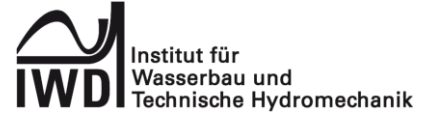




Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen  
Heft 71



Niklas Schwiersch

Ein risikobasierter Planungsansatz für homogene Flussdeichquerschnitte

A risk-based design approach for homogeneous river levees

Der Titel und der Inhalt des Heftes 71 entsprechen der zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) an der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden im August 2022 eingereichten und genehmigten Dissertation von Herrn Dipl.-Ing. Niklas Schwiersch.

Einreichung: 17.08.2022  
Verteidigung: 26.01.2023

Vorsitzender der Promotionskommission:  
Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle, Technische Universität Dresden

Gutachter:  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm, Technische Universität Dresden  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen, Universität Siegen  
Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Engel, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden

Weiteres Mitglied der Promotionskommission:  
Prof. Dr.-Ing. Jochen Schanze, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung, Dresden

Dresden, September 2023

## Bibliografische Informationen

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie. Die bibliografischen Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Ein risikobasierter Planungsansatz für homogene Flussdeichquerschnitte

A risk-based design approach for homogeneous river levees

Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen,  
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik.

Dresden: Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, 2023  
(Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen; Heft 71)  
Zugl.: Dresden, Techn. Univ., 2023  
ISBN 978-3-86780-751-7

Herausgegeben im Auftrag der Rektorin der Technischen Universität Dresden von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Stamm, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. K.-U. Graw

Technische Universität Dresden  
Fakultät Bauingenieurwesen  
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik  
01062 Dresden

Tel.: +49 351 463 34397

Fax: +49 351 463 37120

E-Mail: [wasserbau@tu-dresden.de](mailto:wasserbau@tu-dresden.de)

www: <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/iwd>

Redaktion: Niklas Schwiersch

Redaktionsschluss: 03. Oktober 2023

Verlag: Selbstverlag der Technischen Universität Dresden

Der Nachdruck des Heftes bedarf der Genehmigung durch die Redaktion und ist nur mit Quellenangabe gestattet.

ISSN 0949-5061

ISBN 978-3-86780-751-7

# **Ein risikobasierter Planungsansatz für homogene Flussdeichquerschnitte**

von

**Dipl.-Ing. Niklas Marc Schwiersch (geb. Drews)**

zur Erlangung des Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Dresden  
eingereichte Dissertation

---

## Kurzfassung

Die Erfassung des bestehenden Hochwasserrisikos (HWR) und dessen Steuerung durch Maßnahmen des Hochwasserrisikomanagements (HWRM) stehen seit Beginn der 2000er-Jahre gleichsam im Fokus der nationalen als auch internationalen Forschung. Gründe dafür sind u. a. die mitunter verheerenden und zunehmenden Konsequenzen von Hochwasserereignissen (HW) sowie ihre mediale Aufmerksamkeit (z. B. in Verbindung mit HW in Mitteleuropa 2021 oder in Australien, Bangladesch und Südafrika 2022). Aus der Risikodefinition als Produkt von Wahrscheinlichkeit und Konsequenzen eines HW leiten sich zur Steuerung des HWR zwei Handlungsoptionen ab. Diese sind (1) die Beeinflussung der Überflutungs- bzw. der Versagenswahrscheinlichkeit und (2) die Beeinflussung der HW-Konsequenzen. Für beide bedarf das HWRM geeigneter Werkzeuge, um planerisch mit dem bestehenden HWR umzugehen.

Vor diesem Hintergrund entwickelt diese Arbeit am Beispiel homogener Flussschneisequerschnitte einen risikobasierten Planungsansatz und im Zuge dessen Methoden zur indirekten Bestimmung stochastischer Bodeneigenschaften, zur Identifikation von Steuerungsvariablen in Grenzzuständen und zur ökonomischen Optimierung von Deichquerschnitten.

Dafür erfasst diese Arbeit zunächst einen überregionalen Datensatz zu bodenmechanischen Klassifikationsversuchen. An deren statistischer Auswertung anschließend wird eine Methodik zur indirekten Bestimmung stochastischer Bodeneigenschaften erarbeitet. Die Ergebnisse ihrer Anwendung ermöglichen schließlich die stochastische Modellierung von zuverlässigkeitsrelevanten Bodenkenngößen, welche wiederum die Grundlage für probabilistische Zuverlässigkeitsanalysen in der Geotechnik bilden.

Im nächsten Schritt werden die gewonnenen stochastischen Ergebnisse für probabilistische Zuverlässigkeitsanalysen der Böschungsstabilität verwendet. Auf diese Weise quantifiziert diese Arbeit die Sensitivität der Wahrscheinlichkeit eines landseitigen Böschungsbruchs auf geometrische und materialtechnische Eingangsgrößen. Auf diese Weise können schließlich vier Steuerungsvariablen der Böschungsstabilität identifiziert werden.

---

Abschließend modelliert diese Arbeit die Zuverlässigkeits- und Risikokosten entlang einer idealisierten Deichlinie. Diese fließen in einen genetischen Algorithmus ein mit dessen Hilfe sich eine ökonomische Optimierung von Deichquerschnitten realisieren lässt. Im Ergebnis resultieren eine Methodik zur risikobasierten Optimierung sowie eine Empfehlung hinsichtlich des ökonomischen Anwendungsbereichs des für die Methodikentwicklung definierten Referenzdeichs.

Mit den entwickelten Methoden und den beispielhaft für homogene Flussdeiche gewonnenen Erkenntnissen leistet diese Arbeit einen Beitrag zur volkswirtschaftlich orientierten Flussdeichkonfiguration. Dafür spannt sie den Bogen von den Verteilungen der Eingangsvariablen (bodenmechanische Mikroebene) über die Zuverlässigkeitsanalysen (geotechnische Mesoebene) bis zur risikobasierten Optimierung (volkswirtschaftliche Makroebene). Damit schafft sie einen methodischen Ansatz zur lokalen, risikobasierten Planung von Flussdeichen als Bestandteil eines ganzheitlichen HWRM.

Abschließend empfiehlt diese Arbeit zum einen die Verbesserung der bodenmechanischen Datengrundlage. Zum anderen werden Potenziale zur methodischen Weiterentwicklung des hier vorgestellten Planungsansatzes aufgezeigt, welche insbesondere die Anwendbarkeit sowohl technischer als auch nicht-technischer Maßnahmen des HWRM betreffen.

---

## Abstract

The assessment of existing flood risk (FR) and its management through flood risk management (FRM) measures have been the focus of national and international research since the early 2000s. Reasons for this include the sometimes devastating and increasing consequences of floods and their media attention (e.g. in connection with floods in Central Europe in 2021 or in Australia, Bangladesh and South Africa in 2022). Based on the definition of risk as a product of flood probability and flood consequences, two options for managing FR can be derived. These are (1) influencing the probability of flooding or failure and (2) influencing the consequences of flooding. For both, FRM requires suitable tools to deal with the existing FR.

Against this background, this thesis develops a risk-based design approach using the example of homogeneous levee cross-sections. Hence, methods are developed for the indirect evaluation of stochastic soil properties, for the identification of control variables in limit states and for the economic optimization of levee cross-sections.

For this purpose, this work first collects a trans regional data set of soil mechanical classification tests. Following their statistical evaluation, a methodology for the indirect determination of stochastic soil properties is developed. Subsequently, the results of their application enable the stochastic modelling of reliability-relevant soil properties, which in turn form the basis for probabilistic reliability analyses in geotechnical engineering.

