beschaffenheit der Modellumgebung,
- die Leistungsfähigkeit der Wasserzu- und -ableitung sowie
- den Einsatz der Messtechnik.

Unter Beachtung all dieser Aspekte wird in der Versuchshalle des IWW ein großmaßstäblicher Modelldeich errichtet, der für die physikalische Untersuchung der Sensorvliese zur Verfügung steht. Das Modell befindet sich in einer 20 m langen und bis zu 3 m hohen Betonrinne, in der die luftseitige Böschung eines 1,8 m hohen Deichs sowie eine angeschlossene Deichkrone von 2 m Breite aufgebaut wird. Eine Beschreibung des Versuchsstands, des Modellaufbaus sowie der durchgeführten Versuche findet sich in Kapitel 4.3.

Doch bevor die neu entwickelten, mit Sensorfasern ausgestatteten Geotextilien in einem großmaßstäblichen Modelldeich getestet und validiert werden, erfolgt der Einbau von Prototypensensoren in einen überhöhten, kleinmaßstäblichen Modelldeich (Kapitel 4.2). Ziel ist es hier, die generelle Funktionalität des entwickelten Sensorkonzepts zu testen, während an den untersuchten Prototypen Optimierungen im Sensordesign vorgenommen werden können, ohne großen Aufwand bei Ein-, Aus- und Umbau zu verursachen. Tabelle 1 fasst die durchgeführten Modelluntersuchungen zusammen und stellt die wesentlichen Vor- und Nachteile gegenüber.

Tabelle 1: Durchgeführte Modelluntersuchungen zur Entwicklung der geotextilen Sensoren.

	Kleinmaßstäbliches Deichmodell	Großmaßstäbliches Deichmodell
		
Dimensionen	H = 0,4 m, B = 1,0 m, T = 0,3 m Böschungsneigungen 1:3	H = 1,8 m, B = 7,4 m, T = 2,0 m Böschungsneigung 1:3 $Q_{\max} = 900 \text{ l/s}$
Baustoffe	Homogener Deichkörper aus Quarzsand	Zwei-Zonen-Deich mit Innendichtung; Deckwerksaufbau aus Geotextil, Filterschicht und Betonformsteinen; wasserseitige Böschung nicht abgebildet
Messtechnik	1 Ultraschallsonde Kamera	6 Ultraschallsonden 10 Druckmessdosen (im Deckwerk) 10 Druckmesspunkte (auf Sohle) Induktiver Durchflussmesser Kameras (Photogrammetrie)
Belastung	Durchsickerung	Durchsickerung, Überströmung
Zeitraum je Versuch	ca. 1 h, maximal 1 – 2 Tage	mehrere Stunden, bis zu 8 Monate
Eingesetzte Sensorvliese	Messvlies I, Messvlies II	Messvlies III, Messvlies IV
Ziel der Untersuchung	Bestätigung des Funktionsprinzips; Test verschiedener Designs und Materialien für großes Textil	Test und Validierung der Sensoren unter realitätsnahen Bedingungen
Vorteile	Schneller Auf- und Umbau; flexibler Einsatz mehrerer Textilien; Textil direkt zugänglich; Optische Beobachtung aller Vorgänge	Robustheitstest der Sensoren; Abmessungen und Abstände der Sensoren realitätsnah; Rand- und Modelleffekte vernachlässigbar
Nachteile	Starke Rand- und Modelleffekte	Aufwendiger Auf- und Umbau; Textil unter Deckwerk nicht direkt zugänglich; Einsatz vielfältiger Messtechnik zur Validierung erforderlich

4.2 Kleinmaßstäbliche Untersuchungen

4.2.1 Aufbau des Modelldeichs

Zum testweisen Einbau von ersten Prototypen der entwickelten Sensorvliese wird ein kleinmaßstäbliches Deichmodell in einer Kipprinne in der Versuchshalle des IWW aufgebaut. Die Seitenwände der Rinne sind aus Glas, was eine optische Beobachtung der Prozesse ermöglicht. Mittels vertikaler Einbauten wird ein Bereich der Rinne abgesperrt, in dem das zu untersuchende Deichmodell eingestaut werden kann.

Der Deich besteht – mit Ausnahme eines später beschriebenen Referenzfalls – aus einem homogenen Sandkörper (Quarzsand, $d_m = 0,5 \text{ mm}$). Die Geometrie orientiert sich an einem klassischen Deichprofil mit Berme, der Deich ist jedoch leicht überhöht und die wasserseitige Böschung steiler ausgebildet als bei Seedeichen üblich. Der Deich wird in einem Überprofil aufgeschüttet, verdichtet und anschließend mit einer Platte entlang angebrachter Profile abgezogen. Im Bereich vor dem Deichkörper befindet sich eine Ultraschallsonde, die die Höhe des anstehenden Wasserspiegels aufzeichnet. Der Verlauf der Sickerlinie im Deich sowie die Entwicklung des Deichprofils werden mittels einer Kamera aufgezeichnet. Abbildung 7 zeigt einen Längsschnitt durch den Versuchsstand.

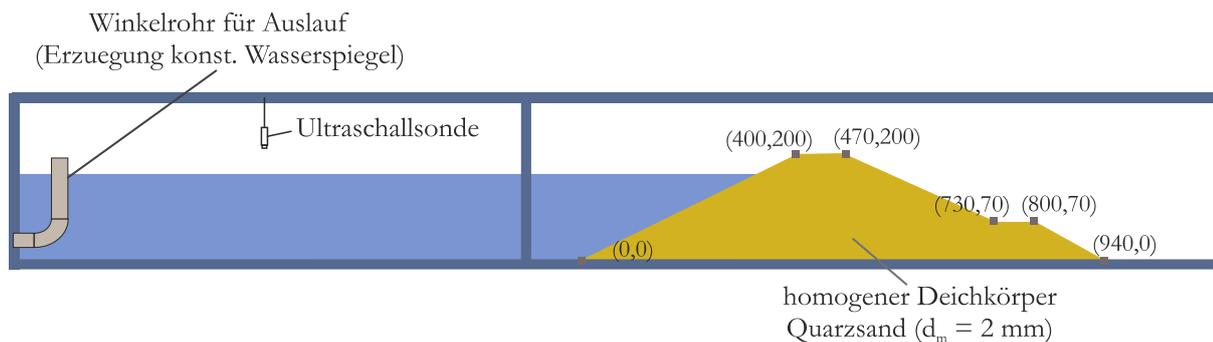


Abbildung 7: Versuchsaufbau in kleiner Kipprinne des IWW, alle Angaben in mm.

4.2.2 Versuchsdurchführung

Nach Aufbau des Deiches und Einbau der intelligenten Geotextilien (s. Kapitel 4.2.4 und 4.2.5) erfolgt eine langsame Erhöhung des Wasserstands und damit ein Einstau des Deiches. Der Wasserspiegel wird bis auf einen maximalen Wasserstand auf Höhe der Deichkrone gesteigert und dort konstant gehalten. Im Folgenden werden die Ergebnisse von drei der durchgeführten Versuche beschrieben und diskutiert:

- Referenzmessung: Deich ohne Sensoren
- Einbau Messvlies I
- Einbau Messvlies II

4.2.3 Referenzmessung

Die Referenzmessungen finden ohne Sensoreinbau an einem Modell eines Zweizonendeiches bestehend aus einem homogenem Sandkörper und einem Kiesfilter statt. Ziel dieser Untersuchungen ist, optimale Verhältnisse für die optische Auswertung der Sickerlinie einzustellen. Ferner gilt es, die zeitliche Entwicklung der Sickerprozesse im kleinen Deichmodell vorab ohne Einbau des Sensorvlieses aufzunehmen, um Anpassungen am Deichaufbau vorzunehmen und später Rückschlüsse auf etwaige Wechselwirkung zwischen Deichdurchströmung und Sensoreinbau identifizieren zu können.

4.2.4 Messvlies I

Bei den Versuchen mit Sensoren werden diese auf der landseitigen Böschung eingebaut. Zur Sicherung gegen Aufschwimmen wird das Geotextil mit einer weiteren Lage Sand beschwert. Abbildung 8 zeigt den fertig aufgebauten Modelldamm mit Sensoren.



Abbildung 8: Aufgebauter Modelldamm mit Sensoren in der kleinen Kippwanne.

Das auf der landseitigen Böschung eingebaute Messvlies besteht aus einem mechanisch verfestigten Spinnfaservliesstoff der Firma NAUE (Typ Secutex), auf welchem 20 Carbonfaserrovings in einem Abstand von je 10 mm aufgesteckt sind (vgl. Abbildung 9). Jeweils zwei Faserbündel sind über Referenzwiderstände (3,9 k Ω) verbunden. Insgesamt sind zehn Kanäle angeschlossen. Die Widerstände befinden sich direkt am Vlies und die Anschlüsse sind nicht isoliert. Jede Faser verfügt über ein Kabel, welches direkt aus dem Sand herausgeführt wird. Nach einigen Zentimetern werden die 20 einzelnen Kabel zu drei Strängen gebündelt. Der Einbau von Messvlies I erfolgt auf dem oberhalb der Berme gelegenen Abschnitt der Binnenböschung. Abbildung 10 zeigt die Lage der einzelnen Sensorkanäle im fertig eingebauten Damm sowie deren Bezeichnung.



Abbildung 9: Einbau von Messvlies I im kleinmaßstäblichen Dammmodell.

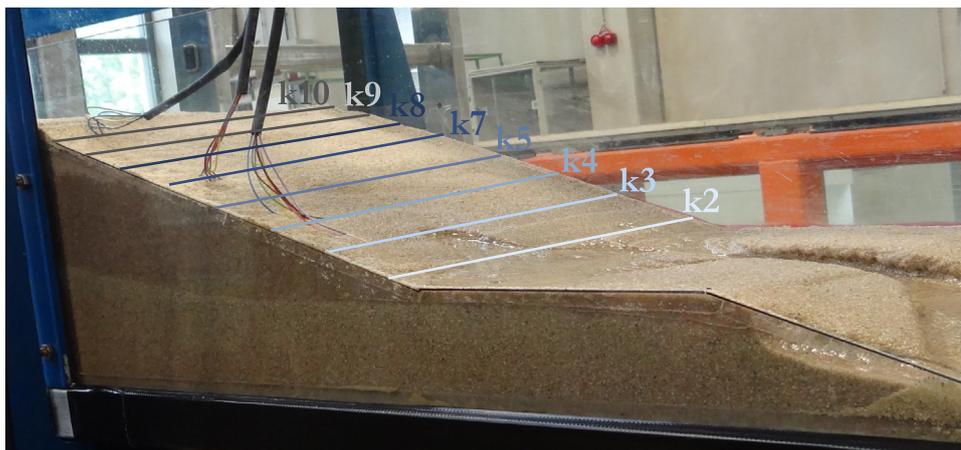


Abbildung 10: Bezeichnung der genutzten Sensorkanäle des Messvlies I.

4.2.5 Messvlies II

Messvlies II besteht aus einem im Vergleich zu Messvlies I etwas dünneren mechanisch verfestigten Spinnfaservliesstoff der Firma NAUE (ebenfalls Typ Secutex), auf welchem 42 Carbonfaserrovings aufgestickt sind. Diesmal reichen die Sensoren über die gesamte Binnenböschung des Deiches (mit einer Aussparung auf der Deichberme), es sind jedoch nicht alle Rovings angeschlossen (siehe Abbildung 11). Die elektronische Verschaltung erfolgt auf einem Steckbrett außerhalb des Deiches. Die Anschlüsse an die Carbonfasern sind mit einer Silikonschicht isoliert, sodass die Fasern die einzigen nicht isolierten Leiter im Deich darstellen. Abbildung 11 zeigt den Einbau von Messvlies II sowie Lage und Bezeichnung der kontaktierten und gemessenen Sensoren.

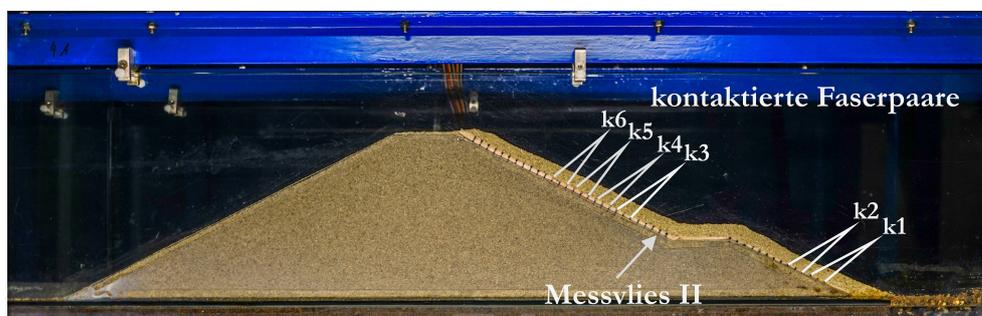


Abbildung 11: Einbau von Messvlies II im kleinmaßstäblichen Deichmodell und Bezeichnung der kontaktierten Faserpaare.

4.3 Großmaßstäbliche Untersuchungen

4.3.1 Aufbau des Modelldeichs

Der Versuchsstand für den großmaßstäblichen Modelldeich (vgl. Abbildung 12) besteht aus einer Versuchsrinne (VR I – III) und einem vorgesetzten Beruhigungsbecken (BB). Im hinteren Bereich (VR III) ist der Versuchsstand offen. Über eine Rampe ist die Rinne befahrbar und damit das Ein- und Ausbauen des Deichkörpers möglich. Während der Versuchsdurchführung wird die Rinne mit einem Dammbalkensystem verschlossen. Der Aufbau des Deichkörpers erfolgt in Abschnitt VR II.



Abbildung 12: Konzeptioneller Aufbau des Versuchsstandes (Ansicht von oben).

Der Zufluss erfolgt durch ein Kunststoffrohr in das vorgesehene Beruhigungsbecken, am Ende der Rinne fällt das Wasser über einen freien Überfall direkt in einen im Boden eingelassenen Ablaufschacht der Versuchshalle. Die Versuchsrinne hat eine Länge von 20 m und eine lichte Breite von 2 m (Versuchsraum) bzw. 6 m (Beruhigungsbecken). Abbildung 13 zeigt eine Skizze des gesamten Versuchsstands.

