

FuE-Abschlussbericht
Zuverlässigkeitsbasierte
Deckwerksbemessung
B3952.04.04.70009



November 2021



FuE-Abschlussbericht
Zuverlässigkeitsbasierte
Deckwerksbemessung

Beginn des Vorhabens: Mai 2016

Auftragsnummer: BAW-Nr. B3952.04.04.70009

Aufgestellt von: Abteilung: Geotechnik
 Referat: Erdbau und Uferschutz
 Bearbeitung: Dr.-Ing. Julia Sorgatz

Hamburg, November 2021

Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

Zusammenfassung

Im Forschungsvorhaben *Zuverlässigkeitsbasierte Deckwerksbemessung* wurden bestehendes Wissen zur Schadensentwicklung und die daraus resultierenden standsicherheitsgefährdenden Schadensbilder an Ufersicherungen systematisiert und ergänzt. Des Weiteren wurde ein erstes mathematisches Modell zur Beschreibung des Deckwerkszustands mit Hilfe von zuverlässigkeitsbasierten Methoden entwickelt, welches auch eine Abschätzung der Zustandsentwicklung erlaubt.

Mit Hilfe von Experteninterviews wurden relevante Schäden und Schadensursachen identifiziert. Die Experteninterviews geben ein besseres Verständnis der aktuellen Instandhaltungsprozesse in den Außenbezirken. Sie zeigen Möglichkeiten, aber auch Grenzen für neu zu etablierende Instandhaltungs- und Dokumentationsprozesse auf. Darüber hinaus wurde das bestehende System zur Klassifizierung von Deckwerksschäden nach Kayser (2015) auf Basis der Experteninterviews um einen Zwischenzustand erweitert.

Basierend auf den Ergebnissen der Experteninterviews wurde ein großmaßstäblicher Modellversuch auf dem BAW-Gelände durchgeführt. Die Analysen zeigen ein typisches Schadensbild. Die Deckwerkssteine aus dem Wasserwechselbereich verlagern sich zum Böschungsfuß hin. Die Oberkante der Böschung steilt sich leicht auf. Es entsteht ein S-Profil. Außerdem wurden die Versuchsergebnisse mit experimentellen Daten aus der Literatur und bekannten Gleichungen zur Beschreibung des Schadensverlaufs verglichen. Bestehende Korrelationen und Gleichungen zur Beschreibung des Schadensverlaufs wurden überwiegend bestätigt. Die Versuchsergebnisse lassen zudem die Vermutung zu, dass mit zunehmender Versuchsdauer die Schädigungsrate abnimmt.

Für die Zustandsbewertung mit Hilfe zuverlässigkeitsbasierter Methoden wurden ein Modell, die Parameterverteilungen der Eingangsvariablen und deren Korrelationen ermittelt. Der vorgeschlagene Ansatz zur Prognose der Schadensentwicklung mittels Markov-Ketten kann bei der Planung von Inspektionsintervallen auf Grundlage der geschätzten Zeit oder Anzahl der Schiffspassagen unterstützen. Die Markov-Kette ermöglicht eine einfache Interpretation von Versagenswahrscheinlichkeiten, indem sie die Wahrscheinlichkeit von Initialschäden auf Verkehr oder Zeit bezieht. Darüber hinaus verdeutlichen die Ergebnisse der Datensichtung und der Zuverlässigkeitsanalyse die Notwendigkeit, repräsentative Datensätze zu erheben.

Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Aufgabe, fortschreitende Schäden mit dem Verkehr zu verbinden. Eine Erweiterung des aktuellen Markov-Ketten-Modells, z. B. in Richtung einer inhomogenen Markov-Kette, ist wünschenswert. Zudem wird empfohlen, die Dauer der Messkampagnen zu verlängern, die Kampagnen und ihre Auswertung zu standardisieren. Für die Prognose der Schadensentwicklung und die langfristige Planung von Instandhaltungsmaßnahmen ist eine Dokumentation der Schäden und Instandhaltungsmaßnahmen erforderlich. Zuverlässigkeitsbasierte Methoden stützen sich gleichermaßen auf Bemessungsgleichungen wie deterministische Methoden. Daher ist auch bei Anwendung probabilistischer Methoden eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Bemessungsgleichungen eine wesentliche Komponente für eine zukunftsorientierte und zuverlässige Deckwerksbemessung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung und Ziel	1
1.2	Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)	3
1.3	Bedeutung für das Expertennetzwerk (SPT 302)	3
2	Technische Ufersicherungen	5
2.1	Funktion und Aufbau	5
2.2	Bemessungsgrundlagen	5
2.3	Definitionen	6
2.4	Schadensursache	7
2.5	Schadenskennzahlen	8
2.6	Schadensentwicklung	9
2.7	Zusammenfassung	11
3	Bewertung der strukturellen Zuverlässigkeit von Bauwerken	11
3.1	Begrifflichkeiten	11
3.2	Stufen der Zuverlässigkeitsanalyse	13
3.3	Anwendung auf Wasserbauwerke	14
3.4	Zusammenfassung	16
4	Präzisierung der Vorgehensweise	16
5	Experteninterviews	17
5.1	Einleitung	17
5.2	Definitionen und Interviewformen	17
5.3	Durchführung	18
5.4	Ergebnisse	19
5.5	Diskussion	21
5.6	Fazit	22
6	Modellversuche in der Wellengrube	23
6.1	Einleitung	23
6.2	Versuchsaufbau	23
6.3	Durchführung	24
6.4	Ergebnisse	26
6.4.1	Wellen- und Strömungsbelastung	26
6.4.2	Deckwerkschädigung	27
6.5	Diskussion	30
6.6	Fazit	31
7	Datenerfassung in der Natur	32
7.1	Einleitung	32

7.2	Derzeitige Methoden	33
7.3	Beispieldatensätze	34
7.4	Bewertung der Datenqualität	37
7.5	Langfristige Verkehrsbeobachtungen	38
7.6	Diskussion	39
7.7	Fazit	40
8	Probabilistische Zustandsbewertung und Zustandsprognose	41
8.1	Einleitung	41
8.2	Methoden	41
8.2.1	Methoden der Datenauswertung	42
8.2.2	Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse	43
8.3	Modell zur Zustandsbewertung und Zustandsprognose	44
8.3.1	Probabilistische Zustandsbewertung	44
8.3.2	Markov-Ketten zur Schadensentwicklung	46
8.4	Anwendungsbeispiele	47
8.4.1	Beispieldatensätze	47
8.4.2	Ergebnisse der Verteilungsanalyse	47
8.4.3	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	48
8.4.4	Ergebnisse der Korrelationsanalyse	49
8.4.5	Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse	50
8.4.6	Vorhersage von Initialschäden	51
8.5	Diskussion	51
8.6	Fazit	53
9	Erkenntnisse und weitere Forschungsbedarf	53
9.1	Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse	53
9.2	Weiterer Forschungsbedarf	54
	Literaturverzeichnis	56

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aleatorische und epistemische Unsicherheit bei der Deckwerksbemessung	2
Abbildung 2: Arbeitspakete des Forschungsvorhabens	4
Abbildung 3: Überblick zu den verschiedenen Bauweisen von Ufersicherungen	5
Abbildung 4: Grundlagen der geotechnischen Deckwerksmessung	6
Abbildung 5: Dimensionslose Schadenszahlen	9
Abbildung 6: Arbeitsablauf zur probabilistischen Bemessung	17
Abbildung 7: Schadensklassifikationssystem	21
Abbildung 8: Impressionen zur Errichtung des Modellversuchs	24
Abbildung 9: Aufbau der Wellengrube in Quer- und Längsschnitt	24
Abbildung 10: Instrumentierung in der Wellengrube	25
Abbildung 11: Dichteverteilung der maximalen Wellenhöhen	27
Abbildung 12: Dichteverteilung der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten	28
Abbildung 13: Räumliche Schadensentwicklung mit zunehmender Wellenbelastung.	29
Abbildung 14: Breitengemittelte Erosionsprofile im Zeitverlauf	30
Abbildung 15: Aufbau von Verkehrsbeobachtungen am Wesel-Dattel-Kanal	34
Abbildung 16: Einrichtung und Beobachtung der Versuchsstrecke	38
Abbildung 17: Schema zur Bestimmung des erforderlichen Steindurchmessers	45
Abbildung 18: Markov-Kette für die Deckwerksbemessung	47
Abbildung 19: Ergebnisse von Sensitivitätsbetrachtungen mit der Methode nach Morris	49
Abbildung 20: Anwendung des Markov-Ketten-Modells auf vier Beispieldatensätze	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Stufen der Zuverlässigkeitsanalyse	14
Tabelle 2: Stichprobenplan mit Auswahlkriterien	19
Tabelle 3: Übersicht der Versuche in der Wellengrube	26
Tabelle 4: Schadens Kennzahlen für drei ausgewählte Querschnitte	31
Tabelle 5: Faktenblätter zur Charakterisierung von vier Wasserstraßen	35
Tabelle 6: Zusammenfassung der statistischen Kennwerte der vier Beispieldatensätze	36

Tabelle 7: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für die Einzelsteinbemessung	48
Tabelle 8: Parameterbereich für die Sensitivitätsanalyse nach Morris	49
Tabelle 9: Korrelationsmatrix für die hydraulische Deckwerksbemessung	50
Tabelle 10: Versagenswahrscheinlichkeit und Bemessungspunkte	50

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung und Ziel

Zur Förderung der Binnenschifffahrt in Deutschland ist es zweckmäßig, eine weitgehende Befahrbarkeit des Wasserstraßennetzes mit möglichst großen Binnenschiffen zu ermöglichen. In der Vergangenheit wurde dies im Regelfall mit einem umfänglichen Ausbau und damit einem guten Standard für sichere, wirtschaftliche und unterhaltungsarme Deckwerke erreicht. Aus ökologischen und/oder wirtschaftlichen Gründen ist ein umfänglicher Ausbau der Wasserstraßen unter Berücksichtigung der derzeit gültigen Standards (GBB 2010; MAR 2008) jedoch nicht in allen Fällen sinnvoll. Vielmehr muss eine ganzheitliche Betrachtung der technischen Ufersicherungen über den gesamten Lebenszyklus erfolgen.

Jede Konstruktion im Ingenieurwesen ist mit Unsicherheiten behaftet. Derzeitige deterministische Bemessungsansätze berücksichtigen diese Unsicherheiten, die sich z. B. aus der Definition charakteristischer Einwirkungen und Widerstände sowie durch das Bemessungsmodell selbst ergeben, primär durch konservative Annahmen und empirisches Wissen. Diese Ansätze mögen daher zwar für eine Bemessung mit Erfahrungswissen geeignet sein, ihnen fehlen jedoch quantitative Informationen über mögliche mit einem Schaden oder Versagen verbundenen Risiken und eine systematische Grundlage für die Bewertung des Grades an (Nicht-)Konservativität einer Bemessung.

Obwohl es verschiedene Klassifizierungen von Unsicherheiten gibt, ist die gebräuchlichste die Unterscheidung zwischen *aleatorischer* und *epistemischer* Unsicherheit. *Aleatorische Unsicherheit* bezieht sich auf eine inhärente Unsicherheit aufgrund natürlicher Variabilität, wie z. B. eine Variation der Bodeneigenschaften und der Belastungsintensität, während die *epistemische Unsicherheit* einen Mangel an Wissen beschreibt, der durch begrenzte, unzureichende oder ungenaue Daten oder Modelle verursacht wird.

Bei der Bemessung von Deckwerken lassen sich die aleatorische und die epistemische Unsicherheit weiter in verschiedene Unsicherheiten wie Transformationsunsicherheit, statistische Unsicherheit oder räumliche Variabilität unterteilen. Weder Lasten noch Widerstände können aufgrund ihres zufälligen Charakters ohne Unsicherheit charakterisiert werden. So gibt es beispielsweise eine inhärente Variabilität der charakteristischen Bodeneigenschaften, da der Untergrund kein standardisiertes, vorgefertigtes Material wie Stahl oder Beton ist. Das Zusammenspiel von Klima, Relief, Organismen und dem Ausgangsgestein in Verbindung mit physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen führt im Laufe der Zeit zu Inhomogenität und Anisotropie und damit zu einer Variabilität der Materialeigenschaften. Charakteristische Einwirkungen können unter anderem je nach Wasserstraße und dem gewählten Beobachtungsort unterschiedlich sein. Darüber hinaus trägt die begrenzte Anzahl von Messungen zur Unsicherheit der Einwirkungen und Materialparameter bei. Schließlich ist zu betonen, dass die Bemessungsmodelle selbst Modellunsicherheiten enthalten. Eine Veranschaulichung der Unsicherheiten, die mit der Bemessung von Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen verbunden sind, findet sich in Abbildung 1.

Eine genaue Zuordnung von Unsicherheiten ist schwierig, da alle Arten von Unsicherheiten zur

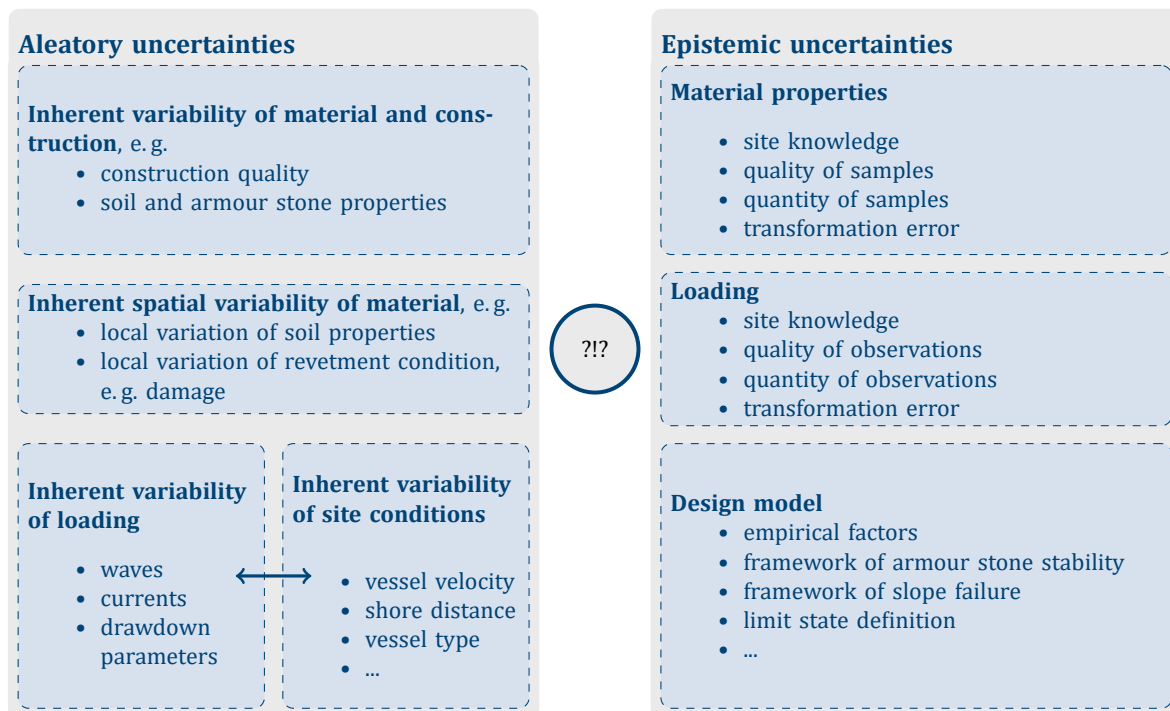


Abbildung 1: Quellen der aleatorischen und epistemischen Unsicherheit bei der Planung von Deckwerken an Binnenwasserstraßen. Der blaue Kreis in der Mitte stellt die "unbekannten Unbekannten" dar.

Gesamtunsicherheit beitragen und vom Anwendungskontext abhängen. Physikalische, finanzielle und zeitliche Beschränkungen erschweren die Spezifizierung und Bewertung aller oben genannten Unsicherheiten. Die sogenannten unbekanntes Unbekanntes ("schwarze Schwäne") erfordern alternative Strategien wie Robustheit oder Widerstandsfähigkeit der Konstruktion (Phoon 2020).

Das Ziel des Forschungsvorhabens *Zuverlässigkeitsbasierte Deckwerksbemessung* ist es, erste Ansätze für ein zuverlässigkeitsbasiertes, zum derzeitigen Bemessungskonzept „Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen“ (GBB, 2010) ergänzendes Bemessungsverfahren für lose Schüttsteindeckwerke zu erarbeiten. Dieses soll eine Prognose der Standsicherheit, der Langzeitbeständigkeit und der Wirtschaftlichkeit von Böschungs- und Sohlensicherungen projektspezifisch und angepasst an das jeweilige Sicherheitsbedürfnis ermöglichen.

Es wird davon ausgegangen, dass ein zuverlässigkeitsbasierter Ansatz vergleichbare Kennzahlen wie den Zuverlässigkeitsindex oder die Versagenswahrscheinlichkeit liefert, die durch Berücksichtigung von Unsicherheiten eine systematische Bewertung des Grades der (Nicht-)Konservativität einer Bemessung ermöglichen. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass aktualisierte Empfehlungen für die Wahl von Kennwerten, die Berücksichtigung ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit sowie ein verbessertes Modellverständnis der Schadensentwicklung eines losen Schüttsteindeckwerks eine projektspezifische Auslegung unter Berücksichtigung der örtlichen Verkehrs- und Sicherheitsanforderungen ermöglichen. Vermutlich konservative Annahmen werden durch ortsspezifisches Wissen ersetzt, um eine sichere, aber auch wirtschaftliche Deckwerksbemessung zu ermöglichen.

1.2 Bedeutung für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)

Die Verwendung von Ressourcen in der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) für die Unterhaltung von Ufersicherungen soll sich zukünftig an der Netzkategorisierung orientieren. Das bedeutet, dass für das Rand- und Nebennetz der Wasserstraßen geringere Mittel für die Unterhaltung verwendet werden sollen. Zunehmend sind auch ökologische Anforderungen bei der Planung von Unterhaltungsmaßnahmen zu beachten. Dabei stehen jedoch die Grenzen der Sicherheit oder eine Veränderung der Gefährdungslage nicht zur Disposition.

Um der WSV unter diesen Randbedingungen einen optimalen Einsatz der Ressourcen ohne Sicherheitsdefizite zu ermöglichen, ist ein Bemessungskonzept erforderlich, das sich an den tatsächlichen Verkehrsbelastungen orientiert und weniger an selten auftretenden Extrembelastungen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadens und das Schadensausmaß, kurzum das mit einem Schaden einhergehende Risiko, sollen verstärkt für eine Bemessung und eine Priorisierung von Instandhaltungsmaßnahmen herangezogen werden. Langfristig sollen Werkzeuge zur Verfügung gestellt werden, die eine Abschätzung der Entwicklung des Zustands von Ufersicherungen und darauf basierend eine Prognose des Sanierungs- und Unterhaltungsbedarfs im Netz der Bundeswasserstraßen erlauben.

1.3 Bedeutung für das Expertennetzwerk (SPT 302)

Das Schwerpunktthema (SPT) 302 arbeitet an der Bewertung der Zuverlässigkeit von Ingenieurbauwerken. Ziel ist die Ableitung aussagekräftiger Kennzahlen durch Analyse, Modellierung und Simulation der Zuverlässigkeit neuer und bestehender Bauwerke. Für den jeweiligen Anwendungsfall werden erforderliche Eingangsdaten und Eingangsdatenformate sondiert. Darauf basierend werden verschiedene Methoden der Zuverlässigkeitsbewertung angewendet. Diese Vorgehensweise soll es ermöglichen, umfassende, vergleichbare Kennzahlen zu generieren, die das breite Spektrum der technischen und administrativen Herausforderungen im Umgang mit einer alternden Infrastruktur abdecken.

Im Forschungsvorhaben *Zuverlässigkeitsbasierte Deckwerksbemessung* wird unter anderem untersucht wie mit zuverlässigkeitsbasierten Methoden Unsicherheiten bei Einwirkungen und Materialeigenschaften bei Bemessung und Zustandsbewertung berücksichtigt werden können. Mit Hilfe von Zuverlässigkeitsanalysen sollen differenzierte, von der Belastungsintensität und der Streuung der Materialkennwerte abhängige Kennzahlen generiert werden. Mit den Markov-Ketten wird ergänzend eine Methode zur Beschreibung der Zustandsentwicklung untersucht. Die entwickelten, für eine Zuverlässigkeitsbetrachtung erforderlichen Prozessabläufe (d. h. von der Datenerfassung, Datenanalyse bis hin zur Zuverlässigkeitsanalyse) sollen in das vom SPT 302 angestrebte ganzheitliche und verkehrsträgerübergreifende Konzept zur Bewertung der Bauwerkszuverlässigkeit integriert werden.

Im Forschungsvorhaben *Zuverlässigkeitsbasierte Deckwerksbemessung* wurden verschiedene Aufgabenstellungen bearbeitet (s. auch Abbildung 2). Ein Kerninhalt des Forschungsvorhabens war die Analyse von Parameterunsicherheiten und deren Einfluss auf die Deckwerksbemessung als eine

wesentliche Komponente einer zuverlässigkeitsbasierten Deckwerksbemessung. Damit verbundene Untersuchungen, Ergebnisse sowie ein erstes Konzept zur Verwendung zuverlässigkeitsbasierter Methoden bei der Deckwerksbemessung werden ausführlich in Sorgatz (2021) dargelegt. Im nachfolgenden Bericht werden die Ergebnisse für die folgenden Arbeitspakete zusammengefasst:

- **Prozessverständnis erhöhen:** Erweiterung des bestehenden Wissens zur Schadensentwicklung und daraus resultierenden standsicherheitsgefährdenden Schadensbildern an Ufersicherungen
 - Identifikation wesentlicher Schadensmechanismen und Schadensursachen
 - Beschreibung der Schadensentwicklung
- **Datensammlung & -analyse:** Beschreibung des Bauwerkszustands mit Hilfe von zuverlässigkeitsbasierten Methoden
 - Sichtung und Bewertung der Bestandsdaten im Kontext zuverlässigkeitsbasierter Methoden
 - Definition der maßgeblichen Einwirkungen und Entwicklung eines Untersuchungsprogramms zur Ermittlung der statistischen Grundlagen
- **Zustandsprognosen durchführen:**
 - Analyse bestehender Modelle zur Schadensentwicklung
 - Entwicklung eines ersten Modells, welches eine Abschätzung der Zustandsentwicklung von Ufersicherungen erlaubt

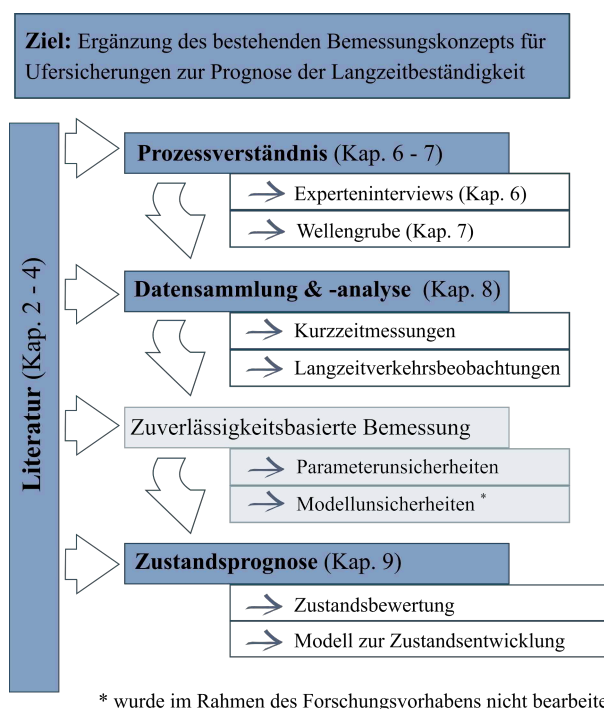


Abbildung 2: Arbeitspakete des Forschungsvorhabens. Die dunkelblau gefärbten Themenblöcke werden in diesem Bericht thematisiert. Der hellblau eingefärbte Themenblock wird ausführlich in Sorgatz (2021) dargelegt.

2 Technische Ufersicherungen

2.1 Funktion und Aufbau

Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) unterhält rund 7300 km Binnenwasserstraßen. Um deren Ufer vor Erosion, einem lokalen Böschungsversagen und anderen negativen Auswirkungen der hydraulischen Belastungen durch die Schifffahrt und natürliche Strömung zu schützen, werden die überwiegend geböschten Ufer in der Regel mit einer Ufersicherung geschützt. Ziel ist der dauerhafte Erhalt der Sicherheit und Navigierbarkeit der Wasserstraßen. Seit Einführung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) im Jahr 2000 sind zudem neben den technischen Anforderungen vermehrt ökologische Aspekte bei Ausbau und Unterhaltung von Ufersicherungen zu berücksichtigen.

Eine Ufersicherung besteht standardmäßig aus einer erosionsstabilen Deckschicht, einer Filterschicht und bei künstlichen Wasserstraßen, die oberhalb des Grundwasserspiegels liegen, eine Dichtungsschicht. Die Deckschicht kann wie in Abbildung 3 zusammengefasst unterschiedlich ausgeführt werden. Die Art der verwendeten Deckschicht richtet sich nach der Stärke der hydraulischen Belastungen. Die weiteren, in diesem Bericht dargelegten Untersuchungen konzentrieren sich auf lose Schüttsteindeckwerke.

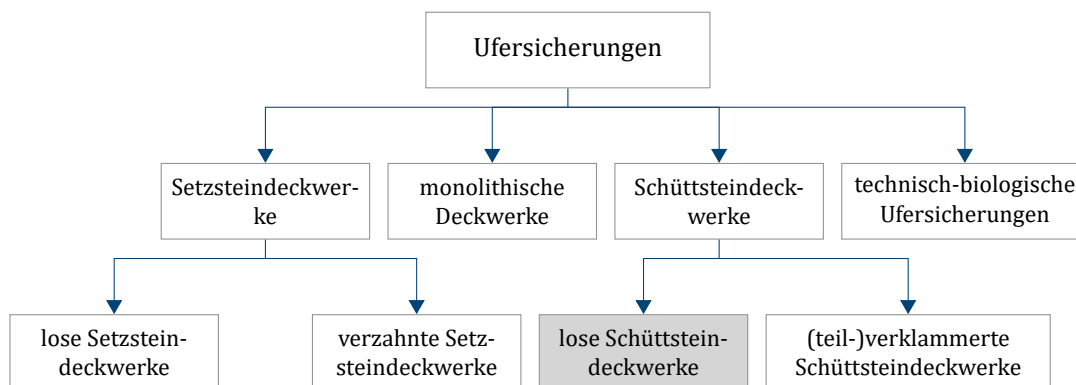


Abbildung 3: Überblick zu den verschiedenen Bauweisen von Ufersicherungen. Die weiteren, in diesem Bericht dargelegten Untersuchungen konzentrieren sich auf lose Schüttsteindeckwerke.

2.2 Bemessungsgrundlagen

Die derzeitigen Bemessungsgrundsätze für lose Schüttsteindeckwerke resultieren aus einer großen Anzahl von überwiegend Modell- und wenigen Felduntersuchungen, u. a. (Blaauw et al. 1984; Führer und Römisch 1981; Hudson 1959; Iribarren und Nogales 1952; Köhler 1997; van der Meer 1987, 1988a,b; van der Meer und Pilarczyk 1984; Verheij und Bogaerts 1989). Die Basis für eine Bemessung bilden oftmals empirische Gleichungen, die deterministisch unter Annahme extremer Randbedingungen gelöst werden (GBB 2010; Rock Manual 2007). Hinweise zu probabilistischen Bemessungsverfahren finden sich z. B. in PIANC (1987b).

Im Bereich der WSV erfolgt die Deckwerksbemessung nach den „Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen“ (GBB 2010). Darin wird in eine hydraulische und eine geotechnische Bemessung unterschieden. Bei der hydraulischen Bemessung wird ein erforderlicher mittlerer Steindurchmesser ermittelt, um eine Verlagerung der Deckwerksteine durch Wellen und Strömungen zu vermeiden. Unter der geotechnischen Bemessung versteht man die Ermittlung der erforderlichen Deckschichtdicke, um ein oberflächennahes, lokales Abgleiten der Böschung und eine hydrodynamische Bodenverlagerung (Verflüssigung) zu verhindern. Die Deckschicht wirkt hierbei als Auflast um Porenwasserüberdrücken im Boden entgegenzuwirken. Diese können als Reaktion auf schnelle Wasserstandsänderungen entstehen (s. Abbildung 4). Im Absinkfall herrscht im Boden ein größerer hydrostatischer Druck als im Kanal. Kann das Wasser aufgrund einer geringen Durchlässigkeit des Bodens oder auch Lufteinschlüssen und der damit einhergehenden Kompressibilität des Wasser-Gas-Gemisches nicht schnell genug in Richtung Kanal strömen, entstehen Porenwasserüberdrücke. Diese Porenwasserüberdrücke reduzieren wiederum die effektive Scherfestigkeit des Bodens und können so zu den oben genannten Schadensmechanismen führen.

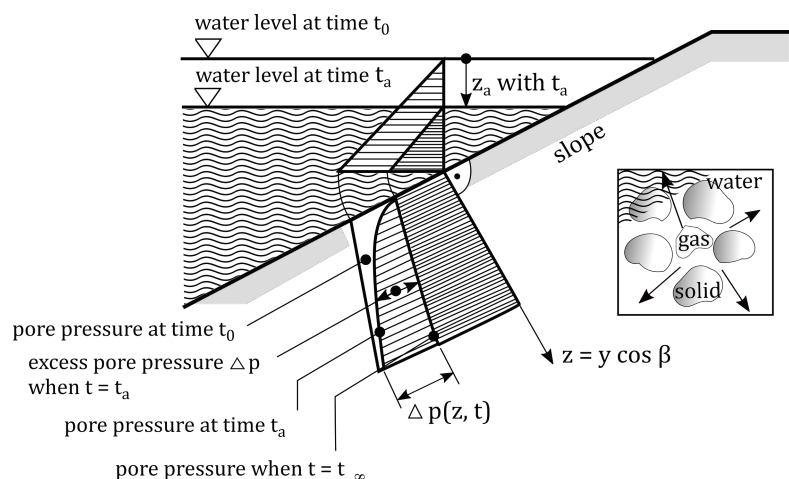


Abbildung 4: Grundlagen der geotechnischen Deckwerksbemessung: Hydrostatischer Porenwasserdruck und Porenwasserüberdruck bei schiffsinduziertem Absink. Eigene Darstellung nach GBB (2010)

2.3 Definitionen

In dieser Arbeit werden die im Anschluss zitierten Definitionen der Arbeitsgruppe 1 - Performance Indicators (COST WG 1 2019) verwendet. Versagensmechanismen sind „quasi-permanent or transient situations that violate code specifications or owner’s/ operator’s provisions [...]“ (COST WG 1 2019). Sie treten auf, wenn ein Grenzzustand überschritten wird. Ein Schaden kann hingegen nur wesentlich zu einem Versagensmechanismus beitragen. Er wird definiert als „physical disruption or changes to the material and/or geometric properties of these a [sic!] systems, including changes to the boundary conditions and system connectivity, which adversely affect the system’s performance.“ (COST WG 1 2019)

Für Schüttsteindeckwerke erfolgt nach GBB (2010) eine Bemessung gegen die Versagensmecha-

nismen:

- Erosion der Deckschicht,
- Abgleiten der Deckschicht (bei Deckwerken ohne Fußstützung),
- hydrodynamische Bodenverlagerung (bei Deckwerken ohne Fußstützung),
- Bruchversagen am Böschungsfuß oder an der Fußvorlage (bei Deckwerken mit Fußstützung) und
- Kolke als spezielle Erosionsform bei Propulsion.