In the next step, the obtained stochastic results are used for probabilistic reliability analyses of slope stability. Thus, this work elaborates the sensitivity of the probability of a landside slope failure to geometric and material input variables. This way, four control variables of slope stability can be identified.

Finally, this work models the reliability and risk costs along an idealized flood defense line. These are incorporated into a genetic algorithm, which can be used to realize an economic optimization of levee cross-sections. The results are a methodology for risk-based optimization and a recommendation regarding the economic application for the reference levee.

With the methods developed and the findings obtained during application, this work makes a contribution to the economic configuration of river levees. For this purpose, it spans the range from the distributions of the input variables (soil-mechanical micro-level) to the reliability analyses (geotechnical meso-level) to the risk-based optimization (economic macro-level). Thus, it creates a methodological approach for local, risk-based planning of river levees as part of a holistic flood risk management.

Finally on the one hand, this work recommends the improvement of the soil mechanical data basis. On the other hand, potentials are shown for methodological research on the applicability to both technical and non-technical measures of flood risk management.

**Keywords:** flood risk, flood risk management, flood protection, levees, stochastic soil properties, reliability, failure, probability of failure, genetic algorithm, optimization

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>II</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>IV</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XII</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>XVII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Die stochastische Beschreibung von Bodeneigenschaften</b> .....	<b>6</b>
2.1 Einführung.....	6
2.2 Mathematische Erfassung von Ungewissheit.....	8
2.3 Bodenklassifikation.....	15
2.4 Datengrundlage .....	17
2.5 Bodenmechanische Kenngrößen .....	23
2.5.1 Allgemeines.....	23
2.5.2 Porenraum und Wassergehalt .....	23
2.5.3 Bodenwichte .....	25
2.5.4 Scherfestigkeit .....	26
2.5.5 Gesättigte Durchlässigkeit .....	29
2.5.6 Transformationsmodelle und ihre physikalischen Grundzüge .....	30
2.5.7 Allgemeines.....	30
2.5.8 Transformationsmodell zur Porenzahl.....	30
2.5.9 Transformationsmodell zur Bodenwichte.....	32
2.5.10 Transformationsmodelle zum inneren Reibungswinkel .....	32
2.5.11 Transformationsmodelle zur gesättigten Durchlässigkeit.....	36
2.6 Stochastische Eigenschaften.....	38
2.6.1 Allgemeines.....	38
2.6.2 Ergebnisse der Literaturrecherche .....	38
2.6.3 Ergebnisse aus der Transformation von Klassifikationsdaten .....	41
2.6.4 Möglichkeiten zur Ergebnisvalidierung .....	45



---

<b>3</b>	<b>Das Versagen von Flussdeichen .....</b>	<b>46</b>
3.1	Einführung.....	46
3.2	Versagensmechanismen .....	48
3.3	Versagenswahrscheinlichkeit.....	52
3.4	Steuerung der Versagenswahrscheinlichkeit .....	58
3.5	Übertragbarkeit auf gegliederte und bestehende Deiche .....	68
3.6	Ungewissheiten im Kontext .....	70
<b>4</b>	<b>Die hochwasserrisikobasierte Querschnittsgestaltung .....</b>	<b>74</b>
4.1	Einführung.....	74
4.2	Risikooptimierung.....	76
4.2.1	Allgemeines.....	76
4.2.2	Genetischer Algorithmus .....	78
4.2.3	Ökonomisches Optimum einer HWRM-Maßnahme.....	81
4.3	Risikooptimierung am Beispiel des landseitigen Böschungsbruchs homogener Flussdeiche .....	83
4.3.1	Allgemeines.....	83
4.3.2	Zuverlässigkeitskostenfunktion .....	84
4.3.3	Ergebnisse.....	87
<b>5</b>	<b>Der Beitrag zu einem ganzheitlichen HWRM .....</b>	<b>93</b>
5.1	Einführung.....	93
5.2	Entwicklungen auf dem Gebiet des HWRM .....	94
5.2.1	Allgemeines.....	94
5.2.2	Veränderung des Wasserkreislaufs .....	94
5.2.3	Gesellschaftliche Entwicklungen .....	96
5.2.4	Entwicklungen zum Prozessverständnis der Deichzuverlässigkeit.....	98
5.3	Einordnung des vorgeschlagenen Ansatzes.....	99
5.4	Fazit und Ausblick .....	107
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>110</b>
	<b>Anhänge .....</b>	<b>128</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wirkungskreise im Hochwasserrisikomanagement.....	4
Abbildung 2: Die Rolle von Daten für probabilistisch begründete Entscheidungen .....	9
Abbildung 3: Eng- (a) und weitgestufte (b) Kornverteilung.....	16
Abbildung 4: Räumliche Verortung der analysierten Klassifikationsdaten .....	17
Abbildung 5: Visualisierung der Rohdaten für die untersuchten 13 Bodengruppen mittels Box-Whisker-Plots für die Kornfraktionen $d_{10}$ , $d_{30}$ , $d_{50}$ , $d_{60}$ und $d_{85}$ .....	20
Abbildung 6: Box-Whisker-Diagramm des Plastizitätsindex $I_p$ .....	21
Abbildung 7: Unterschreitungswahrscheinlichkeit $F(d)$ der Kornfraktionen $d_{10}$ , $d_{30}$ , $d_{50}$ , $d_{60}$ und $d_{85}$ für 13 Bodengruppen .....	22
Abbildung 8: Grenzporenzahl bei (a) kubisch-flächenzentrierter und (b) kubisch-raumzentrierter Packung idealer Kugeln .....	24
Abbildung 9: Neigung des Reibungskegels $\varphi$ und mobilisierter Reibungswinkel $\varphi_m$ .....	27
Abbildung 10: Modellvorstellung zur Grenzbedingung nach Mohr-Coulomb im $(\tau-\sigma')$ -Diagramm .....	28
Abbildung 11: Ebene Modellvorstellung zur (1) wahren Sicker- geschwindigkeit $v_w$ , (2) Abstandsgeschwindigkeit $v_a$ und (3) Filtergeschwindigkeit $v$ in einem porösen Medium .....	29
Abbildung 12: Parametrisierung eines homogenen Deichquer- schnitts auf bindigem Untergrund für die auto-matisierte Stabilitätsanalyse .....	51
Abbildung 13: Schematische Darstellung einer Fragility-Curve.....	55
Abbildung 14: Deichbrüche nach Hauptursache .....	56
Abbildung 15: Modellhafte Beschreibung eines Versagensereignisses .....	57
Abbildung 16: Modifizierungen des Referenzsystems zur Einflussanalyse geometrischer Randbedingungen auf den Grenzzustand .....	59
Abbildung 17: Veränderlichkeit der Wahrscheinlichkeit eines landseitigen Böschungsversagens (Mikro- und Makro-stabilität) .....	64
Abbildung 18: Modellvorstellung zur Analyse der Zuverlässigkeit einer Einzellamelle.....	65