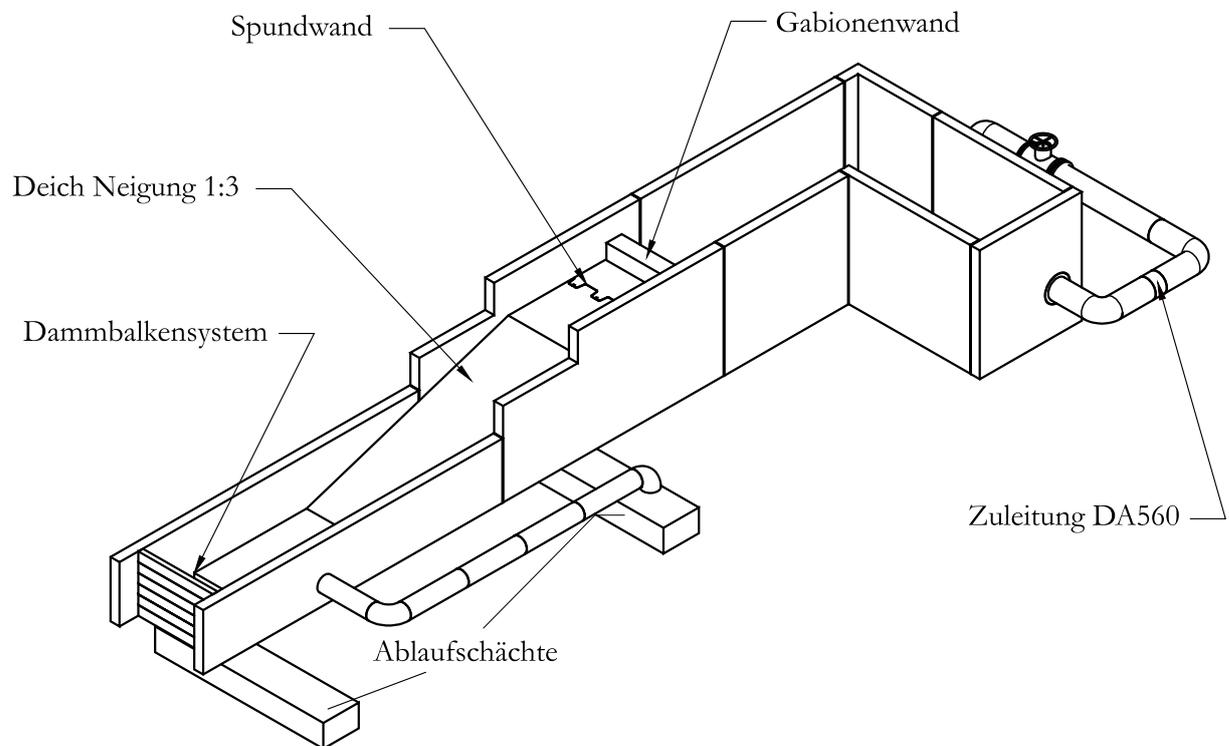


Abbildung 13: 3D-Ansicht des Versuchsstandes mit großmaßstäblichem Modelldeich (oben).

Der aufgebaute Modelldeich dient der Validierung und Weiterentwicklung der intelligenten Geotextilien. Das Deichmodell ist als Zonendeich mit einem Deichkern aus Sand, Innendichtung und überströmbarer Deckschicht ausgeführt. Es wird ein Deichausschnitt betrachtet, die Böschung auf der Seeseite wird nicht abgebildet und ist im Modell vertikal abgeschnitten (vgl. Abbildung 14).

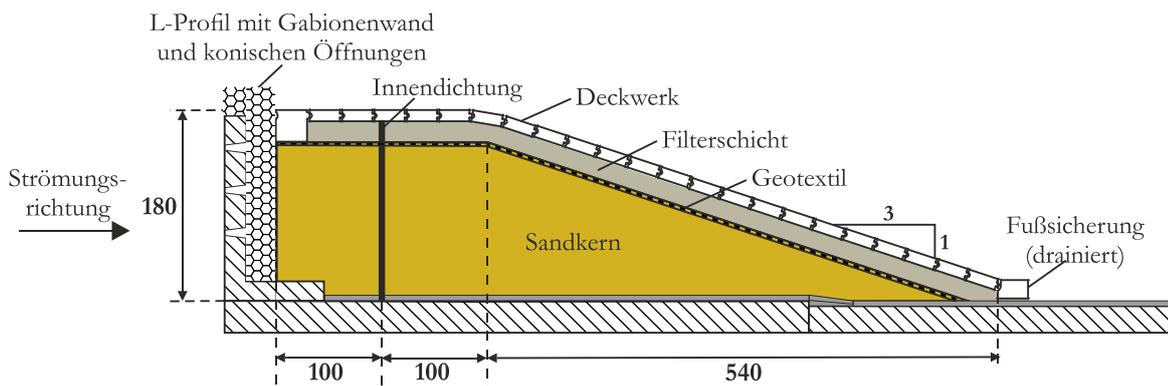


Abbildung 14: Schematischer Aufbau des Modelldeichs.

Da im Versuchsstand lediglich die Abbildung eines halben Deiches erfolgt, verläuft die Wasserseite des Modelldeichs senkrecht und muss entsprechend gestützt werden. Gleichzeitig soll für Durchsickerungsversuche eine gleichmäßige Anströmung gewährleistet werden. Hierzu werden an ein L-Profil aus Beton mit Vulkanstein gefüllte Gabionen angebracht, sodass eine vertikale Gesteinsschicht entsteht, durch die das Wasser den Deich langsam anströmt. Das L-Profil verfügt über konische Öffnungen auf verschiedenen Höhen, durch die das Wasser in die Gesteinsschicht eingeleitet wird. Zur Trennung von Deichkörpermaterial und Vulkangestein wird ein Geotextil mit einer Durchlässigkeit von $k_f = 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ über die Vorsatznetze gespannt.

Die EAK 2002 geben ausführliche Informationen zu den geeigneten Baumaterialien für Seedeich. Für den Deichkern sind „eingespülte und aus dem Spülfeld im Trockenbetrieb aufgesetzte und profilierte Sande der Korngruppe SE (DIN 18196) sowie geschüttete Sande der Korngruppen SE, SW und SI mit $\leq 5\%$ Schluffkorn (...) als Baustoff (...) optimal geeignet.“ (EAK 2002). Es wird ein gewaschener Mittelsand (0/2 mm) mit einem Schluffanteil von 0,8 % gewählt. Aufbau und Verdichtung des Deichkörpers erfolgen stufenweise per Hand (Stampfen) und mit Rüttelplatten.

Der Modelldeich verfügt über eine Kunststoffspundwand als Innendichtung. Die Bohlen an sich sind wasserundurchlässig, die Abdichtung der Schlösser ist entscheidend für die Durchlässigkeit der Spundwände. Es wird die Kunststoffspundwand DuoLock® DL610/7,2 2 der Firma G² mit und ohne Schlosstdichtung verwendet, um eine unterschiedlich starke Durchströmung des Deichkörpers zu erzeugen.

Als Deckwerk wird ein Verkalit® Deckwerkssystem aus verzahnten Deckwerksteinen auf Deichböschung und Krone aufgebracht. Vorteil dieses Aufbaus ist, dass die Deichböschung zwar vor Erosion geschützt wird, dennoch eine Durchströmung des Deckwerkes erlaubt wird und damit die Funktionstüchtigkeit der Feuchtigkeitssensoren untersucht werden kann. Der Aufbau des Deckwerkes erfolgt nach den in ETA-12/045 (BERDING BETON GmbH 2012) vorgegebenen Richtlinien bestehend aus einem Unterbau mit Filterschicht (Splitt) und Geotextil. Abbildung 15 zeigt einen fertig aufgebauten Modelldeich in der Draufsicht.



Abbildung 15: Der aufgebaute Modelldeich in der Draufsicht (Messtechnik eingeklappt).

4.3.2 Konventionelle Messtechnik

Um die Ergebnisse der entwickelten intelligenten Geotextilien validieren zu können, ist der Einsatz konventioneller Messtechnik erforderlich. Dabei gilt es, Messkonzepte für zwei unterschiedliche Ereignisse vorzuhalten: Für die Deichdurchsickerung ist vor allem die Lage der Sickerlinie von Interesse, hierzu wird ein System zur Erfassung des hydrostatischen Wasserdrucks entlang des gesamten Deichquerschnitts eingesetzt: Basierend auf dem Prinzip der kommunizierenden Röhren erfolgt die Druckmessung über wassergefüllte Polyamidschläuche ($\varnothing = 6 \text{ mm}$), welche über eine automatische Ventilsteuerung an einen Druckkalibrator (DP300C, Firma MeCoTec) außerhalb des Versuchsstands angeschlossen sind. Die Schläuche liegen in einem U-Metallprofil in der Mitte der Versuchsrinne, an den Messpunkten wird jeweils ein Schlauchende senkrecht nach oben aus dem Profil geführt und fixiert. Ein pneumatischer Schalldämpfer aus Edelstahl-Drahtgewebe verhindert den Eintrag von Sedimenten in den Schlauch. Die Messung erfolgt für jeden Messpunkt jeweils alle zwei Minuten, wobei für einen Messwert der Mittelwert aus zehn Einzelmessungen (Messfrequenz 3,33 Hz) gebildet wird. Nach jedem Umschalten zwischen zwei Schläuchen wird zum Ausgleich von Druckstößen im Schlauch vor Beginn der Messung eine Verzögerung von 4 sec berücksichtigt. Für die Erfassung der Überströmereignisse kommen Ultraschallsonden (pico+35/I, Firma microsonic) zur Ermittlung der Schichtdicken auf der Deichböschung zum Einsatz (Messfrequenz 10 Hz). Einen Überblick über alle im Deichmodell verwendeten Messverfahren liefert Tabelle 2, wobei die übrigen Messverfahren für die Validierung der Sensorvielse keine Bedeutung haben und deshalb hier nicht weiter beschrieben werden. Abbildung 16 zeigt den Modelldeich im Längsschnitt mit den Positionen aller Messpunkte.

Tabelle 2: Messparameter und eingesetzte Messtechnik.

Messparameter	Messverfahren
Lage der Sickerlinie	Druckmessung auf Sohle (U1 – U10)
Sickerwassermenge	Auslitern, Ultraschallsonde
Durchfluss	Ultraschalldurchflussmesser
Wasserstand auf Deichkrone und -böschung	Ultraschallsonde (P1 – P5)
Fließgeschwindigkeit auf Deichkrone und -böschung	Strömungspropeller und VFMS (Void Fracture Measurement System)
Druck auf Deckwerk und in Filterschicht	Druckmessdosen (S1 – S5, F1 – F5)
Verschiebung der Deichböschung	Kamera (Photogrammetrie)
Bodenfeuchte und -temperatur	Bodensensoren (<i>gia1 – gia4, giaT</i>)
Hydraulische Prozesse und Deichschäden	Webcam und Kameraaufnahmen

4.3.4 Versuchsprogramm

Auch im großmaßstäblichen Modell finden Referenzuntersuchungen ohne Einbau der intelligenten Geotextile statt, um eine Funktionalität der herkömmlichen Messmethodik sowie eine Reproduzierbarkeit der Belastungen zeigen zu können. Im Anschluss erfolgen Versuche mit den entwickelten Sensorvliesen. Insgesamt werden drei Arten von Versuchen durchgeführt:

- „Gießkannentests“,
- Durchsickerungsversuche,
- Überströmversuche bzw. Langzeitversuche.

Die „Gießkannentests“ finden vor Einbau des Deckwerks an den Sensorvliesen statt. Dabei werden die Sensoren einzeln mit einem Wasserschlauch bewässert, um eine erste Funktionalität der Sensoren zu überprüfen und Kurzschlüsse auszuschließen.

Für die Durchsickerungsversuche wird der Deich auf eine konstante Höhe eingestaut. Während der gesamten Versuchszeit werden die Druckhöhen im Deich gemessen. Eine automatische Füllstandsregelung ermöglicht es, die Wasserspiegelhöhe über beliebig lange Versuchszeiträume mit einer Genauigkeit von $\pm 2,5$ mm konstant zu halten. Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen Eindrücke der Versuche.



Abbildung 18: Einstau des Modelldeichs für Durchsickerungsversuche.



Abbildung 19: Erster Sickerwasseraustritt am Deichfuß.

Für die Überströmversuche (Abbildung 20) können durch stufenweise Öffnung der Absperrklappe im Modellzulauf Überfallhöhen zwischen 2 und 40 cm generiert werden. Für die Validierung der Feuchtesensoren sind Dauer und Höhe der Überströmung irrelevant, interessant ist jedoch das Langzeitverhalten. Dies kann während eines Einbaus von Messvlies IV über acht Monate hinweg untersucht wird. Während dieses Zeitraums wird das Deichmodell immer wieder für längere Zeit überströmt, während in Zeiträumen von ein bis zwei Wochen ohne Belastung der Deich entwässern und trocknen kann.



Abbildung 20: Modelldeich während Überströmversuch.

5 Ergebnisse

5.1 Kleinmaßstäbliche Versuche

5.1.1 Referenzfall ohne Sensoren

Mit steigendem Wasserstand lässt sich die fortschreitende Durchsickerung des Deichkörpers beobachten. Abbildung 21 zeigt die Deichdurchsickerung zu unterschiedlichen Zeitpunkten, während der Wasserspiegel vor dem Deich linear ansteigt.

Der Deich in Abbildung 21 stellt einen Zweizonendeich bestehend aus einem homogenen Sandkörper und einem Kiesfilter dar. Die zwei verwendeten Sande unterschieden sich nur hinsichtlich ihrer Farbe. Aus Gründen des besseren Kontrasts zwischen Sickerlinie und trockenem Deich wird für spätere Versuche der helle Quarzsand verwendet. Der am Deichfuß aufgeschüttete Kiesfilter führt zu einem Austritt der Sickerlinie auf Höhe der Deichberme. Damit in Versuchen mit den intelligenten Geotextilien möglichst viele Sensoren angesprochen werden, wird in weiteren Versuchen auf den Kiesfilter verzichtet.