Wesentliche Schadensbilder, die in den BAW-Berichten (Fleischer und Kayser 2006; Kayser 2003, 2006, 2007a,b, 2008; Stein 2008) und Literatur (Blodgett und McConaughy 1986; Julien 2002; Kreyenschulte 2020; Ouellet 1972; Rock Manual 2007) erwähnt werden, sind:

- Einzelsteinverlagerungen
- Kliffbildung und Abbrüche,
- Kolkbildung im Sohlbereich,
- kleinere Rutschungen und
- tiefer gehende Rutschungen / Bodenverlagerung.

In gängigen Bemessungsstandards findet oft keine klare Unterscheidung zwischen Schadens- und Versagensmechanismen statt (GBB 2010; PIANC 1987a; Rock Manual 2007). Und auch eine Studie von in der WSV verfügbaren Berichten zum Deckwerkszustand (Fleischer und Kayser 2006; Kayser 2003, 2006, 2007a,b, 2008; Stein 2008) zeigt, dass eine Unterscheidung zwischen den bemessungsrelevanten Versagensmechanismen und den für eine Instandhaltung relevanten Schäden erforderlich ist. Dies ist besonders bei der Erosion der Deckschicht von Bedeutung, wo Schaden und Versagen fließend ineinander übergehen. Ein Versagensmechanismus führt zu einem Zustand, in dem die Funktionalität eines Bauwerks eingeschränkt bzw. nicht mehr erfüllt ist. Schäden können nur wesentlich zu einem Versagensmechanismus beitragen. Die Beobachtung von Schäden in der Natur ist somit wahrscheinlicher als die Beobachtung von Versagensmechanismen. Für die Instandhaltungsplanung ist daher die Bedeutung eines Schadens hinsichtlich der Versagensmechanismen zu bewerten.

2.4 Schadensursache

Bei einer Schiffspassage entsteht ein komplexes Wellen- und Strömungsbild, welches die Stabilität und Gebrauchstauglichkeit von Erd- und Wasserbauwerken beeinträchtigen kann. Aus einer Schiffspassage resultierende Änderungen des hydrostatischen Drucks können zu Spannungsänderungen im Boden und Materialverlagerungen am Übergang zwischen Boden und Wasser führen. Auch Witterung und menschliches Wirken können den Zustand einer Ufersicherung beeinflussen. Schäden entstehen häufig dann, wenn die nachstehenden Schadensursachen in Kombination mit ungünstigen Umständen, z. B. schlechter Einbau, ufernahe Schiffspassage oder überhöhte Geschwindigkeit auftreten. In den BAW-Berichten (Fleischer und Kayser 2006; Kayser 2003, 2006, 2007a,b, 2008; Stein 2008) werden hydraulische Belastungen, Packeis, Materialalterung und Vandalismus als häufigste Schadensursachen genannt. Eine Reihe weiterer Schadensursachen werden

in PIANC (1987a), Rock Manual (2007), Uliczka (2018) und USACE (1997) dargestellt. Zusammenfassend werden die folgenden Ursachen für Schäden und Versagen identifiziert:

- **Abrasion:** Eisschollen und -trümmer, abrasive Sedimente und Packeis
- **Biologisch:** Vieh, Ungeziefer, Pflanzenwachstum, Algen und Mikroben
- **Chemisch:** Öle und Kohlenwasserstoffe, Sulfate und andere aggressive Salze
- **Temperatur:** Frosthörungen, extrem niedrige Temperaturen, hohe Temperaturen und Frost-Tau-Wechsel
- **Menschliches Handeln:** Vandalismus oder Diebstahl, Waschplätze und Anlegeplätze für Kleinhandwerk
- **Verkehr:** Schiff/Ufer-Kollision, Ankerwurf und Overdregging
- **Ultraviolettes Licht** (Sonnenlicht)

2.5 Schadenskennzahlen

Um Instandhaltungsmaßnahmen effektiv und ressourcenschonend planen zu können, ist eine detaillierte Beobachtung des Schadensverlaufs und somit auch eine entsprechende Schadensklassifikation erforderlich. Bisher existiert keine einheitliche Schadensdefinition für Schüttsteindeckwerke. In der Literatur werden unterschiedliche Klassifikationsansätze verfolgt. Eine Angabe zum Beschädigungsgrad kann anhand optischer Merkmale (Hedar 1965; Kayser 2015; Ouellet 1972), anhand der Anzahl erodierter Steine (Font 1970; Hudson 1959; Thompson und Shuttler 1975; van de Kreeke 1969) oder bezogen auf eine Erosionsfläche (Broderick 1983; van der Meer 1988b) erfolgen.

Das älteste quantitative Schadensmaß ist die totale Anzahl der verlagerten Einzelsteine, N_{od} oder die Anzahl der verlagerten Einzelsteine N_d innerhalb eines Streifens mit der Breite des nominalen Steindurchmessers D_n (Font 1970; Hudson 1959; Rock Manual 2007; van de Kreeke 1969):

$$N_{od} = \frac{\text{Anzahl der aus der Deckschicht verlagerten Deckwerkssteine}}{\text{Breite des untersuchten Abschnitts}} \quad (1)$$

$$N_d = \frac{\text{Anzahl der aus der Deckschicht verlagerten Deckwerkssteine}}{\text{Gesamtzahl der Einheiten im Bezugsbereich}/D_n} \quad (2)$$

Ein großes Manko dieser Schadensklassifizierung ist ihre Anwendbarkeit in der Praxis. Daher wurden Maße vorgeschlagen, die auf dem Oberflächenprofil basieren, obwohl diese Schadensmaße den Nachteil haben, dass sie nur auf einfache Geometrien, z. B. eine einfache Böschung ohne Berme, angewendet werden können. Wenn die Erosionsfläche um den Ruhewasserspiegel mit der Größe der Deckwerksteine in Beziehung gesetzt wird, erhält man eine dimensionslose Schadenzahl, die unabhängig von der Größe (Neigungswinkel und Höhe) des Bauwerks ist (Broderick 1983; Pilarczyk und den Boer, K. 1983). Dieses dimensionslose Schadenmaß S ist definiert durch:

$$S = \frac{A_e}{D_{n50}^2} \quad (3)$$

wobei A_e die erodierte Fläche und D_{n50} der mittlere nominale Steindurchmesser ist. Zusätzlich zu S führen Melby und Kobayashi (1998a) die normalisierte Schadenstiefe E , die normalisierte Überdeckung C und die normalisierte erodierte Länge L ein, um die Form der erodierten Fläche zu beschreiben (s. Abbildung 5). Dabei definiert d_e den maximalen normalen Abstand zwischen dem unbeschädigten und dem beschädigten Profil, d_c ist die Überdeckung und l_e ist die erodierte Länge (s. Abbildung 5).

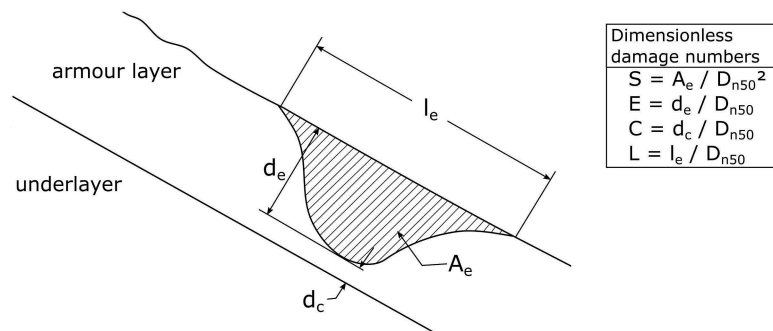


Abbildung 5: Dimensionslose Schadenszahlen (Melby und Kobayashi 1998a)

Eine Schlüsselinformation, die aus den Schadenskennzahlen abgeleitet oder vorhergesagt werden soll, ist der Punkt des Versagens. Hofland, Rosa-Santos et al. (2018), Hofland, Disco et al. (2014) und Hofland, van Gent et al. (2013) schlagen eine Klassifizierung der Schäden für Bauwerke mit einer $2D_{n50}$ dicken Deckschicht vor, wobei $E = 0.2 - 0.3$ als Anfangsschaden und $E = 0.5 - 0.6$ als Zwischenschaden eingestuft wird. Das Versagen wird als Freilegung der Filterschicht mit $E = 0.8 - 1.6$ definiert. In Rock Manual (2007) wird das Versagen einer 1:3 Böschung mit $S = 12$ angegeben. Melby und Kobayashi (1998a) und Melby und Kobayashi (1998b) geben die folgende Gleichung für die mittlere Schädigung S bei Versagenseintritt an:

$$0.1S + 2.7 \left[0.098 - 0.002 (S - 7)^2 \right] = \bar{C}_0 - 2.7\sigma_{c_0} \quad (4)$$

wobei C_0 die initiale normalisierte Überdeckung und σ_{c_0} die initiale Streuung der normalisierten Überdeckung angibt.

2.6 Schadensentwicklung

Bei Schüttsteindeckwerken ist davon auszugehen, dass die hydraulischen Einwirkungen in Form von Wellen und Strömungen mit zunehmender Standzeit des Bauwerks zu Steinverlagerungen führen können. Die Schadensentwicklung konnte in der Vergangenheit anhand von kleinmaßstäblichen Versuchen (Beyer 2007; Daemrich et al. 1996; DST 2006; Font 1968; Hudson 1959; Lee et al. 1987; Pilarczyk und den Boer, K. 1983; Pitt und Ackers 1983; Thompson und Shuttler 1975; Uliczka 2018; van der Meer und Pilarczyk 1984; Verheij und Bogaerts 1989) und großmaßstäblichen Versuchen (Ahrens 1970; Bezuijen et al. 1987; Gier 2017; Köhler 1985; van der Meer 1987; van der Meer und Pilarczyk 1984; Westrich et al. 2003) nachvollzogen werden. Hierbei gilt es zu berücksichtigen, dass diese Untersuchungen überwiegend auf die Entwicklung von Bemessungsansätzen

für Schüttsteindeckwerke und weniger auf eine Beobachtung der Schadensentwicklung abzielen. Die Untersuchungen sind daher in der Regel mit Referenz zu den jeweiligen vorab definierten Versagenszuständen zu betrachten.

Auf der Grundlage seiner Bemessungsformeln für Schüttsteinböschungen und Wellenbrecher (van der Meer 1987) beschreibt van der Meer (2000) eine Methode zur Berücksichtigung kumulativer Schäden durch die Berechnung äquivalenter Schäden für verschiedene Sturmereignisse und die entsprechende Anzahl von Wellen, um diesen Schaden pro Sturmereignis zu erreichen. Es wird der Schaden S_1 für die erste Wellenbedingung berechnet. Anschließend wird ermittelt, wie viele Wellen der zweiten Wellenbedingung erforderlich wären, um denselben Schaden wie bei der ersten Wellenbedingung zu verursachen. Die berechnete Anzahl der Wellen wird mit N'_1 bezeichnet und zur Anzahl der Wellen der zweiten Wellenbedingung N_2 addiert. Schließlich wird der Schaden für die zweite Wellenbedingung mit der erhöhten Wellenzahl $N_t = N_2 + N'_1$ neu berechnet. Der beschriebene Prozess wird für weitere Wellenzustände wiederholt (Rock Manual 2007).

Ein wichtiger Beitrag zur Beschreibung der Schadensentwicklung wurde von Melby (2001), Melby und Kobayashi (1998a) und Melby und Kobayashi (1998b) vorgelegt. Sie geben eine mathematische Beschreibung der fortschreitenden Schäden aufgrund des Auftretens nachfolgender Sturmereignisse in Form von kumulativen Schäden S unter Berücksichtigung von Anfangsschäden ungleich Null. Die Melby-Gleichung basiert auch auf den Bemessungsformeln von van der Meer (1987), vereinfacht diese jedoch durch die Einführung zusätzlicher empirischer Faktoren.

$$S_d(t_n) = S_{d0}(t_0) + 0.025 \frac{N_{s,n}^5}{T_{m,n}^b} (t_n^b - t_0^b) \quad (5)$$

Castillo et al. (2012) schlug ein dimensionsloses stochastisches Schadensverlaufmodell (DDPM) vor. Anstatt einfach zu verwendende mathematische Funktionen auszuwählen, wurde eine mathematische Formulierung gewählt, die eine Reihe von Eigenschaften erfüllt. Das Modell basiert auf Dimensionsanalysen, Kompatibilitätsbedingungen und der zentralen Grenzwerttheorie. Es wird in Form einer kumulativen Dichtefunktion F des dimensionslosen Schadens D^* ausgedrückt:

$$F_{D^*(t^*)}(x) = \Phi \left(\frac{(x - \gamma)^{1/b} - \mu_0 - kt^*}{\sqrt{\sigma_0^2 + rt^*}} \right) \quad (6)$$

Dabei ist $t^* = t/T_m$ die mittlere Anzahl der Wellen, γ und b sind vom Wellenbrecher abhängige Koeffizienten, k und r berücksichtigen die Wellenwirkung und μ_0 und σ_0 hängen von den Anfangsbedingungen des Deckwerks ab. Für D^* kann jeder dimensionslose Schadensindikator verwendet werden. Die Welleneinwirkungsparameter k und r können aus einer Schadensfunktion gewonnen werden. Basierend auf den Untersuchungen von Campos (2016) wurde eine mögliche Beziehung zwischen Wellenaktionsparametern und relativer Dauer angenommen:

$$k = k_0 + a_1(N_s) \cdot (t^*)^{\beta_1(N_s)} \quad (7)$$

$$r = r_0 + a_2(N_s) \cdot (t^*)^{\beta_2(N_s)} \quad (8)$$

Die empirischen Koeffizienten $a_{1,2}$ und $\beta_{1,2}$ sind eine Funktion der Stabilitätszahl N_s . Jedes Intervall mit konstantem N_s kann durch die gleichen $a_{1,2}$ und $\beta_{1,2}$ beschrieben werden. Eine erste Kalibrierung des Modells wurde von Campos (2016) und Campos, Castillo und Molina (2014) durchgeführt.

2.7 Zusammenfassung

Die Literaturübersicht zeigt, dass bei losen Schüttsteindeckwerken verschiedene Arten von Schäden und Versagen beobachtet werden. Neben hydraulischen Belastungen werden biologische, chemische und andere Schadensursachen identifiziert. Häufig gibt es jedoch keine klare Unterscheidung zwischen Schäden und Versagensmechanismen. Auch werden oft unterschiedliche Begriffe für die gleiche Schadensart verwendet. Der Schadensverlauf wird hauptsächlich qualitativ beschrieben. Studien, die die Schadensentwicklung mathematisch beschreiben, gelten nicht für die Bemessung von Deckwerken an Binnenwasserstraßen. Die Häufigkeit der einzelnen Schadensbilder und sowie die Bedeutung der Schadensbilder hinsichtlich eines Versagens lassen sich aus bisherigen Untersuchungen nicht ableiten.

Wie bereits von Campos, Castillo und Molina-Sanchez (2020) ausführlich dargelegt, ist festzustellen, dass es bisher kein allgemein etabliertes Schadensmaß gibt, das in der Praxis problemlos angewendet werden kann. Die meisten Schadens Kennzahlen lassen bei alleiniger Betrachtung keine Rückschlüsse auf die räumliche Form des Schadens zu. Messung und Nachbearbeitung sind nicht standardisiert. Darüber hinaus ist keines der derzeit bekannten Schadensmaße in der täglichen Praxis leicht zu erheben, leicht interpretierbar und nur für wenige Parameter ist die Schwankungsbreite zuverlässig bekannt (Campos, Castillo und Molina-Sanchez 2020).

Mit Ausnahme der Formeln von van der Meer (2000) sind die oben beschriebenen Modelle für Sturmereignisse mit bis zu 60.000 Wellen kalibriert. Auf Wasserstraßen ist jedoch eine geringere Anzahl von steinverlagernden Einzelereignissen zu erwarten, da anders als bei einem Sturm eine Steinverlagerung in der Regel nur dann auftritt, wenn ein Schiff näher oder schneller am Ufer vorbeifährt als in der Bemessung vorgesehen. Zuverlässigkeitsanalysen verschiedener Kanäle haben gezeigt, dass selbst bei einer hohen Auslastung nur 2 % der Schiffe die Bemessungsvorgaben überschreiten, was je nach Anzahl der Schiffspassagen pro Jahr weniger als ein Schiff pro Tag (Sorgatz 2021) ist.

3 Bewertung der strukturellen Zuverlässigkeit von Bauwerken

3.1 Begrifflichkeiten

Grenzzustände: beschreiben Zustände, “beyond which a structure no longer satisfies the design criteria” (ISO 2394:2015-03 2015, S. 6). Wie im Ingenieurwesen allgemein anerkannt, wer-

den Einwirkungen, Umwelteinflüsse, Materialeigenschaften und geometrische Eigenschaften eines Systems bewertet mit “reference to a specified set of limit states which separate desired states of the structure from adverse states” (JCSS 2001, S. 4).

Eine Kategorisierung der Grenzzustände, die für die geotechnische und hydraulische Bemessung von Deckwerken gilt, wird von Oumeraci et al. (1999) und PIANC (1987b) vorgeschlagen, welche eine Erweiterung der in DIN EN 1990:2010-12 (2010) und DIN EN 1997-1:2014-03 (2010) genannten Grenzzustände vorsieht. Die folgenden vier Arten von Grenzzuständen werden spezifiziert:

- **Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS):** “corresponds to the ultimate load bearing capacity, collapse or instability of single elements, transformation into other failure mechanisms, etc.” (PIANC 1987b, S. 10).
- **Grenzzustand eines progressiven Versagens (PCLS):** “corresponds to a state in which accidental loss or overloading of single elements may produce in the structure, or major parts of it, a condition in which progressive failure could take place. This state could occur when the stability of elements in a bank protection (riprap or concrete stones) is based on the supporting reactions of neighbouring elements and one of these elements fails” (PIANC 1987b, S. 10).
- **Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS):** “corresponds to, for example, excessive deformation or (cyclic) motion without loss of equilibrium, durability etc.” (PIANC 1987b, S. 10).
- **Ermüdungskriterium (FLS):** “corresponds to the occurrence of a large number of normal or accidental events which have cumulative damaging effects” (PIANC 1987b, S. 10).

Unsicherheit: Die Motivation zur Durchführung einer Zuverlässigkeitsanalyse im Ingenieurwesen basiert in der Regel auf dem Wunsch, Unsicherheiten bei Einwirkungen, Materialeigenschaften, Geometrie und in den Berechnungsgleichungen (Modell) zu berücksichtigen. Hacking (1975) führt ausgehend von philosophischen Betrachtungen zwei Klassen von Unsicherheiten ein: aleatorische und epistemische Unsicherheiten. Während der erste Begriff eine inhärente Unsicherheit aufgrund der natürlichen Variabilität charakterisiert, z. B. eine Variation der Bodeneigenschaften und der Lastintensität, beschreibt die epistemische Unsicherheit einen Mangel an Wissen, der z. B. durch eine unzureichende Datengrundlage oder ein vereinfachtes Modell verursacht wird. Beide Arten von Unsicherheiten tragen zur Gesamtunsicherheit bei. Eine klare Differenzierung ist daher nicht möglich. Zudem ist die Kategorisierung der Unsicherheiten stets von der Problemstellung selbst sowie dem vorhandenen Ausgangswissen abhängig. Weitere Unterscheidungen sind möglich (Der Kiureghian und Ditlevsen 2009).

Zuverlässigkeit: Die Literatur bietet verschiedene Definitionen von *Zuverlässigkeit*. Die umfassendste Aussage findet sich in DIN EN 1990:2010-12, die Zuverlässigkeit als „Fähigkeit eines Tragwerks oder Bauteils die festgelegten Anforderungen innerhalb der geplanten Nutzungszeit zu erfüllen.“ Die Zuverlässigkeit eines Bauwerks oder Bauteils bezieht sich somit auf die strukturelle Integrität, die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit eines Bau-

werks während seiner Lebensdauer. In der Zuverlässigkeitsanalyse wird eine Überschreitung eines vorab definierten Grenzzustandes auf eine vorab definierte Zielzuverlässigkeit (target reliability) zurückgeführt.

Versagenswahrscheinlichkeit: Da Bauwerke wie Brücken oder Schleusen in ihrer Konstruktion und ihrem Zustand in der Regel einzigartig sind und ein Versagen durch die Überschreitung einer Grenzzustandsfunktion auftritt, kann die Zuverlässigkeit von Strukturen nicht anhand ihrer Ausfallraten beurteilt werden. Stattdessen werden Modelle für Widerstände R und Lasten E erstellt und die strukturelle Zuverlässigkeit wird über die Versagenswahrscheinlichkeit p_f bewertet, welche das Komplement der Zuverlässigkeit darstellt. (Ditlevsen und Madsen 2005)

Zuverlässigkeitsindex: Ein nützlicher Kennwert, der die Versagenswahrscheinlichkeit in eine praktischere Maßeinheit übersetzt, ist der Zuverlässigkeitsindex β_{HL} nach Hasofer und Lind (1974). Durch die Transformation unabhängiger Gauß'scher Variablen vom physischen Raum in einen normalen Standardraum U kann der Zuverlässigkeitsindex als Mindestabstand u^* zwischen dem Ursprung und dem Punkt P^* in U definiert werden. Der Punkt P^* entspricht einem Punkt auf der Grenzzustandsfunktion g , an dem die Wahrscheinlichkeitsdichte der gemeinsamen Dichtefunktion der Eingangsvariablen maximiert wird. Im physischen Raum wird P^* auch als Bemessungspunkt bezeichnet. Die Versagenswahrscheinlichkeit ergibt sich aus β_{HL} nach Gleichung (9), wobei Φ der kumulativen Dichtefunktion einer Normalverteilung im Standardraum entspricht.

$$p_f \approx \Phi(-\beta_{HL}) \quad (9)$$

Zielzuverlässigkeit: Im Sinne eines auf Zuverlässigkeit basierenden Ansatzes entsprechen die bauwerksbezogenen Risikoakzeptanzkriterien der mindestens erforderlichen Zuverlässigkeit, der Zielzuverlässigkeit. Die Anforderungen an die Sicherheit der Struktur werden somit in Form des akzeptierten Minimums oder Maximums ausgedrückt, dem minimalen Zuverlässigkeitsindex oder der maximalen Versagenswahrscheinlichkeit. Die Definition von Zielzuverlässigkeiten erfolgt unter Verwendung der Struktur, der Art der Struktur und der Bemessungssituation. Die Folgen eines Versagens und der Aufwand für die Risikominderung sollten berücksichtigt werden (JCSS 2001). In der Literatur werden für Wellenbrecher, einen mit Deckwerken vergleichbarem Bauwerkstyp, in Abhängigkeit von der Sicherheitsklasse und bezogen auf die gesamte Lebensdauer Versagenswahrscheinlichkeiten zwischen 0.05 bis 0.50 angegeben (PIANC 1989, 2003, 2016; Vrijling 1999). USACE (1999) schlagen Zielzuverlässigkeit speziell für geotechnische Strukturen vor: Ein Objekt mit unterdurchschnittlicher Zuverlässigkeit ist durch eine jährliche Versagenswahrscheinlichkeit von $p_f \leq 6E^{-3}$ gekennzeichnet. Ein Objekt mit hoher Zuverlässigkeit erzielt eine jährliche Versagenswahrscheinlichkeit von $p_f \geq 3E^{-7}$.

Tabelle 1: Stufen der Zuverlässigkeitsanalyse nach Teixeira (2012), eigene Übersetzung

Information	Stufen der Zuverlässigkeitsanalyse				
	0	I	II	III	IV
Hydraulische/ Geotechnische Parameter	✓	✓	✓	✓	✓
Berechnungsmethode (deterministisch)	✓	✓	✓	✓	✓
Bemessungsparameter (statistische Basis)	x	✓	✓	✓	✓
Variabilität der Parameter	x	x	✓	✓	✓
- Mittelwert und Standardabweichung	x	x	✓	✓	✓
- pdf	x	x	x	✓	✓
Kosten	x	x	x	x	✓
Typ der Analyse	Globaler FoS ⁽¹⁾	Teilsicherheitsbeiwerte	FORM ⁽²⁾	MCS ⁽³⁾	Risiko

⁽¹⁾ Factor of Safety

⁽²⁾ First Order Reliability Method

⁽³⁾ Monte-Carlo Simulationen

3.2 Stufen der Zuverlässigkeitsanalyse

Die Methoden einer probabilistischen Zuverlässigkeitsbeurteilung werden entsprechend ihrer Komplexität und Genauigkeit unterschieden (vgl. Tabelle 1). In den praktischen Anwendungen wird ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Berechnungseffizienz angestrebt, da eine Erhöhung der Genauigkeit in der Regel mit einem zunehmenden Rechenaufwand einhergeht.

Inhaltlich werden die unterschiedlichen probabilistischen Verfahrensstufen wie folgt differenziert (Hansen 2004):

- Bei Verfahren der *Stufe 0* handelt es sich um deterministische Bemessungen. Aus charakteristischen Einwirkungen und Widerständen ergibt sich ein globaler Sicherheitsfaktor. Aussagen über eine Versagenswahrscheinlichkeit sind nicht möglich. Auch wird nicht differenziert zwischen Unsicherheiten auf Einwirkungs- und Widerstandsseite.
- Verfahren der *Stufe I*, auch als semi-probabilistische Verfahren bekannt, werden im Allgemeinen aus den Verfahren der *Stufe II* abgeleitet. Sie nutzen als Bemessungswerte charakteristische Kennwerte. Durch normierten Verfahren wie beispielsweise die Multiplikation oder Division der charakteristischen Kennwerte mit Teilsicherheitsbeiwerten wird eine Sicherheit gegen Versagen beaufschlagt. Aussagen über die Versagenswahrscheinlichkeit sind nicht möglich.
- Verfahren der *Stufe II* sind nach derzeitigen Standards ingenieurspraktisch anwendbare Verfahren, die auf einer probabilistischen Näherungslösung beruhen. Die Grenzzustandsgleichungen werden approximiert. Die Zustandsvariablen werden nur mit zwei statistischen Kennwerten z. B. Mittelwert und Varianz beschrieben.
- Verfahren der *Stufe III* sind streng probabilistische Betrachtungen, die eine vollständige mathematische Beschreibung der Grenzzustandsfunktion und der Dichteverteilung der Variablen erfordern.

- Verfahren der *Stufe IV* berücksichtigen zusätzlich ökonomische Randbedingungen. Es wird eine Minimierung der Investitionskosten bei gleichzeitiger Betrachtung potenzieller Schadenskosten angestrebt. Mittels einer Wichtungsfunktion werden die volkswirtschaftlichen Konsequenzen einer Über- oder Unterbemessung analysiert. Der probabilistische Ansatz erfolgt in der Regel mit Verfahren der *Stufe II*.

3.3 Anwendung auf Wasserbauwerke

Erste Empfehlungen für ein probabilistisches Bewertungskonzept von Uferschutzbauwerken finden sich in den Niederlanden. Ausgelöst durch ein schweres Sturmereignis (31. Januar - 1. Februar 1953) entwickelt van Dantzig (1956) einen probabilistischen Ansatz für die geotechnische Bemessung von Hochwasserschutzanlagen. Im Jahr 1980 veröffentlichte Bakker und Vrijling (1980) ein erstes Konzept für die probabilistische Bemessung von Hochwasserschutzanlagen (Deiche und Dünen). Im Jahr 1984 beschreibt Mol et al. (1984) erstmals ein probabilistisches Bemessungskonzept für Wellenbrecher, das sowohl die geotechnische als auch die hydraulische Bemessung beinhaltet. Für die hydraulische Bemessung untersucht Mol et al. (1984) die Wahrscheinlichkeit bestimmter Schadensniveaus anstelle einer Versagenswahrscheinlichkeit des Bauwerks. Barends und van Dijk (1985) liefern einen Leitfaden für die probabilistische, computergestützte geotechnische Bemessung von Wellenbrechern. Das Konzept von van der Meer (1988a) beinhaltet einen probabilistischen Bemessungsansatz, um die Versagenswahrscheinlichkeit von Wellenbrechern von Wellenbrechern während ihrer Lebensdauer abzuschätzen. Es werden verschiedene Schadensniveaus bewertet. Vrijling und van Gelder (1997) erweitern den Ansatz von van der Meer (1988a) hinsichtlich einer Instandhaltungsplanung. Sie stellen verschiedene Methoden vor, um die Versagenswahrscheinlichkeit und in der Folge die Schadenentwicklung mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen (MCS) zu bestimmen. Die Entwicklung des Schadens selbst wird durch eine empirische Gleichung beschrieben, die aus Feldversuchen abgeleitet wurde.

Bruining (1994) und Christiani (1997) schlagen probabilistische Auslegungskonzepte für vertikale Wellenbrecher vor. Einen detaillierten Leitfaden für vertikale Wellenbrecher wurde im Projekt PRObabilistic design tools for VERTical BreakwaterS (PROVERBS) erarbeitet, das von Februar 1996 bis Januar 1999 lief. Relevante Versagensarten und -parameter für einen zuverlässigkeitsbasierten Entwurf vertikaler Wellenbrecher werden bewertet, akzeptable Versagenswahrscheinlichkeiten und ein Teilsicherheitsbeiwert-Konzept werden definiert (Vrijling 1999).

Ausgehend vom Zuverlässigkeitskonzept nach Vrijling (1993), das neue Standards für die Auslegung von Hochwasserschutzsystemen festlegt, schlägt Voortman (2003) einen allgemeinen Rahmen für eine risikobasierte Auslegung von Hochwasserschutzsystemen vor. Klassische Zuverlässigkeitsanalysen werden mit Optimierungsalgorithmen kombiniert, um eine kosteneffektive Bemessung unter Berücksichtigung des erforderlichen Schutzniveaus zu ermitteln. Etwa zur gleichen Zeit skizziert Kortenhaus (2003) ein probabilistisches Bemessungskonzept für deutsche Nordseedeiche. Ähnlich wie Vrijling (2001) bewertet er verschiedene Versagensmechanismen von Deichen und führt sie in einer Fehlerbaumanalyse zusammen, um die gemeinsame Versagenswahrscheinlichkeit zu bestimmen.

Im Jahr 2007 wird das Projekt FLOODsite initiiert, in dessen Rahmen verschiedene europäische Forschungseinrichtungen Untersuchungen zur Zuverlässigkeit von Küstenbauwerken bei Hochwasserereignissen durchführt. Beurteilt werden u. a. der Einfluss von Unsicherheiten auf die Zuverlässigkeit von Hochwasserschutzsystemen (Kanning 2007), die Zuverlässigkeit von Hochwasser- und Seeschutzbauten und -systemen (van Gelder 2009) und die Bestimmung hydraulischer Lasten mittels der Extremwerttheorie (Sánchez-Arcilla et al. 2010; van Gelder und Mai 2008). Ebenfalls Ende der 2000er Jahre wird die Zuverlässigkeitsanalyse von Küstenbauwerken zu einer zeitabhängigen Analyse unter Berücksichtigung einer Schadensentwicklung am Bauwerk (Buijs et al. 2009; van Noortwijk et al. 2007) erweitert.

Seit etwa zehn Jahren wird die hydraulische (Jafarnejad, Pfister, Brühwiler et al. 2017; Jafarnejad, Pfister und Schleiss 2012) und geotechnische Stabilität (Möllmann 2009; Pham Quang et al. 2010; Weißmann 2014) von Uferböschungen im Binnenbereich untersucht. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf Hochwasserereignisse und Wasserstraßen, die einer natürlichen Strömung ausgesetzt sind. Schiffsinduzierte Belastungen wurden bisher nicht berücksichtigt.