---

Abbildung 19: Einfluss der Gleitflächenneigung $\alpha$ und der Porosität $n$ auf die Einwirkung $S$ , den Widerstand $R$ und die Zuverlässigkeit $z=R-S$ für eine trockene Böschungslamelle.....	66
Abbildung 20: Beispiele für die Modifikation von bestehenden (oben) und die Gestaltung von gegliederten Deichen (unten).....	68
Abbildung 21: Beispiel einer ungewissen Sickerlinie für einen Deich mit Kerndichtung.....	69
Abbildung 22: Zu einem Versagen führende Prozesskette.....	72
Abbildung 23: Klassifizierung und Beispiele von Hochwasserkonsequenzen .....	75
Abbildung 24: Ablauf der iterativen Optimierung mit Hilfe eines genetischen Algorithmus .....	79
Abbildung 25: (Two-Point-)Crossover und (Bit Flap) Mutation von einer Eltern- zu einer Kindergeneration .....	81
Abbildung 26: Ökonomisches Optimum der Gesamtkosten als Ergebnis einer Abwägung zwischen Zuverlässigkeits- und Risikokosten .....	82
Abbildung 27: Beispiel eines Simulationslaufs bei einem Schadenspotential von 100.000 EUR/m und Ergebniswerte des optimierten Zustands .....	88
Abbildung 28: Optimierungsergebnisse für die Kosten und Steuerungsvariablen.....	89
Abbildung 29: Relative Zuverlässigkeits- $r_{Zuv}$ und Risikokosten $r_{ris}$ für $1 \text{ EURm} < SP < 100 \text{ Mio. EURm}$ .....	91
Abbildung 30: Optimierte Zuverlässigkeitskosten $C_{Zuv}$ homogener Flussdeiche .....	92
Abbildung 31: Erwartete Änderungen (schematisch) einer Hochwasserganglinie (links) und der Jährlichkeit eines Hochwasserereignisses als Folge einer durch den Klimawandel bedingten Abflusszunahme (rechts) .....	95
Abbildung 32: Stilisiertes Ergebnis des risikobasierten Entwurfs von Flussdeichen für einen eingedeichten Gewässerabschnitt.....	100
Abbildung 33: Optimale Zuverlässigkeitskosten für zwei Deichlinien bei konstantem Schadenspotential.....	101

---

Abbildung 34: Zeitliche Veränderung der Versagenswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung von Trends bei Widerstand R und Einwirkung S. ....	102
Abbildung 35: Schematischer Verlauf der Gesamtkostenfunktion im Falle einer Investition in einen Flussdeich unter Berücksichtigung von (a) statischen und (b) optimierten Zuverlässigkeitskosten. ....	103
Abbildung 36: Zeitliche Entwicklung der erforderlichen Versagenswahrscheinlichkeit $P_{f,erf}$ und der Konsequenzen C im Falle eines konstanten HWR-Wertes .....	105

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ausgewählte Transformationsmodelle des inneren Reibungswinkels .....	35
Tabelle 2:	Ausgewählte Transformationsmodelle der gesättigten Durchlässigkeit.....	37
Tabelle 3:	Mittlere stochastische Eigenschaften ausgewählter, bodenmechanischer Parameter .....	40
Tabelle 4:	Mit Transformationsmodellen bestimmte, stochastische Eigenschaften ausgewählter Bodenkenngrößen .....	44
Tabelle 5:	Beispiele für Deichfunktionen und ihre Bedingungen der Funktionserfüllung.....	47
Tabelle 6:	Konzepte zur Beurteilung der Stabilität.....	52
Tabelle 7:	Materialtechnische Zufallsvariablen für den Referenzzustand .....	60
Tabelle 8:	Untersuchungsintervalle der geometrischen und materialtechnischen Eingangsvariablen .....	61
Tabelle 9:	Definition von Szenarien zur Berücksichtigung der Kohäsion .....	62
Tabelle 10:	Beispiele ungewisser Größen in der Prozesskette der Einwirkungen.....	72
Tabelle 11:	Steuerungsvariablen der Optimierung und ihre Suchintervalle.....	84
Tabelle 12:	Leistungsverzeichnis mit ausgewählten Positionen für die Herstellung eines homogenen Flussdeiches .....	85
Tabelle 13:	Grundkosten für den Referenzdeichquerschnitt .....	86

## Abkürzungsverzeichnis<sup>1</sup>

Abkürzung	Bedeutung
A-D-Test.....	Anderson Darling Test
BAW .....	Bundesanstalt für Wasserbau
DIN .....	Deutsches Institut für Normung e.V.
DWA.....	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
GA .....	Genetischer Algorithmus
Gl.....	Gleichung
HW .....	Hochwasserereignis
HWR.....	Hochwasserrisiko
HWRM.....	Hochwasserrisikomanagement
IPCC.....	International Panel on Climate Change
KLIWA.....	Arbeitskreis Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft
K-S-Test.....	Kolmogorov-Smirnoff Test
KVL .....	Kornverteilungslinie
LIR .....	Lokales, individuelles Risiko
LQI.....	Life-Quality-Index
MM.....	Momentenmethode
MLE .....	Maximum Likelihood Estimate
NaBau .....	Normenausschuss Bauwesen
OLS.....	Ordinary Least Squares
SERI .....	Social and Environmental Repercussion Index
SP .....	Schadenspotential

<sup>1</sup> Auf die Angaben von gebräuchlichen Abkürzungen wie beispielsweise „z. B.“, „u. a.“ oder „vgl.“ wird verzichtet. Nicht aufgeführte oder abweichende Bedeutungen werden an der entsprechenden Stelle im Text erläutert.

## Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung
A.....	Fläche
$\hat{A}$ .....	Teststatistik
$A_D$ .....	Deichquerschnittsfläche
b.....	Breite (einer Gleitkörperlamelle)
$b_g$ .....	Aufstandsbreite
$b_K$ .....	Kronenbreite
BHQ.....	Bemessungshochwasserabfluss
c.....	Kohäsion
$\psi'$ .....	Normierte Werte der Zielfunktion
C.....	Negative Konsequenzen, Kosten
$C_{ges}$ .....	Gesamtkosten
$C_{ris}$ .....	Risikokosten
$C_{zuv}$ .....	Zuverlässigkeitskosten
$C_U$ .....	Ungleichförmigkeit
$C_0$ .....	Grundkosten
d.....	(Korn-)Durchmesser
$d_p$ .....	Kornfraktion zu einem Masseanteil von p Prozent
$d_{eff}$ .....	Wirksamer Korndurchmesser
D.....	Lagerungsdichte
$\hat{D}$ .....	Testergebnis des K-S-Tests
e.....	Porenzahl
$e_{min}, e_{max}$ .....	Grenzwerte der Porenzahl
erf.....	Index für „erforderlich“
E.....	Ereignis
Ex.....	Exposition
$E(x)$ .....	Erwartungswert von x
$f_{min}$ .....	Mindestfreibord
$f(x)$ .....	Wahrscheinlichkeitsdichte
$F(x)$ .....	Verteilung
$F_0(x)$ .....	Theoretische Verteilung
g.....	Erdbeschleunigung, Gravitationskonstante = 9,81 m/s <sup>2</sup>
G.....	Gewichtskraft (einer Gleitkörperlamelle)
$h_d$ .....	Deichhöhe