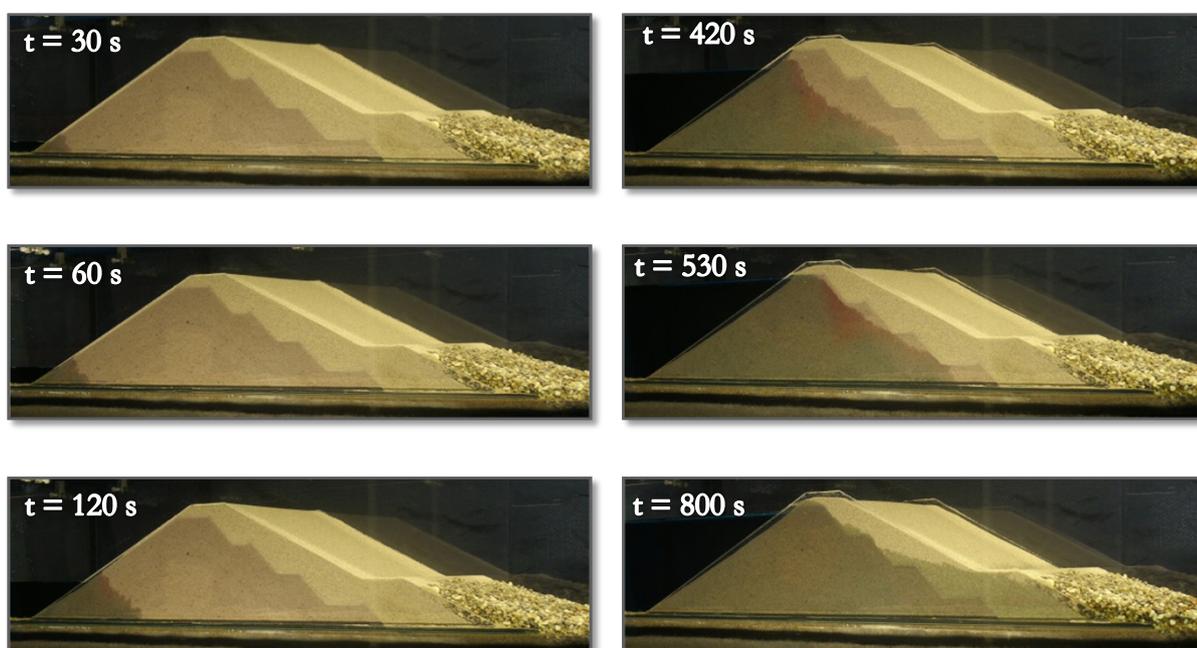


Abbildung 21: Lage der Sickerlinie des Deiches zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

5.1.2 Messvlies I

Abbildung 22 zeigt den gemessenen Spannungsverlauf für die auf der Binnenseite eingebauten Sensoren infolge eines linearen Anstiegs des Wasserspiegels. Die Bezeichnung der Sensoren geht aus Abbildung 10 hervor. Das Messvlies wird mit 0,2 mA bestromt, die Messung des Potenzialunterschieds zwischen zwei Sensorfasern erfolgt mit einer Frequenz von 1 Hz, alle Kanäle werden gleichzeitig gemessen. Kanal 1 und Kanal 6 liefern ein fehlerhaftes Signal und sind deshalb nicht dargestellt.

Zu Beginn ist der komplette Deich trocken und an allen Kanälen ist eine Spannung von 0,78 V zu messen. Der Deich wird nun infolge eines ansteigenden Wasserspiegels langsam durchsickert. Zum Zeitpunkt $t = 750$ s erreicht die Sickerlinie die Deichbinnenseite kurz

oberhalb der Berme, dies führt zu einem Spannungsabfall in Kanal 2. Kurz darauf passiert dies auch an Kanal 3, Kanal 4 und Kanal 5. Kanal 7 wird zum Zeitpunkt $t = 820$ s von der Sickerlinie erreicht, jedoch findet hier lediglich eine Durchfeuchtung des Sandes und keine starke Durchströmung wie an den tiefergelegenen Kanälen statt, weshalb der Spannungsabfall geringer ausfällt. Kanäle 8, 9 und 10 bleiben während des gesamten Versuchs trocken und die gemessene Spannung konstant.

Abbildung 23 zeigt Aufnahmen der Binnenseite des Modelldeichs nach etwa 15 Minuten (links) und 20 Minuten (rechts). Trotz Freispülung der Kanäle 2, 3 und 4 in der Deichmitte lässt sich für diese Kanäle kein markanter Spannungsanstieg beobachten, nachdem die Spannung einmal abgefallen ist. Dies liefert einen Hinweis auf Fehlkontaktierung der Sensoren: Infolge der nichtisolierten Anschlüsse wird der Spannungsabfall nicht zwischen den Carbonfasern, sondern direkt zwischen den Anschlussdrähten gemessen. Dies führt zwar auf den ersten Blick zu plausiblen Ergebnissen, ist jedoch nicht zielführend hinsichtlich der Entwicklung von carbonfaserbasierten Sensoren, die Informationen über die gesamte Länge des Deiches und nicht nur über die Kontaktierungsstelle liefern sollen.

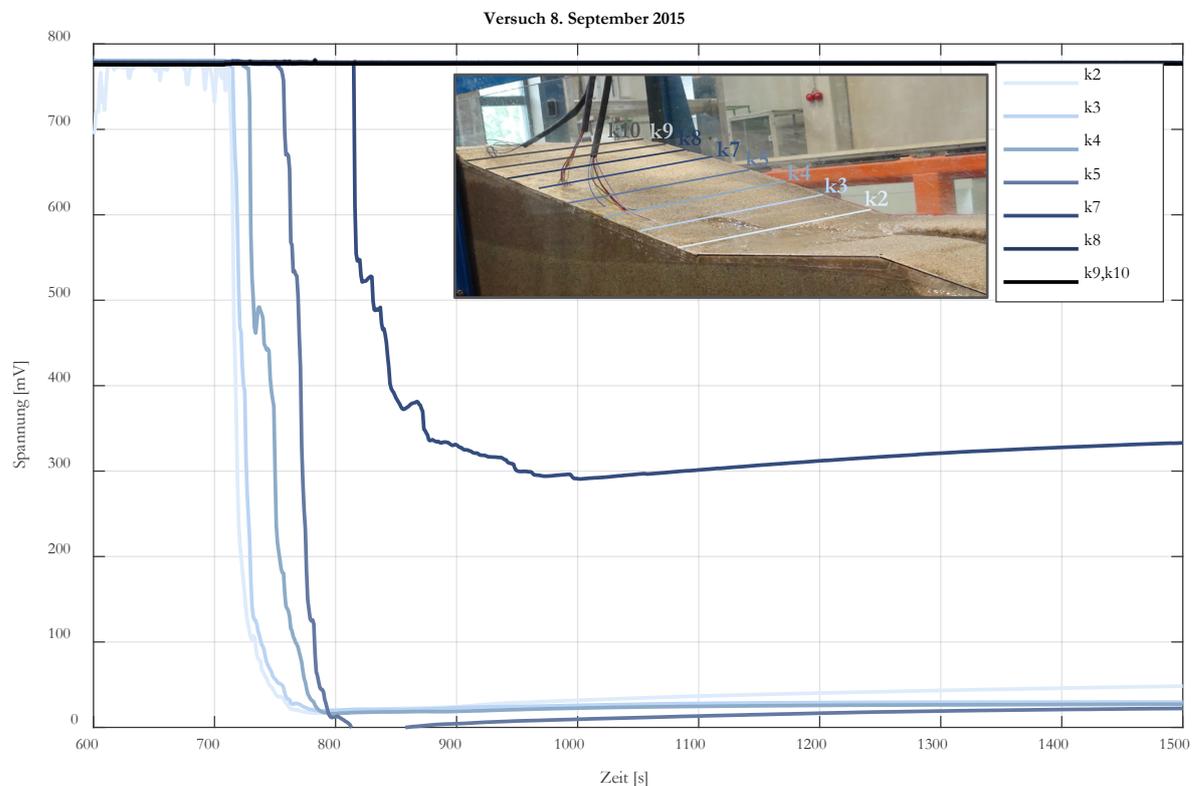


Abbildung 22: Gemessene Spannungen im Messvlies I während einer Deichdurchsickerung infolge eines linearen Anstiegs des Wasserspiegels vor dem Deich bis zum Volleinstau.

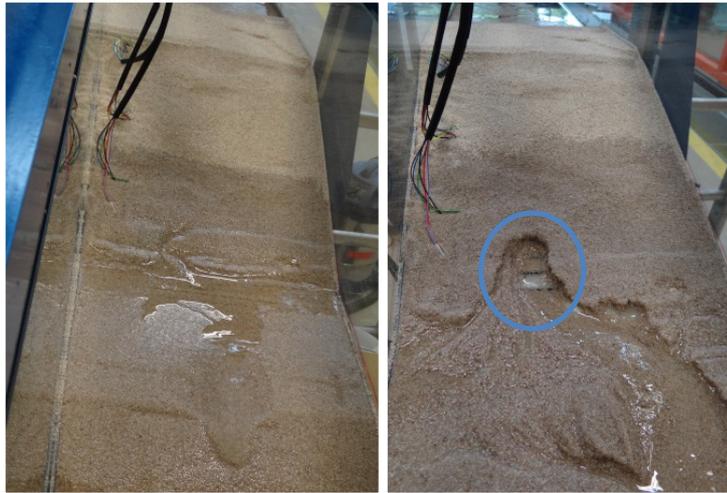


Abbildung 23: Erosion an der Binnenseite des Modelldeiches nach 15 (links) bzw. 20 Minuten (rechts), rechts ist das an einer Stelle freigespülte Geotextil zu erkennen.

5.1.3 Messvlies II

In Messvlies II sind die Anschlussstellen isoliert, sodass nun die tatsächliche Spannung zwischen zwei Carbonfaserrovings gemessen wird. Jedoch kommt es zum Ausfall einiger Sensoren. Als Ursachen hierfür sind unsauberes Arbeiten bei der Kontaktierung der Carbonfasern, falsche Verbindungen auf dem Steckbrett und Kabelbrüche infolge des Transports und Einbaus zu nennen. Genutzt werden können schließlich die in Abbildung 25 beschrifteten Sensoren.

Die Analyse der Spannungsverläufe liefern für alle durchgeführten Versuche plausible Ergebnisse: Der Zeitpunkt eines deutlichen Spannungsabfalls stimmt für jeden Sensor mit der optisch beobachteten Durchsickerung überein. Hierzu sollen beispielhaft die gemessenen Spannungsverläufe während eines Durchsickerungsversuchs im Januar 2016 betrachtet werden. Abbildung 24 zeigt den Spannungsverlauf während des gesamten Versuchs, Abbildung 26 den entscheidenden Zeitabschnitt, in dem die einzelnen Sensoren nass werden. Zu Versuchsbeginn liegen die gemessenen Spannungen deutlich unter den Initialspannungen aus Abbildung 22 und der Spannungsverlauf schwankt stärker. Im Gegensatz zum oben dargestellten Versuch mit Messvlies I, bei dem der Einbau im trockenen Sand erfolgte, ist der Sand bereits zu Versuchsbeginn erdfeucht und der Potenzialabbau erfolgt sofort zwischen den Carbonfasern und nicht erst durch die Referenzwiderstände. Der Spannungsabfall bei Erreichen des wassergesättigten Zustands lässt sich dennoch deutlich erkennen: Abbildung 25 und Abbildung 27 zeigen zwei Aufnahmen des Deichquerschnitts zu den Zeitpunkten $t = 340$ s und $t = 350$ s, zu denen die Kanäle k1, k2 und k3 einen Spannungsabfall gemessen und damit Wasser an der Deichbinnenböschung detektiert haben. Hier zeigen sich aber auch die Grenzen der optischen Auswertung: k4 müsste gemäß Auswertung des Fotos zum Zeitpunkt $t = 350$ s ebenfalls einen Spannungsabfall verzeichnen, tatsächlich ist die Oberseite des Vlieses, auf der die Sensoren aufgebracht sind, aber noch nicht durchfeuchtet und die Spannung in k4 fällt erst 10 Sekunden später ab.

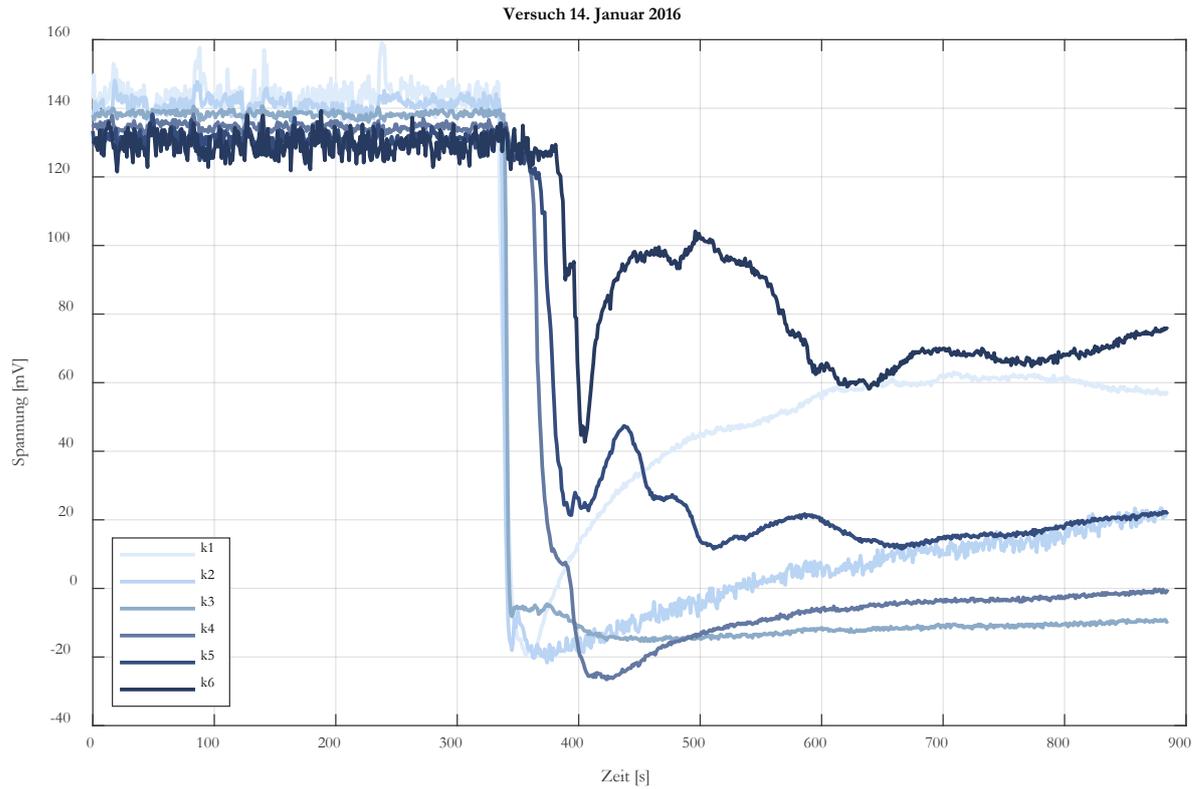


Abbildung 24: Gemessene Spannung während eines Durchsickerungsversuchs mit Messvlies II.