3.4 Zusammenfassung

Die Literaturstudie zeigt, dass auf internationaler Ebene probabilistische Methoden bereits an der Schnittstelle von Wasserbau und Geotechnik angewendet werden. Sie kommen insbesondere dann zum Einsatz, wenn Einwirkungen vorwiegend stochastischer Natur sind, z. B. Wellenereignisse und Wasserstände während einer Sturmflut. Im Gegensatz dazu gibt es kaum Erfahrungen mit der probabilistischen Bemessung von Deckwerken an Binnenwasserstraßen. Es ist daher zu prüfen, inwieweit probabilistische Methoden bei Bemessung und Zustandsbewertung von Deckwerken unterstützen können.

Zusätzlich zeigen die Ergebnisse der Literaturstudie, dass verschiedene Methoden zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit oder der Zuverlässigkeit eines Bauwerks zur Verfügung stehen. Sie wurden bereits erfolgreich auf verschiedene ingenieurtechnische Probleme angewendet. Im Rahmen dieser Arbeit werden Level-III-Analysen favorisiert. Zusätzliche Untersuchungen werden durchgeführt, um die Eignung von Level-II-Analysen für eine probabilistische Deckwerksbemessung zu bewerten.

4 Präzisierung der Vorgehensweise

Eine Bewertung der strukturellen Zuverlässigkeit eines Bauwerks beinhaltet die Analyse, Modellierung und Simulation zur Beschreibung der Zuverlässigkeit. Die drei Bewertungsschritte erfordern jeweils eine spezifische Methodik, um Erkenntnisse über das Problemverständnis, die zu erhebenden und zu analysierenden Daten sowie die Verwendung geeigneter Modelle und Methoden zu erlangen (siehe Abbildung 6). Die Methodik auf Ebene des Problemverständnisses betrifft die Zusammenstellung von Wissen über das Systemverhalten, relevante Grenzzustände, erforderliche Eingangsparameter sowie die Definition eines der Fragestellung angemessenen Detailliertheitsgra-

des. Auf der Ebene der Datenerhebung und -analyse zielt die Methodik darauf ab, das notwendige Wissen zu erheben, um ein mathematisches Modell aufzubauen, welches die reale Situation hinreichend gut abbildet. Es folgt die abschließende Generierung der Kennzahlen und deren Bewertung in Bezug auf den Bauwerkszustand (Panenka, Nyobeu Fangué, Rabe et al. 2020).

In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Arbeitsschritte, die im Rahmen des Forschungsvorhabens zur Deckwerksbemessung durchgeführt wurden, erläutert und Ergebnisse präsentiert. Der Aufbau folgt der Darstellung in Abbildung 6. Das Problemverständnis wird mit Hilfe von Experteninterviews (s. Kapitel 5) und Modellversuchen (s. Kapitel 6) ergänzt. Daraus resultierende Erkenntnisse fließen in die Datenerfassung und -auswertung (s. Kapitel 7) sowie die Erstellung eines probabilistischen Bemessungskonzepts ein (s. Kapitel 8). Anschließend wird das Bemessungskonzept auf vier Beispiele exemplarisch angewendet.

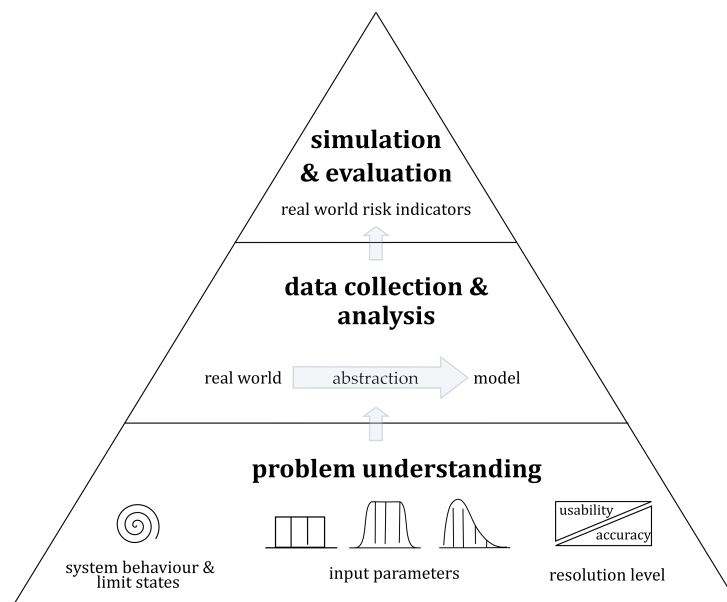


Abbildung 6: Im ExpN (SPT 302) entwickelter Arbeitsablauf zur probabilistischen Bemessung (Panenka, Nyobeu Fangué, Rabe et al. 2020)

5 Experteninterviews

5.1 Einleitung

Mit Hilfe von Experteninterviews soll die Systematik der Schadens- und Versagensbegrifflichkeiten in der Literatur mit den Beobachtungen vor Ort abgeglichen werden. Häufige und für die Instandhaltung relevante Schadensursachen und Schadensbilder sowie deren Verlauf sollen beschrieben werden.

Das Experteninterview ist eine wissenschaftliche Methode aus dem Bereich der Sozialwissenschaften, das insbesondere eine qualitative Datenerhebung zum Ziel hat. In den Sozialwissenschaften

stellen Experteninterviews eine anerkannte Methode dar, um Wissen über den sozialen Kontext von Handlungen und Strukturen zu analysieren (Bogner et al. 2009; Gläser und Laudel 2010; Meuser und Nagel 1991). In den Natur- und Ingenieurwissenschaften ist Expertenwissen häufig von Interesse, wenn empirische Daten nur schwer zugänglich sind, z. B. (Kuhnert et al. 2010; McBride und Burgman 2012; Schüttrumpf et al. 2008).

5.2 Definitionen und Interviewformen

Der Begriff

„Experte‘ beschreibt die spezifische Rolle des Interviewpartners als Quelle von Spezialwissen über die zu erforschenden [sozialen] Sachverhalte. Experteninterviews sind eine Methode, dieses Wissen zu erschließen.“ (Gläser und Laudel 2010)

Kriterien für die Auswahl der ExpertInnen sind ein in den Sozialwissenschaften und der Psychologie vielfach diskutierter Aspekt (Bogner et al. 2009; Gläser und Laudel 2010). Sowohl die Stellung innerhalb einer Institution, eine besondere Ausbildung als auch eine Unabhängigkeit des Expertenstatus von kognitiven Fähigkeiten, eine Bereichsabhängigkeit und langjährige Erfahrungen können als mögliche Auswahlkriterien dienen (Mieg und Näf 2005). Die Auswahl der ExpertInnen muss einerseits den Regeln der statistischen Repräsentativität folgen und andererseits für die Fragestellung typisch sein. Dies kann beispielsweise anhand eines Kompetenz-Kriteriums (Ausbildung, Position, Funktion) begründet werden (Honer 1994). Der Expertin oder dem Experten wird folglich ein Expertenstatus in Abhängigkeit von der Forschungsfrage vom Forschenden selbst verliehen (Meuser und Nagel 1991). Diese Auswahl ist jedoch stets von der subjektiven Kriterienwahl und -wichtung des Forschenden abhängig.

Eine formale Einteilung der Interviews folgt aus dem Grad der Standardisierung der Interviews. Man unterteilt nach Gläser und Laudel (2010) in:

- **(Voll)Standardisierte Interviews**, bei denen der Interviewee einen festgelegten Fragenkatalog mit vorab formulierten Antworten beantwortet.
- **Halbstandardisierte Interviews**, bei denen es einen vorgeschriebenen Fragenkatalog für den Interviewer gibt. Der Interviewee kann die Fragen hingegen frei beantworten.
- **Nichtstandardisierte Interviews** schreiben weder InterviewerIn noch Interviewee einen zuvor definierten Fragen- und Antwortenkatalog vor. Bei einem **Leitfadeninterview** orientiert sich der InterviewerIn an vorgegebenen Themen und einer Frageliste, die in einem Leitfaden zusammengefasst sind. In einem **offenen Interview** wird ein zuvor definiertes Thema ohne Leitfaden bearbeitet. Mehrere, zur gleichen Thematik geführte Interviews können dadurch in verschiedene Richtungen verlaufen.

Die folgende Arbeit verwendet Leitfadeninterviews. Im Gegensatz zu voll standardisierten Interviews ermöglicht diese Methode, Forschungsfragen umfassend und ohne Sanktionierung der Erwartungen des Interviewenden zu untersuchen (Honer 1994).

5.3 Durchführung

Insgesamt wurden 21 Experten aus neun Außenbezirken (Abz), vor allem Ingenieure und Techniker, befragt. Es ist davon auszugehen, dass sie durch ihre tägliche Arbeit an der Wasserstraße detaillierte Beobachtungen zu Schäden, Schadensursachen und der Zustandsentwicklung einer Ufersicherung machen konnten. Darüber hinaus wurden Wasserstraßen mit unterschiedlichen Verkehrsdichten, Wasserstraßenkategorien und damit Instandhaltungsstandards in die Stichprobe einbezogen. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen, wurden nur Kanäle mit losen Schüttsteindeckwerken berücksichtigt. Die Berufserfahrung des Befragten wurde notiert, aber nicht bei der Auswahl der ExpertInnen berücksichtigt. Tabelle 2 fasst zusammen, welche Wasserstraßen und Abz befragt wurden.

Tabelle 2: Stichprobenplan mit Auswahlkriterien

Instandhaltungszustand	Ausbau erfolgt	Ausbau nicht erfolgt
Wasserstraßenkategorie		
A	Dortmund-Ems-Kanal (DEK), Nord Wesel-Datteln-Kanal (WDK)	Dortmund-Ems-Kanal (DEK), Süd Nord-Ostsee-Kanal (NOK)
C	Küstenkanal (KüK) Silokanal (SiK) Sacrow-Panitzer-Kanal (SPK)	Havel-Oder-Wasserstraße (HOW) Stichkanal Hildesheim (SKH)

Vor den eigentlichen Interviews wird ein Fragebogen an die ExpertInnen gesendet. Dieser dient dazu, Details zur Wasserstraße abzufragen, die von den ExpertInnen vorbereitet und vor dem eigentlichen Interview beantwortet werden sollen. Weiterhin werden über eine semiquantitative Skala die Häufigkeit von unterschiedlichen Schadensursachen und Schadensbildern abgefragt. Im eigentlichen Experteninterview können im Fragebogen unklare Fragen oder Antworten ausführlicher diskutiert werden.

Für die Befragung im Experteninterview wird ein Leitfaden mit Forschungsschwerpunkten und entsprechenden Forschungsfragen verwendet. Nach dem Interview erfolgt eine gemeinsame Begehung vor Ort. Die Befragten haben die Möglichkeit, kritische oder beschädigte Bereiche zu zeigen, die im Interview besprochen wurden. Die gemeinsame Inspektion ermöglicht den Vergleich der von den ExpertInnen beschriebenen Beobachtungen mit Beobachtungen an anderen Wasserstraßen durch die Interviewende bzw. den Interviewenden.

5.4 Ergebnisse

Nachfolgend sind wesentliche Ergebnisse der Experteninterviews zusammengefasst. Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse, u. a. die Auswertung der Fragebögen sowie weitere Hinweise zur Durchführung der Interviews können auch in Sorgatz (2021) und Sorgatz, Kayser und Schüttrumpf (2018) nachvollzogen werden.

Schaden, Versagen und deren Ursachen:

Der semi-quantitative Fragebogen und die Interviews zeigen, dass schiffsinduzierte Belastungen von größter Relevanz für das Auftreten und die Entwicklung von Schäden am Deckwerk sind. Steinverlagerungen sind das am häufigsten beobachtete Schadensbild. Bei frühzeitiger Instandhaltung beeinträchtigen Steinverlagerungen die Böschungsstabilität nicht und stellen somit kein Risiko für die Zuverlässigkeit der Wasserstraße dar. Darüber hinaus deuten die Interviews darauf hin, dass der geotechnische Grenzzustand nach GBB (2010) selten überschritten wird. Einige der im Fragebogen vorgeschlagenen Schadensbilder werden in der Natur selten bis nie beobachtet.

Definition des Schadens:

Schaden ist die optisch wahrnehmbare Verlagerung von Deckwerkssteinen. Ein solches Schadensbild wird in der Regel als kritisch bewertet, sobald die Filterschicht oder, bei Konstruktionen ohne Filter, der Boden frei liegt. Dieser Zustand entspricht in etwa dem bevorzugten Eingriffszeitpunkt, der kurz vor einem Freiliegen der Filterschicht oder des Bodens liegt.

Schadensentwicklung: Im Allgemeinen schreitet ein Schaden an Schüttsteindeckwerken langsam voran. Schäden können einige Zeit beobachtet werden, bevor eine Intervention dringend erforderlich wird. Bei Wasserstraßen der Kategorie A findet eine Verschlechterung innerhalb eines Zeitraums von 5 bis 6 Jahren statt. Anschließend sollten Instandhaltungsmaßnahmen erfolgen. Für Wasserstraßen mit geringerer Verkehrsdichte, Kategorie C, sind Zeiträume von mehr als 15 Jahren für eine Schadensentwicklung möglich. Bereiche, die einmal einen Schaden aufweisen, sind eher von einer Verschlechterung betroffen. Ein qualitativ hochwertiger Einbau der Deckschicht erhöht die Langzeitstabilität. Darüber hinaus ist die Schadensentwicklung abhängig von den Geschwindigkeiten und der Fahrweise der Schiffe in Verbindung mit dem Verkehrsaufkommen. Daher könnte die bestehende Kategorisierung der Wasserstraßen als Grundlage für die Planung von Instandhaltungsmaßnahmen herangezogen werden.

Monitoring, Wartung und Dokumentation: Die Instandhaltung funktioniert in den Abz gut mit Hilfe der dort vorhandenen standortspezifischen Erfahrungen. Maßnahmen bis etwa 50 t werden in Regiearbeit von den Abz durchgeführt. Eine systematische und objektive Überwachung von Uferböschungen erfolgt derzeit nur auf einer sehr grundlegenden Ebene in Form von regelmäßigen Streckenaufsichtsfahrten. Darüber hinaus werden jährlich Flächenpeilungen durchgeführt. Beobachtete Schäden werden in unterschiedlicher Qualität und oft nur für den internen Gebrauch in den Abz dokumentiert. Schadens- und Instandhaltungsmaßnahmen werden selten gemeinsam dokumentiert. Eine Aussage über den Zustand des Deckwerks aus aktuellen Dokumentationen ist nur eingeschränkt und unter Berücksichtigung der standortspezifischen Randbedingungen möglich.

Klassifizierung: Das in den Experteninterviews diskutierte Klassifizierungssystem nach Kayser (2015) ist trotz Veröffentlichung in einem BAWMerkblatt (MSV 2015, 2018) kaum einem der befragten Abz bekannt oder wird gar verwendet. Einige der Abz verfügen über eigene Klassifizierungssysteme, z. B. auf Basis der eingebauten Tonnage oder einer Fotodokumentation. Grundsätzlich stimmen die Beobachtungen der ExpertInnen mit der von Kayser (2015) vorgeschlagenen Klassifizierung überein. Der angestrebte Interventionspunkt wird jedoch kurz vor S2 lokalisiert. Es wird daher empfohlen, einen zusätzlichen Zustand oder Zwischenzu-

stand zwischen S1 und S2 einzuführen. Dies würde die Anwendbarkeit der Klassifizierung in der Praxis erhöhen.

Für weitergehende Betrachtungen wird das in Abbildung 7 vorgeschlagene Klassifizierungssystem verwendet. Es unterscheidet optisch zwischen vier Schadensklassen. In Schadensklasse S1 wird eine Schicht Deckwerkssteine erodiert. Schadensklasse S2 ist zur besseren Differenzierbarkeit in zwei Unterklassen unterteilt. In Schadensklasse S2.1 sind einige Deckwerkssteine verlagert. Der Filter liegt fast frei. Hier sollten Instandhaltungsmaßnahmen zeitnah angedacht werden. In Schadensklasse S2.2 liegt der Filter frei. In Schadensklasse S3 wurde der Filter zerstört. Schließlich ist der Boden der hydraulischen Belastung ausgesetzt (S4).

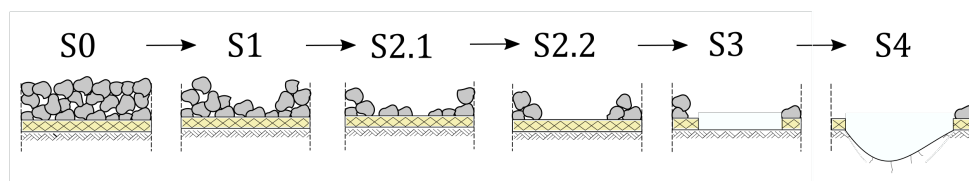


Abbildung 7: System zur Schadensklassifikation nach Sorgatz, Kayser und Schüttrumpf, 2018

5.5 Diskussion

Experteninterviews können zu einem besseren Prozessverständnis beitragen. Es können Arbeitsabläufe vor Ort erfasst und darauf basierend Forschungsfragen präzisiert, Modellversuche und Felduntersuchungen begründet und eng an die Forschungsfrage angepasst werden.

Andererseits kann die „Feststellung der Wahrheit“ auf Basis von Experteninterviews herausfordernd sein, handelt es sich doch um eine wissenschaftliche Methode, die sich auf die Kenntnis der/des Einzelnen stützt. Meuser und Nagel (1991) empfehlen daher eine Methode namens *cross checking*, einen Vergleich von Aussagen verschiedener Befragter während der Datenauswertung. Darüber hinaus bestehen bei Experteninterviews die gleichen Schwierigkeiten wie bei jeder qualitativen (explorativen) Methode der Datenerhebung: Die Qualifikation und Fähigkeiten des Interviewers oder der Interviewerin, seine/ihre Interviewtechnik sowie die Spontaneität und Beziehungsdynamik im Gespräch beeinflussen die Qualität der Ergebnisse stark (Hopf 1978; Pfadenhauer 2009).

Im Falle der vorgestellten Interviews wird zudem davon ausgegangen, dass sich die Qualität der Interviews mit zunehmender Anzahl der durchgeführten Interviews verbessert. Auf der anderen Seite ist zu beachten, dass die ersten Interviews in einem Tandem aus einem erfahrenen und einem weniger erfahrenen Interviewer geführt wurden. Darüber hinaus sind Bedingungen an den Intervieworten unterschiedlich. Während sich bei Wasserstraßen der Kategorie C die verfügbaren Instandhaltungsmaßnahmen in der Regel auf das Nachlegen von Wasserbausteinen beschränken, sind bei Wasserstraßen der Kategorie A öffentliche Ausschreibungen für umfangreichere Instandhaltungsmaßnahmen Standard. In Verbindung mit unterschiedlichem Verkehrsaufkommen (mäßig oder stark) kann dies zu den folgenden Problemen führen, die bei der Interpretation der Interviews und Fragebögen möglicherweise nicht vollständig berücksichtigt werden konnten:

- Aufgrund unterschiedlicher Deckwerkskonstruktionen und Deckwerkszustände bewerten die Befragten die Bedeutung eines bestimmten Schadens hinsichtlich eines Versagens von Deckwerk und Böschung unterschiedlich.
- Unterschiedliche geotechnische Randbedingungen wie lokale Schluffschichten oder sehr sandige Böden erhöhen die Wahrscheinlichkeit bestimmter Versagensmechanismen. Beispielsweise kann in Gebieten mit überwiegend sandigen Böden das Fehlen einer Filterschicht die Bodenerosion fördern. Schluffige Schichten sind hingegen anfälliger für Böschungsrutschungen.
- Die unterschiedliche Herangehensweise bei der Instandhaltung in Kombination mit einer unterschiedlichen Personalausstattung führt auch zu Unterschieden bei der Planung von Instandhaltungsmaßnahmen.

5.6 Fazit

Trotz der oben genannten Einschränkungen lassen sich aus den Experteninterviews einige allgemeine Schlussfolgerungen ableiten. Die vorgestellten Experteninterviews ermöglichen ein besseres Verständnis der aktuellen Instandhaltungsverfahren in den Außenbezirken.

Schiffsinduzierte Belastungen und je nach Lage und Zustand der Wasserstraße auch Vandalismus und Packeis werden als Hauptschadensursachen identifiziert. Das bedeutendste Schadensbild ist die Verschiebung von Einzelsteinen. Im Allgemeinen schreitet die Beschädigung von Deckwerkschäden nur langsam voran. Oft können Schäden über Jahre beobachtet werden, bevor ein Eingriff dringend erforderlich wird. Wenn Filterschicht oder Boden freigelegt werden, steigt die Schädigungsrate rasch an. Größere und umfangreichere Erhaltungsmaßnahmen sind in kurzer Zeit erforderlich. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass vorhandene Schadens- bzw. Instandhaltungsdokumentationen derzeit nicht für vergleichende Langzeitanalysen von Deckwerkszuständen herangezogen werden können, da sie sich im Falle des überhaupt Dokumentationen existieren, im Detail und in der Zielsetzung unterscheiden.

Es kann gefolgert werden, dass die Gleichungen der hydraulischen Bemessung eher eine Ermüdung und nicht den Grenzzustand der Tragfähigkeit beschreiben. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit sind die Funktionalitäten der Deckschicht, der Schutz gegen Bodenerosion und lokales Böschungsversagen, nicht mehr erfüllt. Es gibt derzeit keine Grenzzustandsfunktionen, die diese Bedingung beschreiben. Für die Festlegung einer Grenzzustandsfunktion unter Berücksichtigung des Schadensverlaufs sind weitere Untersuchungen erforderlich. Die bei der geotechnischen Bemessung berücksichtigten Grenzzustände beziehen sich hingegen auf einen Grenzzustand der Tragfähigkeit. Eine Überschreitung der Grenzzustandsfunktion könnte ein lokales Böschungsversagen herbeiführen.

Wenn in Zukunft eine Vorhersage der Schäden und ihrer Entwicklung erfolgen soll, ist die Langzeitbeobachtung des Schadensverlaufs unerlässlich. Neue Methoden der Datenerhebung für eine vergleichbare Schadens- und Erhaltungsdokumentation sollten etabliert werden. Dies kann aus Gründen der Wirtschaftlichkeit jedoch nur durch eine verstärkte Automatisierung des Dokumentationsprozesses erreicht werden. Beispielsweise könnte ein Datenbanksystem bei der Schadensmeldung

helfen. Es ermöglicht die Erfassung wesentlicher Informationen über Schäden und damit verbundene Reparaturmaßnahmen einschließlich einer Fotodokumentation direkt vor Ort. Eine Zusammenfassung der jährlichen Instandhaltungskosten kann die regelmäßigen Zustandsbeurteilungen ergänzen und dadurch bei der Identifizierung kritischer Infrastrukturen helfen.

6 Modellversuche in der Wellengrube

6.1 Einleitung

Aus den Experteninterviews lässt sich ableiten, dass insbesondere Steinverlagerungen bei der Planung von Instandhaltungsmaßnahmen an deutschen Binnenwasserstraßen mit technischen Ufersicherungen berücksichtigt werden müssen. Eine Steinverlagerung führt nicht zum sofortigen Versagen der Böschung, ist gut erkennbar und leicht zu reparieren. Insbesondere für kleinere Wasserstraßen mit geringer Verkehrsdichte könnte daher ein Bemessungskonzept angewendet werden, das Schäden bis zu einem gewissen Grad zulässt. Aber auch wenn mäßige Schäden zugelassen werden, stehen die Grenzen der Sicherheit oder eine Änderung der Gefährdungssituation nicht zur Diskussion. Zu diesem Zweck ist es wichtig, die Schadensentwicklung einer Ufersicherung zu verstehen und gegebenenfalls zukünftig mit Hilfe mathematischer Modelle zu prognostizieren. Mit den nachfolgend vorgestellten Modellversuchen wird primär der Prozess der Schadensentwicklung erläutert. Eine detaillierte Darstellung der Versuche sowie weitere Ergebnisse (z. B. Modellvergleiche) findet sich in Sorgatz, Letzelter et al. (no date).

6.2 Versuchsaufbau

In einem Wellenbecken der Größe $8\text{ m} \times 14\text{ m} \times 6\text{ m}$ ($B \times L \times T$) wurde ein 1:1 - Modell einer Ufersicherung nach den derzeit gültigen Standards (GBB 2010; MAR 2008) errichtet. Die Böschungsneigung beträgt 1:3. Das Böschungsmaterial ist ein mittelsandiger Feinsand mit einer hydraulischen Durchlässigkeit von $k_f \approx 1 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$. Der Sand wurde in Schichten von 0.20 m eingebaut und verdichtet. Die Verdichtung bzw. die Lagerungsdichte wurde während des Einbaus sowohl mit einem dynamischen Lastplattenversuch als auch mit Densitometerversuchen kontrolliert. Der Zweistufen-Kornfilter hat eine Dicke von $2 \times 0.15\text{ m}$ und ist durch eine Deckschicht aus losen Schüttsteinen der Längensklasse CP45/125 (TLW 2003) gesichert. Abbildung 8 zeigt die Wellengrube während des Einbaus und kurz vor einem Versuch. Ein Quer- und Längsschnitt der Wellengrube sind in Abbildung 9 dargestellt.

Wird ein Modell skaliert, treten Maßstabeffekte auf. Diese sind insbesondere bei Wasser-Ufer-Interaktionen nicht zu vernachlässigen, da sie das Brechverhalten der Wellen beeinflussen (Heller 2011; Kobus 1984). Bei den vorliegenden Modellversuch handelt es sich um ein Modell im Maßstab 1:1, welches jedoch den Nachteil hat, dass die Versuchsanlage es nicht zulässt, das Wellen- und Strömungsbild der Wasserstraße exakt abzubilden. Eine Schiffspassage verursacht am Ufer einer Wasserstraße ein komplexes Belastungsmuster aus verschiedenen Wellen, die schräg auf das Ufer

auflaufen, und aus Strömungen. Untersuchungen zum Verhalten des Deckwerks gegenüber schiffsinduzierten Belastungen unter Berücksichtigung aller Einflüsse sind bisher nur in Naturmessungen möglich, welche wiederum andere Nachteile mit sich bringen. Im Rahmen dieser Versuche wird die Böschung mit möglichst regelmäßigen, senkrecht auf die Böschung auflaufenden Wellen belastet (s. auch Abschnitt 6.3).



Abbildung 8: Impressionen zur Errichtung des Modellversuchs (Fotos: Sorgatz)

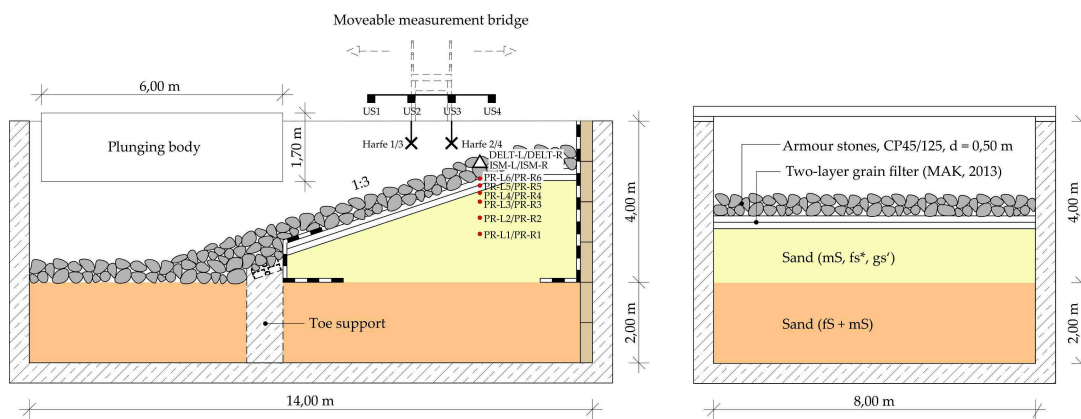


Abbildung 9: Aufbau der Wellengrube in Quer- und Längsschnitt

Die Wellenhöhen werden unter anderem mit vier kapazitiven Wellenhöhenaufnehmern (Harfe) in zwei Querschnitten erfasst. Strömungen werden in zwei Querschnitten an der Oberfläche des Deckwerks mit jeweils zwei elektromagnetischen (DELT) und induktiven Strömungsaufnehmern (ISM) erfasst. Beide Sondentypen messen in X- und Y-Richtung. Der Porenwasserdruck im Boden wird von zwölf Absolutdruckaufnehmern (PR) gemessen, die in zwei Querschnitten in unterschiedlichen Tiefen im Boden installiert sind (vgl. auch Abbildung 9, rechts). Die Druckaufnehmer dienen primär der Überwachung, um ein Böschungsversagen aufgrund von Porenwasserüberdrücken auszuschließen. Zwei dieser Druckaufnehmer liegen außerdem unmittelbar unterhalb der Filterschicht und erlauben so auch einen Rückschluss auf die Wellenhöhe. Ausgewählte Messaufnehmer sind in Abbildung 10 dargestellt.

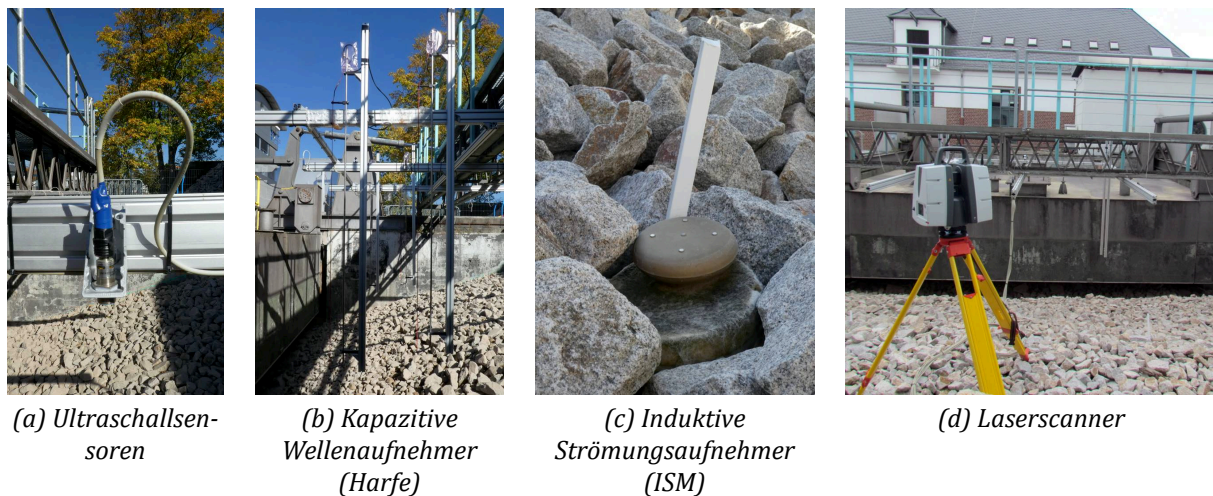


Abbildung 10: Instrumentierung in der Wellengrube (Fotos: Sorgatz)

6.3 Durchführung

Insgesamt wurden zwei Versuchsreihen mit mehreren Einzelmessungen durchgeführt (vgl. Tabelle 3). In einem Versuch wird die Böschung mit kontinuierlich aufeinanderfolgenden Wellen belastet. Eine Hubbewegung des Tauchkörpers führt zu einer Welle und einer Rückströmung des Wassers nach dem Brechen der Welle an der Böschung. Insgesamt werden 50 regelmäßige Wellen durch 50 schnelle, regelmäßige Hubbewegungen des Tauchkörpers erzeugt. Im Anschluss an die Wellenbelastung wird das Wasser aus der Wellengrube abgelassen und die Wellengrube wird aus mehreren Perspektiven mit einem Laserscanner aufgenommen. Das Prozedere, Wellen aufgeben, Wasser ablassen und Deckwerk scannen, wird mehrmals wiederholt, um einen Schädigungsverlauf zu beobachten.