---

$h_W$	Wasserstand
$H_A$	Arbeitshypothese
$H_0$	Gegenhypothese
$i$	Hydraulischer Gradient
$I_D$	Bezogene Lagerungsdichte
$I_P$	Plastizitätsindex
$k$	Koeffizient (zur Berücksichtigung der Ungleichförmigkeit)
$k_f$	Gesättigte Durchlässigkeit, Permeabilität
$K$	Index für „Korn / Feststoff“
$l_o$	Oberflächenlänge im Querprofil
$L$	Index für „Luft“
$m_d$	Trockenmasse
$m_L$	Luftseitige Böschungsneigung
$m_W$	Wasserseitige Böschungsneigung, Wassermasse
$n_{ob}$	Anzahl an Beobachtungen
$n$	Porenanteil
$n_c$	Index für „normal konsolidiert“ (engl.: normally consolidated)
$n_i$	Prozentualer Anteil der Phase $i$
$n_m$	Anzahl der Mutationen je Chromosom
$n_p$	Realisierte Anzahl an Simulationsläufen
$n_{pop}$	Generations-, Populationsgröße
$n_{sim}$	Variable für die Anzahl an Simulationsläufen
$N$	Normalkraft
$\hat{N}$	Parameter des statistischen Tests
$oc$	Index für „überkonsolidiert“ (engl.: over consolidated)
$p$	Druck
$p_p$	Koeffizient zur Modellierung der Auswahlwahrscheinlichkeit
$P$	Wahrscheinlichkeit
$P_f$	Versagenswahrscheinlichkeit
$P_i$	Preis der Position $i$
$P_i'$	Auf die Bauwerkslänge bezogener Preis
$P_U$	Unterschreitungswahrscheinlichkeit
$Q$	Sickerströmung, Abfluss, Volumenstrom
$Q_{HL}$	Abfluss im Hinterland
$r$	Radius
$r_{eq}$	Gleichverteilte Zufallszahlen



---

$r_j$ .....	Beiwert der Kornrauheit nach Jänke
$r_{\text{norm}}$ .....	Normalverteilte Zufallszahlen
$r_{\text{risiko}}$ .....	Anteil von $C_{\text{ris}}$ an $C_{\text{ges}}$
$r_{\text{Zuv}}$ .....	Anteil von $C_{\text{Zuv}}$ an $C_{\text{ges}}$
$R$ .....	Widerstand auf ein System / Bauwerk
$R_r$ .....	Maß der Kornrundheit
$s$ .....	Empirische Standardabweichung
$S$ .....	Einwirkung auf ein System / Bauwerk
$S$ .....	Index für „Boden“ (engl.: soil)
$\hat{S}$ .....	Parameter des statistischen Tests
$t_{\text{Nutzen}}$ .....	technische Lebensdauer
$t_{\text{OB}}$ .....	Schichtdicke des Oberbodens
$T$ .....	Tangentialkraft (einer Gleitkörperlamelle)
$u$ .....	Index für „undrainiert“
$v$ .....	Filtergeschwindigkeit
$v_a$ .....	Abstandsgeschwindigkeit
$v_w$ .....	tatsächliche Sickergeschwindigkeit
$V$ .....	Vulnerabilität
$V$ .....	Volumen einer Bodenprobe
$V_s$ .....	Feststoffvolumen
$V_p$ .....	Hohlraum- bzw. Porenvolumen
$\text{Var}(x)$ .....	Varianz von $x$
$\text{VarK}(x)$ .....	Variationskoeffizient von $x$
$w$ .....	Natürlicher Wassergehalt
$w_L$ .....	Fließgrenze
$w_p$ .....	Ausrollgrenze
$w_0$ .....	Breiwasserzahl
$w_1$ .....	Einheitswasserzahl
$W$ .....	Index für „Wasser“
$x$ .....	Realisierung der Zufallsvariable $X$
$x$ .....	Elterngeneration im GA
$\bar{x}$ .....	Arithmetisches Mittel
$\bar{x}_g$ .....	Geometrisches Mittel
$\bar{x}_h$ .....	Harmonisches Mittel
$\tilde{x}$ .....	Median
$X_i$ .....	Beobachtung

---

$y$	Kindergeneration im GA
$z$	Zuverlässigkeit
$\alpha$	Signifikanzniveau
$\alpha$	Neigungswinkel der Gleitfläche
$\beta$	Indikator für Falsch-Negativ-Schätzung
$\beta$	Priorisierungskoeffizient
$\gamma$	(Boden-)Wichte
$\gamma$	Steuerungsparameter des genetischen Algorithmus
$\eta$	globaler Sicherheitsfaktor
$\kappa_i$	Koeffizient zur kostenwirksamen Berücksichtigung von $i$
$\mu$	Erwartungswert (Stochastik)
$\mu$	Ausnutzungsgrad (Tragwerkslehre)
$\mu$	Mutationsrate im GA
$\nu$	Zähigkeit
$\nu_{nc}$	Steifezahlbeiwert
$\rho_i$	Dichte der Phase $i$
$\rho_m$	Feuchtdichte
$\sigma$	Normalspannung
$\sigma$	Schrittweite der Mutationen im GA
$\sigma_1, \sigma_3$	Hauptspannungen
$T$	Schubkraft, Schubspannung
$T_f$	Grenzwert der aufnehmbaren Schubspannung
$\varphi$	Innerer Reibungswinkel
$\varphi_m$	Mobilisierter Reibungswinkel

---

## Danksagung

Die in dieser Arbeit vorgestellten Erkenntnisse sind das Ergebnis von Arbeiten, welche ich in den Jahren 2017 bis 2022 am Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der Technischen Universität Dresden durchgeführt habe. In dieser Zeit wurde mir die wertvolle Unterstützung einer Reihe von Personen zuteil, denen ich an dieser Stelle herzlich danken möchte.

Zunächst danke ich Prof. Stamm für die mir gewährte Chance zur Promotion, die fruchtbaren Diskussionen, aus welchen sich stets ein Weg für das weitere Vorgehen entwickelt hat und sein allzeit offenes Ohr.

Weiterhin danke ich Prof. Engel für seine Bereitschaft, gleichsam Forschungsdaten und Expertenwissen mit mir zu teilen und Prof. Jensen für seine methodischen Impulse und langjährigen Erfahrungen im Zuge von Diskussionen um die Probabilistik im Wasserbau. Der niederländischen Forscher:innengruppe aus der Section „Hydraulic Structures and Flood Risk“ (TU Delft) danke ich, weil sie mich zu einer konzeptionellen Auseinandersetzung mit Fragestellungen des Hochwasserrisikomanagements inspiriert hat. Darüber hinaus gilt mein Dank einer Vielzahl an Kolleg:innen von der TU Dresden, der Hochschule Magdeburg und aus der Wasserwirtschaft, die mit Software und Daten sowie Gesprächen zu ihrer eigenen Forschung, zu methodischen Kniffen und über ihre langjährige Berufserfahrung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt außerdem meiner geliebten Frau Anna-Katharina und unserer Tochter Charlotte, die mir zu jeder Zeit den Rücken gestärkt und gemeinsam mit unserer Hündin für den nötigen mentalen Ausgleich gesorgt haben. Ebenso danke ich meinen Eltern dafür, dass sie mir eine Vielzahl an wertvollen Erfahrungen ermöglicht haben, auf welche ich im Zuge meiner Promotion zurückgreifen konnte.

Abschließend danke ich meinen Kolleg:innen am IWD sowie den lekturierenden Freunden für die Entlastung bzw. Unterstützung in angespannten Phasen dieser Arbeit sowie allen Freunden gleichermaßen für das aufgebraachte Verständnis, wenn ich in diesen Phasen schlechter erreichbar war.