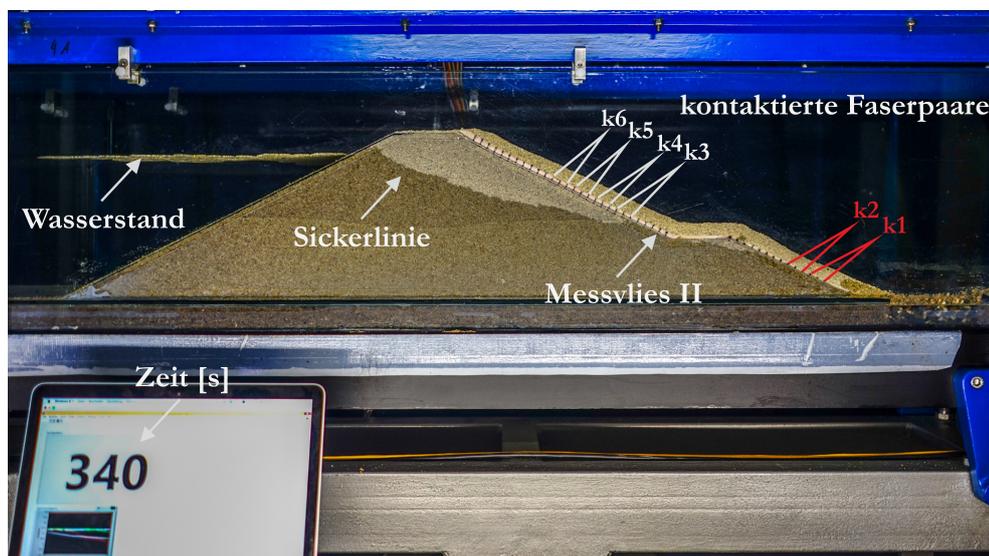


Abbildung 25: Versuch mit Messvlies II zum Zeitpunkt $t = 340$ s. Die im Bild rot markierten Sensoren verzeichneten bereits einen Spannungsabfall.

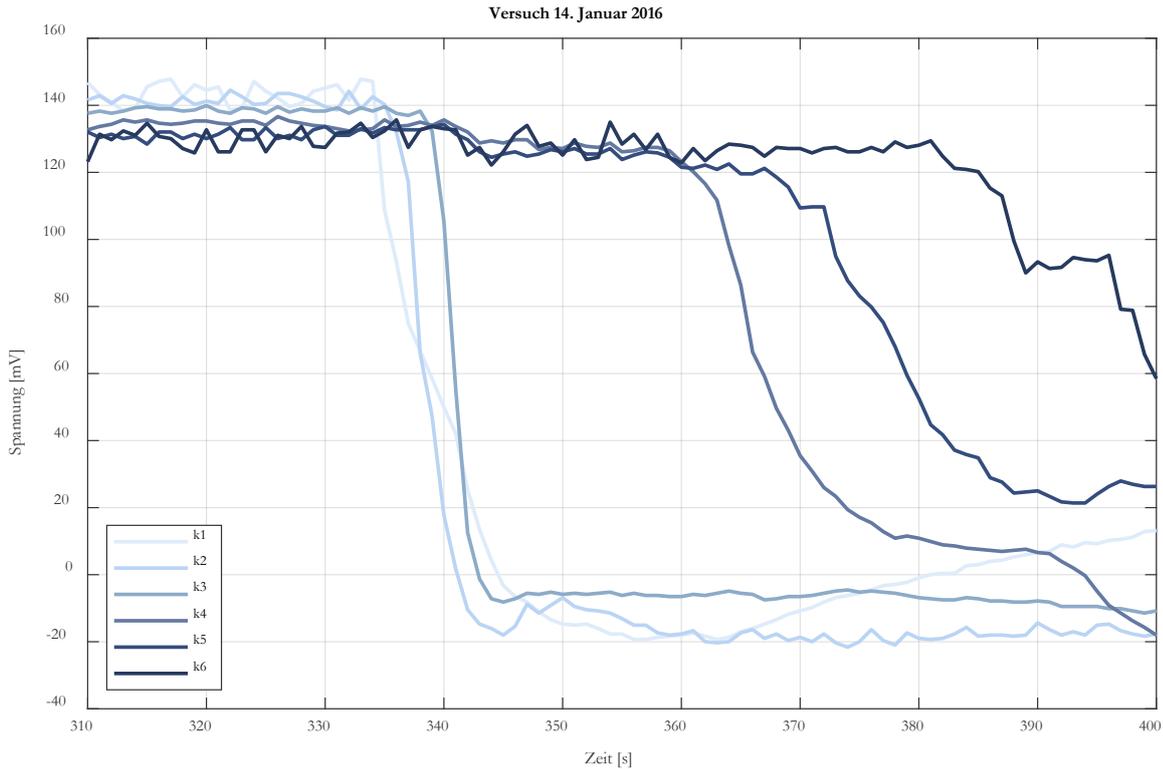


Abbildung 26: Gemessene Spannung während eines Durchsickerungsversuchs mit Messvlies II (Ausschnitt).

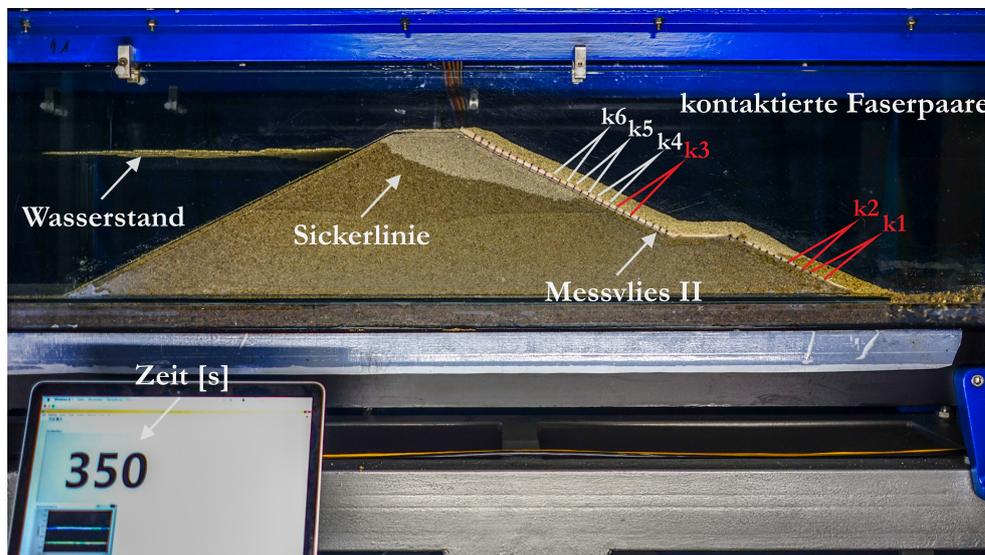


Abbildung 27: Versuch mit Messvlies II zum Zeitpunkt $T = 350$ s. Die im Bild rot markierten Sensoren verzeichneten bereits einen Spannungsabfall.

Bei der mehrmaligen Wiederholung der Versuche im trockenen sowie erdfeuchten Sand zeigt sich, dass die Spannungsmessungen in ihrer absoluten Höhe und in der Höhe des Spannungsabfalls deutlichen Schwankungen unterliegen und in dieser Hinsicht keine reproduzierbaren Ergebnisse erlauben. Hierbei spielen vor allem die Entstehung von „Fehler“-Strömen eine Rolle: Aufgrund des geringen Abstands zwischen den Sensorpaaren kann es passieren, dass der geringste elektrische Widerstand nicht zwischen zwei nebeneinanderliegenden Sensoren liegt, sondern ein Sensor übersprungen wird (s. Abbildung 28). Dieser

Effekt ist durch den kleinen Maßstab und den daraus resultierenden geringen Abstand der Faserpaare bedingt und führt zu einer gegenseitigen Beeinflussung der Sensoren. Auch kommt es bei einigen Versuchen zu stark verrauschten Spannungssignalen, die auf eine Überlagerung mit Fremdeinflüssen infolge der mangelnden Abschirmung der Messeinheit zurückzuführen sind.

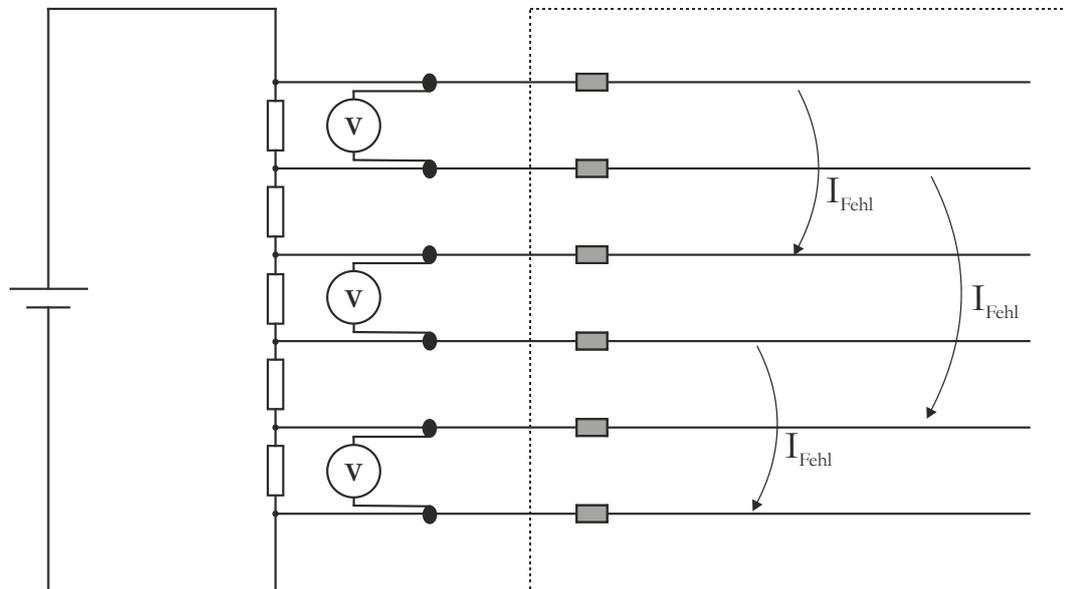


Abbildung 28: Bei den Sensoren, die im wassergesättigten Bereich liegen, kann es infolge des geringen Abstandes der Sensorpaare untereinander zur Entstehung von „Fehler“-Strömen kommen (skizzenhafte Darstellung).

5.2 Zwischenfazit

Die Untersuchungen mit den kleinmaßstäblichen Sensorvliesen zeigen, dass das entwickelte Messprinzip zur Detektion eines erhöhten Wassereintritts im Deich geeignet ist. Dabei funktionieren die Messungen nicht nur bei einem Einbau der Vliese im trockenen Material, sondern auch bei Vorliegen eines erdfeuchten Materials, auch wenn die Spannungsabfälle bei Durchfeuchtung des Sandes hier geringer ausfallen. Die Carbonfasern selber und auch ihre Fixierung mittels Sticktechnik auf dem Geotextil erweisen sich als ausreichend robust und für einen Einbau im Deichkörper geeignet.

Dennoch gibt es Schwachstellen, deren Identifikation zu einer iterativen Verbesserung der eingesetzten Sensorvliese führt. Ein größeres Augenmerk ist auf die Kontaktierung der Fasern und die Verschaltung der Sensoren zu legen. Das Umhüllen der Anschlüsse mit Silikon stellt hier eine zufriedenstellende Lösung dar. Ebenfalls erweist es sich als sinnvoll, einen Großteil der Verkabelung und Anschlüsse außerhalb des Deiches anzuordnen und nur die eigentlichen Sensorfasern im Deich zu verbauen. Auch die Anordnung der gesamten Schaltung auf einem kleinen Klemmbrett ist noch fehleranfällig. Einerseits, da die Schaltungen per Hand gebaut und gelötet werden und andererseits, da ausreichender Schutz und geeignete Abschirmung gegen äußere Umwelteinflüsse fehlen.

In enger Abstimmung mit dem ITA, werden auf Basis der gesammelten Erfahrungen Anforderungen an ein großmaßstäbliches Messvlies definiert, das für den Einbau im Modelldeich ausreichend robust und für Langzeitmessungen geeignet ist. Hierzu liegt das Augenmerk insbesondere auf den folgenden Punkten:

- Kaschierung der Sensorfasern zum Schutz vor Beschädigung und Abrasion während des Einbaus
- Verwendung langer und robuster Anschlusskabel, um Beschädigungen am Kabel während des Einbaus und infolge überströmendem Wassers zu vermeiden
- gesammeltes Ausführen der Anschlusskabel aus dem Deichkörper
- Isolation der Kontaktstellen zwischen Sensor und Kabel
- Ausschließen von Kurzschlüssen infolge feiner, loser Carbonfasern im Textil
- Abschirmung der Messschaltung zur Vermeidung von Fremdeinflüssen

Die Anforderungen führen zu Veränderungen in der Herstellung der eingesetzten Messvliese und zu Überarbeitungen an der entwickelten Messschaltung. Für die technischen Details sei auf Schwab et al. 2021 verwiesen. Mit dem auf Basis der gesammelten Erfahrungen entwickelten Messvlies werden dann – auf makroskaliger Ebene – verschiedene Szenarien simuliert, um folgende Fragestellungen detailliert zu untersuchen:

- Wie verhalten sich die Sensoren während einer Trocknungsphase?
- Kann die Beeinflussung der Sensoren untereinander durch die vergrößerten Sensorabstände ausgeschlossen werden?
- Lassen sich unterschiedliche Belastungsfälle (Durchsickerung, Überströmung) an den Messergebnissen erkennen?
- Lassen sich mehrere aufeinander folgende Ereignisse erneut detektieren?
- Wie verhalten sich die Sensoren unter Langzeitbelastung?

5.3 Großmaßstäbliche Versuche

5.3.1 Messvlies III

Funktionstests ohne eingebautes Deckwerk („Gießkannentests“) zeigen, dass das erste großmaßstäbliche Sensorvlies (Messvlies III) keine plausiblen Ergebnisse liefert. Im Vergleich zu Messvlies II werden die Sensorfasern mit einer Kaschierung aus einem dünnen Vliesstoff vor Abrasion geschützt und die angeschlossenen Kabel als Flachbandkabel aus dem Textil geführt, die Messschaltung außerhalb des Deiches wurde nicht überarbeitet.

Als Ursache für die Fehlmessungen werden Kurzschlüsse im Textil infolge feiner Carbonfaser splitter identifiziert. Ferner erweisen sich die Ausführung der Anschlusskabel und der Anschluss an die Messeinheit trotz Verbesserungen als nicht ausreichend robust für den Einbau im großen Modelldeich (vgl. Abbildung 29). Messvlies III wird infolgedessen nicht weiter untersucht. Überarbeitungen der Messeinheit und der Anschlüsse führen zur Herstellung eines neuen Messvlieses (Messvlies IV), welches schließlich im November 2017 in den Modelldeich eingebaut wird.