Der Scanner erzeugt eine dreidimensionale Punktwolke von Deckwerk und Wellengrube. Die insgesamt vier unterschiedlichen Standpunkte des Scanners helfen, verdeckte Kanten der Deckwerksteine zu erfassen. Über ein lokales Koordinatensystem, welches über Passpunkte um die Wellengrube herum angelegt wurde, können mehrere Aufnahmen des Laserscanners überlagert und anschließend Bereiche mit Steinverlagerungen in einem Höhendifferenzenmodell identifiziert werden. Der Fehler bei der Referenzierung der Einzelaufnahmen ist kleiner 9 mm.

Die Höhendifferenzen werden zwischen der Referenzwolke (siehe Tabelle 3, Nullmessung) und jeder Messung innerhalb einer Testreihe berechnet. Bei der Nachbearbeitung wird die Punktwolkendichte reduziert, um einerseits eine homogene Punktwolkendichte über das gesamte Modell zu erhalten und andererseits den Rechenaufwand zu reduzieren. Um einen qualitativ hochwertigen Vergleich zwischen den Punktwolken zu erreichen, wird die Referenzpunktwolke (ursprüngliche Deckschichtbedingungen) auf 50 % der ursprünglichen Punktwolkendichte reduziert, während die Aufnahmen nach den Messungen auf 35 % der ursprünglichen Punktwolkendichte reduziert werden. Anschließend werden die Höhendifferenzen aufgeteilt in x-, y- und z-Komponenten mit der Software CloudCompare (CloudCompare 2018) ermittelt. Die resultierenden „Differenzwolken“ zeigen

die Steinverlagerungen in positiver und negativer z-Richtung an der Deckwerksoberfläche. Die Ergebnisse werden anschließend auf ein Raster der Größe $0.100\text{ m} \times 0.100\text{ m}$ projiziert.

Die Wellen- und Strömungslasten werden mit Hilfe eines kleinen Programms in Python aus den kontinuierlichen Messreihen ermittelt. Die mittlere Wellenhöhe und mittlere Strömungsgeschwindigkeit ergeben sich aus den Mittelwerten der einzelnen Spitzenereignisse zusammengefasst für einen Aufnehmertyp, z. B. jeweils für Harfen und ISM. Bei den Strömungsgeschwindigkeiten erfolgt keine Unterscheidung in X- und Y-Richtung, da sich diese zumindest in ihren Mittelwerten kaum unterscheiden. Die Strömungsverhältnisse unmittelbar über dem Deckwerk können daher auch als turbulent beschrieben werden.

Tabelle 3: Übersicht der Versuche in der Wellengrube

	Bezeichnung	Wellenbelastung	Mittlere Wellenhöhe in m	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit in m s^{-1}	Laserscanner-Aufnahme	Bemerkung
Reihe 1	Wellengrube 0/18	–	–	–	31.07.2018	Nullmessung
	Wellengrube 1/18	07.08.2018	0.25	2.60	09.08.2018	–
	Wellengrube 2/18	26.09.2018	0.21	2.23	04.10.2018	–
	Wellengrube 3/18	10.10.2018	0.23	2.50	12.10.2018	–
	Wellengrube 4/18	23.10.2018	0.23	2.71	05.11.2018	–
Reihe 2	Wellengrube 0/19	–	–	–	06.05.2019	Nullmessung
	Wellengrube 1/19	29.05.2019	0.21	1.99	03.06.2019	–
	Wellengrube 2/19	06.06.2019	0.23	2.30	13.06.2019	–
	Wellengrube 3/19	19.06.2019	0.20	2.17	26.06.2019	–
	Wellengrube 4/19	10.07.2019	0.21	1.54	11.07.2019	–
	Wellengrube 5/19	17.07.2019	0.24	1.75	18.07.2019	–
	Wellengrube 6/19	24.07.2019	0.21	2.07	26.07.2019	–
	Wellengrube 7/19	14.08.2019	0.23	1.53	16.08.2019	–

6.4 Ergebnisse

6.4.1 Wellen- und Strömungsbelastung

In diesem Abschnitt werden einzelne Messungen exemplarisch genauer betrachtet. Es handelt sich hierbei um eine repräsentative Datenauswahl. Viele Messgrößen wurden redundant erfasst. Es werden daher nur Ergebnisse ausgewählter Instrumente dargestellt, welche jedoch durch die zusätzliche Instrumentierung plausibilisiert wurden.

Im Wellenbecken kann eine maximale Wellenhöhe von etwa 0.40 m erzeugt werden. Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten, die im Wellenbecken bei dieser Wellenhöhe gemessen werden, liegen in der Regel zwischen 2.00 m s^{-1} und 3.00 m s^{-1} , mit gelegentlichen Spitzen von 4.50 m s^{-1} . Folgt man den Bemessungsvorgaben nach GBB (2010) können bei einer Wellenhöhe $H \geq 0.30\text{ m}$ Steinverlagerungen auftreten. Darüber hinaus können Steinverlagerungen aus Strömungsgeschwindigkeiten $v \geq 1.40\text{ m s}^{-1}$ resultieren.

In Abbildung 11 ist die Dichteverteilung der Maxima der Wellenhöhen im linken und rechten Querschnitt beispielhaft für zwei Messungen dargestellt. Die mittlere Wellenhöhe liegt etwa zwischen

0.20 m und 0.30 m. Die beiden Grafiken illustrieren insbesondere durch die stark variierende Streubreite der Wellenhöhen, dass tendenziell auf der linken Seite der Wellengrube größere Wellenhöhen gemessen wurden. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Belastung an diesen ausgewählten Bereichen der Böschung zwischen den einzelnen Versuchen nur bedingt vergleichbar ist. Wurden beim Versuch *Wellengrube 1/18* an beiden Seiten insgesamt ähnliche Wellenhöhen gemessen, zeigen die Ergebnisse von Versuch *Wellengrube 2/18* eine größere Anzahl höherer Wellen für Harfe 1 und Harfe 2, also im linken Bereich der Böschung.

Die Ergebnisse erlauben zunächst keine Rückschlüsse auf die Ursachen des veränderten Wellenbilds. Denkbar wären geringe Abweichungen in der Position der Messbrücke, aber auch die stärkere Schädigung des Deckwerks auf der linken Seite (vgl. auch Abschnitt 6.4.2).

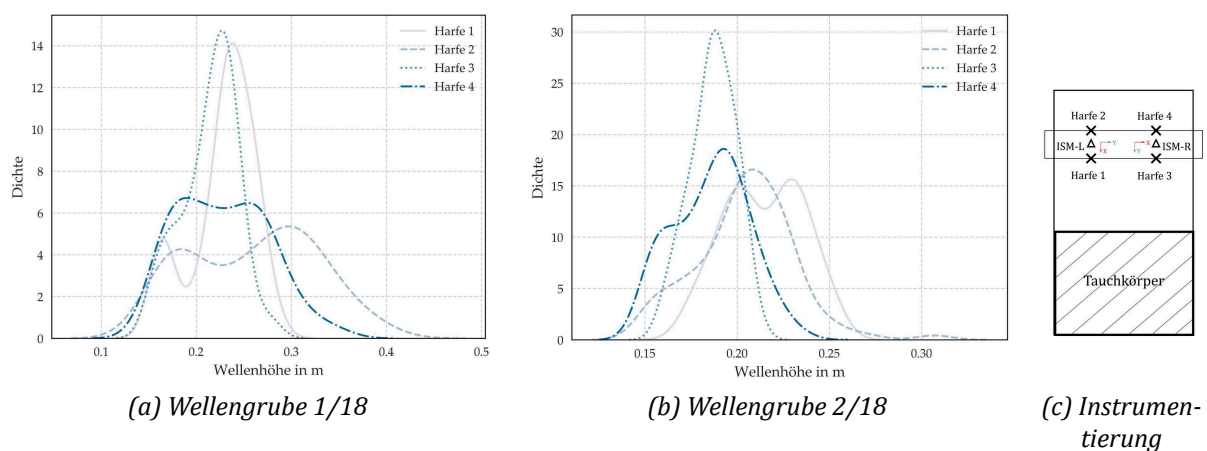


Abbildung 11: Dichteverteilung der maximalen Wellenhöhen am Beispiel zweier Versuchsdurchläufe in der Wellengrube

Abbildung 12 zeigt einen Dichteplot der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten für die gleichen, bereits für die Wellenhöhen gezeigten Beispielmessungen. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit liegt mit Ausnahme der Messung ISM-R-X aus dem Versuch *Wellengrube 1/18* etwa zwischen 1.5 m s^{-1} bis 2.5 m s^{-1} . Hierbei gilt es zu berücksichtigen, dass die Ausrichtung der Strömungsaufnehmer nur durch die Messungen, nicht während des Einbaus überprüft werden kann. Die Ergebnisse der Messungen sind jedoch nicht eindeutig. Es wird vermutet, dass im linken Querschnitt die X-Richtung der Strömungsaufnehmer parallel zur Längsachse der Böschung, im rechten Querschnitt senkrecht zur Längsachse der Böschung verläuft. Auch hier kann beobachtet werden, dass die Strömungsgeschwindigkeiten im Versuch *Wellengrube 2/18* auf der linken Seite etwas größer als auf der rechten Seite sind. Insgesamt deuten die Messungen auf größere Verwirbelungen und Turbulenz unmittelbar oberhalb der Deckwerkssteine und eine daraus resultierende ungleichmäßige Belastung der betrachteten Längsschnitte hin. Zudem kann geschlossen werden, dass die Belastungen an ausgewählten Böschungsbereichen zwischen den einzelnen Versuchen nur bedingt vergleichbar sind. In Messung *Wellengrube 1/18* wurden beispielsweise häufiger größere Strömungsgeschwindigkeiten gemessen. Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten wurden hingegen in *Wellengrube 2/18* beobachtet.

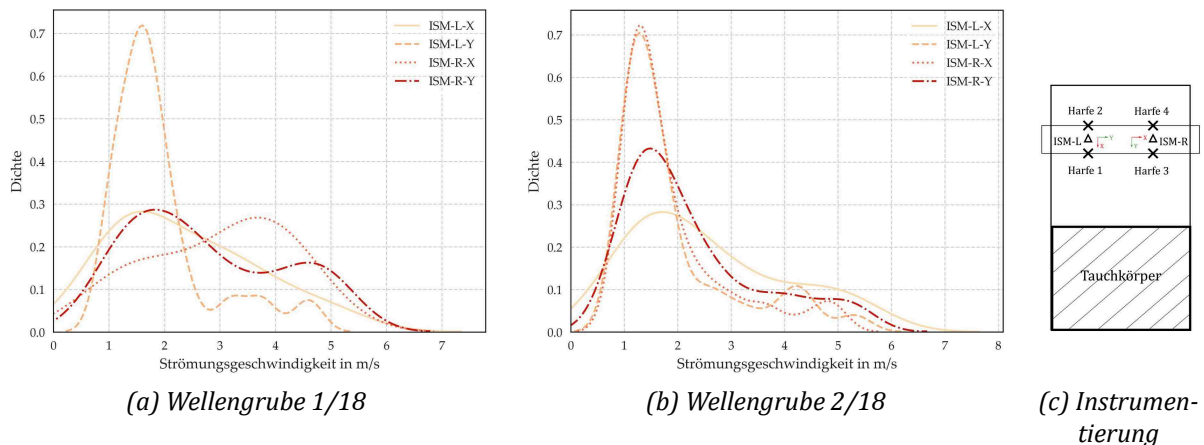


Abbildung 12: Dichteverteilung der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten am Beispiel zweier Versuchsdurchläufe in der Wellengrube

6.4.2 Deckwerkschädigung

Im Gegensatz zu konventionellen Messungen ermöglicht der Laserscanner eine räumliche und querschnittliche Analyse des Deckwerkszustandes. Die zeitliche und räumliche Schadensentwicklung über die gesamte Fläche ist in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt. In Abbildung 13 deuten die schwarz schattierten Bereiche auf Erosion hin, während die rot schattierten Bereiche eine Akkumulation von Deckwerkssteinen anzeigen. Es ist zu beobachten, dass sich die Wasserbausteine vom Wasserwechselbereich in Richtung Böschungsfuß bewegen. Die Mitte und der linke Bereich des Wellenbeckens sind stärker von Steinverlagerungen betroffen als der rechte Bereich.

Die Varianz der Erosion über die Breite des Wellenbeckens wird auch in Abbildung 14 durch die Konfidenzintervalle (schattierte Flächen) dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird für *Reihe 2* nur jeder zweite Versuch gezeigt. Beide Versuchsreihen zeigen einen ähnlichen Schadensverlauf. Außerdem zeigen die Abbildungen, dass die Oberkante der Böschung, die durch die gestrichelte Linie gekennzeichnet ist, mit jedem Belastungszyklus steiler wird und sich in Richtung Inland bewegt. Es entsteht das typische S-förmige (Schadens-)Profil.

In einem nächsten Schritt wurden die Schadens Kennzahlen entlang dreier markanter Profile ausgewertet (siehe Tabelle 4). Um die Bedeutung von Ausreißern für die Querschnittsanalysen zu reduzieren wird der Mittelwert von 10 Zellen pro Querschnitt verwendet, was im realen Modell 1 m entspricht. In Übereinstimmung mit den Definitionen der Schadenszahlen konzentrierten sich die Analysen auf den oberen schwarz gefärbten Bereich in Abbildung 13 (Wasserwechselbereich). Es handelt sich jeweils um Mittelwerte, gekennzeichnet durch \bar{m} . \bar{S} wurde durch Summierung der Tiefe \times Zelllänge über den jeweiligen Querschnitt berechnet. \bar{E} und \bar{C} wurden aus der maximalen Erosionstiefe berechnet, die in einem Bereich von $0.100 \text{ m} \times 0.100 \text{ m}$ ermittelt wurde. \bar{L} wurde aus der Differenz zwischen dem Beginn und dem Ende der Erosionszone \times Breite des Wellenbeckens berechnet.

Bei fast allen Messungen ist ein Anstieg der Schadenszahlen mit zunehmender Versuchsdauer zu

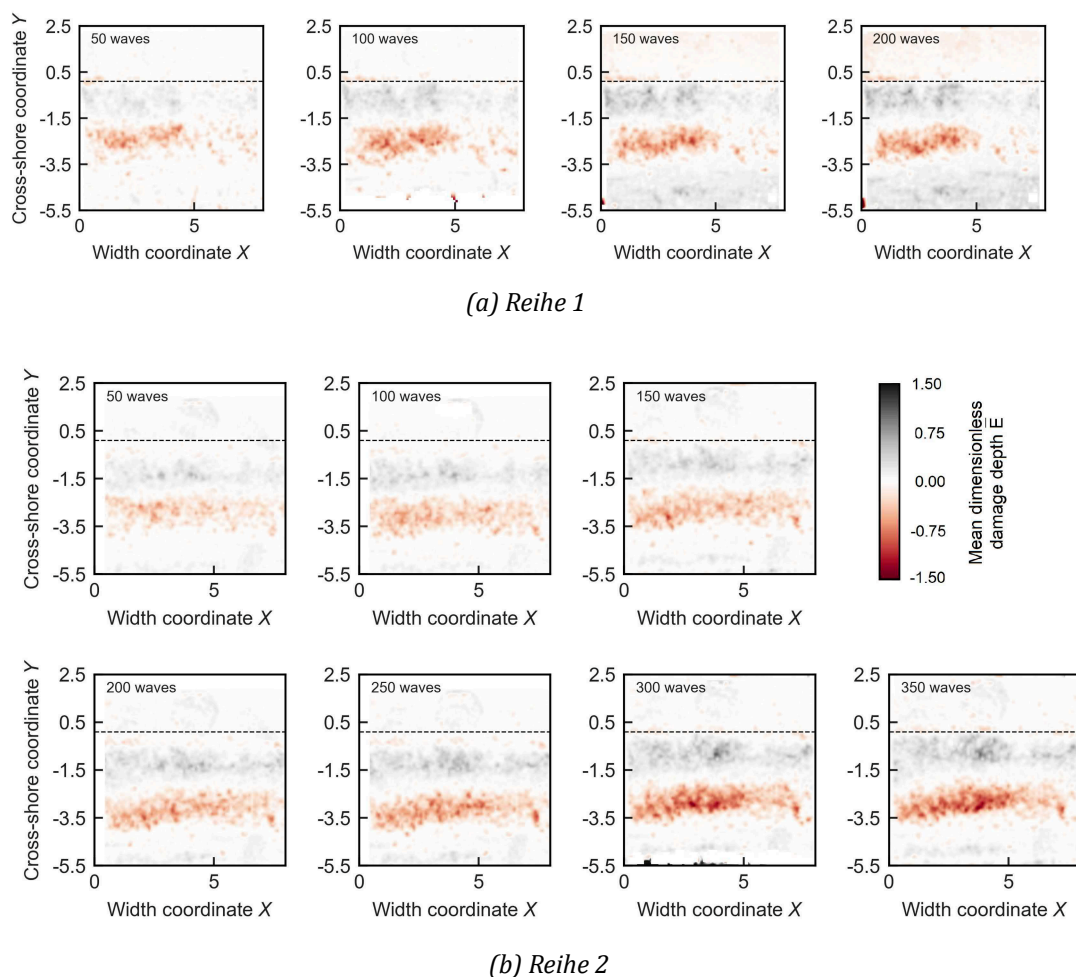


Abbildung 13: Räumliche Schadensentwicklung mit zunehmender Wellenbelastung. Der Ursprung der längs zur Böschung verlaufenden Koordinate Y ist die Wasserlinie. Die Oberkante der Böschung ist durch die gestrichelte Linie gekennzeichnet.

beobachten (s. Tabelle 4). Die berechneten \bar{S} entsprechen 5 % bis 15 % der verschobenen Wasserbausteine (Rock Manual 2007). Der Zustand des Deckwerks wird als „intermediate damage“ eingestuft (Hofland, Rosa-Santos et al. 2018; Rock Manual 2007). \bar{S} und \bar{E} sind in allen bis auf einen Fall in Reihe 2 etwas größer. Im Gegensatz dazu wird für Reihe 1 im Vergleich zu Serie 2 eine größere Variabilität der Schadenszahlen beobachtet. \bar{L} ist durch eine große Variabilität gekennzeichnet, die möglicherweise auf Schwierigkeiten bei der Bestimmung dieses Parameters zurückzuführen ist.

Wie in Abschnitt 2.2 dargelegt kann der Schadensverlauf durch verschiedene mathematische Modelle beschrieben werden. Die Anwendung der mathematischen Modelle auf die Ergebnisse der Wellenprobe, weitergehende Empfehlungen zur Verwendung der verschiedenen mathematischen Modelle sowie ein Vergleich der Versuchsergebnissen mit vorangegangenen Messungen aus der Literatur werden in Sorgatz, Letzelter et al. (no date) präsentiert.

Die mathematische Beschreibung des Schadensverlaufs zielt in der Regel auf die Vorhersage des Versagens und damit auf den Punkt, an dem ein Eingreifen dringend erforderlich wird. Betrachten wir die Vorgaben von Hofland, Rosa-Santos et al. (2018) und Rock Manual (2007), so wird in

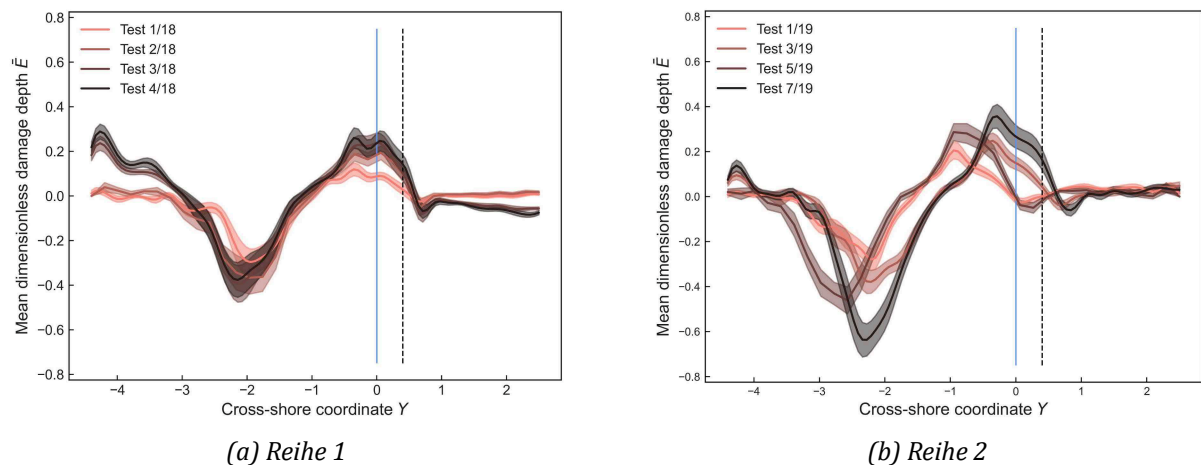


Abbildung 14: Breitengemittelte Erosionsprofile im Zeitverlauf mit Vertrauensbereichen (schattierte Flächen). Breitengemittelte Erosionsprofile im Zeitverlauf mit Vertrauensbereichen (schattierte Flächen). Der Ursprung der längs zur Böschung verlaufenden Koordinate Y ist die Wasserlinie, wie durch die durchgezogene Linie angezeigt. Die Oberkante der Böschung ist durch die gestrichelte Linie gekennzeichnet.

den vorgestellten Versuchsreihen $\bar{E} = 0.8$ erreicht, während $\bar{S} < 12$. Ein Versagen ist in diesen Untersuchungen nicht erkennbar, da die vorhandene Deckschichtdicke (ursprünglich $7.7D_{n50}$) die Filterschicht und den Boden noch vor Erosion schützt. Bei Deckwerken an Kanälen ist die erhöhte Schichtdicke eine Folge von Konstruktionsvorgaben, die die Deckwerksstabilität bei Schiffsanprall sowie Ankerwurf und UV-Strahlung sicherstellen. Diese liegen zwar in der Regel nicht beim 8-fachen D_{n50} , kann aber durchaus größer als der 2-fache D_{n50} sein. Der Vergleich der Ergebnisse aus den vorangegangenen Studien (Hofland, Rosa-Santos et al. 2018; Melby und Kobayashi 1998a; Melby und Kobayashi 1998b) zeigt, dass die Fokussierung auf \bar{S} oder \bar{E} keine vergleichbaren Informationen für verschiedene Arten von Strukturen und Konstruktionen liefert. Wenn man davon ausgeht, dass das Versagen die Exposition der Filterschicht ist, sollte das Versagenskriterium unabhängig von den Eigenschaften der Strukturen sein. So sollte \bar{C} , das die noch vorhandene Deckschichtdicke angibt, in Zukunft die Versagenskriterien ergänzen.

6.5 Diskussion

Die Modellversuche in der Wellengrube können zu einem besseren Verständnis der Schadensentwicklung beitragen. Wie bei allen Modellversuchen handelt es sich jedoch nur um eine näherungsweise Abbildung der natürlichen Bedingungen. Folgende Probleme können sich daher bei der Interpretation der Versuchsergebnisse ergeben:

- Die Wellenhöhen sind mit der bestehenden Versuchstechnik nicht genau zu kontrollieren. Zusammen mit dem fehlenden Wellenabsorber muss daher von einem unregelmäßigen Wellenbild und Turbulenzen ausgegangen werden.
- Zudem erfolgt die Messung der Wellenhöhen nur punktuell in zwei Querschnitten über eine

Tabelle 4: Schadenskenzzahlen für drei ausgewählte Querschnitte: Links (L), Mitte (M) und Rechts (R). Es handelt sich um Mittelwerte.

	Reihe	Schadenszahl \bar{S}			Schadenstiefe \bar{E}			Überdeckung \bar{C}			Erodierte Länge \bar{L}		
		L	M	R	L	M	R	L	M	R	L	M	R
Reihe 1	Test 18/1	2.12	2.35	0.48	0.27	0.30	0.15	7.48	7.47	7.59	12.01	11.63	2.31
	Test 18/2	4.12	4.70	1.31	0.47	0.48	0.24	7.34	7.33	7.50	18.62	17.70	7.04
	Test 18/3	5.43	5.13	1.33	0.61	0.53	0.26	7.23	7.28	7.49	19.86	17.24	5.96
	Test 18/4	5.49	5.93	1.57	0.62	0.60	0.26	7.22	7.24	7.48	19.09	23.09	6.54
Reihe 2	Test 19/1	2.21	3.38	1.13	0.32	0.44	0.23	7.47	7.34	7.52	15.91	29.93	16.16
	Test 19/2	2.77	3.79	1.36	0.41	0.52	0.27	7.39	7.29	7.50	15.39	13.85	NA
	Test 19/3	2.85	4.11	2.02	0.37	0.49	0.30	7.37	7.29	7.46	15.58	34.63	17.85
	Test 19/4	3.02	5.11	2.07	0.34	0.56	0.34	7.43	7.22	7.42	23.09	32.94	17.96
	Test 19/5	3.38	6.48	2.03	0.42	0.63	0.33	7.39	7.18	7.43	23.09	30.01	21.55
	Test 19/6	4.42	7.68	2.16	0.47	0.82	0.30	7.30	7.04	7.45	18.16	34.79	10.52
	Test 19/7	4.41	8.32	1.96	0.46	0.83	0.32	7.34	7.02	7.41	24.32	31.09	9.89

verschiebbare Messbrücke. Auch wenn über Markierungen versucht wurde sowohl Wasserstand als auch Position der Messaufnehmer in allen Versuchen anzugleichen, ist von leichten Abweichungen der Aufnehmerpositionen zwischen den einzelnen Versuchen auszugehen.

- Eine Schiffspassage verursacht ein komplexes Belastungsmuster von Wellen und Strömungen am Ufer einer Wasserstraße. Abhängig von der Querschnittsfläche, den vorbeifahrenden Schiffen, ihrer Geometrie und Geschwindigkeit liegt die Wellenperiode einer Schiffspassage zwischen 1 s und 300 s. Im Rahmen dieser Studie konnte diese große Bandbreite an Wellenperioden und das komplexe schiffsinduzierte Wellenmuster nicht untersucht werden. Da jedoch kurzperiodische Wellen für die Stabilität des Deckwerks am kritischsten sind (Melby und Kobayashi 1998a), stellen die vorgestellten Untersuchungen ein Worst-Case-Szenario dar.
- Betrachtet man die mittleren Lasten auf dem Deckwerk im Vergleich zu den Bemessungskennwerten wird deutlich, dass die Steinverlagerung mit großer Wahrscheinlichkeit primär aus den hohen Strömungsgeschwindigkeiten nach dem Brechen der Welle resultiert. Dieses Belastungsszenario entspricht eher einer Ufersicherung im Bereich des Küstenschutzes. Mit den bisherigen Analysen kann nicht eindeutig geklärt werden, inwiefern die Versuchsergebnisse auch auf die Wasserstraße übertragbar sind.
- Die Untersuchungen zur Schadensentwicklung zielten initial auch auf die Vorhersage des Versagens und damit auf den Punkt, an dem ein Eingreifen dringend erforderlich wird, ab. Ein Versagen ist bei den hier vorgestellten Untersuchungen allerdings noch nicht erkennbar, da die vorhandene Deckschichtdicke (ursprünglich $7.7D_{n50}$) die Filterschicht und den Boden noch vor Erosion schützt. Die hier vorgestellten Versuche lassen daher keine Schlussfolgerungen zum Übergang von Schaden zu Versagen zu.

6.6 Fazit

Eine erste Auswertung der Versuchsergebnisse deutet darauf hin, dass sich bei großer Wellen- oder Strömungsbelastung die Deckwerkssteine aus dem Wasserwechselbereich zum Böschungsfuß hin

verlagern. Die Oberkante der Böschung steilt sich leicht auf und es entsteht ein S-Profil. Mit zunehmender Belastungsdauer scheint die Schädigungsrate abzunehmen. Diese Beobachtung entspricht den gängigen Modellvorstellungen in der Literatur und gilt wie durch die Experteninterviews bestätigt natürlich nur bis die Filterschicht frei liegt.

Die Beurteilung des Schadensverlaufs durch Laserscans zeigt zufriedenstellende Ergebnisse. Auch die Anwendung auf das Modell im Maßstab 1:1, das sich im Freien befindet und anderen Einflüssen ausgesetzt ist als ein physikalisches Modell in Versuchshallen, kann als erfolgreich angesehen werden. Im Vergleich zu älteren Ergebnissen, z. B. von Melby und Kobayashi (1998a) und Melby und Kobayashi (1998b), kann von einer höheren Genauigkeit der Ergebnisse ausgegangen werden, insbesondere im Hinblick auf die Parameter \bar{E} und \bar{C} .

Ein Nachteil von Laserscannern ist die Tatsache, dass sie nur oberhalb des Wasserspiegels scannen können. In der Praxis ist die Anwendung daher für Deckwerke im Tidenbereich denkbar, während sie bei der Beurteilung von Kanälen mit konstantem Wasserstand eine Herausforderung darstellt. Hier kann \bar{L} bzw. die Verschiebung der Böschungsoberkante in Richtung Landseite eine Kennzahl zur Charakterisierung der Schadensschwere darstellen. Hierzu sind jedoch weitere Analysen erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Beschreibung der Schadensentwicklung zunächst vereinfacht anhand des optischen Klassifikationsmodell nach Kayser (2015) und Sorgatz, Kayser und Schüttrumpf (2018) (s. Abbildung 7) weiter untersucht.

Weitergehende Studien müssen zeigen, inwiefern die Beobachtungen aus der Wellengrube auf die Wasserstraße übertragbar sind. Beispielsweise kann mit Hilfe von Zuverlässigkeitsanalysen überprüft werden, zu welchen Anteilen die unterschiedlichen Einwirkungen zum Versagen beitragen. Auch ist mit weiteren Untersuchungen zu prüfen, welchen Einfluss die Steinverlagerungen auf die lokale Standsicherheit der Böschung hat. So wäre es beispielsweise denkbar, dass die Umverteilung der Steine zum Böschungsfuß hin ähnlich wie eine Fußsicherung zu einer Erhöhung der lokalen Standsicherheit der Böschung beiträgt.

7 Datenerfassung in der Natur

7.1 Einleitung

Das aktuelle Bemessungskonzept (GBB 2010; MAR 2008) basiert auf einer Bemessungsschiffahrt, dessen Bemessungsgeschwindigkeit mit 97 % der kritischen Schiffsgeschwindigkeit definiert ist. Die Schiffsposition basiert auf der ungünstigsten Position eines voll beladenen Schiffes nahe dem Ufer. Das Schiff passiert das Ufer gemäß den „Richtlinien für Regelquerschnitte von Binnenschiffahrtskanälen“ (BMVBS 2011) in einem T-Profil am Rande der Fahrspur ca. 1 m über dem Böschungsfuß (MAR 2008). Vorhandene Verkehrsbeobachtungen (IBS 2006, 2007a,b, 2008a,b, 2015, 2016) und auch die Experteninterviews lassen vermuten, dass die eingangs beschriebenen Annahmen eine konservative Abschätzung des tatsächlichen Fahrverhaltens sind.