## 1 Einleitung

Hochwasser sind natürliche Phänomene, die sich nicht verhindern lassen. Vielmehr ist davon auszugehen, dass sie infolge des Klimawandels in ihrer Anzahl und Intensität zunehmen. Dies ist die logische Folge eines intensivierten Wasserkreislaufs, in welchem die Zunahme von Niederschlägen sowohl global als auch regional bereits beobachtet wird (Arbeitskreis KLIWA, 2021; IPCC, 2022). Wegen der zahlreichen und zunehmenden anthropogenen Nutzungen in Überflutungsflächen und den damit verbundenen Schadenspotentialen stellen Hochwasser (HW) eine Gefährdung sowohl für den Menschen als auch für die Umwelt dar (Jüpner, 2018; Schüttrumpf, 2017).

Das Produkt aus negativen HW-Konsequenzen  $C(E)$  und HW-Wahrscheinlichkeiten  $P(E)$  definiert das Hochwasserrisiko (HWR, vgl. Gl. (1)). Weil das Auftreten von HW oder von HW-Konsequenzen nicht auszuschließen ist, kann das HWR nicht Null sein (Merz, 2006). Daraus leitet sich ab, dass gesellschaftlich immer mit einem verbleibenden HWR-Wert umzugehen ist.

$$HWR = P(E) \cdot C(E) \quad (1)$$

Doch welches Maß an HWR ist gesellschaftlich verträglich?

Das Fachgebiet des Hochwasserrisikomanagements (HWRM) widmet sich der Steuerung und Regelung des HWR und ergreift hierzu HWRM-Maßnahmen (Merz & Bittner, 2011). Hierzu zählen u. a. Maßnahmen des technischen Hochwasserschutzes, der Hochwasservorsorge und des Flächenrückhalts (Müller, 2010). Eine der technischen Maßnahmen und Gegenstand dieser Arbeit ist die Planung und Errichtung von Flussdeichen als abschirmende Liniinfrastruktur.

Die Umsetzbarkeit einer Deichbaumaßnahme und die spätere Unterhaltung unterliegen in Anbetracht begrenzter öffentlicher Finanzmittel volkswirtschaftlichen Zwängen (vgl. Anhang 7:). Daher stellt sich im Weiteren die Frage, welche Investitionen an welcher Stelle entlang eines zu schützenden Gewässerabschnitts sinnvollerweise zu tätigen sind. Um eine derartige Entscheidung treffen zu können, bedarf es geeigneter Werkzeuge, die gleichermaßen die technischen wie auch die gesellschaftlichen Aspekte einbeziehen.

Vor diesem Hintergrund ist das Ziel dieser Arbeit, am Beispiel homogener Flussdeiche, einen methodischen Ansatz zur risikobasierten Planung von HWRM-Maßnahmen zu entwickeln.

Für diesen Anwendungsfall wird davon ausgegangen, dass eine Überflutung als Folge von Versagen auftritt. So lässt sich das HWR über die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  nach Gl. (2) bestimmen (Plate, 1993). Dabei kann das Versagen sowohl funktional als auch strukturell definiert werden (vgl. Kapitel 3). Funktionales Versagen tritt auf, wenn ein Bauwerk seine Funktion nicht erfüllt (Plate, 1993). Dies ist z. B. der Fall, wenn ein Schutzgebiet unplanmäßig geflutet wird. Strukturelles Versagen beschreibt den Zustand, dass die Einwirkungen auf ein Bauwerk  $S$  dessen Widerstände  $R$  übersteigen (Schneider & Schlatter, 1996). Die Bestimmung der negativen Konsequenzen erfolgt unter Verwendung der Exposition  $Ex$  (Ausgesetztheit) und der Vulnerabilität  $V$  (Verletzlichkeit) von Schadenspotentialen (Merz, 2006) und wird in 4.1 näher erläutert. Risikodefinitionen weiterer Fachdisziplinen finden sich in Anhang 1.

$$HWR = P_f \cdot C(E) \quad (2)$$

Bei einem inakzeptablen HWR muss dieses durch das Ergreifen geeigneter Maßnahmen gesteuert werden. Hierzu leiten sich aus Gl. (2) zwei Handlungsoptionen ab. So können eine HWR-Steuerung oder eine HWR-Regelung entweder

- (1) über die Beeinflussung der Überflutungs- bzw. Versagenswahrscheinlichkeit oder
- (2) über die Beeinflussung der negativen Konsequenzen erfolgen.

Infolge jüngerer Hochwasserereignisse (in Mitteleuropa u. a. in den Jahren 1997, 2002, 2010, 2013 und 2021) und ihrer gravierenden Konsequenzen steht das HWRM im Fokus nationaler und internationaler Forschungsarbeiten. In diesem Rahmen werden zum einen Feldbeobachtungen zu Versagensfällen gesammelt und strukturiert ausgewertet (Heyer, 2011; Horlacher & Carstensen, 2007; Kool et al., 2019; Özer et al., 2020). Zum anderen werden meteorologische (IPCC, 2022), hydrologische (Bender, 2015; Mudersbach, 2017) und geotechnische Aspekte (Länsivaara et al., 2021; Lendering et al., 2018; Möllmann, 2009) in einzelnen zu Versagen führenden Prozessketten quantifiziert. Mittels Fehlerbaum- bzw. Ereignisablaufanalysen werden mehrere Prozessketten kombiniert ausgewertet und lassen sich systemprägende Versagensmechanismen identifizieren. Dies zeigen z. B. die probabilistischen Studien zu Nordseedeichen von Kortenhuis (2003) und zum Management des HWR in ganzen Flusseinzugsgebieten (Bachmann, 2012). Die Einbeziehung von C(E) in die HWR-Analysen ermöglichen u. a. Naumann et al. (2015) mit ihrer Methodik zu bauwerkstypischen Schadensfunktionen. Diese Entwicklungen der HWR-Forschung bilden die Basis dafür das HWR als Eingangsgröße in die Planung von neuen und die Optimierung bestehender HWRM-Maßnahmen einzubeziehen. Methodisch lässt sich dies z. B. über das Ableiten von Zielzuverlässigkeiten aus einem akzeptablen Risikowert realisieren (Fischer et al., 2012). Eine praxisorientierte Umsetzbarkeit risikobasierter Planungsansätze zeigen z. B. Sykora et al. (2017) für Eisenbahninfrastruktur und Roubos et al. (2018) für Kaimauern.

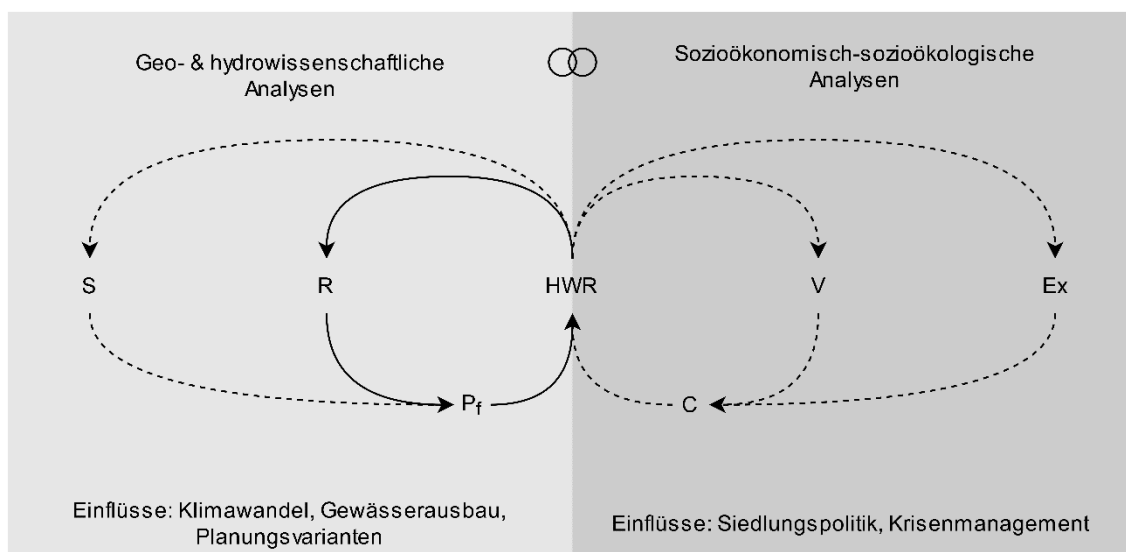
Die interdisziplinäre Aufgabe des HWRM lässt sich in die geo- und hydrowissenschaftlichen sowie die sozioökonomisch-sozioökologischen Analysen unterteilen. Dabei widmen sich erstgenannte der Quantifizierung der

Überflutungs- bzw. Versagenswahrscheinlichkeit und letztere den Konsequenzen.