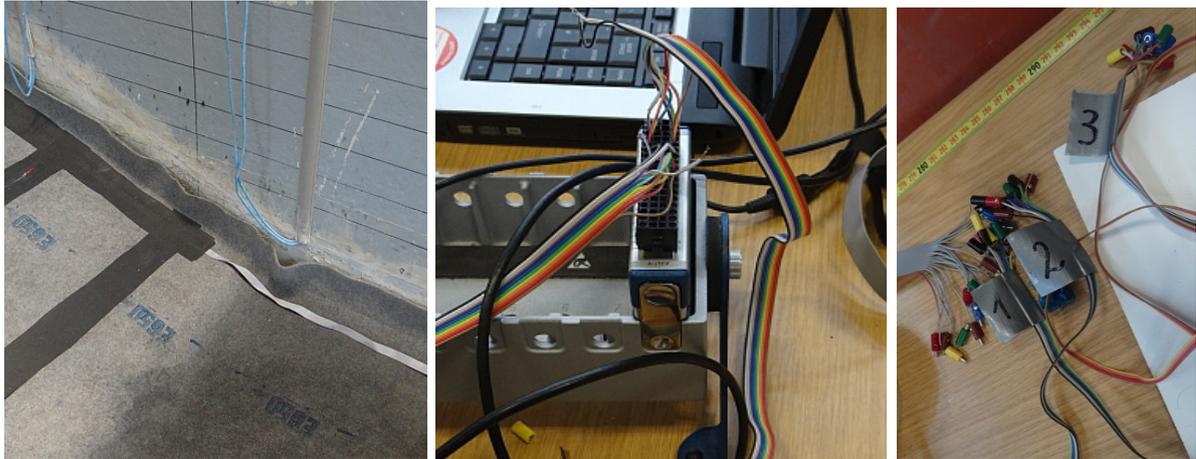


Abbildung 29: Kaschierung der Sensoren, Verbindungskabel zwischen Sensoren und Messeinheit als Flachbandkabel (links) sowie der Anschluss an die Messeinheit für Sensorvlies III (Mitte und rechts).

5.3.2 Messvlies IV

Das Anschlusskabel von Messvlies IV ist durch Verwendung von XLR-Kabeln und -Steckern deutlich robuster, die Messschaltungen selbst befinden sich in spritzwassergeschützten Kunststoffboxen (vgl. Abbildung 30). Um bei Messvlies IV die Entstehung von Kurzschlüssen infolge feiner Carbonfaser-splitter zu vermeiden, sind die Carbonfaserrovings beschichtet (s. Schwab et al. 2021).



Abbildung 30: Verbindungskabel zwischen Sensoren und Messeinheit (links) sowie der Anschluss an die Messeinheit für Sensorvlies IV (rechts).

Erste Funktionstests („Gießkannentests“) des Sensorvlies IV ohne eingebautes Deckwerk erzielen gute Ergebnisse: Es besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Bewässerung einzelner Sensorfasern und den gemessenen Spannungen. Eine Beeinflussung der Sensoren untereinander, wie sie in den kleinmaßstäblichen Untersuchungen beobachtet wurde, besteht nicht mehr. Ferner erweisen sich die Ausführung der Kabel und Anschlussstellen als ausreichend robust für den Einbau unterhalb des Deckwerks und den Einsatz in Langzeitversuchen. Der Deichaufbau wird fortgesetzt und das Sensorvlies mit einem Filtermaterial und einem Deckwerk aus Betonformsteinen überbaut (Abbildung 31).



Abbildung 31: Ausführung der Verbindungskabel bei Einbau des Filtermaterials (links oben) sowie nach Einbau des Deckwerks (links unten), rechts: Aufbau des kompletten Deckwerks abgeschlossen.

Anschließend wird Messvlies IV in Durchsickerungs- sowie Überströmversuchen für mehrere Monate belastet und die Messungen der Spannungen permanent aufgezeichnet. Hierbei erfolgt die Messung und Datenerfassung mit einer am *gia* entwickelten Messeinheit und die Daten werden mittels MQTT-Protokollen direkt in die Sensordateninfrastruktur übertragen (vgl. Herle et al. 2021). Die Messwernerfassung je Sensorkanal (Messung des Potenzialabbaus zwischen zwei Sensorfasern) erfolgt alle zwei Minuten, wobei für jeden Messwert 30 Einzelmessungen mit einer Frequenz von 100 Hz gemittelt werden. Die erfassten Daten werden am *IWW* entweder aus einer Datenbank heruntergeladen oder über MQTT-Protokolle in Echtzeit abonniert.

5.3.3 Auswertung der Langzeitversuche und Entwicklung einer automatischen Auswerteroutine

Eine erste Validierung der spannungsinduzierten Durchfeuchtungsmessung durch Messvlies IV ist – ähnlich zur Auswertung in den kleinmaßstäblichen Versuchen – durch die grafische Aufbereitung der Messdaten aus dem Sensorvlies sowie des am Boden der Versuchsrinne installierten Druckmesssystems rein optisch möglich (Abbildung 33).

Auf Grundlage der in den Langzeitversuchen gewonnenen Daten wird im folgenden Schritt eine automatische Auswerteroutine entwickelt, mithilfe derer aus den gemessenen Spannungen an einem Sensorpaar automatisch auf einen Wassereintritt geschlossen werden kann. Hiermit lässt sich der exakte Zeitpunkt der Wasserdetektion am Messvlies bestimmen, welcher dann mit dem erwarteten Zeitpunkt der Befeuchtung jedes Sensors (bestimmt aus dem Schnittpunkt zwischen der aus den Druckmessungen errechneten Sickerlinie und dem Textil) verglichen werden kann. Bei einer korrekten Funktion des Sensorvlieses sowie der Auswerteroutine sollten diese beiden Zeitpunkte möglichst genau

übereinstimmen. Das Flussdiagramm in Abbildung 32 skizziert den beschriebenen Ablauf zur Validierung des Sensorvlieses und der Auswerteroutine, welche im Folgenden anhand ausgewählter Versuchszeiträume diskutiert wird.

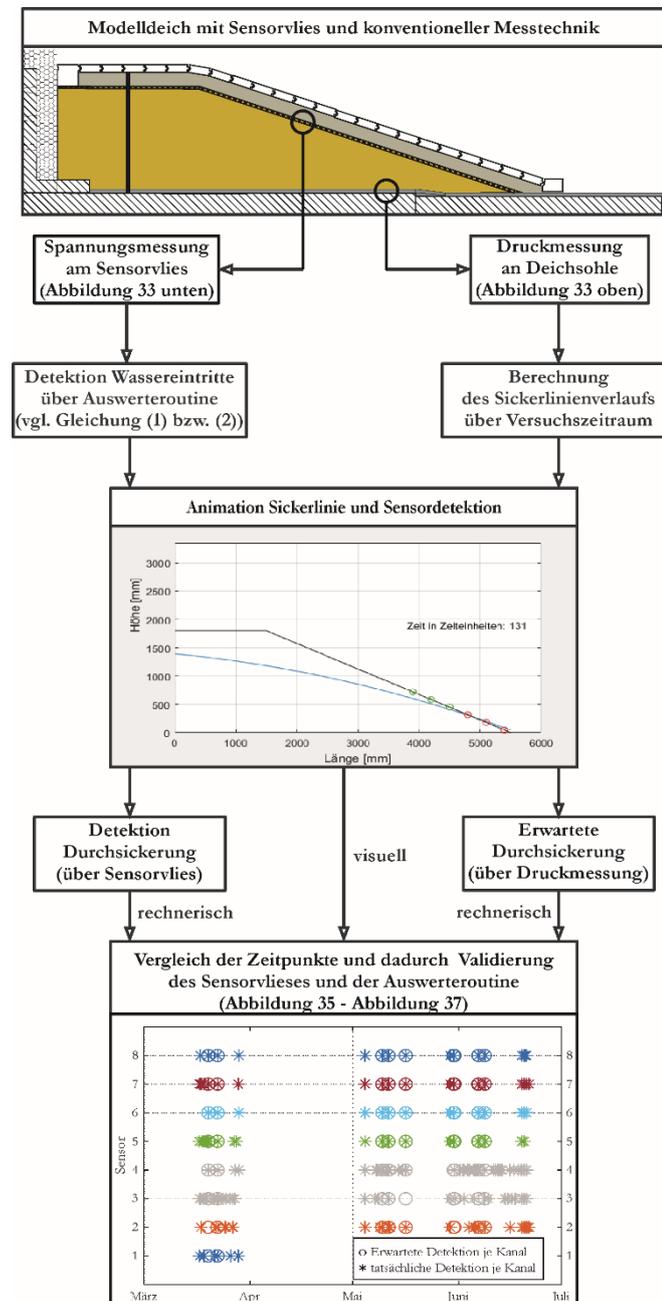


Abbildung 32: Schema zur Validierung des Sensorvlieses und Entwicklung einer automatischen Auswerteroutine mithilfe der Daten aus den Langzeitversuchen.

Abbildung 33 zeigt den Verlauf der Druckmessung am Boden des Modelldiechs (U1 – U10) und die gemessenen Spannungen an den Kanälen des Sensortextils (Ch 1 – Ch 8) für zwei Überströmereignisse im Juni 2018. Die Druckmesspunkte am Boden sind dabei von unmittelbar vor der Deichkrone bis zum Deichfuß von 1 – 10 durchnummeriert (vgl. Abbildung 16). Die Kanäle am Textil sind vom Deichfuß zur Deichkrone von 1 bis 8 durchnummeriert. Ch 1 entspricht folglich dem am Deichfuß liegenden Kanal und Ch 8 dem oben auf der Deichböschung liegenden Kanal. Die Sensoren Ch 3 und Ch 4 sind nicht

dargestellt, da sie aufgrund eines Defekts keine plausiblen Werte lieferten (vgl. Abbildung 34).

Das erste dargestellte Ereignis (Nachmittag des 6. Juni) entspricht einer geringen und kurzen Überströmung, bei der der Deich im Anschluss für kurze Zeit eingestaut blieb (die Schwankungen der Pegel im Deich sind an dieser Stelle zu vernachlässigen). Das zweite Ereignis (Nachmittag des 8. Juni) ist eine ebenfalls kurze, deutlich höhere Überströmung, im Anschluss wurde das Wasser direkt aus dem Becken vor dem Deich abgelassen. Aus der Betrachtung der Daten lässt sich Folgendes erkennen:

- Die an den Sensoren gemessenen Spannungen liegen zu Beginn der Messung auf unterschiedlich hohem, jedoch konstantem Niveau.
- Zum Zeitpunkt der Überströmung lässt sich an allen Kanälen ein deutlicher Spannungsabfall erkennen, der sich in seiner Höhe jedoch stark unterscheidet.
- Nach dem Spannungsabfall lässt sich mit Absinken des Wasserspiegels im Deich ein Anstieg der Spannungen erkennen, wobei die Spannung für die auf der Deichböschung weiter oben liegenden Sensoren zuerst ansteigt.
- Im weiteren Verlauf steigt die Spannung weiter – jedoch weniger stark – an, nachdem der Wasserpegel im Deich bereits abgesunken ist (Trocknungsphase der Sensoren).
- Innerhalb der hier zwei Tage andauernden Trocknungsphase ist die Spannung in den Sensoren noch nicht auf den Ausgangszustand zurückgekehrt.
- Dennoch lässt sich bei erneutem Überströmen des Deichs ein erneuter Spannungsabfall erkennen, der sich charakteristisch ähnlich verhält wie der erste Spannungsabfall.
- Insgesamt weisen die Sensoren unterschiedlich starke Schwankungen auf.

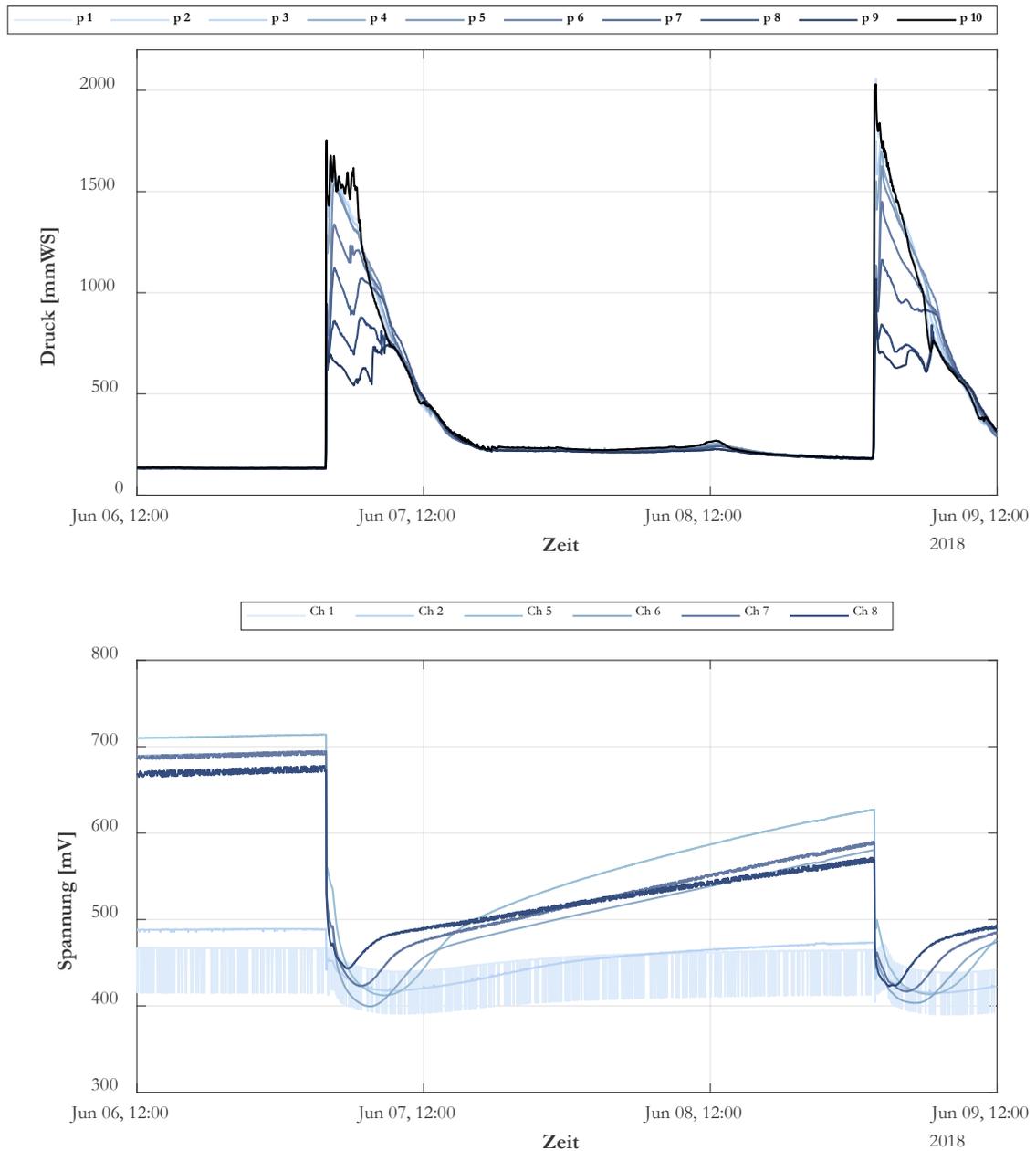


Abbildung 33: Darstellung der gemessenen Wasserspiegelhöhe im Modelldeich (oben) und der Spannungen an den Sensoren des Messvlieses IV (unten) für zwei Überströmereignisse am Modelldeich im Juni 2018.