Nicht allein um das in Kapitel 8 beschriebene (Neu-)Bewertungsmodell anwenden zu können

wurden daher Daten über den tatsächlichen Verkehr an der jeweiligen Wasserstraße gesammelt. Auch Annahmen im bestehenden Bemessungsmodell können mit Hilfe von Verkehrsbeobachtungen plausibilisiert und erweitert werden. Dieses Kapitel fasst die Datenerhebung, wie sie derzeit im Feld stattfindet, kurz zusammen. Anschließend werden vier Beispieldatensätze vorgestellt, welche in den nachfolgend präsentierten probabilistischen Bemessung genutzt werden. Die Qualität der vorhandenen Daten wird kurz bewertet. Das Kapitel schließt mit einem Konzept zur langfristigen Erfassung von Naturdaten.

7.2 Derzeitige Methoden

Während wenige Untersuchungen des Verkehrsflusses existieren, z. B. Biles et al. (2004), Fischer et al. (2014) und Xiao et al. (2015), werden die tatsächlichen hydraulischen Belastungen einer Schiffspassage, d. h. Wellen und Strömungen, oder Parameter einer Schiffspassage, d. h. Uferabstand und Schiffsgeschwindigkeit, selten beobachtet oder veröffentlicht. Zunächst muss unterschieden werden zwischen Verkehrsbeobachtungen, bei denen der „durchschnittliche“ Verkehr erfasst wird, und Fahrversuchen, bei denen ausgewählte Schiffe verschiedener Schiffsklassen angewiesen werden, in einem definierten Uferabstand und mit einer definierten Geschwindigkeit zu fahren. Üblicherweise werden Messungen der hydraulischen Lasten während der Fahrversuche durchgeführt, da sie definierte Randbedingungen für die Erweiterung bestehender Bemessungsstandards liefern. Tatsächliche Verkehrsbeobachtungen werden in der Regel nur für individuelle, standortspezifische Studien durchgeführt, die üblicherweise mit einer Bewertung oder Bemessung eines Deckwerks in Zusammenhang stehen. Diese Arbeit konzentriert sich auf die Analyse von Verkehrsbeobachtungen.

Bis dato durchgeführte Messkampagne dauern in der Regel ein bis zwei Wochen, in denen alle Schiffe, die den Beobachtungsort passieren, registriert werden. Die Messwerte umfassen in der Regel die Abmessungen und den Tiefgang des Schiffes, die Schiffsgeschwindigkeit, den Uferabstand sowie daraus resultierende Wasserspiegelschwankungen und Strömungsgeschwindigkeiten. Schiffsgeschwindigkeit, Schiffsabmessungen, Schiffstyp und Uferabstand werden mit Laser oder Radar, aus Bildsequenzen oder dem Automatic Identification System (AIS) ermittelt. Darüber hinaus können an den Schleusen zusätzliche Informationen zu den Schiffen abgefragt werden. Die Wellenhöhen werden durch Drucksonden (absolut oder relativ) in mindestens zwei verschiedenen Höhen erfasst. Schiffsinduzierte Strömungsgeschwindigkeiten werden in mindestens zwei Richtungen mit akustischen Doppler-Velocimetern (ADCP) oder elektromechanischen Strommessgeräten (induktiv oder elektromagnetisch) gemessen. Abbildung 15a zeigt einen Querschnitt mit der üblichen Instrumentierung. Es ist jedoch anzumerken, dass sich die Aufnehmer und Position der Aufnehmer zwischen den verschiedenen Kampagnen leicht unterscheiden.

Aus den gemessenen Wasserspiegelschwankungen und Strömungsgeschwindigkeiten werden für jede Schiffspassage schiffsinduzierte Belastungen, Wellen, Strömungen und Absunkparameter bestimmt. Dieser Vorgang wird in Abbildung 15b für das Beispiel der Wellenhöhen an Bug und Heck. Für jedes Wellenereignis werden die in der Grafik markierten Punkte von der/dem BearbeiterIn manuell ausgewählt. Daraus ergeben sich mögliche „charakteristische“ Wellen. Zum Beispiel wird

die Differenz zwischen P1 und P2 als H_{Bug} definiert; die Differenz zwischen P4 und P3 ergibt $H_{\text{u,Heck}}$. Das manuelle Verfahren kann zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, wenn der/die BearbeiterIn wechselt. Die Unsicherheiten, die sich aus diesem Verfahren ergeben, können mit den vorhandenen Daten nicht rekonstruiert werden und werden daher in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Für die Zukunft sollte eine standardisierte und automatisierte Auswertung von Feldmessungen angestrebt werden.

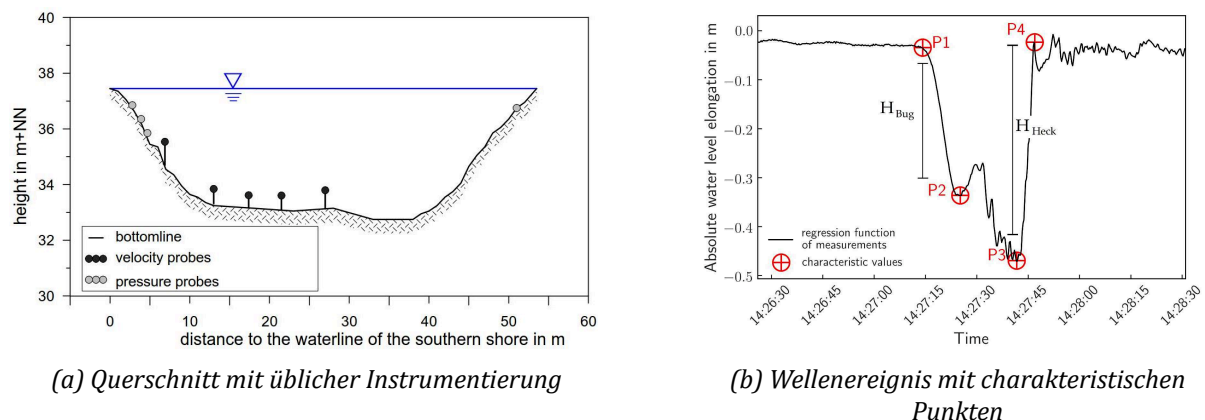


Abbildung 15: Aufbau von Verkehrsbeobachtungen am Wesel-Dattel-Kanal. Abbildungen nach IBS (2008a,b)

7.3 Beispieldatensätze

In den letzten zwanzig Jahren wurde im Auftrag der BAW eine Reihe von Messungen durchgeführt. Es wurden Verkehrsbeobachtungen und Fahrversuche durchgeführt. Gegenwärtig sind zwanzig dieser Messkampagnen für insgesamt elf Kanäle und Flüsse ausgewertet und in einer internen Datenbank gespeichert. Eine Kampagne wird in der Regel durch einen Bericht ergänzt, in dem Standort, Querschnittsprofil(e), Instrumentierung und Messwertverarbeitung skizziert werden.

Da Kanäle in der Regel durch wohldefinierte Randbedingungen gekennzeichnet sind, z. B. ganzjährig nahezu konstanter Wasserstand, keine oder kaum natürliche Strömung und eine standardisierte Querschnittsgeometrie, konzentriert sich diese Arbeit auf Kanäle. Aus statistischer Sicht handelt es sich bei der Annahme eines konstanten Wasserstands um eine Annahme, deren Einfluss auf die Berechnungen aufgrund der geringen Dauer der Messkampagnen jedoch vernachlässigbar scheint. Dies ist vorteilhaft, da die Messwerte zunächst keine Drift aufgrund von Wasserspiegelschwankungen enthalten, welcher berücksichtigt werden müsste.

Für im nächsten Abschnitt vorgestellte probabilistische Analysen werden die vier jüngsten Kampagnen, die an vier unterschiedliche Kanälen durchgeführt wurden, ausgewählt. Sie sind hinsichtlich der eingesetzten Messgeräte und der Datenauswertung am zuverlässigsten und am ehesten vergleichbar. Darüber hinaus wurden drei der vier ausgewählten Messungen im Rahmen eines Projekts zur Überprüfung des Deckwerksbestands durchgeführt. In diesem Projekt wurde eine vergleichende Bewertung der Bemessung, des Deckwerkszustandes und der Feldbeobachtungen durchgeführt (Kayser 2007a,b; Sorgatz und Soyeaux 2019). Daher sind für diese Kanalabschnitte auch

weitergehende Informationen zu Deckwerkszustand und Bemessung bekannt. Grundlegende Informationen zu den vier Wasserstraßen sind in einem Faktenblatt zusammengestellt (siehe Tabelle 5).

Eine Zusammenfassung der deskriptiven Statistiken der vier Beispieldatensätze finden Sie in Tabelle 6. Aus der Zusammenfassung in Tabelle 6 geht hervor, dass die Wiederauffüllungsströmung u_{\max} in keinem Datensatz enthalten ist. Dies mag auf die Schwierigkeiten zurückzuführen sein, u_{\max} in Feldbeobachtungen zu quantifizieren. Die Parameter für den Absink, z_a und t_a , sind nur für KuK-2015 verfügbar. Dagegen ist die Rückströmungsgeschwindigkeit v_{rueck} für KuK-2015 nicht verfügbar. Darüber hinaus wird abgeleitet, dass die größten und schnellsten Schiffe bei SiK-2007 und WDK-2007 beobachtet werden.

Die durchschnittliche Schiffsgeschwindigkeit liegt zwischen 2.41 m s^{-1} und 3.16 m s^{-1} . Der Uferabstand hängt von der verfügbaren Querschnittsfläche ab. Die Mittelwerte von $H_{u,\text{Heck}}$ liegen zwischen 0.12 m und 0.27 m ; die Standardabweichung (std) nimmt Werte von 0.08 m bis 0.14 m an, was zu einem Variationskoeffizienten (cov) zwischen 0.37 und 0.75 führt. Die Mittelwerte von v_{rueck} liegen zwischen 0.33 m s^{-1} und 0.88 m s^{-1} mit std-Werten von 0.15 m s^{-1} bis 0.27 m s^{-1} . Die entsprechenden cov-Werte variieren zwischen 0.27 bis 0.45 . Die Mittelwerte von t_a variieren innerhalb von 12.21 s bis 28.14 s mit cov zwischen 0.31 und 0.47 .

Tabelle 5: Faktenblätter zur Charakterisierung von vier Wasserstraßen, deren Messungen in den nachfolgenden Untersuchungen verwendet werden. Die Informationen basieren auf einer kurzen Zusammenfassung von Experteninterviews und entsprechenden Fragebögen (siehe Abschnitt 5), (Fotos: Sorgatz).


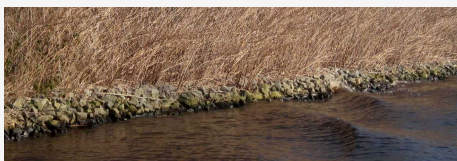


<p>Dortmund-Ems-Kanal (DEK), Nord</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kategorie A • $A = 103 \text{ m}^2$ • $b_{\text{ws}} = 35.0 \text{ m}$ • $\approx 15\,000$ Berufsschiffahrt, $\approx 1\,500$ Freizeitschiffahrt pro Jahr • Errichtung: 1921 - 1935 • Ausbau: 1965 - 1975 	<p>Der Kanal wurde teilweise ausgebaut. Die Schäden treten in regelmäßigen Abständen in den nicht ausgebauten Abschnitten auf. Schiffswellen, Absink und Packeis sind die Hauptschadensursachen. Steile Böschungen und keine Filterschicht erfordern einen strengen Instandhaltungsplan.</p>	
<p>Küstenkanal (KuK)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kategorie C • $A = 123 \text{ m}^2$ • $b_{\text{ws}} = 39.8 \text{ m}$ • $\approx 5\,000$ Berufsschiffahrt, ≈ 500 Freizeitschiffahrt pro Jahr • Errichtung: 1921 - 1935 • Ausbau: 1965 - 1975 	<p>Dieser Kanal weist erhebliche Schäden auf. Größere Steinverlagerungen sind zu beobachten. Es ist nicht klar, ob eine mangelnde Instandhaltung in der Vergangenheit oder eine unzureichende Bemessung zu Schäden geführt hat.</p>	
<p>Silokanal (SiK), Untere-Havel-Wasserstraße</p> <ul style="list-style-type: none"> • Category C • $A = 186 \text{ m}^2$ • $b_{\text{ws}} = 55.0 \text{ m}$ • ≈ 900 Berufsschiffahrt, $\approx 12\,000$ Freizeitschiffahrt pro Jahr • Errichtung: 1910 • Ausbau: 2002 - 2005 	<p>Der Kanal wurde erst kürzlich ausgebaut und ist in einem guten Zustand. Bei den Schäden handelt es sich um die Verlagerung von Einzelsteinen, hauptsächlich durch Vandalismus verursacht. Die Instandhaltung besteht aus seltenen, lokalen Maßnahmen. Sie soll naturnah erfolgen.</p>	
<p>Wesel-Datteln-Kanal (WDK)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Category A • $A = 183 \text{ m}^2$ • $b_{\text{ws}} = 55.0 \text{ m}$ • $\approx 25\,000$ Berufsschiffahrt, $\approx 1\,500$ Freizeitschiffahrt pro Jahr • Errichtung: 1930 • Ausbau: 1970 - 1989 	<p>Der Kanal ist ausreichend bemessen. Schäden sind selten. Schiffswellen und Vandalismus gelten als Hauptschadensursachen. Deckwerksveränderungen werden als ein natürlich auftretender Alterungsprozess bedingt durch Extremereignisse betrachtet.</p>	

Tabelle 6: Zusammenfassung der statistischen Kennwerte zur Beschreibung der vier Beispieldatensätze. Ein vollständiger Datensatz sollte Schiffslänge L , Schiffsbreite B , Schiffstiefgang T , Schiffsgeschwindigkeit v_s , Uferabstand d_{Ufer} , Absinkzeit am Bug $t_{a, Bug}$, Absinkzeit am Heck $t_{a, Heck}$, Absunkhöhe am Bug $z_{a, Bug}$, Absunkhöhe am Heck $z_{a, Heck}$, Bugwellenhöhe H_{Bug} , Heckwellenhöhe $H_{u, Heck}$, Sekundärwellenhöhe H_{Sek} , Rückströmungsgeschwindigkeit v_{rueck} und Wiederauffüllungsströmungsgeschwindigkeit u_{max} enthalten.

Maß	L	B	T	v_s	d_{Ufer}	$t_{a, Bug}$	$t_{a, Heck}$	$z_{a, Bug}$	$z_{a, Heck}$	H_{Bug}	$H_{u, Heck}$	H_{Sek}	v_{rueck}	u_{max}
	m	m	m	$m s^{-1}$	m	s	s	m	m	m	m	m	$m s^{-1}$	$m s^{-1}$
DEK-2006														
(km 111.100 - 111.300, 11 Juli 2006 - 25 Juli 2006)														
count	257	257	255	257	257	-	-	-	-	257	253	256	244	-
median	80.00	8.20	2.30	2.38	20.73	-	-	-	-	0.22	0.24	0.04	0.89	-
mean	75.92	8.38	1.86	2.51	20.53	-	-	-	-	0.22	0.25	0.05	0.88	-
std	12.24	0.95	0.76	0.52	2.34	-	-	-	-	0.09	0.10	0.04	0.27	-
cov	0.16	0.11	0.41	0.21	0.11	-	-	-	-	0.41	0.41	0.85	0.31	-
min	12.90	3.95	0.60	1.34	12.00	-	-	-	-	0.04	0.07	0.01	0.25	-
max	95.00	9.50	2.70	4.00	24.52	-	-	-	-	0.47	0.69	0.29	1.64	-
KuK-2015														
(km 15.960, 09 Juni 2015 - 23 Juni 2015)														
count	47	47	46	46	47	47	47	47	47	47	47	47	-	-
median	80.00	8.20	2.15	2.25	21.10	12.25	27.25	0.16	0.22	0.17	9.23	0.03	-	-
mean	76.56	8.39	1.83	2.41	21.18	12.70	28.14	0.19	0.25	0.19	0.27	0.03	-	-
std	11.07	0.91	0.65	0.43	2.34	4.63	8.81	0.09	0.11	0.09	0.14	0.03	-	-
cov	0.14	0.11	0.36	0.18	0.11	0.36	0.31	0.48	0.46	0.47	0.54	0.78	-	-
min	31.50	6.02	0.75	1.88	13.60	5.75	6.00	0.06	0.09	0.07	0.09	0.01	-	-
max	100.00	9.50	2.50	3.47	27.75	25.25	56.00	0.44	0.58	0.47	0.72	0.16	-	-
SiK-2007														
(km 58.200 - 58.400, 30 Mai 2007 - 05 Juni 2007)														
count	174	174	123	174	174	154	154	-	-	154	154	167	133	-
median	67.00	8.00	1.50	3.10	27.31	10.71	21.29	-	-	0.08	0.09	0.03	0.30	-
mean	63.26	7.38	1.43	3.16	26.97	12.21	21.74	-	-	0.10	0.12	0.04	0.33	-
std	24.33	1.74	0.52	0.67	4.55	5.58	10.22	-	-	0.07	0.09	0.03	0.15	-
cov	0.38	0.24	0.36	0.21	0.17	0.46	0.47	-	-	0.68	0.75	0.81	0.45	-
min	13.00	3.20	0.60	1.80	13.42	2.75	3.58	-	-	0.01	0.01	0.01	0.06	-
max	124.00	11.40	2.45	4.90	41.23	32.42	58.17	-	-	0.39	0.65	0.22	0.97	-
WDK-2007														
(km 33.450 - 33.800, 08 August 2007 - 22 August 2007)														
count	397	397	397	397	397	397	397	-	-	397	397	397	397	-
median	80.00	9.00	2.48	2.77	27.00	15.75	26.75	-	-	0.23	0.21	0.05	0.70	-
mean	84.82	8.88	2.25	2.83	26.71	16.30	27.90	-	-	0.23	0.23	0.06	0.71	-
std	19.76	1.18	0.56	0.40	3.55	5.49	9.56	-	-	0.07	0.08	0.02	0.19	-
cov	0.23	0.13	0.25	0.14	0.13	0.34	0.34	-	-	0.31	0.37	0.38	0.27	-
min	39.00	5.05	0.55	2.06	14.60	3.50	8.75	-	-	0.06	0.07	0.02	0.14	-
max	181.00	11.48	2.83	4.16	38.15	45.25	77.00	-	-	0.49	0.65	0.21	1.38	-

7.4 Bewertung der Datenqualität

Verkehrsbeobachtungen müssen einen repräsentativen Eindruck des lokalen Verkehrs vermitteln, wenn sie bei der Planung oder Beurteilung von Deckwerken verwendet werden. Die Gesamtzahl der Schiffspassagen auf einer Wasserstraße über einen Zeitraum von einem Jahr wird als Referenzwert oder Gesamtpopulation definiert, mit dem die Stichprobe, die begrenzte Anzahl von Verkehrsbeobachtungen, verglichen wird. Die nachfolgend vorgestellte Qualitätssicherung zielt auf eine qualitative Beurteilung der Datenerhebung im Hinblick auf die konkrete Zielanwendung ab. Vergleichbare, wenn auch differenziertere Ansätze finden sich im Bereich der Wirtschaft und Informationstechnologie (ISO/IEC 25012:2008-12 2008; ISO/IEC 25024:2015-10 2015; Sebastian-Coleman 2012), der Ökobilanzierung (Veiga et al. 2017; Weidema 1998; Weidema und Wesnæs 1996) und neuerdings auch in der Technik (Klerk et al. 2018).

Sebastian-Coleman (2012) definiert Datenqualität in Bezug auf die Erwartungen der Verbraucher basierend auf den beabsichtigten Verwendungszweck der Daten und dem damit einhergehenden wahrscheinlichen oder festgelegten Zweck der Daten. Datenqualität ist folglich der Grad, bis zu dem die Merkmale der Daten unter bestimmten Bedingungen den angegebenen und impliziten Bedürfnissen der Anwender entsprechen (ISO/IEC 25012:2008-12 2008). Es werden die folgenden Qualitätsindikatoren vorgeschlagen, die aus Weidema und Wesnæs (1996) übernommen und für eine Anwendung auf die oben vorgestellten Feldbeobachtungen modifiziert wurden:

- (1) Alle für eine Bemessung oder Bestandsbewertung von Deckwerken erforderlichen Variablen (entweder Schiffspassagen oder hydraulische Lasten) stehen in ausreichender Menge und Dichte zur Verfügung (Vollständigkeit).
- (2) Die Daten zeigen die Schiffsflotte der Bemessungssituation (Zeitliche Korrelation).
- (3) Die Daten werden für eine bestimmte Wasserstraße erhoben. Der Beobachtungsstandort wird so gewählt, dass er für die jeweilige Wasserstraße repräsentativ ist, z. B. nicht direkt in einer Kurve, in der Nähe einer Schleuse oder Anlegestelle (Geografische Korrelation).
- (4) Die Daten werden mit modernsten Messmethoden ermittelt. Dokumentation und Rohdaten liegen vor (Gültigkeit & Konsistenz).

Eine detaillierte Analyse der oben genannten Qualitätsindikatoren bezogen auf die vier Beispieldatensätze findet sich in Sorgatz (2021). Insbesondere der Aspekt der Datenvollständigkeit wird in Sorgatz (2021) eingehend diskutiert. An dieser Stelle wird lediglich darauf verwiesen, dass die Analyse der in den letzten Jahren erhobenen Daten zeigt, dass die quantitative Auswertung der Wellenhöhen und Strömungsgeschwindigkeiten stark von der/dem SachbearbeiterIn abhängt. Auch Qualität und Inhalt der Messberichte variieren zwischen den einzelnen Kampagnen. Derzeit gibt es weder einen vollständig standardisierten Messaufbau noch standardisierte Vorgaben für die Auswertung der Messungen. Die Zusammenfassung der vorhandenen Daten in Tabelle 6 zeigt, dass teilweise Messgrößen komplett fehlen (u_{\max}). Bei anderen Größen sind, wie die schwankende Anzahl an Messwerten zeigt, Lücken im Datenbestand.

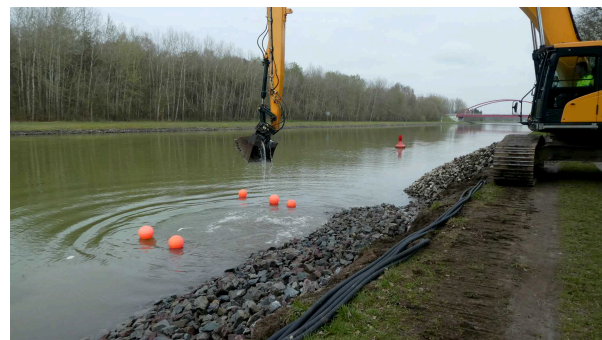
7.5 Langfristige Verkehrsbeobachtungen

Dem erforderlichen Umfang der Datenerfassung wird derzeit auch gemeinsam mit dem WSA Rheine und dem Außenbezirk Münster am Dortmund-Ems-Kanal durch die Errichtung einer Dauermessstelle nachgegangen. Ziel der Langzeitmessungen ist es u. a. die durch eine Schiffspassage verursachten Einwirkungen (Wellenhöhe, Strömungen, Absenk) an der Wasserstraße in einem statistisch repräsentativen Zeitraum zu ermitteln. Auch können die hierbei erfassten Daten in die Entwicklung von Methoden zur Automatisierung und Standardisierung von Verkehrsbeobachtungen einfließen. Gleichzeitig soll an der Dauermessstelle die Veränderung des Deckwerks über einen längeren Zeitraum gezielt beobachtet werden. Um jahreszeitlich bedingte Schwankungen des Schiffsverkehrs zu erfassen, ist zunächst ein Mindestmesszeitraum von einem Jahr angestrebt.

Um tatsächlich eine Schadensentwicklung am Deckwerk beobachten zu können, ist ein hydraulisch leicht unterdimensioniertes Deckwerk in einem definierten Streckenabschnitt von 20 m eingebaut. Dazu ist es erforderlich, die Wasserbausteine abzutragen und durch eine neue Deckschicht zu ersetzen. Die bestehende Fußeinbindung wird nicht angegriffen. Einige Eindrücke von der Versuchsstrecke sind in Abbildung 16 dargestellt.



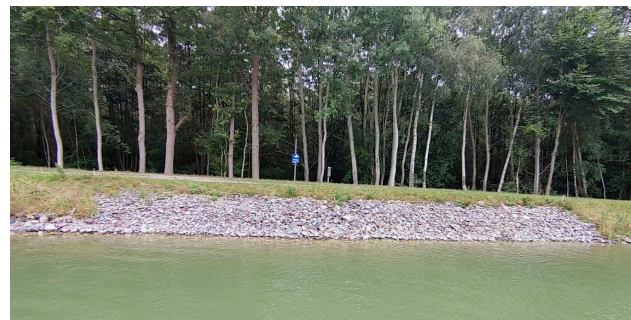
(a) Blöcke zur Befestigung der Druck- und Strömungsaufnehmer



(b) Einbau des neuen Deckwerks



(c) Versuchsstrecke nach dem Einbau



(d) Versuchsstrecke nach einem Jahr

Abbildung 16: Einrichtung und Beobachtung der Versuchsstrecke

Der Messquerschnitt besteht aus zwei Versuchsfeldern mit nahezu identischem Aufbau und Instrumentierung. Zur Messung der Wellenhöhe werden in beiden Querschnitten jeweils zwei Druckaufnehmer in verschiedenen Tiefen auf dem Deckwerk angebracht. Zur Messung der Strömungsge-

schwindigkeit werden in unterschiedlichen Tiefen Strömungsaufnehmer in einem Querschnitt auf dem Deckwerk befestigt. Des Weiteren werden in beiden Querschnitten jeweils drei Druckaufnehmer zur Erfassung des Porenwasserüberdrucks in verschiedenen Tiefen in den Boden eingebracht. Ein Ringspeichersystem erlaubt es, jeweils nur die einzelne Schiffspassage als Ereignis zu speichern. Nachfolgend werden wesentliche Konstruktionsmerkmale für den Einbau der Aufnehmer zusammengefasst.

Strömungsaufnehmer und Druckaufnehmer (Wellenhöhe):

Die Strömungs- und Druckaufnehmer im Kanal müssen stabil und dauerhaft auf dem Deckwerk befestigt werden. Dazu werden nach Abtragung der bestehenden Deckschicht Betonblöcke, welche bereits mit Lehrrohren versehen sind, auf der Filterschicht aufgestellt. Die Lage der Blöcke wird durch Nivellieren überprüft. Die Aufnehmer werden mit Hilfe von Tauchern unter Wasser installiert. Gewindestangen in den Blöcken dienen der Aufnehmerbefestigung. Die genaue Einbauhöhe der Strömungsaufnehmer wird ebenfalls durch Nivellieren ermittelt.

Druckaufnehmer (Schiffsgeschwindigkeit) und Kamera:

Die Schiffsgeschwindigkeit, Uferabstand sowie weitere Schiffparameter werden einerseits aus den AIS-Daten ermittelt. Aus Kontrollzwecken wird die Versuchsstrecke jedoch auch mit einer Kamera zur visuellen Erfassung der Schiffseignisse ausgestattet. Um die Schiffsgeschwindigkeit zu ermitteln, wird ein zusätzlicher Druckaufnehmer zur Messung der Wellenhöhe in ca. 50 m Entfernung entlang des Kanals in Richtung Süden eingebracht.

Druckaufnehmer (Porenwasserdruck):

Die Druckaufnehmer zur Ermittlung der Porenwasserdrücke im Boden werden in zwei Querschnitten in jeweils drei verschiedenen Tiefen eingebaut werden. Für jeden Druckaufnehmer ist ein separates Bohrloch abzuteufen. Wenn die Kennwerte des Bodens zulassen, kann mit einer Rammkernsondierung das Bohrloch abgeteuft werden und der Aufnehmer eingehängt werden. Im Fall der Versuchsstrecke wurden die letzten Dezimeter mit einer verlorenen Spitze sondiert.

Die Messstelle ist im Juni 2019 in den Messbetrieb gegangen und liefert seitdem Daten. Derzeit wird die Datenauswertung vorgenommen. Eine große Herausforderung stellt hierbei die Menge der Daten dar, weswegen so weit möglich eine Automatisierung der Auswertung angestrebt ist.

7.6 Diskussion

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Methoden der Datenerfassung und Qualitätsbewertung kurz vorgestellt. Es wurde mehrfach darauf hingewiesen, dass eine Standardisierung der Datenerfassung, Datenauswertung und Datenablage erforderlich ist.

Im Rahmen dieser Arbeit kann die mangelnde Standardisierung durch umfangreiche Recherchen und Datenaufbereitung teilweise kompensiert werden. Zusätzlich konzentrieren sich die nachfolgenden Analysen auf die Entwicklung eines probabilistischen Bemessungsansatzes für Deckwerke und nicht auf die Bemessung von Deckwerken. Zu diesem Zweck können kleinere Zugeständnisse hinsichtlich der Validität und Konsistenz der Daten tolerierbar sein.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen erfordern nicht die neuesten Daten. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Analysen an verschiedenen Kanälen zu gewährleisten wurden die vier jüngsten Kampagnen ausgewählt. Sie sind die zuverlässigsten in Bezug auf die eingesetzten Messgeräte und Datenauswertung. Tatsächlich bedeutet dies für die in dieser Arbeit ermittelten Zuverlässigkeiten, dass sie möglicherweise nicht die aktuelle Situation an den Kanälen repräsentieren. Sie beschreiben den Zustand zum Zeitpunkt der Messungen. Alle Vergleiche von Schäden, Schadensentwicklung und Instandhaltungskosten, die zur Validierung der Analysen dienen können, müssen sich daher auf den Zeitpunkt der Messkampagnen beziehen.

Die zusätzlichen Informationen zu den Randbedingungen an den Messorten wurden möglichst genau erhoben. Die Bewertung der Zuverlässigkeit ist daher in erster Linie ein Maß für diesen Standort, kann aber aufgrund des repräsentativ gewählten Beobachtungsstandortes auch als Näherung für andere Abschnitte betrachtet werden. Trotz dieser Tatsachen wird betont, dass die Ergebnisse keine Rückschlüsse auf den Zustand der gesamten Wasserstraße zulassen.

7.7 Fazit

Die Analyse der Verkehrsbeobachtungen und deren Auswertung auch anhand der vier Beispieldatensätze zeigt, dass Messung unterschiedlich durchgeführt, verarbeitet und dokumentiert werden. Auch wenn sie in Bezug auf die eingesetzten Messgeräte und die Datenverarbeitung vergleichbar sind, sind die Daten selbst teilweise heterogen und/oder unvollständig. Dies liegt zum einen an den unterschiedlichen Fragestellungen, die in den Feldkampagnen untersucht werden. Zum anderen liegt dies an der mangelnden Standardisierung der Messungen. Trotz dieser Tatsache können die verfügbaren Daten für generische Untersuchungen zur Entwicklung einer zuverlässigkeitsbasierten Deckwerksbemessung verwendet werden können. Der Aspekt der Datenvollständigkeit wird im Rahmen dieser Arbeit nicht genauer betrachtet. Für erste Aussagen zu dieser Thematik wird auf Sorgatz (2021) und WgV (2018) verwiesen.