Der in dieser Arbeit entwickelte, risikobasierte Planungsansatz bezieht den in Abbildung 1 hervorgehobenen, allgemeinen Wirkungskreis von HWR, Widerstand und Versagenswahrscheinlichkeit ein. Etwaige Einflüsse aus weiteren Wirkungskreisen werden für die Modellbildung vereinfacht.

Für die Zielerreichung steht die Methodikentwicklung im Vordergrund der Arbeit, sodass mitunter durch Annahmen gestützte Ansätze verfolgt werden. So bedarf es beispielsweise der stochastischen Beschreibung von bodenmechanischen Kenngrößen (Kapitel 2), welche jedoch nur sehr eingeschränkt zur Verfügung stehen (Schwiersch et al., 2022). Daher werden Transformationsmodelle herangezogen, um die notwendigen Eingangsverteilungen aus einem umfassenden Klassifikationsdatensatz zu gewinnen.

Die Ergebnisse der bodenmechanischen Analysen erlauben die probabilistische Modellierung von Grenzzuständen und die Identifikation potenzieller Steuerungsvariablen für erdbauliche HWRM-Maßnahmen. Hierbei wird sich auf die analytische Betrachtung des landseitigen Böschungsbruchs homogener Flussdeiche beschränkt (Kapitel 3). Darauf aufbauend werden Flussdeichquerschnitte ökonomisch unter Einbeziehung sowohl geometrischer als auch materialtechnischer Steuerungsvariablen optimiert (Kapitel 4).



**Abbildung 1: Wirkungskreise im Hochwasserrisikomanagement nach Gl. (2); durchgezogene Linie: inhaltlicher Fokus dieser Arbeit**

Das Ergebnis umfasst die optimierte Kostenaufteilung zwischen Risiko- und Zuverlässigkeitskosten sowie deren absoluten Werte für homogene Flusdeiche und Schadenspotentiale bis zu 100 Mio.  $\frac{\text{EUR}}{\text{m}}$ . Abschließend werden die Erkenntnisse dieser Arbeit in ein ganzheitliches HWRM eingeordnet (Kapitel 5) und an das Fazit (Kapitel 5.4) anknüpfend der weitere Forschungsbedarf herausstellt.



## **2 Die stochastische Beschreibung von Bodeneigenschaften<sup>2</sup>**

### **2.1 Einführung**

Wenngleich der Begriff der Versagenswahrscheinlichkeit die Möglichkeit eines Versagens (vgl. Kapitel 3) eindeutig transportiert, bedarf es für ihre Bestimmung und Interpretation der umfassenden Kenntnis bodenmechanischer und geotechnischer Grundlagen. Vor diesem Hintergrund präsentiert dieses Kapitel eine Methode zur stochastischen Modellierung von bodenmechanischen Kenngrößen, welche für probabilistische Zuverlässigkeitsanalysen in der Geotechnik Voraussetzung sind. Dem Fokus dieser Arbeit entsprechend beschränkt es sich dabei auf die Analyse derjenigen Kenngrößen, welche für die Stabilität landseitiger Flussdeichböschungen relevant sind. Um dem zu genügen, beschreibt es zunächst die mathematische Erfassung von Ungewissheit (2.2) und stellt anschließend die deutsche Bodenklassifikation (2.3), die in dieser Arbeit analysierte Datengrundlage (2.4) und die ausgewählten Bodenkenngrößen (2.5) vor. Nach der Zusammenstellung von bodenmechanischen Transformationsmodellen (2.5.6) schließen die aus der Literatur

---

<sup>2</sup> Teile des Kapitels wurden bereits in Schwiersch et al. (2022) veröffentlicht

gesammelten und mit eigenen Analysen gewonnenen stochastischen Eigenschaften klassifizierter Böden das Kapitel ab (2.6).

Natürliche Böden sind das Ergebnis der Pedogenese, der Gesteinsumwandlung in Kontakt mit Atmosphäre und Biosphäre. In diesem geologischen Prozess spielt die Fraktionierung durch Sedimentation die prägendste Rolle. Dadurch variieren Böden in ihrer mineralischen Zusammensetzung (Mikroskala), ihren Eigenschaften der Einzelkörner (Mesoskala) und ihrer Wirkung als Korngerüst (Makroskala). Zusätzlich unterliegen natürliche Böden einer räumlichen Variabilität, welche ihre Ursache in erdgeschichtlichen Prozessen besitzt, wie z. B. der zeitlichen Entwicklung von Gletschern. Einen umfassenden Überblick zur Entstehungsgeschichte von Böden geben Scheffer et al. (2010) und zu bodenmechanischen Untersuchungen Kempfert und Raithel (2007) sowie Lang et al. (2011).

Aus technischer Sicht ähnliche Böden werden nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik in Bodengruppen klassifiziert und ihre Eigenschaften mithilfe von bodenmechanischen Labor- und Feldversuchen quantifiziert. So kann das Bodenverhalten anhand von Kenngrößen wie z. B. Scherfestigkeit, Steifigkeit oder gesättigte Durchlässigkeit und unter Verwendung üblicher, bodenmechanischer Materialmodelle approximiert werden. Dies geschieht im Wasserbau entweder für die Verwendung von Boden als Baugrund (natürlich gewachsener Boden) oder als Baustoff wie z. B. zur Errichtung von Flussdeichen. In beiden Fällen müssen die Böden hinsichtlich ihrer Stabilität eingeschätzt werden.

Eine Folge der Pedogenese ist, dass Bodeneigenschaften sowohl räumlich als auch zeitlich variabel und somit ungewiss sind (Scheffer et al., 2010). Diese Ungewissheit pflanzt sich über die technischen Kenngrößen und verwendeten Materialmodelle bis in die Stabilitätsaussage fort und wird in die aleatorische und epistemische Ungewissheit unterschieden. Mit der aleatorischen Ungewissheit bezeichnet man die natürliche Variabilität, welche bei Vorliegen einer ausreichend umfassenden Stichprobe mithilfe der deskriptiven Statistik erfasst und mittels stochastischer Modelle prognostiziert werden kann. Die unveränderliche, epistemische Ungewissheit (auch Unschärfe genannt) ist eine Folge mangelnden Wissens und beinhaltet unter

anderem die Unmöglichkeit einer exakten Messung (Reuter, 2006), Ungewissheiten infolge von vereinfachenden Annahmen, die Modellungsgewissheit und die aus einer begrenzten Stichprobe resultierenden, statistische Ungewissheit. Wie Lacasse und Nadim (2007) festgestellt haben, kann die epistemische Ungewissheit in bodenmechanischen Analysen durchaus den größten Anteil der Ergebnisungewissheit ausmachen. Gleiches formulierte Karl Terzaghi (\*1883 in Prag; † 1963 in Winchester) bereits 1954 wie folgt:

„[Jede] Theorie der angewandten Mechanik [ist] praktisch auf einer Reihe von Annahmen aufgebaut, die die mechanischen Eigenschaften des zu Grunde liegenden Baustoffs vereinfachen. Diese Annahmen sind stets in einem gewissen Maße mit der Natur im Widerspruch.“ – aus Terzaghi und Jelinek (1954).