Abbildung 34: Gemessene Sensorspannungen am Messvlies IV (Ende Mai bis Anfang Juni 2018) inklusive der defekten Sensoren Ch 3 und Ch 4 (in rot und orange dargestellt).

Nun soll eine automatische Auswertung der Spannungsverläufe erfolgen, mithilfe derer die Zeitpunkte der Wasserdetektionen an einem Sensor bestimmt und dann mit dem durch die Druckmessung am Boden bestimmten Verlauf der Sickerlinie verglichen werden können. Später soll die Auswerterroutine zur Ermittlung des Sensorzustands in Echtzeit genutzt werden. Folglich ist eine schlanke und schnelle Berechnung erforderlich, auf deren Basis für jeden eintreffenden Spannungswert neu entschieden werden kann, ob der Sensor zum betrachteten Zeitpunkt einen Wassereintritt detektiert hat oder nicht.

Bei Betrachtung der für die zwei Ereignisse im Juni dargestellten Spannungsverläufe wird deutlich, dass die an den Sensoren im „trockenen“ (nicht wassergesättigten) Zustand gemessenen Spannungsverläufe insgesamt auf unterschiedlichen Niveaus liegen und die Sensoren nicht immer auf ihren Ausgangszustand zurückkehren müssen, um einen erneuten Anstieg des Wassergehalts detektieren zu können. Alle Sensoren auf einen trockenen Zustand zu referenzieren und nur relative Spannungsabfälle zu betrachten, erweist sich als ungeeignet, da sich keine eindeutigen Schwellenwerte festlegen lassen. Zielführend ist ein relativer Vergleich: Hierzu wird der einfache gleitende Mittelwert über einen definierten Zeitraum vorangegangener Messungen mit dem einfachen gleitenden Mittelwert der jeweils aktuellsten Messungen verglichen. Unterschreitet dieser den n -fachen Wert der Standardabweichung der Messwerte des vorangegangenen Zeitraums, so liegt ein charakteristischer Abfall vor, der auf eine Wasserdetektion am Sensor hindeutet. Es gilt folglich für jeden Zeitpunkt t zu überprüfen:

$$\frac{[\sum_{i=t}^{t+f} U(i)]}{f+1} - \left(\frac{[\sum_{i=t-p}^{t-1} U(i)]}{p} - n \cdot \sqrt{\frac{1}{p} \cdot \sum_{i=t-p}^{t-1} \left(U(i) - \frac{[\sum_{i=t-p}^{t-1} U(i)]}{p} \right)^2} \right) \begin{matrix} < 0 \\ \geq 0 \end{matrix} \quad (1)$$

Mit:

- $U(t)$ gemessene Spannung zum Zeitpunkt t
- f Anzahl der Messungen nach Zeitpunkt t , die Berücksichtigung findet, um Zustand zum Zeitpunkt t zu definieren (*future events*)
- p Anzahl der Messungen vor Zeitpunkt t , die Berücksichtigung findet, um Zustand zum Zeitpunkt t zu definieren (*past events*)
- n Vielfaches der Standardabweichung, deren Unterschreitung einen kritischen Spannungsabfall am betrachteten Sensor bedeutet

Solange Gleichung (1) ≥ 0 ist, ist der Wassergehalt in der Sensorumgebung unverändert oder abnehmend. Ergibt sich zum Zeitpunkt t , dass Gleichung (1) < 0 ist, so hat der Sensor einen Wassereintritt detektiert. Zu beachten ist, dass auf Grundlage der Spannungsmessungen stets nur der Zeitpunkt des Wassereintritts detektiert wird. Es erfolgt also keine Unterscheidung zwischen „Sensor nass“ und „Sensor trocken“, sondern eine zwischen „erhöhter Wassergehalt in Sensorumgebung“ oder „konstanter bzw. abnehmender Wassergehalt in Sensorumgebung“.

Vorteil der relativ schlanken Rechenoperation ist die schnelle Umsetzung für die angestrebte automatische Sensorauswertung in Echtzeit: Es genügt die Betrachtung eines kurzen Datenausschnitts zusammengesetzt aus p -vergangenen und f -zukünftigen Werten. Durch Einbeziehung der gleitenden Standardabweichung wird dabei die individuelle Schwankungsbreite jedes Sensors berücksichtigt, ohne dass eine aufwändige Analyse der gesamten Zeitreihe erforderlich ist. Die Entscheidung über den Zustand des Sensors zum Zeitpunkt t ist allerdings erst nach f weiteren Messungen möglich. Der Wert f sollte folglich für eine schnelle Entscheidung so niedrig wie nötig sein. Auch der Wert p sollte so gering wie nötig gewählt werden, da er entscheidend dafür ist, wie schnell ein weiteres auf einen Sensorabfall folgendes Ereignis detektiert werden kann.

Auf Grundlage der durchgeführten Versuche werden nun die Parameter f , p und n bestimmt. Hierzu wird oben aufgeführte Gleichung mit variierenden Parametern für jeden Zeitschritt auf die mit Messvlies IV über den Zeitraum von März bis Juli 2018 gemessenen Sensordaten angewandt. Die Zeitpunkte der daraus resultierenden Detektionen werden mit den tatsächlich stattgefundenen Überströmereignissen am Modelldeich verglichen. Der Zeitpunkt der Überströmung wird auf Grundlage der gemessenen Druckhöhen im Deich bestimmt. Hierbei ist der Zeitpunkt, ab dem der Wasserstand im Deich die Höhe der Spundwand überschreitet und das Wasser durch den Filter unter dem Deckwerk abfließen kann, entscheidend (da die Messungen der Druckhöhen ebenso wie die Sensormessungen nur alle zwei Minuten aufgezeichnet wurden, können eventuelle Verzögerungen vernachlässigt werden). Ziel ist es, die Parameter f , p und n so zu wählen, dass alle Überströmereignisse detektiert und Fehldetektionen möglichst vermieden werden.

Abbildung 35 zeigt diesen Vergleich für den Versuchszeitraum von Mai bis Juni 2018 für die Parameter $p = 50$, $f = 5$ und $n = 5$. Auf der y -Achse sind die acht im Deich verbauten Sensoren aufgetragen, ein Sternchen entspricht einer Sensordetektion, ein Kreis einer Überströmung des Modelldeichs. Liegt das Sternchen im Kreis, bedeutet dies, dass

der Sensor den Zeitpunkt der Überströmung korrekt detektiert hat und die Auswerterroutine funktioniert. Es wird deutlich, dass die gewählten Parameter für die Sensoren 5 bis 8 relativ gut funktionieren und nur wenige Fehlalarme liefern. Für die Sensoren 1 und 2 treten deutlich mehr Fehlalarme auf. Die Sensoren 3 und 4 sind in der Darstellung ausgegraut, da sie ab Mai keine plausiblen Werte lieferten (vgl. Abbildung 34)

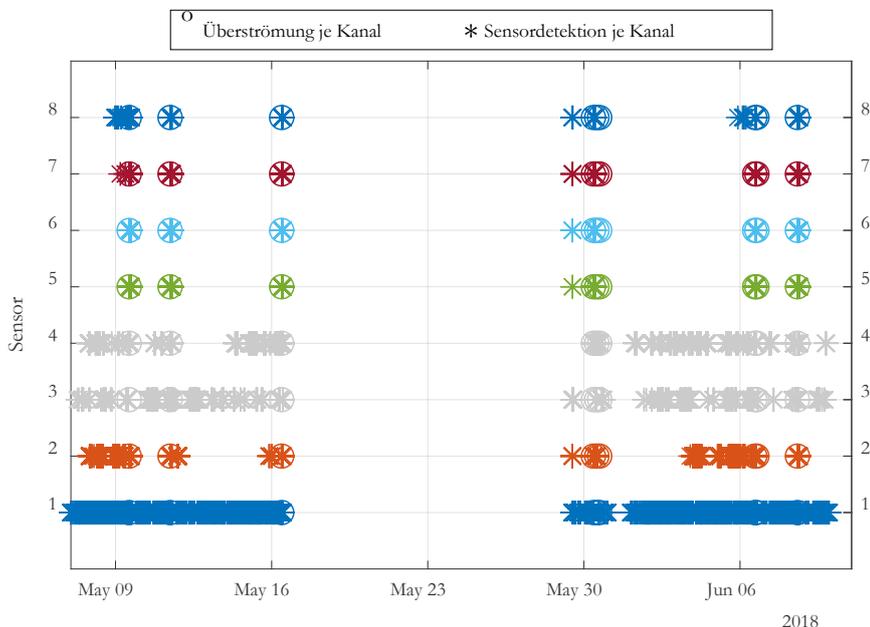


Abbildung 35: Vergleich der Sensordetektion auf Grundlage der beschriebenen Auswerterroutine (für $p = 50$, $f = 5$ und $n = 5$) mit der tatsächlichen Überströmung des Modelldeichs für den Zeitraum 7. Mai bis 10. Juni 2018: Alle Ereignisse werden korrekt erkannt, jedoch treten wenige Fehldetektionen an den Sensoren 5 bis 8 und viele Fehldetektionen an Sensor 1 und 2 auf.

Eine Variation der Parameter (hier nicht grafisch dargestellt) zeigt: Eine weitere Reduzierung von f funktioniert für die Sensoren 5 bis 8 gut, führt bei Sensor 2 jedoch dazu, dass erste Ereignisse nicht mehr detektiert werden. Eine Erhöhung von p verbessert die Auswertung nicht, erhöht jedoch die Rechenzeit. Eine Veränderung des Parameters n wirkt sich am sensitivsten aus, da hierüber der Schwellenwert, ab wann ein Spannungsabfall kritisch ist, festgelegt wird. Wird n erhöht, um die Anzahl an Fehldetektionen zu verringern, führt dies dazu, dass an Sensor 2 ein Ereignis nicht mehr erkannt wird, während weiter Fehldetektionen stattfinden (vgl. Abbildung 36).

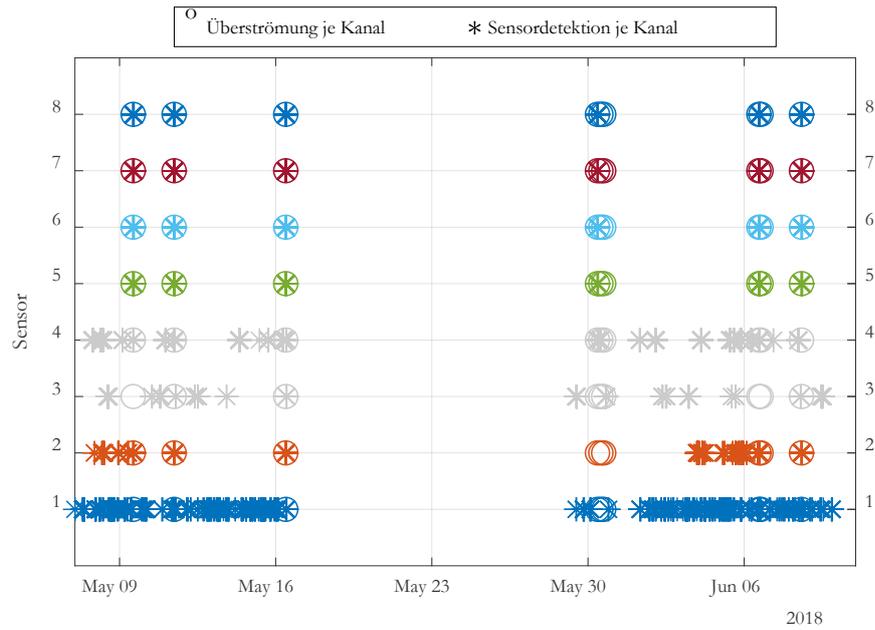


Abbildung 36: Vergleich der Sensordetektion auf Grundlage der beschriebenen Auswerterroutine (für $p = 50$, $f = 5$ und $n = 15$) mit der tatsächlichen Überströmung des Modelldeichs für den Zeitraum 7. Mai bis 10. Juni 2018: Fehldetektionen werden reduziert (Sensor 5 bis 8), aber Ereignis am 30. Mai wird von Sensor 2 nicht erkannt.

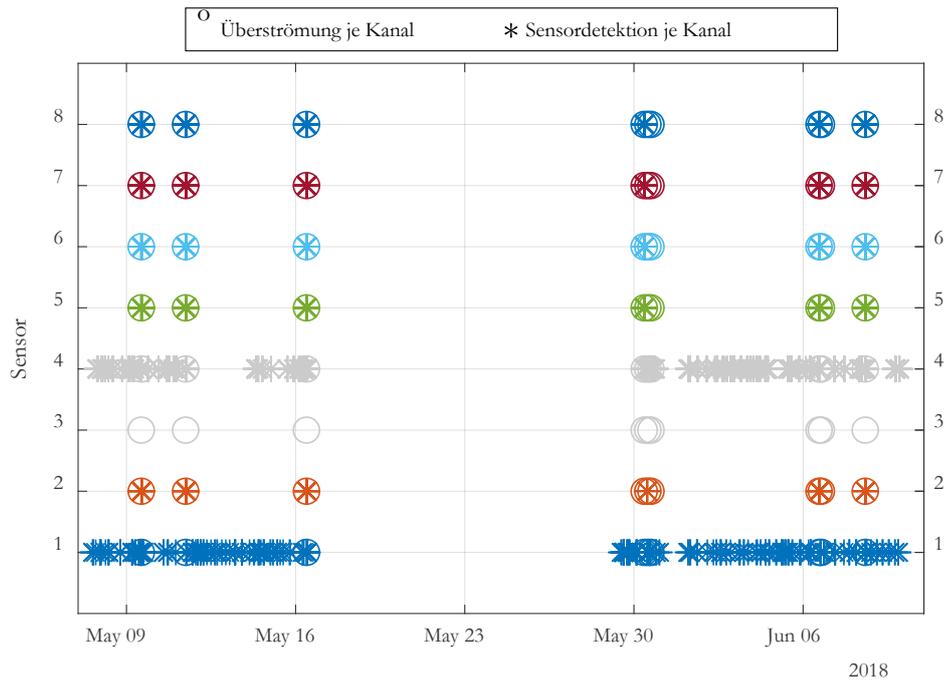


Abbildung 37: Vergleich der Sensordetektion auf Grundlage der beschriebenen Auswerterroutine (für $p = 50$, $f = 5$ und $n = 5$) unter Berücksichtigung des zusätzlichen Kriteriums, dass der Spannungsabfall $> 10\%$ sein muss: Alle Ereignisse werden detektiert, Fehlalarme treten für Sensoren 2 bis 8 nicht mehr auf.