Auf Basis der vorangegangenen Bewertung der Bestandsdaten konnte ein Konzept für langfristige Naturbeobachtungen entwickelt und auch erfolgreich umgesetzt werden. Derzeit wird ein Konzept zur Datenauswertung erstellt, um anschließend bestehende Aussagen zur Repräsentativität vorhandener Messungen zu prüfen. Es soll eine Aussage zur mindestens erforderlichen Messdauer abgeleitet werden. Die im Rahmen der Versuchsstrecke durchgeführten Beobachtungen der Schadensentwicklung an der Wasserstraße ergänzen die Untersuchungen in der Wellengrube und helfen, deren Validität hinsichtlich der Übertragbarkeit auf die Wasserstraße zu bewerten. Bestehende Bemessungsansätze für Deckwerke nach GBB (2010) können so fachlich und methodisch weiterentwickelt und ergänzt werden.

Um Daten aus Verkehrsbeobachtungen oder Langzeitmessungen zukünftig in einer Bemessung zu verwenden, sollte eine Automatisierung und Standardisierung der Feldmessungen erfolgen. Des Weiteren sollte das Konzept zur Qualitätssicherung der Daten weiterentwickelt werden. Denkbar ist auch ein mehrstufiger Prozess. Bei Übernahme der Daten z. B. in eine Datenbank werden primär Validität und Konsistenz bewertet. Vor Verwendung der Messergebnisse werden dann Vollständigkeit, geografische und zeitliche Korrelation durch die/den ProjektbearbeiterIn geprüft. Weiterge-

hende Untersuchungen sollten evaluieren, welche Größen tatsächlich für eine Deckwerksbemessung zu erfassen sind. Gegebenenfalls könnte so der Arbeitsaufwand im Vergleich zum bestehenden Messsystem und bei der Datenauswertung reduziert werden.

8 Probabilistische Zustandsbewertung und Zustandsprognose

8.1 Einleitung

Aus den Experteninterviews wurde abgeleitet, dass die Verlagerung von Einzelsteinen der häufigste Schadenstyp an Binnenwasserstraßen ist. Ein Schaden schreitet jedoch langsam voran. Geringfügige Beeinträchtigungen können bis zu 15 Jahre beobachtet werden, bevor eine Intervention dringlich wird, da die Zuverlässigkeit der Ufersicherung nicht mehr den vorab definierten Maßgaben entspricht. Für ein effizientes Ressourcenmanagement wäre es daher von Vorteil, wenn eine Methode zur Planung optimaler Wartungsintervalle zur Verfügung stünde. Hierfür ist es zunächst erforderlich, die Zuverlässigkeit eines Bauwerks mit geeigneten Methoden zu ermitteln. Anschließend ist die Veränderung der Zuverlässigkeit als Reaktion auf verschiedene Einwirkungen oder die Zeit mit Hilfe eines geeigneten Modells abzubilden.

In diesem Kapitel werden zunächst wesentliche Methoden der Datenauswertung und der Zuverlässigkeitsanalyse kurz eingeführt. Anschließend wird ein Modell zur Zustandsbewertung und Zustandsprognose von Deckwerken vorgestellt. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels wird das Modell anhand von vier Anwendungsbeispielen erprobt. Eine Darstellung dieser Ergebnisse wurde auch in Sorgatz, Kayser und Schüttrumpf (2019) veröffentlicht. Weitergehende Analysen zum Zusammenhang zwischen im Feld erhobenen Instandhaltungsmaßnahmen und der Zuverlässigkeit werden in Sorgatz und Kayser (no date) vorgestellt.

8.2 Methoden

Die Ursprünge der Zuverlässigkeitstheorie liegen in der militärischen Luft- und Raumfahrttechnik (AGREE 1957; Lloyd und Lipow 1962; US Department of Defense 1987). Ab den 1970er Jahren wird die Probabilistik allmählich bei der Tragwerksplanung von Bauwerken eingesetzt, um Unsicherheiten aus begrenzten Informationen und der natürlichen Streuung von Eingangsparametern zu integrieren. Mit Sicherheit maßgebend für die Entwicklung der Probabilistik im Ingenieurwesen sind die Veröffentlichungen von Ang und Tang (1975) und Benjamin und Cornell (1976), die Methoden der Probabilistik speziell für technische Anwendungen zusammenfassen.

Inzwischen ist die Theorie der zuverlässigkeitsbasierten Methoden und deren Anwendung auch im Wasserbau und in der Geotechnik gut bekannt (s. auch Abschnitt 3.3). Obwohl, wie Lacasse et al. (2013) feststellt, zuverlässigkeitsbasierte Ansätze in der Praxis nur langsam Anwendung finden, werden sie seit Jahrzehnten bei der Bemessung einzelner, meist komplexer Bauwerke eingesetzt. Die methodischen Grundlagen werden daher in diesem Bericht nur stark gekürzt und auf ausgewählte Methoden beschränkt dargestellt. Es wird auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen,

z. B. Ang und Tang (2007), Baecher und Christian (2003), Ditlevsen und Madsen (2005) und Rubinstein und Kroese (2016).

8.2.1 Methoden der Datenauswertung

Die Datenauswertung übersetzt die reale Welt in mathematische Modelle. Dazu können verschiedene Methoden zum Einsatz kommen, die nachfolgend kurz eingeführt werden. Unabhängig von der Methodik der Datenerhebung und -analyse empfiehlt sich wie im vorangegangenen Abschnitt bereits erwähnt eine Qualitätssicherung der Daten.

Verteilungsanalyse:

Die Realisierung einer aus Messungen abgeleiteten Variablen erfolgt in einem Bereich von realen, aber zufälligen Werten. Wahrscheinlichkeitsfunktionen übertragen diese Zufallswerte in ein mathematisches Modell. Eine diskrete Zufallsvariable wird durch ihre Wahrscheinlichkeitsmassenfunktion beschrieben; eine kontinuierliche Zufallsvariable durch ihre Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion. In der klassischen Statistik werden mit Hilfe verschiedener Methoden, z. B. Methods of Moments Estimate (MME) oder Maximum Likelihood Estimate (MLE), die Parameter der Verteilung näherungsweise bestimmt. (Ang und Tang 2007) Sind Annahmen über eine Verteilung nicht möglich oder gewünscht, können nicht-parametrische Schätzverfahren wie eine Kerndichte-Schätzung (KDE) nach Parzen (1962) und Rosenblatt (1956) angewendet werden. Schließlich vereinfacht die steigende rechnerische Effizienz auch die Anwendung der Bayes'schen Statistik zur Verteilungsbestimmung.

Godness-of-Fit Tests (GoF):

Die Anpassungsgüte einer Verteilung kann durch visuelle Tests und Hypothesentests bestimmt werden. Die Wahrscheinlichkeitsfunktion und die kumulative Wahrscheinlichkeitsfunktion sind die klassischen GoF - Darstellungen. Zusätzlich können der Q-Q-Plot insbesondere für die Verteilungsenden und der P-P-Plot für den mittleren Bereich einer Verteilungsfunktion verwendet werden. (Ang und Tang 2007) Des Weiteren sind Hypothesentests, Methoden der statistischen Interferenz, anwendbar. Die Anpassungsgüte einer Verteilungsfunktion wird häufig mit dem Anderson-Darling-Test (AD) und dem Kolmogorov-Smirnov-Test (KS) für kontinuierliche Daten; und dem χ^2 -Test für diskrete oder kategorische Daten untersucht. Weitere Testverfahren sind das Akaike-Information-Kriterium (AIC) und Bayesian-Information-Kriterium (BIC). (Sachs und Hedderich 2009)

Korrelationsanalyse:

Wenn das abstrahierte Modell mehr als eine Eingangsvariablen erfordert, muss die Abhängigkeit zwischen den Variablen mathematisch beschrieben werden. Eine unbedingte Abhängigkeit mehrerer Variablen lässt sich durch multivariate Wahrscheinlichkeitsfunktionen beschreiben. Da diese jedoch schwierig zu konstruieren und Daten über multivariate Korrelation rar sind, wird die Abhängigkeit häufig auf bivariate Beobachtungen reduziert. Die lineare Beziehung von zwei Variablen wird durch den Pearson-Korrelationskoeffizienten bewertet. Der Korrelationskoeffizient nach Spearman beschreibt eine monotone, aber nicht lineare Beziehung. Beide Koeffizienten können innerhalb der Grenzen von $[-1.00, 1.00]$ variieren. (Ang

und Tang 2007; Baecher und Christian 2003)

Sensitivitätsanalyse:

In einer Sensitivitätsanalyse wird die Änderung der Modellausgabe in Abhängigkeit der Eingangsparameter untersucht. Dadurch kann unter anderem beantwortet werden, (1) welche Parameter zusätzliche Untersuchungen erfordern, um die Zuverlässigkeit des Modells zu erhöhen; (2) welche Parameter nicht signifikant sind und daher aus dem endgültigen Modell eliminiert werden können; (3) welche Eingangsparameter am meisten zur Varianz des Ergebnisses beitragen; (4) welche Parameter miteinander interagieren; (5) ob das Modell fehlerhaft ist; und (6) bei der Verwendung des Modells zur Berechnung, welche Konsequenzen sich aus der Änderung eines Eingangsparameters ergeben (Chan et al. 1997; Hamby 1994). Im Allgemeinen wird zwischen einer lokalen (gradientenbasierten) und einer globalen (varianzbasierten) Sensitivitätsanalyse unterschieden. In der lokalen Sensitivitätsanalyse wird die Ableitung der Modellfunktion bewertet. In der globalen Sensitivitätsanalyse werden die Eingangsparameter variiert. Die Mehrheit dieser Methoden erlaubt es nicht, eine Korrelation der Eingangsparameter zu berücksichtigen. (Saltelli 2008)

8.2.2 Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse

Die Ermittlung des genauen Wertes der Versagenswahrscheinlichkeit ist mathematisch komplex, wenn nicht gar unmöglich. Oftmals werden daher Näherungsverfahren, z. B. First Order Reliability Method (FORM) genutzt. Bei stark nichtlinearen Grenzzustandsfunktionen sollten vollständig probabilistischen Verfahren, z.B. der Monte-Carlo-Simulationen (MCS) verwendet werden. Im Allgemeinen führt eine höhere Genauigkeit zu einem größeren Rechenaufwand. In der Praxis ist daher ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Zeitaufwand zu suchen.

Anschließend an die Zuverlässigkeitsanalyse erfolgt bei dem neu entwickelten Ansatz zur Deckwerksbewertung eine Zustandsprognose des Deckwerks mit Markov-Ketten unter Verwendung der ermittelten Versagenswahrscheinlichkeiten. Ein ähnlicher Ansatz wurde von Possan und Andrade (2014) für die Lebensdauer von Stahlbetonkonstruktionen skizziert. Eine einfachere Anwendung von Markov-Ketten auf Deckwerke wurde von Kayser (2015) vorgeschlagen.

First Order Reliability Method (FORM):

Die First Order Reliability Method (FORM) wurde von Hasofer und Lind (1974) entwickelt, der eine geometrische Definition des Zuverlässigkeitsindex β_{HL} einführte. FORM löst ein beschränktes Optimierungsproblem. Die Grenzzustandsfunktion wird durch Linearisierung im Bemessungspunkt angenähert und der minimale Abstand zum Ursprung ermittelt. Dies kann mit Hilfe von verschiedenen Methoden wie Lagrangian Multiplier, Taylor Series oder dem Fiessler-Rackwitz-Ansatz (Abdo und Rackwitz 1991; Rackwitz und Fiessler 1978) erfolgen. Andere Verteilungen als die Gauß'sche Normalverteilung können mit Hilfe der Rosenblatt-Transformation (Rosenblatt 1952) oder der Nataf-Transformation (Nataf 1962) in den Standardraum überführt werden. Eine Korrelation der Variablen kann beispielsweise mittels einer Cholesky-Matrix oder Eigenvektoren und Eigenwerte berücksichtigt werden. (Baecher und Christian 2003) FORM basiert auf der Annahme, dass der Bemessungspunkt ein defi-

nierter Punkt im Normalraum ist. Dies kann insbesondere bei stark nichtlinearen Grenzzustandsfunktionen zu fehlerhaften Ergebnissen führen (Baudin et al. 2015).

Monte Carlo-Simulation (MCS):

Der Begriff „Monte Carlo-Simulation“ bezieht sich auf eine breite Klasse von statistischen Stichprobenverfahren, dessen Ursprünge auf die Erforschung der Kerntechnik während des Zweiten Weltkriegs zurückgehen (Fermi und Richtmyer 1948; Metropolis, Rosenbluth et al. 1953; Metropolis und Ulam 1949). MCS werden häufig bei mathematischen Problemen eingesetzt, deren analytische Lösungen tendenziös oder unmöglich sind. Aus den Verteilungen der Eingangsvariablen wird eine Stichprobe erstellt und das Problem analytisch gelöst. Dem Zentralen Grenzwertsatz folgend nähert sich der Durchschnitt aus den Ergebnissen einem wahren Wert an, wenn die Anzahl der Simulationen gegen Unendlichkeit strebt. Die Versagenswahrscheinlichkeit und damit der Zuverlässigkeitsindex β_{HL} werden direkt aus der Statistik der Simulationsergebnisse abgeleitet. MCS hängen stark vom für den Stichprobenprozess verwendeten Algorithmus, z. B. Wichmann-Hill-Algorithmus (Wichmann und Hill 1982) und SIMD-orientierte Fast Mersenne Twister-Algorithmus (Saito und Matsumoto 2008), und der Anzahl der durchgeführten Simulationen ab.

Markov-Ketten (MK):

Ein Markov-Prozess ist ein spezieller stochastischer Prozess, der eine Zustandsentwicklung auf der Grundlage von beschränkten Erkenntnissen aus der Vergangenheit beschreibt. Das bedeutet, dass die Übergangswahrscheinlichkeiten von einem Zustand in den nächsten bedingt unabhängig voneinander sind. Eine Markov-Kette ist ein Markov-Prozess mit einer diskreten Zustandszahl. Das wesentliche Element der Markov-Kette ist die Markov-Matrix, in der Wahrscheinlichkeiten für den Übergang von einem Zustand in einen anderen Zustand gegeben sind. (Rubinstein und Kroese 2016) Markov-Ketten werden u. a. für die Beschreibung von Verfallsprozessen von Bauteilen an Wasserbauwerken oder bei der Planung von Instandhaltungsmaßnahmen im Straßenbau verwendet (Girmscheid und Fastrich 2010; Kühni et al. 2008).

8.3 Modell zur Zustandsbewertung und Zustandsprognose

8.3.1 Probabilistische Zustandsbewertung

Diese Arbeit beschäftigt sich primär mit aleatorischen Unsicherheiten, indem sie Einwirkungs- und Widerstandparameter als Zufallsvariablen einführt. Epistemische Unsicherheiten, z. B. Modellfehler, werden zunächst nicht berücksichtigt. Hier bedarf es weiterer Forschung. Das entwickelte Konzept zur Anwendung zuverlässigkeitsbasierter Methoden auf die Deckwerksbemessung beschränkt sich derzeit auf die Prognose von Steinverlagerungen.

Grenzzustandsfunktion:

Die Grenzzustandsfunktion für die Zuverlässigkeitsanalyse ergibt sich aus den Gleichungen des GBB (2010). Im Modell wird der mindestens erforderliche Steindurchmesser berechnet,

um (schiffsinduzierten) Wellen und Strömungen standzuhalten. Der Begriff „Modell“ bezieht sich auf die mathematische Formulierung der Grenzzustandsfunktion

$$g = D_{50,ist} - D_{50,erf}(v_{rueck}, u_{max}, H_{u,Heck}, H_{Sek}) \leq 0, \quad (10)$$

mit den Zufallsvariablen Rückströmungsgeschwindigkeit v_{rueck} , Wiederauffüllungsströmungsgeschwindigkeit u_{max} , Heckwellenhöhe $H_{u,Heck}$ und Sekundärwellenhöhe H_{Sek} . Der berechnete Steindurchmesser $D_{50,erf}$ wird anschließend mit dem in-situ Steindurchmesser $D_{50,ist}$ verglichen. Eine Überschreitung des Grenzzustandes wird durch $g \leq 0$ beschrieben. Auf der Grundlage der Sensitivitätsanalyse wird die Sekundärwellenhöhe H_{Sek} als deterministischer Parameter berücksichtigt. Aufgrund der Formulierung der Grenzzustandsfunktion können die erhaltenen Versagenswahrscheinlichkeiten einzig die Wahrscheinlichkeit einer Steinverlagerung ausdrücken. Daraus kann nicht die Größe eines möglichen Schadens abgeleitet werden.

Modellüberblick:

Der erforderliche Steindurchmesser ist unter anderem eine Funktion der schiffsinduzierten Wellen und Strömungen. Nach GBB (2010) ist hierbei eine Wichtung der Einwirkungen vorgesehen (s. Abbildung 17). Wird streng nach GBB (2010) bemessen, werden die schiffsinduzierten hydraulischen Lasten mit mehreren Gleichungen ermittelt. Sowohl bei $H_{u,Heck}$ als auch bei H_{Sek} wird bei der Auswertung der Feldmessungen jedoch nicht in Schräg- und Querwellen unterschieden, sondern nur ein Maximum angegeben. Daher können bei einer Bemessung mit Naturdaten nur diese Maxima als Grundlage für die zu ermittelnden Verteilungen der jeweiligen Eingangsgröße berücksichtigt werden.

Hydraulischen Last		Gleichung	Wichtung				
Primärwellenfeld	$H_{u,Heck}$	GBB (2010) Gl. (6-1)	Mittelwert	$D_{50, erf, 1}$	Maximum	$D_{50, erf}$	
		GBB (2010) Gl. (6-2)					
	u_{max}	GBB (2010) Gl. (6-10)					
		GBB (2010) Gl. (6-11)					
Rückströmungsgeschwindigkeit	v_{rueck}	GBB (2010) Gl. (6-8)	$D_{50, erf, 2}$				
Sekundärwellenfeld	$H_{Sek, div}$	GBB (2010) Gl. (6-7)	Mittelwert	Maximum			$D_{50, erf, 3}$
	$H_{Sek, trans}$	GBB (2010) Gl. (6-1)					
		GBB (2010) Gl. (6-2)					

Abbildung 17: Schema zur Bestimmung des erforderlichen Steindurchmessers nach GBB (2010)

Derzeit wird die Zuverlässigkeitsanalyse mit Hilfe des Pakets OpenTURNS (Baudin et al. 2015) in Python durchgeführt. Aus den Ergebnissen der Feldmessungen werden Verteilungen be-

stimmt. Diese dienen als Eingangswerte bei der Zustandsbewertung nach der oben beschriebenen Grenzzustandsfunktion. Die Gleichung kann im bestehenden Modell sowohl mit FORM als auch mit MCS gelöst werden. Im Ergebnis stehen die Versagenswahrscheinlichkeit p_f oder der Zuverlässigkeitsindex β_{HL} zur Bewertung des Bauwerkszustandes.

Aufgrund der Komplexität der Wechselwirkungen zwischen Wasser und Böschungen enthalten die ursprünglichen GBB (2010) Gleichungen empirische Faktoren, B'_B als Stabilitätskoeffizient und B_B^* als Koeffizient für die Häufigkeit des Auftretens. Beide beschreiben die Sicherheit innerhalb der Berechnungen auf empirischer Basis. So tritt beispielsweise bei einer Bemessung, die mit einem höheren B'_B durchgeführt wird, der Bemessungsfall selten auf und/oder es ist nur ein begrenzter Instandhaltungsaufwand akzeptabel. Das probabilistische Bewertungsmodell benötigt diese Faktoren theoretisch nicht, da die Sicherheit über die Zuverlässigkeit des Systems differenziert werden kann. Da diese Faktoren sich jedoch aus Modellversuchen ableiten und sich auf einen Referenzzustand beziehen, können sie nicht aus den bestehenden Gleichungen gestrichen werden. Es wäre eine Art Transformation bezogen auf das gewünschte Sicherheitsniveau erforderlich.

Oftmals sind nicht alle erforderlichen Eingabevariablen in jeder Messkampagne verfügbar. Dies gilt insbesondere für die Strömungsgeschwindigkeiten v_{rueck} und u_{max} , da diese im Feld schwer zu beobachten sind. Derzeit werden fehlende hydraulische Lasten mit *GBBSOft+* und einem Tabellenkalkulationsprogramm ermittelt, die die Gleichungen nach GBB (2010) für jede Schiffspassage einzeln lösen. Anschließend werden die ermittelten Werte als Zufallsvariablen behandelt. Dies führt zu konservativen Schätzungen der so ermittelten hydraulischen Lasten und damit zu einer Überschätzung ihres Beitrags zum Versagen des Bauwerks. Insbesondere in Fällen, in denen diese Eingangsparameter den Bemessungspunkt definieren, kann die Zuverlässigkeit des Bauwerks unterschätzt werden.

8.3.2 Markov-Ketten zur Schadensentwicklung

Wie in Abschnitt 2.2 und Sorgatz, Letzelter et al. (no date) diskutiert sind bestehende Modelle zur Beschreibung der Schadensentwicklung nur bedingt für die Beschreibung der Schadensentwicklung eines losen Schüttsteindeckwerks an Binnenwasserstraßen geeignet. Daher wird in diesem Abschnitt ein einfacheres auf Markov-Ketten basierendes Modell vorgestellt, welches auf der optischen Klassifikation eines Schadens und der Überschreitung der Grenzzustandsfunktion basiert.

In Abbildung 7 entwickelt sich der Schaden von links nach rechts von einem intakten Deckwerk (S0) bis hin zur Erosion des Bodens (S4). Leider, und das bestätigen auch die Experteninterviews (vgl. Abschnitt 5), verlaufen die Schäden an losen Schüttsteindeckwerken nach dem Auftreten der Initialschäden unterschiedlich. Daher ermöglicht das vorliegende Markov-Modell nur die Vorhersage von Anfangsschäden (S0 - S1), aber nicht von fortschreitenden Schäden (S1 - S4).

Abbildung 18 veranschaulicht das Markov-Ketten - Modell zur Prognose von Initialschäden auf Basis der Zustandsklassen nach Sorgatz, Kayser und Schüttrumpf (2018). Das ungeschädigte Ausgangssystem S0 ist durch den Zustandsvektor $v^{(0)} = [1, 0]$ gekennzeichnet. Die Wahrscheinlich-

keit, dass das System in den nächsten Zustand S1 übergeht, wird in dieser Anwendung durch die Versagenswahrscheinlichkeit ($p_{01} = p_f$) beschrieben. Die Zuverlässigkeit hingegen stellt die Wahrscheinlichkeit dar, dass das System im aktuellen Zustand bleibt ($p_{00} = 1 - p_f$). Es wird davon ausgegangen, dass das System ohne Wartung nicht in einen früheren Zustand zurückkehren kann ($p_{10} = 0, p_{11} = 1$). Die Übergangswahrscheinlichkeiten sind in einer Übergangsmatrix $P = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} \\ p_{10} & p_{11} \end{bmatrix}$ zusammengefasst. Die Entwicklung des Systems für n Schritte wird durch Gleichung (11) definiert.

$$v^{(n)} = v^{(0)} * P^n \quad (11)$$

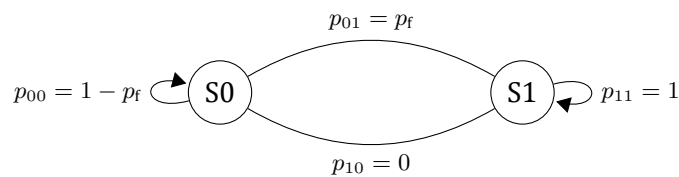


Abbildung 18: Markov-Kette für die Deckwerksbemessung mit Übergangswahrscheinlichkeiten

8.4 Anwendungsbeispiele

8.4.1 Beispieldatensätze

Die vier verwendeten Kampagnen inklusive der im Feld erfassten hydraulischen Einwirkungen wurden bereits ausführlich in Abschnitt 7.3 beschrieben. Die vier Kampagnen umfassen Wasserstraßen verschiedener Gewässerkategorien, Verkehrsdichten, Ausbau- und Erhaltungsbedingungen. Obwohl sie in Bezug auf die eingesetzten Messgeräte und die Datenverarbeitung vergleichbar sind, sind die Daten selbst teilweise heterogen und/oder unvollständig und erfordern daher eine Aufbereitung in Bezug auf Vollständigkeit und Repräsentativität. So ist beispielsweise die Wiederauffüllungsströmungsgeschwindigkeit u_{\max} in Feldbeobachtungen kaum quantifizierbar und somit in keinem Datensatz enthalten. Die Rückströmungsgeschwindigkeit v_{rueck} ist nur für KuK-2015 verfügbar.

Neben den hydraulischen Parametern verlangt die Deckwerksplanung Informationen zu ausgewählten geotechnischen Randbedingungen in den Berechnungsquerschnitten. Die Neubewertung bestehender Bauwerke erfordert Daten über den aktuellen Deckwerksaufbau und -zustand, die aus geotechnischen Berichten, Literatur und/oder weiteren Felduntersuchungen verfügbar sind. In den vier exemplarischen Fällen stammen die Daten zum Deckwerksaufbau aus BAW-Berichten in der Nähe der Kampagnenstandorte sowie den Experteninterviews (Kayser 2007a, 2008; Sorgatz und Soyeaux 2019; Soyeaux 2009).

8.4.2 Ergebnisse der Verteilungsanalyse

Die Verwendung parametrischer Verteilungen und ihre Approximation durch Maximum Likelihood Estimate und Method of Modified Moments erwies sich als die robusteste und vor allem reproduzierbarste Methode zur Beurteilung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen unter Berücksichtigung der schwankenden Stichprobengrößen. Mit Hilfe von visuellen Tests und Hypothesentests wird die Anpassungsgüte einer Verteilung für jede Variable bewertet.

Aus den Analysen kann zusammengefasst werden, dass $H_{u,Heck}$ sich gut mit einer dreiparametrischen Log-Normalverteilung $\mathcal{LG}(\lambda, \xi, \gamma)$ beschreiben lässt. Diese ist besonders für Daten mit einem ausgeprägten Rand (heavy tailed) geeignet. Neben dem Formparameter λ (shape) und dem Skalenparameter ξ (scale) verfügt sie über einen Verschiebungsparameter γ (shift). Die Variablen v_s und v_{rueck} werden durch Gauß'schen Verteilungen $\mathcal{N}(\mu, \sigma)$ approximiert. Der mittlere Steindurchmesser $D_{50,ist}$ ist aufgrund der Messmethode, üblicherweise Sieben, eine diskrete Größe. Es wird durch eine Poisson-Verteilung $\mathcal{P}(\lambda)$ angepasst und dann in eine Gauß'sche Verteilung überführt, ein Ansatz, der für große Stichprobengrößen gilt. Tabelle 7 fasst die ermittelten Verteilungen und ihre Parameter zusammen. Für u_{max} konnte keine Verteilungsanpassung vorgenommen werden, da keine Messungen vorhanden sind.

Die Ergebnisse der Verteilungsanpassung implizieren, dass die Verteilungsart allein von den Variablen abhängt und nicht von der Wasserstraße. Es wird jedoch betont, dass visuelle und hypothetische Tests nur die wahrscheinlichste Verteilungsart anzeigen. Abhängig von der Stichprobengröße und -qualität gibt es immer Unsicherheiten in Bezug auf die Verteilungswahl.

Tabelle 7: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für die Einzelsteinbemessung gemäß GBB (2010). LogNorm $\mathcal{LG}(\lambda, \xi, \gamma)$; Gaussian $\mathcal{N}(\mu, \sigma)$.

Daten-satz	v_s in m s^{-1}	$H_{u,Heck}$ in m	v_{rueck} in m s^{-1}	$D_{50,ist}$ in mm
DEK-2006	Gaussian (2.535, 0.520)	LogNorm (-0.783, 0.245, -0.228)	Gaussian (0.810, 0.357)	Gaussian (150, 12)
KuK-2015	Gaussian (2.410, 0.433)	LogNorm (-1.254, 0.263, -0.078)	Gaussian (1.115, 0.376)	Gaussian (150, 12)
SiK-2007	Gaussian (3.180, 0.614)	LogNorm (-1.520, 0.351, -0.091)	Gaussian (0.341, 0.169)	Gaussian (150, 12)
WDK-2007	Gaussian (2.834, 0.404)	LogNorm (-1.530, 0.350, -0.004)	Gaussian (0.708, 0.192)	Gaussian (180, 12)

8.4.3 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Es gibt verschiedene Parameter, die bei der hydraulischen Bemessung von Deckwerken zu berücksichtigen sind. Die erforderliche Anzahl probabilistischer Eingangsgrößen hängt jedoch vom Modell selbst, der Modellempfindlichkeit, der gewünschten Genauigkeit der Analyse und den verfügbaren Daten ab. Eine Sensitivitätsanalyse ermöglicht es, die wichtigsten Eingangsparameter zu identifizieren.

Der Parameterbereich wird durch Minima und Maxima aus dem MAR (2008) und den vier exemplarischen Feldbeobachtungen definiert (s. Tabelle 8). Die Querschnittsfläche A variiert innerhalb des Bereichs der möglichen Unsicherheiten, die sich aus der Messung ergeben. Die Sensitivitätsanalyse deckt nicht verschiedene Querschnitte ab, z.B. aufgrund unterschiedlicher Gewässerkategorien. Diese Vereinfachung ist sinnvoll, da davon ausgegangen werden kann, dass für Bemessungs- und Instandhaltungszwecke ungefähre Angaben zum Querschnitt vorliegen. Der Steindurchmesser variiert innerhalb der nach TLW (2003) zulässigen Grenzen.

Tabelle 8: Parameterbereich für die Sensitivitätsanalyse nach Morris (Morris 1991)

$H_{u,Heck}$	H_{Sek}	v_{rueck}	u_{max}	v_s	$D_{50,ist}$	A	m	ρ_s	ϕ_s
m	m	$m\ s^{-1}$	$m\ s^{-1}$	$m\ s^{-1}$	mm	m^2	-	$kg\ m^{-3}$	°
0.25	0.05	0.10	0.50	1.00	120	90	2.80	2600.00	50.00
1.00	0.20	2.50	3.00	4.50	150	110	3.20	2700.00	60.00

Die Ergebnisse der Morris-Analyse sind in Abbildung 19 dargestellt. Es wird angenommen, dass $H_{u,Heck}$, v_{rueck} und u_{max} von erheblicher Bedeutung sind. Darüber hinaus wird eine lineare Beziehung von $H_{u,Heck}$ und dem Grenzzustand beobachtet, während v_{rueck} und u_{max} eine kubische Beziehung zum Grenzzustand anzeigen. Weniger signifikant, aber dennoch zur Varianz des Modells beitragend, ist $D_{50,ist}$. Die übrigen Parameter zeigen keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen Modelleingabe und -ausgabe.

8.4.4 Ergebnisse der Korrelationsanalyse

Die Korrelationen der Eingangsparameter sind auf der Grundlage der derzeit verfügbaren Daten schwer zu bestimmen. Für das vorliegende Prototypmodell handelt es sich um eine bestmögliche Schätzung, die auf einer Korrelationsanalyse und zusätzlichem technischen Wissen basiert.

Physikalische Überlegungen implizieren eine gegenseitige Abhängigkeit der schiffsinduzierten Variablen. Eine Untersuchung der vier Beispieldatensätze zeigt, dass sich für die gleichen hydraulischen Parameter an unterschiedlichen Wasserstraßen unterschiedliche Pearson-Korrelationskoeffizienten ergeben. Insbesondere die Strömungsgeschwindigkeiten weisen eine große Variationsbreite auf. Dies unterstreicht die Bedeutung standardisierter Messverfahren und einer gründlichen Datenaufbereitung. Insgesamt können keine systematischen Abweichungen festgestellt werden. In einem Fall werden sogar physikalisch unplausible Korrelationskoeffizienten bestimmt. Vorerst wird ein vereinfachter Ansatz gewählt, der eine für alle Wasserstraßen gültige Korrelationsmatrix verwendet (s. Tabelle 9). Zukünftig sollte eine systematische Untersuchungen zur Beschreibung der Parameterkorrelation angestrebt werden.