Der verantwortungsvolle Umgang mit Ungewissheit ist ein wesentlicher Bestandteil der Ingenieurpraxis. Dies zeigt sich z. B. in der ingenieurmäßig konservativen Wahl von Kennwerten und Belastungssituationen. In der wissenschaftlichen Praxis werden Kennwerte zumeist an einzelnen Proben abgeschätzt und deren Ungewissheit über in der Literatur gegebenen Variationskoeffizienten einbezogen (Assis, 2020). Die statistische Beschreibung von Bodeneigenschaften ist bisher nur vereinzelt Gegenstand der internationalen Literatur (Schwiersch et al., 2022), weshalb die stochastische Auswertung geotechnischer Grenzzustände gleichermaßen mit aleatorischen als auch epistemischen Ungewissheiten behaftet ist.

## 2.2 Mathematische Erfassung von Ungewissheit

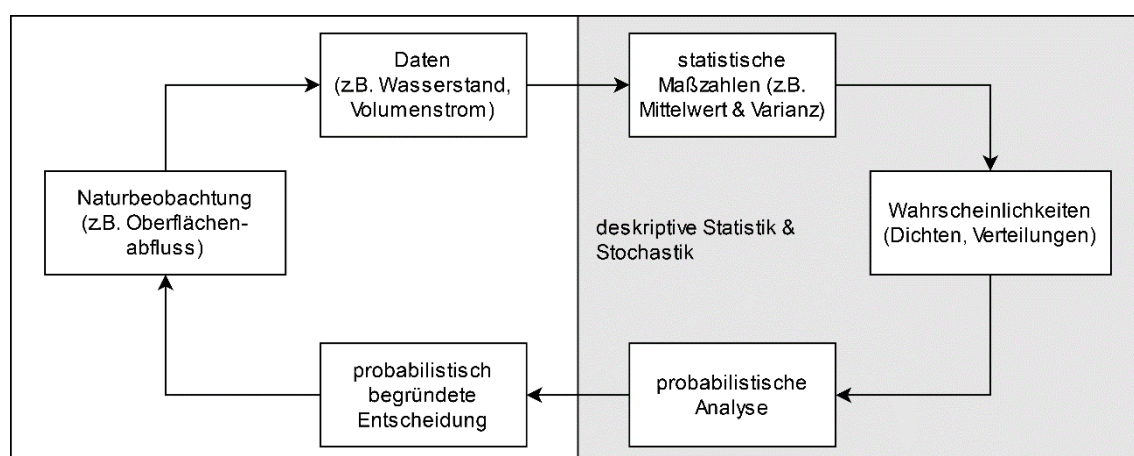
Die mathematische Erfassung vorgenannter Ungewissheiten basiert auf einer Vielzahl von Beobachtungen. Diese werden in Form von Datensätzen (oder auch „Daten“) systematisch erfasst (Ang & Tang, 2006). Als aussagekräftig gilt ein Datensatz, wenn er plausibel, homogen und stationär ist. Verfahren zur Prüfung von Datensätzen auf diese drei Eigenschaften sowie ergänzende Hinweise finden sich in DWA (2022). Mit Hilfe der deskriptiven Statistik (auch beschreibende Statistik genannt) können von den Datensätzen statistische Maßzahlen abgeleitet und relative Häufigkeiten sowie Wahrscheinlich-

keiten gewonnen werden (vgl. Abbildung 2). Durch die Anwendung stochastischer Modelle (Probabilistik) lassen sich schließlich Prognosen entwickeln und Entscheidungen auf Grundlage von Wahrscheinlichkeiten treffen.

Die Daten selbst können in unterschiedlichen Datentypen (z. B. qualitative & quantitative, nichtmetrische & metrische Daten) vorliegen, welche jeweils auf geeigneten Skalen zu bewerten sind. Für die Analyse qualitativer oder nichtmetrischer Daten sowie die Bewertung auf der Nominal- oder Ordinalskala wird auf Hartung et al. (2009), Eckle-Kohler und Kohler (2017) sowie Hedderich und Sachs (2020) verwiesen.

Relevante Datensätze im Flussdeichkontext enthalten z. B. Informationen zu den hydraulischen Einwirkungen oder zum bodenmechanischen Widerstand. Gegenstand dieser Arbeit sind Datensätze aus Laborversuchen zur Gewinnung bodenmechanischer Kennwerte (vgl. 2.4). Somit werden quantitative und metrische Daten berücksichtigt, deren Bewertung üblicherweise anhand von Intervall- oder Verhältnisskalen stattfindet.

Zur Auswertung der Daten werden diese in Häufigkeiten bzw. Stichproben zusammengefasst (Ang & Tang, 1984; Hartung et al., 2009). So vereint eine Stichprobe beispielsweise alle Messwerte zum inneren Reibungswinkel oder der Bodenwichte für eine Bodengruppe. Eine ganzheitliche Beschreibung der Stichprobe lässt sich u. a. anhand von Lage- und Streuungsmaßzahlen vornehmen. Für weitere statistische Maßzahlen, wie z. B. zur Beschreibung der Schiefe oder der Wölbung, wird auf



**Abbildung 2: Die Rolle von Daten für probabilistisch begründete Entscheidungen**

Ang & Tang (2006), Cramer & Kamps (2017), Eckle-Kohler & Kohler (2017) und Hedderich & Sachs (2020) verwiesen.

Lagemaßzahlen geben an, in welchem Wertebereich die „Mitte“ der betrachteten Messreihe liegt (Eckle-Kohler & Kohler, 2017). Das arithmetische Mittel  $\bar{x}$  ist gleich der Summe aller Beobachtungen  $x_i$ , geteilt durch die Anzahl dieser Beobachtungen  $n_{ob}$ . Es dient zur repräsentativ-nivellierenden Mittelung (Informationsverdichtung) für mehrere bis zahlreiche nicht zu heterogene Beobachtungen (Hedderich & Sachs, 2020).

$$\bar{x} = \frac{1}{n_{ob}} \cdot (x_1 + x_2 + \dots + x_{n_{ob}}) = \frac{1}{n_{ob}} \sum_{i=1}^{n_{ob}} x_i \quad (3)$$

Nachteil des arithmetischen Mittels ist, dass es einerseits nur für reelle Messgrößen berechnet und andererseits sehr stark durch sogenannte Ausreißer beeinflusst werden kann. Daher gilt es auch als empfindliches Lagemaß (Hedderich & Sachs, 2020).

Wenn sich der Wertebereich einer Stichprobe über mehrere Zehnerpotenzen erstreckt, empfiehlt es sich das sogenannte geometrische Mittel als Lagemaß zu benutzen (Hedderich & Sachs, 2020). Der geometrische Mittelwert bestimmt sich bei Vorliegen ausschließlich positiver Werte als die  $n_{ob}$ -te Wurzel aus dem Produkt aller Werte.

$$\bar{x}_g = \sqrt[n_{ob}]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_{n_{ob}}} \quad (4)$$

Weitere Lagemaßzahlen sind z. B. der Median  $\tilde{x}$ , welcher als robust gilt und das harmonische Mittel  $\bar{x}_h$ , mit welchem sich Messreihen durchgehend positiver oder negativer Beobachtungswerte analysieren lassen.