Insgesamt zeigt sich, dass die Auswerterroutine für die Sensoren 5 bis 8 bereits hinreichend gut funktioniert, während eine zuverlässige Detektion an den Sensoren 1 und 2 kritisch ist. Eine genauere Betrachtung der Spannungsverläufe zeigt, dass insbesondere nach langen Zeiten gleichmäßiger Messungen ohne Wassereintritt (wie beispielsweise Anfang Juni)

kleinste Schwankungen im Spannungsverlauf zum Auslösen von Fehldetektionen führen. Dieses Problem konnte durch Einführung eines zweiten Kriteriums gelöst werden (s. Abbildung 37). Eine Detektion findet nun erst statt, wenn Gleichung (1) < 0 ist und die Spannung gleichzeitig um mindestens 10 % abfällt:

$$\frac{[\sum_{i=t}^{t+f} U(i)]}{f+1} - \frac{[\sum_{i=t-p}^{t-1} U(i)]}{p} < -0,1 \cdot \frac{[\sum_{i=t-p}^{t-1} U(i)]}{p} \quad (2)$$

Die Auswertung von Sensor 1 zeigt sich jedoch weiterhin fehlerbehaftet. An diesem Sensor kam es zu starken, sehr gleichmäßigen Spannungsausschlägen. Dieses Phänomen zeigte sich zu Beginn der Messung auch an anderen Sensoren und lag in einem technischen Problem bei der Messwerterfassung im Sensorknoten des *gia* begründet. Das Problem konnte durch veränderte Einstellungen seitens des *gia* für die Sensoren Ch 2 – Ch 8 bereits Ende März behoben werden, für Ch 1 war dies am Ende des Versuchszeitraums ebenfalls möglich, weshalb die Schwierigkeiten mit Ch 1 bei der Auswertung des gezeigten Zeitraums vernachlässigbar sind.

Für die durchgeführte Versuchsreihe mit Messvlies IV wird folglich für $p = 50$, $f = 5$ und $n = 5$ eine zuverlässige Detektion mit allen Sensoren (Ausnahme Ch 1, s. o.) ermöglicht, sodass sich für die am Modelldeich zu verwendende Auswerteroutine eine Sensorerkennung bei Eintreten folgender Bedingung ergibt:

$$\frac{[\sum_{i=t}^{t+5} U(i)]}{6} - \left(\frac{[\sum_{i=t-50}^{t-1} U(i)]}{50} - 5 \cdot \sqrt{\frac{1}{p} \cdot \sum_{i=t-50}^{t-1} \left(U(i) - \frac{[\sum_{i=t-50}^{t-1} U(i)]}{50} \right)^2} \right) < 0 \quad (3)$$

und

$$\frac{[\sum_{i=t}^{t+5} U(i)]}{6} - \frac{[\sum_{i=t-50}^{t-1} U(i)]}{50} < -0,1 \cdot \frac{[\sum_{i=t-50}^{t-1} U(i)]}{50}$$

Es gilt zu beachten, dass die Parameter p und f abhängig von der Messfrequenz der Sensoren sind. In den im Modelldeich durchgeführten Versuchen beträgt das Messintervall zwei Minuten (0,0055 Hz). Eine Variation der Frequenz wurde nicht durchgeführt, sodass keine Angaben über die Übertragbarkeit auf höhere oder niedrigere Frequenzen gemacht werden können. Zu erwarten ist jedoch, dass Parameter p konstant bleiben wird, da er dazu dient, die Messschwankungen bei unverändertem Wassergehalt abzubilden, welche sich mit steigender Frequenz kaum verändern werden. Parameter f ist abhängig davon, wie hoch aufgelöst der Sensorabfall gemessen wird, sodass sowohl f als auch n mit veränderter Messfrequenz variieren können. Da die ermittelten Parameter lediglich auf der Analyse der Messungen mit Messvlies IV bei Einbau unter einer Kiesschicht beruhen, bleibt ferner offen, ob sich die Parameter auch auf andere Messvliese und Einbausituationen übertragen lassen. Die entwickelte Auswerteroutine kann jedoch mit dem hier beschriebenen Vorgehen für neue Messvliese und Deichaufbauten identisch kalibriert und die Faktoren der Gleichung (1) können entsprechend neu bestimmt werden.

5.3.4 Entwicklung des Echtzeit-Deichmonitors

Die durch das Sensortextil in der Versuchshalle des *IWW* aufgenommenen Daten werden über einen Sensorknoten unter Verwendung von MQTT-Protokollen in die am *gia* erstellte

Sensordateninfrastruktur übermittelt (Herle et al. 2021). Ein am *IWW* erstelltes Programm („*Broker*“) abonniert für die in Abschnitt 5.3.3 beschriebene Auswerteroutine die Sensorsignale (topic: „*sensor 1*“ – „*sensor 8*“). Die Auswerteroutine erhält nun in Echtzeit mit jeder Messung für jeden Sensor einen gemessenen Spannungswert. Für jeden neu eingehenden Messwert werden die Bedingungen aus Gleichung (3) überprüft und als Ergebnis schließlich ein Sensorzustand „Wassergehalt konstant“ („*good*“) oder „Wassergehalt erhöht“ („*bad*“) ausgegeben. Der Sensorzustand wird im Anschluss über ein neu definiertes topic „*sensor state 1*“ – „*sensor state 10*“ ebenfalls in die Sensordateninfrastruktur eingespeist und kann dort wiederum von anderen Interessenten abonniert werden.

Ein Abonnent der topics „*sensor state 1*“ – „*sensor state 10*“ ist die Warnungsanalyse. Diese abonniert neben den Sensorzuständen zusätzlich den durch eine Ultraschallsonde im Versuchsstand gemessenen Wasserspiegel vor dem Modelldeich („*water level*“). Infolge des Wasserspiegels vor dem Deich ergibt sich eine zu erwartende Durchsickerung der Deichböschung. Der Verlauf der stationären Sickerlinie kann bei bekannten Bodenkennwerten und homogenem Aufbau über analytische Ansätze, z. B. nach Cozeny-Casagrande, berechnet werden (Casagrande 1934). Für komplexere Aufbauten und zur Berücksichtigung von Dichtungsschichten kann die Berechnung mithilfe von FE-Programmen erfolgen. Hierzu ist vorab der Verlauf der Sickerlinie für den gegebenen Deichaufbau für verschiedene Wasserstände zu berechnen und in Tabellen zu hinterlegen, sodass nicht für jeden ermittelten Wasserstand eine neue Berechnung gestartet werden muss, sondern der zu erwartende Sickerwasseraustrittspunkt aus den hinterlegten Berechnungsergebnissen ermittelt werden kann. Für den Modelldeich wird für den Verlauf der Sickerlinie auf die Messergebnisse des Druckmesssystems am Boden der Versuchsrinne zurückgegriffen. Entspricht der berechnete Austrittspunkt der Sickerlinie dem von den Sensoren detektierten Wasseraustritt oder liegt darüber (dies wird der Fall sein, sofern der Verlauf der berechneten stationären Sickerlinie angesetzt wird und mit der tatsächlichen instationären Durchsickerung des Deiches verglichen wird), ist der Deichzustand in Ordnung (topic: „*dike state*“ = „*good*“). Wird durch die Sensoren ein infolge des Wasserstands vor dem Deich nicht zu erwartender, erhöhter Wasserstand detektiert, so deutet dies auf Fehlstellen in der Dichtungsschicht hin (vgl. Kapitel 3). Der Deich verfügt folglich über Schäden, der Deichzustand wird als kritisch (topic: „*dike state*“ = „*critical*“) definiert und es wird eine automatische Warnung generiert.

Die Datenvisualisierung erfolgt in einem Deich-Dashboard. Das Deich-Dashboard abonniert die unter den Topics „*sensor state*“, „*dike state*“ und „*water level*“ veröffentlichten Daten und kann damit den Zustand jedes einzelnen Sensors, den Wasserstand vor dem Deich, den Gesamtzustand des Deichs sowie eventuell generierte Warnungen in Echtzeit anzeigen. Zusätzlich erfolgt eine Speicherung der Daten, sodass Ereignisse aus der Vergangenheit ebenfalls über das Deich-Dashboard visualisierbar sind.

Abbildung 38 stellt die beschriebenen Zusammenhänge und Datenströme bis zum Deich-Dashboard grafisch dar, Abbildung 39 zeigt einen Screenshot des für den Modelldeich entwickelten Deich-Dashboards kurz nach einem Überströmereignis. Der Sensorzustand ist hier bereits für alle Sensoren auf „*good*“ gesprungen, da mit der Auswerteroutine lediglich der Zeitpunkt des Wassereintritts detektiert wird: Für das aufgezeichnete Ereignis ist dies bereits erfolgt und an den Ausschlägen im Verlauf des Sensorzustands (unten links) sichtbar. Der Deichzustand ist für den gezeigten Modelldeich trotz des gemessenen Wassereintritts an allen Sensoren unkritisch („*good*“), da der durch die Sensoren gemessene Wassereintritt

dem erwarteten Wassereintritt bei einem Überströmereignis über ein durchlässiges Deckwerk entspricht und für den im Modelldeich umgesetzten Deichaufbau entsprechend keinen kritischen Zustand bedeutet.

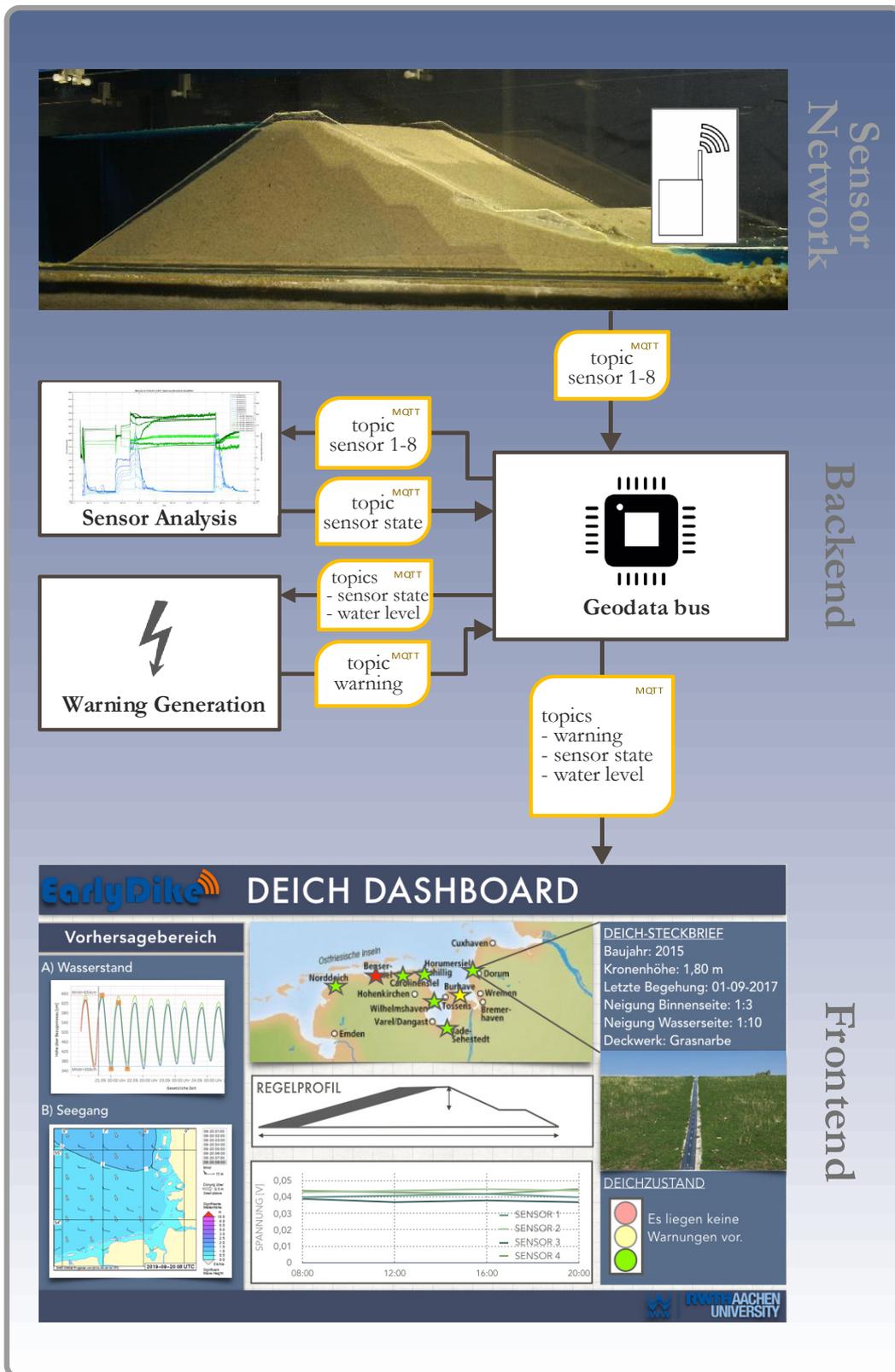


Abbildung 38: Informationsfluss zum Echtzeit-Deichmonitor.



Abbildung 39: Screenshot des Deich-Dashboards für den Modelldiich kurz nach erfolgtem Überströmereignis.

6 Fazit und Ausblick

In Arbeitspaket 3 des Projekts EarlyDike wurde ein Konzept für ein verbessertes und kontinuierliches Deichmonitoring erarbeitet, welches sich auf den Einsatz von mit Sensoren ausgestatteten Geotextilien stützt. Hierzu wurden neuartige intelligente Geotextilien entwickelt, die eine erhöhte Durchfeuchtung des Bodens erkennen können. Bei Einbau der Sensortextilien in der Deichböschung und entsprechender Auswertung der generierten Daten ist es möglich, einen Anstieg der Sickerlinie innerhalb des Deichkörpers sowie eine Infiltration durch die Deckschicht des Deiches zuverlässig zu erkennen. Eine Analyse der im Schrifttum identifizierten Deichversagensmechanismen zeigte, dass ein erhöhter Wassergehalt unter der Kleischicht eines Seedeiches, kritisch für die Stabilität des Deiches sein kann. Über die Detektion eines unter den gegebenen Belastungen nicht zu erwartenden Anstiegs des Wassergehalts lassen sich folglich Schäden am Deich frühzeitig erkennen. Im Vergleich zu konventionellen Monitoring-Verfahren, die sich vor allem auf regelmäßige Sichtkontrollen der Deiche beschränken, ermöglicht das nun vorgeschlagene Konzept ein kontinuierliches Monitoring sowie die Erkennung von äußerlich nicht sichtbaren Schäden.