8.4.5 Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse

Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalysen sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Für jede Wasserstraße wird die Versagenswahrscheinlichkeit mit der FORM (Abdo-Rackwitz-Algorithmus) und

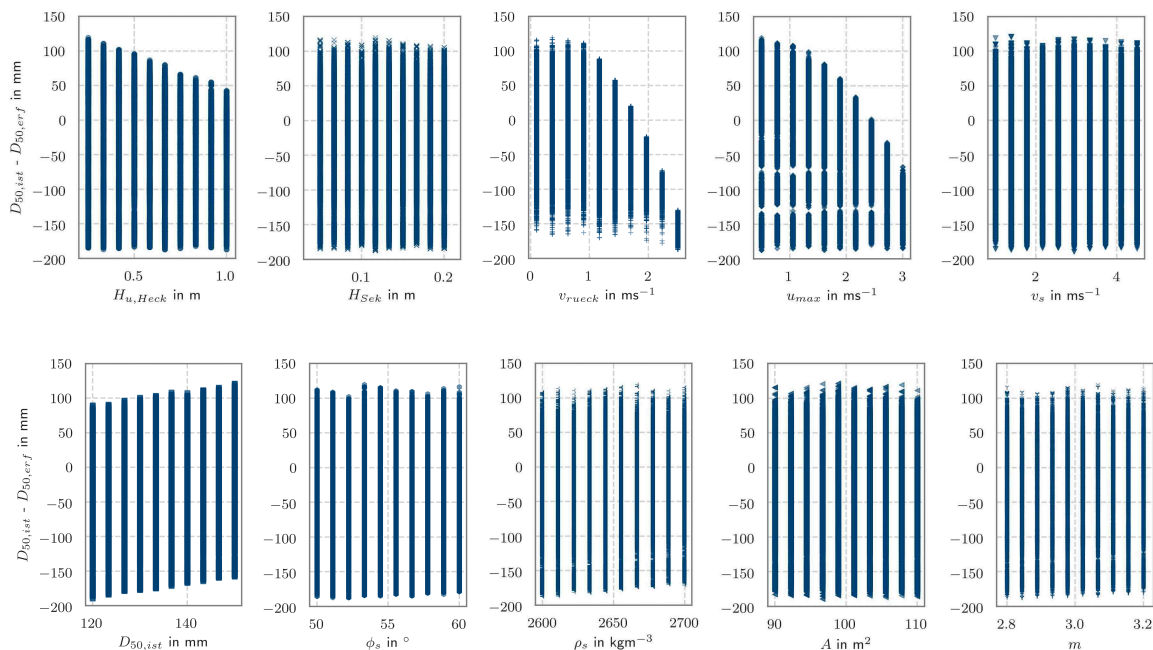


Abbildung 19: Ergebnisse von Sensitivitätsbetrachtungen mit der Methode nach Morris (Morris 1991) für die hydraulische Deckwerksbemessung. Der Parameterbereich wird durch Minima und Maxima definiert, die auf der Grundlage des (MAR 2008) und Feldbeobachtungen zusammengestellt wurden. Die Vergleichsmenge bezieht sich auf die Differenz zwischen dem erforderlichen, mittleren Deckwerkssteindurchmesser und dem Deckwerkssteindurchmesser im Feld. Eine signifikante Änderung der Streuung in den Plots, die durch eine mäßige Änderung des Eingangsparameters verursacht wird, deutet auf eine größere Bedeutung dieses Parameters für das Modell hin.

MCS bewertet. Die Versagenswahrscheinlichkeiten variieren stark zwischen den Wasserstraßen und, im Falle von SiK-2007, auch zwischen den Verfahren. Letzteres könnte durch eine unzureichende Anzahl von MCS verursacht werden. Für SiK-2007 ergeben sich diese Abweichungen jedoch aus der FORM, welche nicht das globale Maximum ermittelt. Dies wird auch durch den Strong Maximum Test bestätigt (Dutfoy und Lebrun 2007). Die FORM ermittelt näherungsweise einen Entwurfspunkt bei einer hohen Schiffsgeschwindigkeit und Wellenhöhe, aber einer niedrigen Rückströmungsgeschwindigkeit. Diese Kombination ist physikalisch zweifelhaft, da schnelle Schiffe auch hohe Strömungsgeschwindigkeiten verursachen.

Im Vergleich zu den Zielwerten für die Bemessung von Beton- und Stahlkonstruktionen (DIN EN 1990:2010-12 2010; JCSS 2001) oder Wellenbrechern (PIANC 1989) sind die bewerteten Versagenswahrscheinlichkeit relativ hoch. Dafür gibt es mehrere Gründe:

- (1) Die Analyse bezieht sich nicht auf neu errichtete Bauwerke. Die Zulassung größerer Schiffe und/oder Abladungen als in der ursprünglichen Bemessung berücksichtigt kann zu unterdimensionierten Deckwerken nach GBB (2010) führen.
- (2) Das GBB (2010) geht von einem Sicherheitsfaktor gleich 1 ohne Teilsicherheitsbeiwerte aus.
- (3) Das GBB (2010) lässt geringfügige Schäden zu, da wenige verlagerte Deckwerkssteine kein Ri-

Tabelle 9: Korrelationsmatrix der vier zufallsverteilten Eingangsparameter, welche für eine hydraulische Deckwerksbemessung mindestens erforderlich sind

	v_s	$H_{u,Heck}$	v_{rueck}	$D_{50,ist}$
v_s	1.00	0.30	0.40	0.00
$H_{u,Heck}$	–	1.00	0.70	0.00
v_{rueck}	–	–	1.00	0.00
$D_{50,ist}$	–	–	–	1.00

Tabelle 10: Versagenswahrscheinlichkeit und Bemessungspunkte, die mittels MC-Simulationen und FORM (Abdo-Rackwitz-Algorithmus) ermittelt wurden.

Dataset	MCS	FORM	FORM design point			
	$p_f = p_{01}$	p_f	v_s $m s^{-1}$	$H_{u,Heck}$ m	v_{rueck} $m s^{-1}$	$D_{50,ist}$ mm
DEK-2006	5.012×10^{-3}	4.439×10^{-3}	3.01	0.44	1.59	145
KuK-2015	4.773×10^{-2}	4.419×10^{-2}	2.66	0.36	1.64	130
SiK-2007	8.135×10^{-5}	2.293×10^{-7}	4.53	1.09	0.95	134
WDK-2007	1.784×10^{-5}	2.083×10^{-5}	2.99	0.86	1.22	173

siko für die Böschungstabilität darstellen. Daher kann eine größere Versagenswahrscheinlichkeit bei regelmäßiger Überwachung und Instandhaltung akzeptabel sein.

Es wird betont, dass die Analysen nur für einen bestimmten Querschnitt jeder Wasserstraße gültig sind. Sie stellen nicht den Gesamtzustand dieser Wasserstraße dar. Die Ergebnisse decken sich jedoch mit den Beobachtungen aus den Experteninterviews. An Wasserstraßen mit einer hohen Versagenswahrscheinlichkeit wurden vergleichbar viele Schäden von den Außenbezirken behoben oder einzelne Wasserstraßenabschnitte waren in einem mäßigem Instandhaltungszustand.

8.4.6 Vorhersage von Initialschäden

Die Wahrscheinlichkeit eines Initialschadens kann in Bezug auf Schiffspassagen oder Zeit visualisiert werden. Die Zeit ergibt sich aus der durchschnittlichen Anzahl der Schiffspassagen über ein Jahr. Die Berechnungen gehen davon aus, dass die für die Zuverlässigkeitsanalyse verwendeten Einwirkungen und damit die Versagenswahrscheinlichkeiten das typische Jahresverhalten darstellen.

Abbildung 20 veranschaulicht die Wahrscheinlichkeit von Initialschäden und den Übergang von Schadensklasse S0 nach S1 in Abhängigkeit von Zeit und Schiffspassagen. Dargestellt ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Deckwerksbereich in Schadensklasse S1 befindet. Die Ergebnisse zeigen kein Böschungsversagen, sondern einzig Steinverlagerungen. Eine 50 %-ige Wahrscheinlichkeit eines Initialschadens ist nach 200 Schiffen oder 3 Tagen für DEK-2006, 11 Schiffen oder 2 Tagen für KuK-2015, 9 000 Schiffen oder 250 Tagen für SiK-2007 und 50 000 Schiffen oder 900 Tagen für WDK-2007 zu beobachten. Daraus kann man schließen, dass für DEK-2006 und KuK-2015 häufiger Inspektionen geplant werden müssen als für SiK-2007 und WDK-2007. Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit, die Verkehrsdichte in die Planung der Inspektionsintervalle einzubeziehen. Obwohl DEK-2006 und KuK-2015 durch ähnliche Versagenswahrscheinlichkeiten gekenn-

zeichnet sind, erhöht eine größere Verkehrsdichte die Wahrscheinlichkeit, erste Schäden in einem gleichen Zeitraum zu beobachten.

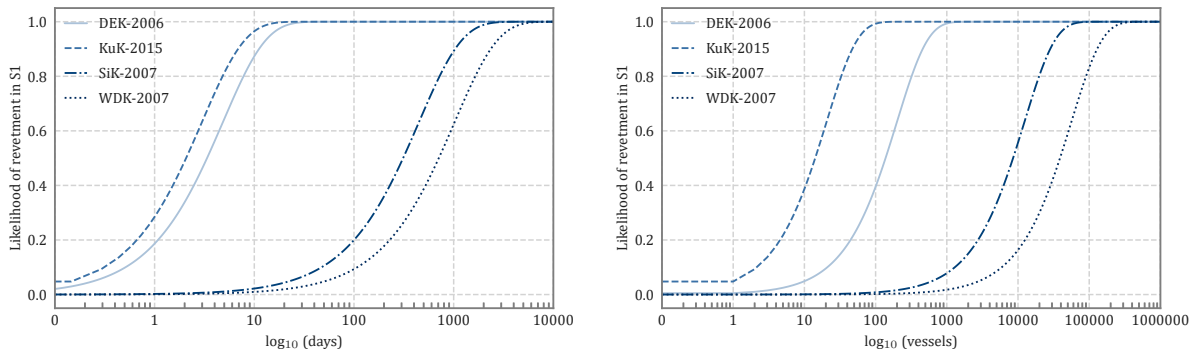


Abbildung 20: Anwendung des Markov-Ketten-Modells auf vier Beispieldatensätze. Dargestellt ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Deckwerksbereich in Schadensklasse S1 befindet (links bezogen auf Schiffsanzahl, rechts auf Tage).

8.5 Diskussion

Ein wesentlicher Vorteil des Markov-Ketten - Modells ist seine Einfachheit in der Anwendung. Da das Modell auf der Grenzzustandsgleichung basiert ist anders als bei bestehenden Modellen theoretisch keine Kalibrierung empirischer Parameter erforderlich. Allerdings sind folgende Punkte beim Markov-Ketten - Modell kritisch anzumerken:

- Das Modell nur Schäden darstellen, die durch Überlastung verursacht wurden. Vandalismus, Kollisionen oder Materialverschlechterung können ebenfalls Schäden verursachen und damit die Funktionalität des Deckwerks beeinträchtigen. Während diese Prozesse für die Bemessung von geringem Interesse sind, müssen sie im Instandhaltungsmanagement oder bei der Neubewertung bestehender Deckwerke berücksichtigt werden.
- Wie im Abschnitt 8 beschrieben, werden fehlende Lastparameter mit den Gleichungen nach GBB (2010) bestimmt, was im Allgemeinen zu einer konservativen Schätzung führt. Daher können Ergebnisse, die mit dem Prototyp des probabilistischen Bewertungsmodell erzielt wurden, die tatsächliche Zuverlässigkeit im Feld unterschätzen.
- Die Korrelationen der Zufallsvariablen sind auf der Grundlage der verfügbaren Daten schwer zu bestimmen. Für das vorliegende Prototypmodell werden sie geschätzt. Zukünftig sollen systematische Untersuchungen zur Beschreibung der Parameterkorrelation durchgeführt werden. Dies muss mit einer gesicherten Datenqualität einhergehen.
- Zusätzlich hängt die Messung der hydraulischen Parameter stark vom zuständigen Experten ab. Messkampagnen sind daher sowohl in Bezug auf die verwendete Messtechnik als auch in Bezug auf die Auswertung, die derzeit noch manuell durchgeführt wird, schwer vergleichbar.
- Das Modell kann durchaus als datenhungrig beschrieben werden. Dieser Nachteil kann gegebenenfalls durch weitergehende Forschung zur Beschreibung der hydraulischen Lasten mit

Hilfe statistischer Methoden (z. B. Bayesian networks) ausgeglichen werden.

- Das derzeitige Modell kann nur die Entstehung eines Initialschadens unter Verwendung der optischen Klassifikation vorhersagen. Es sollte zukünftig geprüft werden, ob mit Hilfe der Markov-Ketten und der Schadens Kennzahlen auch eine Vorhersage der Schadensentwicklung möglich ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass diese Nachteile zu einer Überschätzung der Versagenswahrscheinlichkeit- und/oder Inspektionsintervalle führen können, die für DEK-2006 und KuK-2015 wahrscheinlich zu beobachten sind.

8.6 Fazit

Dieser Abschnitt skizziert Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse der hydraulischen Bemessung von Deckwerken. Ein erstes Berechnungsmodell, die Verteilungen der Parameter und Korrelationen wurden ermittelt. Die aus der Zuverlässigkeitsanalyse erhaltenen Versagenswahrscheinlichkeiten werden als Übergangswahrscheinlichkeiten verwendet, um mittels einer Markov-Kette den Anfangsschaden vorherzusagen.

Der vorgeschlagene Ansatz kann bei der Planung von Inspektionsintervallen auf der Grundlage der geschätzten Zeit oder Anzahl der Schiffspassagen bis zum Initialschaden hilfreich sein. Der größte Wert der Untersuchungen liegt jedoch in der Identifizierung der Parameter mit dem größten Einfluss auf das Versagen und der ergänzenden Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeiten. Die Verwendung einer Markov-Kette ermöglicht eine einfache Interpretation der Ausfallwahrscheinlichkeiten, indem sie die Wahrscheinlichkeit des Anfangsschadens in Bezug auf Verkehr oder Zeit visualisiert. Da für die Bemessung von Deckwerken keine Zielwahrscheinlichkeiten existieren und Zielzuverlässigkeiten (target reliability) anderer Ingenieurbauwerke nicht eins zu eins übertragen werden können, kann die vorgestellte Methodik eine Klassifizierung der Versagenswahrscheinlichkeiten ermöglichen, die zur Definition möglicher Bemessungswerte führt.

Weitere Forschung ist erforderlich, um fortschreitende Schäden mit dem Verkehr zu verknüpfen. Folgt man dem exponentiell wachsenden Markov-Ketten - Ansatz, dann können insbesondere anfängliche Schäden bei stark befahrenen Wasserstraßen schwerwiegend sein. Darüber hinaus unterstreichen die Ergebnisse die Notwendigkeit, repräsentative Datensätze zu sammeln. Es wird daher empfohlen, die Dauer der Messkampagnen zu verlängern und die Messungen und Feldbeobachtungen zu standardisieren. Abschließend ist anzumerken, dass die in einer Markov-Kette enthaltene Annahme einer exponentiell fortschreitenden Schadensinitiierung übermäßig konservativ sein könnte. Eine Erweiterung des derzeitigen Modells ist wünschenswert. Hierfür ist es jedoch sicherlich erforderlich, dass hydraulische Belastungen, Schäden und Instandhaltung an der Wasserstraße in der täglichen Arbeit dokumentiert oder aus Feld- und Modellversuchen ermittelt werden.

9 Erkenntnisse und weitere Forschungsbedarf

9.1 Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse

Mit Hilfe der Experteninterviews konnte die Forschungsfrage geschärft, relevante Schadensmuster und Schadensursachen identifiziert und auf dieser Basis ein geeignetes physikalisches Modell errichtet werden. Die Experteninterviews geben ein besseres Verständnis der aktuellen Instandhaltungsprozesse in den Außenbezirken. Sie zeigen Möglichkeiten, aber auch Grenzen im Hinblick auf neu zu etablierende Instandhaltungs- und Dokumentationsprozesse auf. Beispielsweise können bestehende Schadens- und/oder Instandhaltungsdokumentationen vorerst nicht für eine vergleichende Langzeitanalyse des Deckwerkszustandes herangezogen werden, da sie sich in Detail und Ziel unterscheiden. Die Ergebnisse der Experteninterviews verdeutlichen zudem die Notwendigkeit, zwischen Schaden und Versagen sowie Instandhaltung und Bemessung in Sprachgebrauch und Richtlinien zu differenzieren. Darüber hinaus wird das bestehende Klassifizierungssystem von Kayser (2015) auf Grundlage der Experteninterviews um einen Zwischenzustand erweitert.

Basierend auf den Ergebnissen der Experteninterviews wurde ein großmaßstäblicher Modellversuch auf dem BAW-Gelände durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen ein typisches Schadensbild. Die Deckwerkssteine aus dem Wasserwechselbereich verlagern sich zum Böschungsfuß hin. Die Oberkante der Böschung steilt sich leicht auf. Es entsteht ein S-Profil. Die Versuchsergebnisse lassen zudem die Vermutung zu, dass mit zunehmender Versuchsdauer die Schädigungsrate abnimmt. Diese Beobachtung entspricht den gängigen Modellvorstellungen in der Literatur. Weiterhin kann festgestellt werden, dass die neuen Untersuchungen und die entsprechende Erfassung des Deckwerkszustands mit Laserscans im Einklang mit früheren Studien stehen. Der Vergleich der Ergebnisse aus der Wellengrube mit vorangegangenen Studien zeigt, dass die Fokussierung auf eine Schadenskennzahl keine vergleichbaren Informationen für verschiedene Arten von Strukturen und Konstruktionen liefert. Wenn man davon ausgeht, dass das Versagen die Exposition der Filterschicht ist, sollte mindestens ein Versagenskriterium unabhängig von den Eigenschaften der Strukturen sein. Daher sollte \bar{C} , das die noch vorhandene Deckschichtdicke angibt, in Zukunft die Versagenskriterien \bar{S} und \bar{E} ergänzen.

Für die probabilistische Zustandsbewertung werden ein Modell, Parameterverteilungen der Eingangsvariablen und deren Korrelationen ermittelt. Der vorgeschlagene Ansatz zur Prognose der Schadensentwicklung mittels Markov-Ketten kann bei der Planung von Inspektionsintervallen auf der Grundlage der geschätzten Zeit oder Anzahl der Schiffspassagen bis zum ersten Schaden helfen. Die Markov-Kette ermöglicht eine einfache Interpretation von Versagenswahrscheinlichkeiten, indem sie die Wahrscheinlichkeit von Initialschäden auf Verkehr oder Zeit bezieht. Möglicherweise kann sie als ein Hilfsmittel zur Festlegung von Zielzuverlässigkeiten verwendet werden. Darüber hinaus verdeutlichen die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse die Notwendigkeit, repräsentative Datensätze zu erheben. Es wird daher empfohlen, die Dauer der Messkampagnen zu verlängern und Feldbeobachtungen sowie deren Auswertung zu standardisieren.

Für die Prognose der Schadensentwicklung und die langfristige Planung von Instandhaltungsmaßnahmen ist eine Dokumentation der Schäden und Instandhaltungsmaßnahmen zwingend erforder-

lich. Dies erscheint jedoch nur dann sinnvoll, wenn eine Automatisierung unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit und der organisatorisch unterschiedlichen Arbeitsabläufe in den Außenbezirken möglich ist. Dies könnte beispielsweise durch ein einfaches Datenbanksystem erreicht werden in dem direkt vor Ort wesentliche Informationen zum Schaden (Foto, Aufmaß) sowie der dazugehörigen Instandsetzungsmaßnahme erfasst werden.

9.2 Weiterer Forschungsbedarf

Die Auswertung der Wellenhöhen und Strömungsgeschwindigkeiten bei verschiedenen Versuchen zeigt, dass die Belastungen an ausgewählten Böschungspunkten zwischen den einzelnen Versuchen nur bedingt vergleichbar sind. In der ersten ausgewerteten Versuchsreihe kann ein signifikanter Unterschied der Deckwerksschädigung zwischen linken und rechtem Deckwerksbereich beobachtet werden. Ob der Unterschied der räumlichen Schadensentwicklung tatsächlich aus einer asymmetrischen Belastung in der Wellengrube durch Turbulenzen oder aus einer Vorschädigung bzw. unregelmäßigen Einbauweise resultiert, ist mit der Auswertung der weiteren Versuche zu prüfen. Eine weitergehende Auswertung der Versuchsergebnisse muss zudem prüfen, inwiefern die Beobachtungen aus der Wellengrube auf die Wasserstraße übertragbar sind.

Eine Analyse der bisher bei Feldbeobachtungen erhobenen Daten zeigt, dass die quantitative Auswertung der Wellenhöhen und Strömungsgeschwindigkeiten stark von der/dem SachbearbeiterIn abhängt. Auch Qualität und Inhalt der Messberichte variieren zwischen den einzelnen Kampagnen. Derzeit gibt es weder einen vollständig standardisierten Messaufbau noch standardisierte Vorgaben für die Auswertung der Messungen. Um die Daten zukünftig in einer Bemessung zu verwenden, sollte eine Automatisierung und Standardisierung der Feldmessungen erfolgen. Des Weiteren sollte das Konzept zur Qualitätssicherung der Daten erweitert und in Anwendung gebracht werden. Dem erforderlichen Umfang der Datenerfassung wird derzeit gemeinsam mit dem WSA Rheine und dem Außenbezirk Münster am Dortmund-Ems-Kanal durch die Errichtung einer Dauermessstelle nachgegangen. Die Messstelle ist im Juni 2019 in den Messbetrieb gegangen. Gegebenenfalls können diese Daten auch zur Entwicklung von statistischen Methoden zur Beschreibung der hydraulischen Lasten verwendet werden.

Zuverlässigkeitsbasierte Methoden stützen sich ebenso sehr auf die Bemessungsgleichungen wie deterministische Methoden. Daher ist eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Bemessungsgleichungen eine wesentliche Komponente für eine zukunftsorientierte und zuverlässige Deckwerksbemessung. Dies betrifft die Gleichungen der hydraulischen und geotechnischen Bemessung gleichermaßen, da beide Bemessungsansätze überwiegend auf Modell- und Naturmessungen basieren und eine Zahl von empirischen Faktoren beinhalten.

Des Weiteren wird im vorliegenden Prototyp des probabilistischen Bewertungsmodells die Korrelationsmatrix der Eingangsparameter auf Basis einer Korrelationsanalyse der Beispieldatensätze und zusätzlichem technischen Wissen einheitlich für alle Wasserstraßen geschätzt. Zukünftig sollte eine systematische Untersuchung zur Beschreibung der Parameterkorrelation angestrebt werden. Darüber hinaus verdeutlichen die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse die Notwendigkeit, repräsentative Daten zu erheben. Weitergehende Betrachtungen sind erforderlich, um Kriterien zu

identifizieren, die es erlauben, die Repräsentativität eines Datensatzes im Kontext einer probabilistischen Deckwerksbewertung zu beurteilen.

Nicht zuletzt besteht weiterer Forschungsbedarf bei der Aufgabe, fortschreitende Schäden mit dem Verkehr bzw. den Lasten zu verbinden. Eine Erweiterung des aktuellen Markov-Ketten-Modells, z. B. in Richtung einer inhomogenen Markov-Kette oder unter Verwendung von Schadens Kennzahlen, ist wünschenswert. Solange hydraulische Lasten, Schäden und Instandhaltungsarbeiten jedoch nicht vergleichbar erfasst und dokumentiert werden, ist dieser Fortschritt kaum möglich.

Literaturverzeichnis

Bücher, Artikel und Dissertationen

Abdo, T. und R. Rackwitz (1991): A New Beta-Point Algorithm for Large Time-Invariant and Time-Variant Reliability Problems. In: *Reliability and Optimization of Structural Systems '90. Lecture Notes in Engineering* (Berlin, Heidelberg). Hrsg. von A. Der Kiureghian und P. Thoft-Christensen. 61. Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-84362-4.

AGREE (1957): *Reliability of Military Electronic Equipment: Report*. Hrsg. von US Department of Defense.

Ahrens, J. P. (1970): The influence of breaker type on riprap stability. In: *Proceedings of 12th Conference on Coastal Engineering, Washington D.C.* Hrsg. von American Society of Civil Engineers. Bd. 12. Coastal Engineering 12, S. 1557–1566.

Ang, A. H. und W. H. Tang (1975): *Probability concepts in engineering planning and design*. New York: Wiley. ISBN: 9780471032007.

Ang, A. H. und W. H. Tang (2007): *Probability concepts in engineering. Emphasis on applications in civil & environmental engineering*. eng. Hoboken, NJ: Wiley. 406 S. ISBN: 978-0-471-72064-5.

Baecher, G. B. und J. T. Christian (2003): *Reliability and statistics in geotechnical engineering*. eng. Chichester: Wiley. ISBN: 9780471498339.

Bakker, K. J. und J. K. Vrijling (1980): *Probabilistic design of sea defences*. Hrsg. von TU Delft, Section Hydraulic Engineering.

Barends, F. B. J. und J. J. van Dijk (1985): *Computer aided evaluation of the reliability of a breakwater design. Final report*. Hydraulic Engineering Reports. Zoetermeer: CIAD. ISBN: 9789068180190.

Baudin, M., A. Dutfoy, B. Iooss und A.-L. Popelin (2015): *OpenTURNS. An industrial software for uncertainty quantification in simulation*. arXiv:1501.05242.

Benjamin, J. R. und C. A. Cornell (1976): *Probability, statistics, and decision for civil engineers*. New York: McGraw-Hill Book Co. ISBN: 0070045496.

Beyer, T. (2007): Vergleich von Modellversuchen zur Fahrt eines Grossmotorschiffes in zwei verschiedenen Kanalprofilen mit Berechnungen nach GBB. Diplomarbeit. München: Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Institut für Wasserwesen.

Bezuijen, A., M. Klein Breteler und K. J. Bakker (1987): *Design criteria for placed block revetments and granular filters. 2nd Copedec, Beijing, China*.

Biles, W. E., D. Sasso und J. K. Billbrey (2004): Integration of Simulation and Geographic Information Systems. Modeling Traffic Flow on Inland Waterways. In: *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference. Washington Hilton and Towers, Washington, D.C., U.S.A., December 5-8, 2004*. 2004 Winter Simulation Conference, 2004 (Washington, D.C). Hrsg. von R. G. Ingalls. Association for Computing Machinery, Institute of Electrical and Electronics Engineers und Winter Simulation

Conference. New York, N.Y und Piscataway, N.J.: Association for Computing Machinery, S. 331–337. ISBN: 0-7803-8786-4.

Blaauw, H. G., F. C. M. van der Knaap, M. T. de Groot und K. W. v (1984): *Design of bank protection of inland navigation fairways*. Hrsg. von Delft Hydraulics Laboratory.

Blodgett, J. C. und C. E. McConaughy (1986): *Rock Riprap for Protection of Stream Channels Near Highway Structures. Volume 2 - Evaluation of Riprap Design Procedures. U.S. Geological Survey. Water Resources Investigations Report 86-4128*. Prepared in Cooperation with Federal Highway Administration.

Bogner, A., B. Littig und W. Menz, Hrsg. (2009): *Experteninterviews. Theorien, Methoden, Anwendungsfelder*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. ISBN: 9783531162591.

Broderick, L. (1983): Riprap stability, a progress report. In: *Proceedings of Coastal Structures '83, Arlington, Virginia*. Hrsg. von J. R. Weggel, S. 320–330.

Bruining, J. W. (1994): Wave forces on vertical breakwaters. Master thesis. Delft: Delft University of Technology.

Buijs, F. A., J. W. Hall, P. B. Sayers und P. H. A. J. M. van Gelder (2009): Time-dependent reliability analysis of flood defences. In: *Reliability Engineering & System Safety* 94 (12), S. 1942–1953. ISSN: 09518320.

Campos, Á. (2016): A methodology for the analysis of damage progression in rubble mound breakwaters. PhD thesis. Ciudad Real, Spain: Universidad de Castilla-La Mancha,

Campos, Á., C. Castillo und R. Molina (2014): ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE DIFFERENT VARIABLES INVOLVED IN A DAMAGE PROGRESSION PROBABILITY MODEL. In: *Coastal Engineering Proceedings* 1 (34), S. 70. ISSN: 2156-1028.

Campos, Á., C. Castillo und R. Molina-Sanchez (2020): Damage in Rubble Mound Breakwaters. Part I: Historical Review of Damage Models. In: *Journal of Marine Science and Engineering* 8 (5), S. 317. ISSN: 2077-1312.

Castillo, C., E. Castillo, A. Fernández-Canteli, R. Molina und R. Gómez (2012): Stochastic Model for Damage Accumulation in Rubble-Mound Breakwaters Based on Compatibility Conditions and the Central Limit Theorem. In: *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 138 (6), S. 451–463. ISSN: 0733-950X.

Chan, K., A. Saltelli und S. Tarantola (1997): *Sensitivity analysis of model output: variance-based methods make the difference*. Hrsg. von S. Andradóttir, K. J. Healy, D. H. Withers und B. L. Nelson.

Christiani, E. (1997): Application of Reliability in Breakwater Design. PhD thesis. Aalborg: Aalborg Universitet.

CloudCompare (2018): *CloudCompare*. Version Version 2.11 alpha (Anoia).

COST WG 1 (2019): *Performance indicators*. URL: <https://www.tu1406.eu/working-groups/wg1-performance-indicators> (besucht am 03. 07. 2019).

Daemrich, K.-F., H. J. Mathias und C. Zimmermann (1996): Untersuchungen zur Bemessung von Deckwerken in Schifffahrtskanälen unter Wellenbelastung. Einfluss der Deckschichtdicke auf die Stabilität der Deckschicht. In: *Wellen. Wirkungen am Ufer-Befestigungen; Wasserbaukolloquium '96 an der TU Dresden am 19. September 1996*. Hrsg. von H.-B. Horlacher. Dresdener Wasserbauliche Mitteilungen 9. Dresden, S. 199–209. ISBN: 3-86005-165-2.

Der Kiureghian, A. und O. Ditlevsen (2009): Aleatory or epistemic? Does it matter? In: *Structural Safety* 31 (2), S. 105–112. ISSN: 0167-4730.

Ditlevsen, O. und H. O. Madsen (2005): *Structural Reliability Methods*. Hrsg. von H. Jun. Shanghai: Tongji University Press.

DST (2006): *Bericht 1794: Modellversuche zu schiffsinduzierten Wirkungen auf Ufer [unveröffentlicht]*. Hrsg. von E. für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.

Dutfoy, A. und R. Lebrun (2007): *Le test du maximum fort : une façon efficace de valider la qualité d'un point de conception. 18ème Congrès Français de Mécanique, Grenoble*. URL: <http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/15776/CFM2007-0441.pdf?sequence=1>.

Fermi, E. und R. D. Richtmyer (1948): *Note on census-taking in Monte Carlo calculations*.

Fischer, N., M. Treiber und B. Söhnngen (2014): Modeling and simulating traffic flow on inland waterways. In: *Proceedings of PIANC World Congress 2014*. Hrsg. von Permanent International Association of Navigation Congresses, S. 1–20.