Die entwickelten Sensortextilien wurden in klein- und großmaßstäblichen Deichmodellen getestet und das Design der Sensoren sowie das Messkonzept in enger Zusammenarbeit mit dem *ITA* optimiert. In über mehrere Monate stattfindenden Langzeitversuchen wurden die Sensoren kontinuierlich belastet und vielfachen Nass-Trocken-Wechseln ausgesetzt. Die erfolgten Untersuchungen mit den Sensortextilien verliefen vielversprechend und das entwickelte Messprinzip erwies sich als geeignet für den Einsatz im Deichmonitoring.

Es wurde ein Verfahren entwickelt, die Messsignale der textilen Sensoren automatisch auszuwerten, in eine Sensor- und Geodateninfrastruktur zu übermitteln und schließlich

über ein Deich-Dashboard online abrufbar zu machen. Hierdurch ist eine Echtzeitüberwachung des aufgebauten Modelldeichs in der Versuchshalle des *IWW* möglich und damit eine erste Umsetzung des entwickelten Frühwarnsystems realisiert worden.

Im Rahmen zukünftiger modelltechnischer Untersuchungen sollte vor allem der Einbau der Sensoren unterhalb einer Kleischicht untersucht und das Verhalten während Regenerereignissen analysiert werden. Ferner sind im Vergleich zur Lebensdauer eines Deichs die bislang untersuchten Zeiträume gering. Die Langzeitbeständigkeit der Sensoren ist jedoch elementar und sie gilt es, vor einem Einsatz unter Naturbedingungen mit geeigneten Verfahren zu simulieren. Nach erfolgreicher Absolvierung weiterer Modellversuche empfiehlt sich der testweise Einbau in der Natur. Hierbei ist das Augenmerk auf die Robustheit der Sensoren bei der Verwendung schweren Geräts zu legen. Ferner sollte geprüft werden, inwieweit die entwickelte Auswerterroutine zur Interpretation der Messsignale auch für andere Messvielse und Einbausituationen gültig ist und ob die Analyse unter Verwendung selbstlernender Algorithmen verbessert werden kann. Weitere praktische Fragestellungen ergeben sich für den Einsatz der Sensoren unter extremen Wetterbedingungen. So gilt es, die Sensoren bspw. vor Blitzeinschlägen zu schützen. Auch ein Ausfall aufgrund fehlender Stromversorgung bzw. Telekommunikation im Hochwasserfall wäre fatal, sodass durch Redundanzen und autarke Lösungen eine möglichst sichere Stromversorgung und Datenübertragung zu gewährleisten ist.

7 Danksagung

Das Verbundprojekt *EarlyDike* wurde vom 1. Juni 2015 bis zum 31. Mai 2018 mit Mitteln des *Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)* im Rahmen des Sonderprogramms *Geotechnologien* gefördert (BMBF-Förderkennzeichen: 03G0847A). Die Autoren danken für die intensive Betreuung durch den Projektträger Jülich sowie dem BMBF für die Förderung und Ermöglichung des Projekts. Weiterer Dank gilt allen Projektpartnern für die gute und fruchtbare Zusammenarbeit.

8 Literaturverzeichnis

Abdoun, T.; Bennett, V.; Danisch, L.; Shantz, T.; Jang, D.: Field installation details of a wireless shape-acceleration array system for geotechnical applications. In: Tomizuka, M., Yun, C.-B.; Giurgiutiu, V. (Eds.): San Diego, California, 65293O. <https://doi.org/10.1117/12.714413>, 2007.

Allsop, W.; Kortenhaus, A.; Morris, M.: Failure Mechanisms for Flood Defence Structures. FLOODsite Project Report (T04_06_01), 211 S., 2007.

Artières, O.; Beck, Y. L.; Khan, A. A.; Cunat, P.; Fry, J. J.; Courivaud, J.-R.; Guidoux, C.; Pinettes, P.: Assessment of dams and dikes behavior with a fibre optics based monitoring solution. In: Garca, R. R.; Mir, M. A.; Bitrián, F. H.; Dios, R. L.; Rubín de Célix Caballero, M.; Rodríguez-Trelles, M. d. A. (Eds.): Dam maintenance and rehabilitation II. Proceedings of the 2. International Congress an Dam Maintenance and Rehabilitation, Zaragoza, Spain, 23–25 November 2010. Boca Raton, London, New York, Leiden, 79–86. 2011.

Aufleger, M.; Dornstädter, J.; Strobl, T.; Conrad, M.; Perzlmaier, S.; Goltz, M.: 10 Jahre verteilte faseroptische Temperaturmessungen im Wasserbau. In: *Wasserwirtschaft*, 10, 2007.

Becker, R.; Blankenbach, J.; Dreier, N.; Fröhle, P.; Gries, T.; Herle, S.; Jensen, J.; Krebs, V.; Lehfeldt, R.; Mulckau, A.; Niehüser, S.; Quadflieg, T.; Schüttrumpf, H.; Schwab, M.: EarlyDike - Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems für Seedeiche. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 1, BMBF-Förderkennzeichen Förderkennzeichen 03G0847A, 03G0847B, 03G0847C, 03G0848A. In: *Die Küste*, 90, 2021.

BERDING BETON GmbH 2012: Europäische Technische Zulassung – Verkalit-Beton-elemente zur Verwendung in Deckwerken. Angemeldet durch Deutsches Institut für Bau-technik. Veröffentlichungsnr: ETA-12/0245.

Bersan, S.; Koelewijn, A. R.; Simonini, P.: Application of distributed temperature sensors in piping-prone dikes. In: Dight, P. (Eds.): *Proceedings of the Ninth International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*, 9–11 September 2015, Sydney, Australia. 475–486. 2015.

Casagrande, L.: Näherungsverfahren zur Ermittlung der Sickerung in geschütteten Dämmen auf undurchlässiger Sohle. In: *Die Bautechnik*, 15, 205–208. 1934.

CIRIA: *The international levee handbook*. Construction Industry Research and Information Association, London, 1332 S., 2013.

Cundill, S. L.: *Investigation of remote sensing for dike inspection*. Dissertation. University of Twente, Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, 236 S., 2016.

Desrosiers, T.; Bennett, V.; Abdoun, T.; Simm, J.: Comprehensive Real-Time Field Monitoring at Active Embankment subjected to Tidal Loading. In: Meehan, C. L.; Pradel, D.; Pando, M. A.; Labuz, J. F. (Eds.): *GeoCongress 2013*. San Diego, California, United States, 1549-1558. <https://doi.org/10.1061/9780784412787.155>, 2013.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA): *Merkblatt DWA-M 507-1, Deiche an Fließgewässern Teil 1: Planung, Bau und Betrieb*. Hennef, 2011.

Dornstädter, J.: Temperaturmessung im Wasserbau - Sichere Überwachung von Dämmen und Deichen seit mehr als 60 Jahren. In: Technische Universität Dresden – Fakultät Bauingenieurwesen Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik (Hg.): 38. Dresdner Wasserbaukolloquium. Dresden, 2015.

EAK: *Empfehlungen für Küstenschutzwerke*. Korrigierte Ausgabe 2007 In: *Die Küste*, 65, 2002.

EurOtop: *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures*. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application 264 S., 2016.

Herle, S.; Becker, R.; Blankenbach, J.; Mulckau, A.; Lehfeldt, R.: EarlyDike: Sensor- & Geodateninfrastruktur für ein sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 6, BMBF-Förderkennzeichen

03G0847A und 03G0848A: Teilprojekt 5 – Sensor- & Geodateninfrastruktur, Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme der RWTH Aachen University und Bundesanstalt für Wasserbau. In: *Die Küste*, 90, 2021.

Kortenhaus, A.; Oumeraci, H.: Probabilistische Bemessung für Seedeiche (ProDeich). Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Braunschweig, (877), 403 S., 2002.

Krebs, V.; Schüttrumpf, H.: EarlyDike – Sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche, AP 3: Deichmonitoring und Deichsimulator. 2. Zwischenbericht Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University, 2017.

Krzhizhanovskaya, V. V.; Shirshov, G. S.; Melnikova, N. B.; Belleman, R. G.; Rusadi, F. I.; Broekhuijsen, B. J.; Gouldby, B. P.; Lhomme, J.; Balis, B.; Bubak, M.; Pyayt, A. L.; Mokhov, I. I.; Ozhigin, A. V.; Lang, B.; Meijer, R. J.: Flood early warning system: design, implementation and computational modules. In: *Procedia Computer Science*, 4, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2011.04.012>, 2011.

MELF Niedersachsen: Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 im niedersächsischen Küstengebiet. Die Sturmflut vom 16./17. Bericht der vom Niedersächsischen Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten eingesetzten Ingenieur-Kommission In: *Die Küste*, 10, 1, 17–53, 1962.

MELF Schleswig-Holstein: Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 an der Schleswig-Holsteinischen Westküste. Bericht des Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten – Landesamt für Wasserwirtschaft – Schleswig-Holstein In: *Die Küste*, 10, 1, 55–80, 1962.

MELUND Schleswig-Holstein: Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein. Fortschreibung 2012 Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Kiel, 102 S., 2013.

Naumann, M.; Bill, R.; Niemeyer, F.; Nitschke, E.: Deformation Analysis of Dikes Using Unmanned Aerial Systems (UAS). In: Saathoff, F.; Cantré, S. (Eds.): *Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction*. Rostock, Hohe Düne, 119–128. 2014.

NLWKN: Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen – Festland. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, 78 S., 2007.

Ohle, N.; Elsner, A.; Zimmermann, C.: Deichüberwachung unter Einsatz der Fernerkundung. In: *Franzius-Mitteilungen*, 92, 2006.

Pei, H.-F.; Teng, J.; Yin, J.-H.; Chen, R.: A review of previous studies on the applications of optical fiber sensors in geotechnical health monitoring. In: *Measurement*, 58, 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.013>, 2014.

Peters, E. T.; van der Vliet, P. P.: GeoBeads, multi-parameter sensor network for soil stability monitoring. In: *8th International Symposium on Field Measurements in GeoMechanics*. Berlin, 2011.

Ponziani, M.; Bachmann, D.: Real-time monitoring and forecasting of dike strength. In: *International Journal of Safety and Security Engineering*, 6, 2, 122–131. <https://doi.org/10.2495/SAFE-V6-N2-122-131>, 2016.

Pyayt, A. L.; Kozionov, A. P.; Mokhov, I. I.; Lang, B.; Krzhizhanovskaya, V. V.; Sloot, P. M.A.: An Approach for Real-time Levee Health Monitoring Using Signal Processing Methods. In: *Procedia Computer Science*, 18, 2357–2366. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.05.407>, 2013.

Richwien, W.: Kritische Beanspruchungen von Deichböden – Versagensformen und Nachweiskonzepte. In: *HANSA, Zentralorgan für Schifffahrt, Schiffbau, Hafen*, 133, 5, 56–58. 1996.

Royet, P.; Palma-Lopes, S.; Fauchard, C.; Mériaux, P.; Ariaux, L.: WP3: Reliability of Urban Flood Defences. D3.2: Rapid and cost-effective dike condition assessment methods: geophysics and remote sensing 136 S., 2013.

Schüttrumpf, H.; Oumeraci, H.: Learning from Seadike Failures. In: *PIANC Bulletin*, 117, 47–60. 2004.

Schüttrumpf, H.: Sea Dikes in Germany. In: *Die Küste*, 74, 189–199, 2008.

Schüttrumpf, H.: Wellenüberlaufströmung bei Seedeichen - Experimentelle und theoretische Untersuchungen. Dissertation. Technische Universität Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, 174 S., 2001.

Schwab, M.; Quadflieg, T.; Gries, T.: Intelligente Geotextilien für das Echtzeit-Deichmonitoring. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 5, BMBF-Förderkennzeichen 03G0847A: Teilprojekt 3 – Deichmonitor und Deichsimulator, Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University. In: *Die Küste*, 90, 2021.

Simm, J.; Wallis, M.; Smith, P.; Tourment, R.; Veylon, G.; Deniaud, Y.; Durand, E.; McVicker, J.; Hersh-Burdick, R.: The significance of failure modes in the design and management of levees—a perspective from the International Levee Handbook team. In: Klijn, F. (Eds.): *Comprehensive flood risk management. Research for policy and practice. Proceedings of the 2nd European Conference on Flood Risk Management Floodrisk 2012 Rotterdam The Netherlands 19–23 November 2012*. Boca Raton, Fla, <https://doi.org/10.1201/b13715-43>, 2013.

Thiele, E.; Glözl, R.; Werth, K.; Krebber, K.; Schlurmann, T.: Entwicklung von multifunktionalen sensorbasierten Geotextilien zur Deichertüchtigung, für räumlich ausgedehntes Deichmonitoring, sowie für die Gefahrenerkennung im Hochwasserfall bei der Deichverteidigung. *rimax – Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse* 96 S., 2008.

Vries, G. de; Koelewijn, A. R.; Hopman, V.: IJkdijk Full Scale Underseepage Erosion (Piping) Test: Evaluation of Innovative Sensor Technology. In: Burns, S.; Bhatia, S.; Avila, C. (Eds.): *Scour and Erosion*. San Francisco, California, United States, 649–657. [https://doi.org/10.1061/41147\(392\)63](https://doi.org/10.1061/41147(392)63), 2014.

Vrijling, J. K.: Probabilistic design of water defense systems in The Netherlands. In: *Reliability Engineering & System Safety*, 74, 3, 337–344. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(01\)00082-5](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00082-5), 2001.

Waal, J. P.; van der Meer, J.: Wave Runup and Overtopping on Coastal Structures. In: *Coastal Engineering Proceedings*, 23, 1992.

Zeghal, M.; Abdoun, T.; Exton, M.; Mercado, V.; Lv, X.; Bennett, V.; Yazici, B.; Marr, A.: Development of a Multiscale Monitoring and Health Assessment Framework for Effective Management of Levee Infrastructure. In: Meehan, C. L.; Pradel, D.; Pando, M. A.; Labuz, J. F. (Eds.): GeoCongress 2013. San Diego, California, United States, 1605–1614. <https://doi.org/10.1061/9780784412787.161>, 2013.