Fleischer, P. und J. Kayser (2006): *BAW-Gutachten. BAW-Grundsatzaufgabe. Bestandsaufnahme von Deckwerken. Aufgabenstellung und Struktur. 4. Teilbericht (BAW-Gutachten: A39520410006.04 [unveröffentlicht])*. Bundesanstalt für Wasserbau.

Font, J. B. (1968): The effect of storm duration on rubble mound breakwater stability. In: *Coastal Engineering Proceedings* 1 (11), S. 779–786.

Font, J. B. (1970): Damage functions for a rubble-mound breakwater under the effect of swells. In: *Proceedings of 12th Conference on Coastal Engineering, Washington D.C., USA*. Hrsg. von American Society of Civil Engineers. Bd. 1. Coastal Engineering 12, S. 1567–1586.

Führer, M. und K. Römisch (1981): *Dimensionierung von Sohlen- und Böschungsbefestigungen an Schifffahrtskanälen. Erweiterte Fassung eines Teil-Beitrages zum XXV. Internationalen Schifffahrtskongress, Edinburgh*.

Gier, F. (2017): Zur Bemessung von verzahnten Setzsteindeckwerken gegen hydrodynamische Belastungen. PhD thesis. Aachen: RWTH Aachen.

Girmscheid, G. und A. Fastrich (2010): Optimierungsmodell - Probabilistische Optimierung der Strassenunterhaltmassnahmen mittels Markov-Ketten und Monte-Carlo-Simulation. In: *Bauingenieur* (11), S. 471–481.

Gläser, J. und G. Laudel (2010): *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. ISBN: 978-3-531-17238-5.

Hacking, I. (1975): *The Emergence of Probability*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN: 9780511817557.

Hamby, D. M. (1994): A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. In: *Environmental Monitoring and Assessment* 32 (2), S. 135–154.

Hansen, M. (2004): *Zur Auswirkung von Überwachungsmaßnahmen auf die Zuverlässigkeit von Betonbauteilen*. Univ., Diss.–Hannover, 2003. ger. Bd. 2. Berichte des Instituts für Massivbau der Universität Hannover. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag. 216 S. ISBN: 3-8167-6611-0.

Hasofer, A. M. und N. C. Lind (1974): Exact and Invariant Second-Moment Code Format. In: *Journal of the Engineering Mechanics Division* 100 (1), S. 111–121.

Hedar, A. (1965): *Design Of Rock-Fill Breakwaters*. American Society of Civil Engineers.

Heller, V. (2011): Scale effects in physical hydraulic engineering models. In: *Journal of Hydraulic Research* 49 (3), S. 293–306.

Hofland, B., P. Rosa-Santos, F. Taveira-Pinto, E. de Almeida, R. Lemos, A. Mendonça Conceição und J. Fortes (2018): Measuring damage in physical model tests of rubble mounds. In: *Coasts, marine structures and breakwaters. Realising the potential; proceedings of the 11th international conference organised by the Institution of Civil Engineers and held in Liverpool on 05 to 07 September 2017*. Hrsg. von K. Burgess. London: Thomas Telford, BW17:125:1–BW17:125:10. ISBN: 978-0-7277-6317-4.

Hofland, B., M. Disco und M. Gent (2014): DAMAGE CHARACTERIZATION OF RUBBLE MOUND ROUND-HEADS. In: *Coastlab14 – Varna: APPLICATION OF PHYSICAL MODELLING TO PORT AND COASTAL PROTECTION. 29 September - 2 October 2014 Varna, Bulgaria*. Hrsg. von V. Penchev und F. Taveira-Pinto. Bd. 1. BlackSea – Danube Coastal Research Association (BDCA).

Hofland, B., M. R. A. van Gent, T. Raaijmakers und F. Liefhebber (2013): DAMAGE EVALUATION USING THE DAMAGE DEPTH. In: *Coastal Structures 2011*. Proceedings of the 6th International Conference (Yokohama, Japan). Hrsg. von S. Takahashi, M. Isobe, N. Kobayashi und K.-i. Shimosako. World Scientific, S. 812–823. ISBN: 978-981-4412-20-9.

Honer, A. (1994): Das explorative Interview: zur Rekonstruktion der Relevanzen von Expertinnen und anderen Leuten. In: *Schweizer Zeitschrift für Soziologie* 20 (3), S. 623–640.

Hopf, C. (1978): Die Pseudo-Exploration - Überlegungen zur Technik qualitativer Interviews in der Sozialforschung. In: *Zeitschrift für Soziologie* 7 (2), S. 97–115.

Hudson, R. Y. (1959): Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters. In: *Journal of the Waterways and Harbor Division, ASCE* 85 (WW3), S. 610–659.

IBS (2006): *Bericht zu den Schiffsbeobachtungen am Dortmund-Ems-Kanal - Nordstrecke. Messungen vom 11.07.2006 bis 25.07.2006 (unveröffentlicht)*. Hrsg. von Ingenieurbüro Schmid.

IBS (2007a): *Bericht zu den Schiffsbeobachtungen am Silokanal. Messungen vom 30.05.2007 bis 05.06.2007 (unveröffentlicht)*. Hrsg. von Ingenieurbüro Schmid.

IBS (2007b): *Bericht zu den Schiffsbeobachtungen am Wesel–Datteln–Kanal in der Stauhaltung Dors-ten. Messungen vom August 2007 (unveröffentlicht)*. Hrsg. von Ingenieurbüro Schmid.

IBS (2008a): *Bericht zu den weiteren Auswertungen der Schiffsbeobachtungen am WDK, Juni 2008. Messungen vom August 2007 (unveröffentlicht)*. Hrsg. von Ingenieurbüro Schmid.

IBS (2008b): *Kurzbericht zur Datenaufbereitung der Schiffsbeobachtungen am Wesel-Datteln-Kanal (unveröffentlicht)*. Hrsg. von Ingenieurbüro Schmid.

IBS (2015): *Bericht zu den Verkehrsbeobachtungen am Küstenkanal km 15,96 und km 46,90. Messungen vom Juni 2015 (unveröffentlicht)*. Hrsg. von Ingenieurbüro Schmid.

IBS (2016): *Bericht zu den weiteren Auswertungen der Verkehrsbeobachtungen am Küstenkanal km 15,96 und km 46,90. Messungen vom Juni 2015 (unveröffentlicht)*. Hrsg. von Ingenieurbüro Schmid.

Iribarren, R. und C. Nogales (1952): New confirmation of the formula for the calculation of rock fill dikes. In: *Proceedings of the Third Conference on Coastal Engineering. Third International Conference on Coastal Engineering* (Cambridge, Massachusetts, USA). Hrsg. von Council on Wave Research, S. 185–189.

Jafarnejad, M., M. Pfister, E. Brühwiler und A. J. Schleiss (2017): Probabilistic failure analysis of riprap as riverbank protection under flood uncertainties. In: *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 31 (7), S. 1839–1851. ISSN: 1436-3240.

Jafarnejad, M., M. Pfister und A. J. Schleiss (2012): Failure risk analysis of riverbank ripraps with Monte Carlo simulation. In: *River flow 2012. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, San José, Costa Rica, 5-7 September 2012*. Hrsg. von R. Murillo Muñoz. CRC Press, S. 1325–1330. ISBN: 978-0-415-62129-8.

Julien, P. Y. (2002): *River mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN: 9780521562843.

Kanning, W. (2007): *Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies Analysis and influence of uncertainties on the reliability of flood defence systems. FLOODSite. Report Number T07-07-03*.

Kayser, J. (2003): *BAW-Gutachten. Bestandsaufnahme vorhandener Deckwerke. Teil 2: Dortmund-Ems-Kanal, km 79,35 - 84,00 (BAW-Gutachten: B3952.04.04.10006 [unveröffentlicht])*. Bundesanstalt für Wasserbau.

Kayser, J. (2006): *BAW-Gutachten. BAW-Grundsatzaufgabe. Bestandsaufnahme von Deckwerken Untersuchungen am Main-Donau-Kanal, 5. Teilbericht (BAW-Gutachten: A39520410006.05 [unveröffentlicht])*. Bundesanstalt für Wasserbau.

Kayser, J. (2007a): *BAW-Gutachten. BAW-Grundsatzaufgabe. Bestandsaufnahme von Deckwerken. 8. Teilbericht. Untersuchungen am Wesel-Datteln-Kanal (BAW-Gutachten: A39520410006.08 [unveröffentlicht])*. Bundesanstalt für Wasserbau.

Kayser, J. (2007b): *BAW-Gutachten. Bestandsaufnahme von Deckwerken. Teilbericht Dortmund – Ems – Kanal, Lose 14 und 15 (BAW-Gutachten: A39520410006.07 [unveröffentlicht])*. Bundesanstalt für Wasserbau.

- Kayser, J. (2008): *BAW-Gutachten. BAW Grundsatzaufgabe. Bestandsaufnahme von Deckwerken. 9. Teilbericht. Untersuchungen an der DEK-Nordstrecke (BAW-Gutachten: A39520410006.09 [unveröffentlicht])*. Bundesanstalt für Wasserbau.
- Kayser, J. (2015): *FuE-Abschlussbericht: Entwicklung des Zustands von Deckwerken bei Absenkung des technischen Standards (report A39520470004)*. Bundesanstalt für Wasserbau.
- Klerk, W. J., J. M. van der Hammen, K. Wojciechowska und R. Pot (2018): A framework for assessing information quality in asset management of flood defences. In: *Life Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering. Towards an Integrated Vision: Proceedings of the Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2018), 28-31 October 2018, Ghent, Belgium*. Hrsg. von R. Caspeele, L. Taerwe und D. M. Frangopol. CRC Press, S. 673–689. ISBN: 9781351857567.
- Kobus, H. (1984): *Wasserbauliches Versuchswesen*. Bd. 39. Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. Kobus, Helmut (Hrsg.) Hamburg: Parey. 353 S. ISBN: 3-490-03997-1.
- Köhler, H. J. (1985): Modellversuche für die Dimensionierung von Deckwerken an Wasserstraßen - Stabilität loser Steinschüttungen -. In: *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau* (56), S. 69–101. ISSN: 0572-5801.
- Köhler, H. J. (1997): Porenwasserdruckausbreitung im Boden, Messverfahren und Berechnungsansätze. In: *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau* (75), S. 84–108.
- Kortenhaus, A. (2003): Probabilistische Methoden für Nordseedeiche. PhD thesis. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, Fachbereich Bauingenieurwesen.
- Kreyenschulte, M. (2020): Wellen-Bauwerks-Interaktion bei mörtelvergossenen Schüttsteindeckwerken. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Aachen: RWTH Aachen.
- Kuhnert, P. M., T. G. Martin und S. P. Griffiths (2010): A guide to eliciting and using expert knowledge in Bayesian ecological models. ENG. In: *Ecology letters* 13 (7), S. 900–914. ISSN: 1461-023X.
- Kühni, K., J. Bödefeld und C. Kunz (2008): EMS-WSV - Ein Erhaltungsmanagementsystem für Verkehrswasserbauwerke. In: *Bautechnik* 85 (8), S. 514–520. ISSN: 09328351.
- Lacasse, S., F. Nadim, L. Høeg und Z. Q. Liu (2013): An homage to Wilson Tang: Reliability and risk in geotechnical engineering practice - How Wilson led the way. In: *Geotechnical Safety and Risk IV*. Hrsg. von L. Zhang, Y. Wang, G. Wang und L. Dianqing. CRC Press, S. 3–26. ISBN: 9781315797342.
- Lee, D. W., S. R. Abt, N. E. Hinkle, M. S. Khattak, J. D. Nelson, J. F. Ruff, A. Shaikh und R. J. Wittier (1987): *Development of riprap design criteria by riprap testing in flumes: Phase I. NU-REG/CR-4651, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., May, 111*.
- Lloyd, D. K. und M. Lipow (1962): *Reliability: Management, Methods, and Mathematics*.
- McBride, M. F. und M. A. Burgman (2012): What Is Expert Knowledge, How Is Such Knowledge Gathered, and How Do We Use It to Address Questions in Landscape Ecology? In: *Expert Knowledge and Its Application in Landscape Ecology*. Hrsg. von A. H. Perera, C. A. Drew und C. J. Johnson. New York NY: Springer Science+Business Media LLC. ISBN: 9781461410348.

- Melby, J. A. (2001): *Damage development on stone armored breakwaters and revetments. ERDC / CHLCHETN-III-64*. Hrsg. von US Army Engineer Research and Development Center.
- Melby, J. A. und N. Kobayashi (1998a): Damage Progression on Breakwaters. In: *Proceedings of 26th Coastal Engineering Conference, Copenhagen, Denmark*. Hrsg. von American Society of Civil Engineers. Bd. 2. Coastal Engineering 26, S. 1884–1897.
- Melby, J. A. und N. Kobayashi (1998b): Progression and Variability of Damage on Rubble Mound Breakwaters. In: *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 124 (6), S. 286–294. ISSN: 0733-950X.
- Metropolis, N., A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller und E. Teller (1953): Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. In: *The Journal of Chemical Physics* 21 (6), S. 1087–1092. ISSN: 0021-9606.
- Metropolis, N. und S. Ulam (1949): The Monte Carlo Method. In: *Journal of the American Statistical Association* 44 (247), S. 335–341. ISSN: 01621459.
- Meuser, M. und U. Nagel (1991): ExpertInneninterviews - vielfach erprobt, wenig bedacht: ein Beitrag zur qualitativen Methodendiskussion. In: *Qualitativ-empirische Sozialforschung: Konzepte, Methoden, Analysen*. Hrsg. von D. Garz und K. Kraimer. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 441–471. ISBN: 3-531-12289-4.
- Mieg, H. und M. Näf (2005): *Experteninterviews in den Umwelt- und Planungswissenschaften. Eine Einführung und Anleitung*. Skript. ETH Zürich, Institute of Human-Environment Systems.
- Mol, A., R. L. Groeneveld und A. J. Waanders (1984): Safety and reliability of breakwaters. In: *Coastal Engineering Proceedings* 1 (19), S. 2451–2466. ISSN: 2156-1028.
- Möllmann, A. F. (2009): Probabilistische Untersuchung von Hochwasserschutzdeichen mit analytischen Verfahren und der Finite-Elemente-Methode. PhD thesis. Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik.
- Morris, M. D. (1991): Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. In: *Technometrics* 33 (2), S. 161–174. ISSN: 00401706.
- Nataf, A. (1962): Détermination des distributions de probabilités dont les marges sont données. In: *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. Hrsg. von L'Académie des Sciences, S. 42–43.
- Ouellet, Y. (1972): Effects of irregular wave trains on rubble-mound breakwaters. In: *Journal of the Waterways and Coastal Engineering Division, ASCE* 98 (WW1), S. 1–13.
- Oumeraci, H., N. Allsop, M. T. de Groot, R. S. Crouch und J. K. Vrijling (1999): *MAST III / PROVERBS. Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters. MAS3 - CT95 - 0041. Final Report. VOLUME I*.
- Parzen, E. (1962): On Estimation of a Probability Density Function and Mode. In: *The Annals of Mathematical Statistics* 33 (3), S. 1065–1076. ISSN: 0003-4851.
- Pfadenhauer, M. (2009): Das Experteninterview. In: *Qualitative Marktforschung. Konzepte - Methoden - Analysen*. Hrsg. von R. Buber und H. H. Holzmüller. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, S. 449–461. ISBN: 978-3-8349-0976-3.

- Pham Quang, T., J. K. Vrijling, P. H. A. J. M. van Gelder und T. M. Thu (2010): Reliability-tools in geotechnical design, an approach for river dike analysis. In: *Proceeding of the International Symposium Hanoi Geoengineering 2010, Hanoi, Vietnam, 22-23 November 2010*.
- Phoon, K.-K. (2020): The story of statistics in geotechnical engineering. In: *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards* 14 (1), S. 3–25. ISSN: 1749-9518.
- PIANC (1987a): *Report of Working Group I-4: Guidelines for the design and construction of flexible revements incorporating geotextiles for inland waterways*. Hrsg. von Permanent International Association of Navigation Congresses.
- PIANC (1987b): *Risk consideration when determining bank protection requirements*. Hrsg. von Permanent International Association of Navigation Congresses.
- PIANC (1989): *Risk analysis in breakwater design. Report of PIANC Working Group No. 12 of Permanent Technical Committee II. Analysis of rubble mound breakwaters. Sub-Group C*. Hrsg. von Permanent International Association of Navigation Congresses.
- PIANC (2003): *Breakwaters with Vertical and Inclined Concrete Walls. Report of Working Group No. 28 of the Maritime Navigation Commission*. Hrsg. von Permanent International Association of Navigation Congresses.
- PIANC (2016): *Criteria for the Selection of Breakwater Types and their Related Optimum Safety Levels*. Hrsg. von Permanent International Association of Navigation Congresses.
- Pilarczyk, K. W. und den Boer, K. (1983): *Stability and profile development of coarse materials and their application in coastal engineering. Paper presented at the International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Colombo, Sri Lanka, March 20–26, 1983*. Hrsg. von D. H. Laboratory. Bd. 293.
- Pitt, J. D. und P. Ackers (1983): Prototype Tests on Riprap under Random Wave Attack. In: *Proceedings of the 18th Coastal Engineering Conference, November 14 - 19, 1982, Cape Town, Republic of South Africa*. Hrsg. von B. L. Edge. New York, NY: American Society of Civil Engineers, S. 1820–1836. ISBN: 978-0-87262-373-6.
- Possan, E. und J. J. d. O. Andrade (2014): Markov Chains and reliability analysis for reinforced concrete structure service life. In: *Materials Research* 17 (3), S. 593–602. ISSN: 1980-5373.
- Rackwitz, R. und B. Fiessler (1978): Structural reliability under combined random load sequences. In: *Computers & Structures* 9 (5), S. 489–494. ISSN: 00457949.
- Rosenblatt, M. (1952): Remarks on a Multivariate Transformation. In: *The Annals of Mathematical Statistics* 23 (3), S. 470–472. ISSN: 0003-4851.
- Rosenblatt, M. (1956): Remarks on Some Nonparametric Estimates of a Density Function. In: *The Annals of Mathematical Statistics* 27 (3), S. 832–837.
- Rubinstein, R. Y. und D. P. Kroese (2016): *Simulation and the Monte Carlo Method*. Wiley Series in Probability and Statistics. Newark: Wiley. ISBN: 9781118631980.

Sachs, L. und J. Hedderich (2009): *Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R*. ger. 13., aktualisierte und erw. Aufl. Dordrecht: Springer. ISBN: 978-3-540-88901-4.

Saito, M. und M. Matsumoto (2008): SIMD-Oriented Fast Mersenne Twister. A 128-bit Pseudorandom Number Generator. In: *Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Methods 2006*. Hrsg. von A. Keller, S. Heinrich und H. Niederreiter. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 607–622.

Saltelli, A. (2008): *Global sensitivity analysis. The primer*. Chichester u.a.: Wiley. ISBN: 978-0-470-05997-5.

Sánchez-Arcilla, A., J. Gomez Aguar, J. J. Egozcue, M. I. Ortego, P. Galiatsatou und P. Prinos (2010): Extremes from scarce data. The role of Bayesian and scaling techniques in reducing uncertainty. In: *Journal of Hydraulic Research* 46 (sup2), S. 224–234.

Schüttrumpf, H., A. Kortenhaus, P. Fröhle und K. Peters (2008): *Analysis of uncertainties in coastal structure design by expert judgement. Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering*. Darmstadt: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft.

Sebastian-Coleman, L. (2012): *Measuring Data Quality for Ongoing Improvement. A Data Quality Assessment Framework*. The Morgan Kaufmann Series on Business Intelligence. Burlington: Elsevier Science. ISBN: 9781283933186.

Sorgatz, J. und R. Soyeaux (2019): *BAW-Gutachten. Geotechnik am Küstenkanal. Baugrund und Deckwerk (BAW-Gutachten: B3952.04.01.10313 [unveröffentlicht])*. Bundesanstalt für Wasserbau.

Soyeaux, R. (2009): *BAW-Gutachten. Ausbau der Unteren Havel-Wasserstraße (UHW-km 32,610 - 54,250) - Ufersicherungen - (BAW-Gutachten: A39530406303 [unveröffentlicht])*. Hrsg. von Bundesanstalt für Wasserbau.

Stein, J. (2008): *BAW-Gutachten. Bestandsaufnahme von Deckwerken. Teilbericht 6. DEK Los 2b (BAW-Gutachten: B3952.04.04.10006 [unveröffentlicht])*. Bundesanstalt für Wasserbau.

Teixeira, A. (2012): *Reliability and Cost Models of Axial Pile Foundations*. PhD thesis. Minho: Universidade do Minho.

Thompson, D. M. und R. M. Shuttler (1975): *Riprap design for wind-wave attack - A laboratory study in random waves. Wallingford report EX707 for CIRIA*. Hrsg. von HR Wallingford.

Uliczka, K. (2018): *FuE-Abschlussbericht. Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen (report B3955.02.04.70141)*. Hrsg. von Bundesanstalt für Wasserbau.

van Dantzig, D. (1956): Economic Decision Problems for Flood Prevention. In: *Econometrica* 24 (3), S. 276–287. ISSN: 00129682.

van de Kreeke, J. (1969): Damage function of rubble-mound breakwaters. In: *Journal of the Waterways and Harbor Division, ASCE* 95 (WW3), S. 345–354.

van der Meer, J. W. (1987): Stability of breakwater armour layers — design formulae. In: *Coastal Engineering* 11 (3), S. 219–239.

- van der Meer, J. W. (1988a): Deterministic and Probabilistic Design of Breakwater Armor Layers. In: *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 114 (1), S. 66–80.
- van der Meer, J. W. (1988b): Rock Slopes and Gravel Beaches under Wave Attack. PhD thesis. Delft: Delft University of Technology.
- van der Meer, J. W. (2000): *Design of concrete armour layers*. Hrsg. von I. J. Losada. pp. 213–221. URL: http://www.vandermeerconsulting.nl/downloads/stability_c/1999_vandermeer.pdf (besucht am 10.08.2021).
- van der Meer, J. W. und K. W. Pilarczyk (1984): *Stability of rubble mound slopes under random wave attack. Presented at 19th International Conference on Coastal Engineering, 3–7 September 1984, Houston*. Hrsg. von Delft Hydraulics Laboratory.
- van Gelder, P. H. A. J. . (2009): *Reliability Analysis of Flood and Sea Defence Structures and Systems. FLOODSite. Report Number T07-08-01*.
- van Gelder, P. H. A. J. M. und C. V. Mai (2008): Distribution functions of extreme sea waves and river discharges. In: *Journal of Hydraulic Research* 46 (2), S. 280–291.
- van Noortwijk, J. M., J. A. M. van der Weide, M. J. Kallen und M. D. Pandey (2007): Gamma processes and peaks-over-threshold distributions for time-dependent reliability. In: *Reliability Engineering & System Safety* 92 (12), S. 1651–1658. ISSN: 09518320.
- Veiga, A. K., A. M. Saraiva, A. D. Chapman, P. J. Morris, C. Gendreau, D. Schigel und T. J. Robertson (2017): A conceptual framework for quality assessment and management of biodiversity data. In: *PloS one* 12 (6).
- Verheij, H. J. und M. P. Bogaerts (1989): *Ship waves and stability of armour layers protecting slopes. Paper presented at the 9th International Harbour Congress*. Hrsg. von Delft Hydraulics Laboratory. Delft.
- Voortman, H. G. (2003): Risk-based design of large-scale flood defence systems. PhD thesis. Delft: Delft University of Technology.
- Vrijling, J. K. (1993): Development in Probabilistic Design of Flood Defenses in the Netherlands. In: *Reliability and Uncertainty Analyses in Hydraulic Design*. Hrsg. von B. C. Yen und Y.-K. Tung. New York, NY: American Society of Civil Engineers, S. 133–178. ISBN: 0872629937.
- Vrijling, J. K. (1999): *MAST III/PROVERBS: Probabilistic design tools for vertical breakwaters. Vol. 2d: Probabilistic aspects*.
- Vrijling, J. K. (2001): Probabilistic design of water defense systems in The Netherlands. In: *Reliability Engineering & System Safety* 74 (3), S. 337–344.
- Vrijling, J. K. und P. H. A. J. M. van Gelder (1997): Probabilistic Design of Berm Breakwaters. In: *Engineering Probabilistic Design and Maintenance for Flood Protection*. Hrsg. von R. Cooke, M. Mendel und J. K. Vrijling. Boston, MA: Springer US, S. 181–198. ISBN: 978-1-4613-3399-9.
- Weidema, B. P. (1998): Multi-user test of the data quality matrix for product life cycle inventory data. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 3 (5), S. 259–265. ISSN: 0948-3349.

Weidema, B. P. und M. S. Wesnæs (1996): Data quality management for life cycle inventories—an example of using data quality indicators. In: *Journal of Cleaner Production* 4 (3-4), S. 167–174. ISSN: 09596526.

Weißmann, R. (2014): Probabilistische Bewertung der Zuverlässigkeit von Flussdeichen unter hydraulischen und geotechnischen Gesichtspunkten. PhD thesis. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.

Westrich, B., R. Siebel, P. A. Vermeer und B. Zwechper (2003): *Neue naturnahe Bauweisen für überströmbare Dämme an dezentralen Hochwasserrückhaltebecken und Erprobung von Erkundungsmethoden zur Beurteilung der Sicherheit von Absperrdämmen. Schlussbericht zum BWPLUS Forschungsprojekt Stuttgart.*

Wichmann, B. A. und I. D. Hill (1982): Algorithm AS 183. An Efficient and Portable Pseudo-Random Number Generator. In: *Applied Statistics* 31 (2), S. 188–190. ISSN: 00359254.

Xiao, F., H. Ligteringen, C. van Gulijk und B. Ale (2015): Comparison study on AIS data of ship traffic behavior. In: *Ocean Engineering* 95, S. 84–93. ISSN: 00298018.

Normen, Richtlinien und gesetzliche Vorschriften

BMVBS (2011): *Richtlinien für Regelquerschnitte von Binnenschifffahrtskanälen.* Hrsg. von Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

DIN EN 1990:2010-12 (2010): *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.* Norm. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 1997-1:2014-03 (2010): *Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1:2004 + AC:2009 + A1:2013.* Norm. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

GBB (2010): *Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB).* Techn. Ber.

ISO 2394:2015-03 (2015): *General principles on reliability for structures.* Norm.

ISO/IEC 25012:2008-12 (2008): *Software-Engineering - Qualitätskriterien und Bewertung von Softwareprodukten (SQuaRE) - Modell der Datenqualität.* Norm.

ISO/IEC 25024:2015-10 (2015): *System und Software-Engineering - Qualitätskriterien und Bewertung von System- und Softwareprodukten (SQuaRE) - Messung der Datenqualität.* Norm.

JCSS (2001): *Probabilistic Model Code. PART I.* Techn. Ber.

MAR (2008): *Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen.* Hrsg. von Bundesanstalt für Wasserbau. BAWMerkblatt.

MSV (2015): *Merkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken.* Hrsg. von Bundesanstalt für Wasserbau. BAWMerkblatt.

MSV (2018): *Merkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken*. Hrsg. von Bundesanstalt für Wasserbau. BAWMerkblatt.

Rock Manual (2007): *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering*. London: CIRIA.

TLW (2003): *Technische Lieferbedingungen für Wasserbausteine*. Techn. Ber.

US Department of Defense (1987): *MIL-HDBK-781, Military Handbook: Reliability test methods, plans, and environments for engineering development, qualification, and production*.

USACE (1997): *Design of Coastal Revetments, Seawalls, and Bulkheads*. Hrsg. von US Army Corps of Engineers.

USACE (1999): *Engineering and Design: Risk-Based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies. Technical Letter No. 1110-2-556*. Hrsg. von Department of the Army.

WgV (2018): *Handlungsempfehlung. Beurteilung von Ufersicherungen und Fahrrinnenquerschnitten von Wasserstraßen der Kategorie C hinsichtlich einer vergrößerten verkehrlichen Nutzung [unveröffentlichter Entwurf]*. Hrsg. von Arbeitsgruppe „Wasserstraßen mit geringem Verkehr“.

Publikationen im Rahmen des Forschungsvorhabens

Ewers, J., J. Sorgatz und H. Montenegro (2017): Laborversuche und gekoppelte Berechnungen zur Untersuchung von Porenwasserüberdrücken infolge schneller Wasserstandsabsenkungen. In: *Fachsektionstage Geotechnik der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik*. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.

Panenka, A., J. Kasper und J. Sorgatz (2018): Understanding risk-driving factors, their indicators and resulting decision criteria: The interdisciplinary approach in Germany. In: *Proceedings of the 34th PIANC-World Congress Panama City* (Panama City, Panama, 7.–11. Mai 2018). Hrsg. von Permanent International Association of Navigation Congresses.

Panenka, A., F. M. Nyobeu Fangué, R. Rabe, H. Schmidt-Bäumler und J. Sorgatz (2020): Reliability assessment of ageing infrastructures. An interdisciplinary methodology. In: *Structure and Infrastructure Engineering* 16 (4), S. 698–713. ISSN: 1573-2479.

Panenka, A., F. M. Nyobeu Fangué, H. Schmidt-Bäumler, J. Sorgatz, R. Rabe und M. Reinhardt (2018): Reliability assessment of infrastructure in Germany: Approaching a holistic concept. In: *Life Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering. Towards an Integrated Vision: Proceedings of the Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2018), 28-31 October 2018, Ghent, Belgium*. Hrsg. von R. Caspeele, L. Taerwe und D. M. Frangopol. CRC Press, S. 295–300. ISBN: 9781351857567.

Sorgatz, J. (2021): Towards reliability-based bank revetment design: Investigation of limit states and parameter uncertainty. Fakultät für Bauingenieurwesen, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft. PhD thesis. Aachen: RWTH Aachen.

Sorgatz, J. und J. Kayser (2021): Investigation of Parameter Uncertainties Inherent to the Geotechnical Design of Bank Revetments at Inland Waterways. In: *18th International Probabilistic Workshop. IPW 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*. Hrsg. von J. C. Matos, P. B. Lourenço, D. V. Oliveira, J. Branco, D. Proske, R. A. Silva und H. S. Sousa. 153. Springer, S. 469–480. ISBN: 978-3-030-73615-6.

Sorgatz, J. und J. Kayser (no date): *Assessment of maintenance efforts and probabilities of failure at German inland waterways to advance the design of bank revetments (in preparation)*.

Sorgatz, J., J. Kayser und H. Schüttrumpf (2018): Expert interviews in long-term damage analysis for bottom and bank revetments along German inland waterways. In: *Life Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering. Towards an Integrated Vision: Proceedings of the Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2018), 28-31 October 2018, Ghent, Belgium*. Hrsg. von R. Caspeele, L. Taerwe und D. M. Frangopol. CRC Press, S. 749–756. ISBN: 9781351857567.

Sorgatz, J., J. Kayser und H. Schüttrumpf (2019): Armor stone displacements at German inland waterways: An approach to schedule inspections coupling reliability analysis with Markov chains. In: *7th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk*. Hrsg. von D. V. Griffiths.

Sorgatz, J., S. Letzelter und J. Kayser (no date): *Evaluation of existing damage progression formulae for loose armour stone revetments subjected to a limited number of waves (in preparation)*.

Sorgatz, J., A. P. van den Eijnden, H. Montenegro und M. A. Hicks (no date): *On the design of bank revetments at inland waterways subjected to ship-induced water level drawdown: A probabilistic infinite slope analysis (in preparation)*.



Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe
Tel. +49 (0) 721 9726-0 · Fax +49 (0) 721 9726-4540

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg
Tel. +49 (0) 40 81908-0 · Fax +49 (0) 40 81908-373

www.baw.de