Streuungsmaßzahlen dienen wiederum zur Beschreibung des Bereichs, über den sich die Werte im Wesentlichen erstrecken, insbesondere kann man aus diesen ablesen, wie stark die Werte um die „Mitte“ der Werte schwanken (Eckle-Kohler & Kohler, 2017). Für diese Arbeit relevante Streuungsmaßzahlen sind die (empirische) Varianz, die (empirische) Standardab-

weichung und der Variationskoeffizient. Die Varianz ist definiert als arithmetisches Mittel aller quadratischen Abstände der Datenpunkte vom arithmetischen Mittel (Eckle-Kohler & Kohler, 2017):

$$s^2 = \frac{1}{n_{ob} - 1} \cdot \left( (x_1 - \bar{x})^2 + \dots + (x_{n_{ob}} - \bar{x})^2 \right)$$

$$s^2 = \frac{1}{n_{ob} - 1} \sum_{i=1}^{n_{ob}} (x_i - \bar{x})^2 \quad (5)$$

Die Standardabweichung ist definiert als die Wurzel der Varianz.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n_{ob} - 1} \sum_{i=1}^{n_{ob}} (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

Die Größe der Standardabweichung relativ zum arithmetischen Mittel beschreibt der sogenannte Variationskoeffizient (VarK), welcher durch

$$VarK = \frac{s}{\bar{x}} \quad (7)$$

definiert ist. Dieser ist für nichtnegative Messreihen mit  $\bar{x} > 0$  maßstabsunabhängig und kann daher zum Vergleich der Streuung verschiedener Messreihen verwendet werden (Eckle-Kohler & Kohler, 2017).

In der Stochastik wird die Grundgesamtheit aller möglichen Beobachtungen anhand von Zufallsvariablen beschrieben. Der Wert  $x$ , den eine Zufallsvariable  $X$  bei der Durchführung eines Zufallsexperimentes annimmt, wird Realisierung von  $X$  genannt. Unterliegt ein zu analysierender Prozess den Einflüssen gleich mehrerer Zufallsvariablen  $X_i$ , lassen sich diese in einem Zufallsvektor  $X=(X_1, \dots, X_n)$  zusammenfassen. Wie wahrscheinlich eine oder gleich mehrere Prozessverläufe sind, lässt sich dann mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen bestimmen. Dies ermöglicht z. B. die Zuordnung von Wahrscheinlichkeiten zu diskreten Werten des inneren Reibungswinkels oder der Bodenwichte. Dabei gibt die Verteilungsfunktion  $F(t)$  die Wahrscheinlichkeit an, mit welcher eine Realisierung kleiner oder gleich dem betrachteten Wert  $t$  ist.

$$F(t) = P(X \leq t) \quad (8)$$

Verteilungsfunktionen sind daher monoton nicht fallend (Hartung et al., 2009) und werden allgemein nach Gl. (9) definiert.

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f_x(\xi) d\xi \quad (9)$$

Der Wert  $F(x)$  beschreibt also die Unterschreitungswahrscheinlichkeit von  $x$ . Mit  $f$  wird die Wahrscheinlichkeitsdichte definiert. Aus Gl. (9) geht hervor, dass die Wahrscheinlichkeit einer Realisierung  $x$  per Definition Null ist, weil das Integral eines Abschnitts im Intervall von  $x$  bis  $x+\Delta x$  für  $\Delta x \rightarrow 0$  keine Fläche besitzt.

Ist  $X$  ein Zufallsvektor  $X=(X_1, \dots, X_n)$  ergibt sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung als eine  $n$ -dimensionale, räumliche Größe und bestimmt sich zu

$$F(t_1, \dots, t_n) = \int_{-\infty}^{t_1} \dots \int_{-\infty}^{t_n} f(\xi_1, \dots, \xi_n) d\xi_1 \dots d\xi_n. \quad (10)$$

In diesem Fall beschreibt  $f$  die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichte aller Zufallsvariablen  $X_i$ . Eine Zusammenstellung gebräuchlicher Verteilungen unter Angabe ihrer Verteilungsfunktionen und Dichten findet sich in Bachmann (2012). Weiterhin gibt Bender (2015) einen Überblick zur Modellierung mehrdimensionaler Wahrscheinlichkeitsverteilungen im Kontext wasserwirtschaftlicher Fragestellungen.

Für einen Überblick zu diskreten Zufallszahlen verweist diese Arbeit auf Hedderich und Sachs (2020) und beschränkt sich somit auf stetige Zufallsvariablen. Für diese lassen sich der Erwartungswert  $E(X)$  nach Gl. (11) und die Varianz  $\text{Var}(X)$  nach Gl. (12) errechnen. Die Wurzel der Varianz drückt die Standardabweichung  $\sigma$  aus.

$$E(X) = \mu = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx \quad (11)$$

$$\text{Var}(X) = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 \cdot f(x) dx \quad (12)$$

Die Anpassung einer Verteilung an die Beobachtungen einer Stichprobe erfolgt anhand von Schätzern. Die Bestimmung der Schätzer kann z. B. über die Momentenmethode (MM), das Maximum-Likelihood-Estimate (MLE) oder die Ordinary Least Squares (OLS) erfolgen. An dieser Stelle wird ausschließlich das Grundprinzip der MLE beschrieben und für MM und OLS auf Hedderich und Sachs (2020) verwiesen, weil die MLE hinsichtlich ihres breiten Anwendungsfelds und ihre meist sehr guten Anpassungsergebnisse (engl.: fitting) Vorteile den anderen gegenüber besitzt.

Im Zuge der MLE wird ein vordefiniertes Wahrscheinlichkeitsmodell an die Beobachtungen angepasst. Daher stellen die Parameter eines solchen Modells in der Likelihood-Funktion Unbekannte dar, die geeignet bestimmt werden. Oft ist sie daher eine hochgradig nichtlineare Funktion der zu schätzenden Parameter, so dass eine analytische Lösung nicht existiert und numerische Maximierungsverfahren eingesetzt werden müssen. Eine Einführung zu der in dieser Arbeit verwendeten MLE geben Hedderich und Sachs (2020). Für zahlreiche Wahrscheinlichkeitsmodelle (z. B. Normal-, Lognormal- oder Weibullverteilungen) sind die Likelihood-Funktionen und Bestimmungsterme der MLE-Schätzer in den mathematischen Entwicklungsumgebungen bereits gegeben. Da aus den Beobachtungen der Stichproben jedoch nicht zwingend hervorgeht, welches Wahrscheinlichkeitsmodell die Beobachtungen am besten beschreibt, werden gleich mehrere Modelle an die Beobachtungen angepasst. Anschließend sind die einzelnen Modelle hinsichtlich ihrer Eignung zu beurteilen.

Für die Beurteilung der Eignung werden in der Regel statistische Tests (auch Anpassungstests genannt) verwendet. Grundlage statistischer Tests bilden Hypothesen, für die entweder eine Arbeitshypothese  $H_A$  oder eine Gegenhypothese  $H_0$  (auch Nullhypothese genannt) formuliert werden muss.

Eine Arbeitshypothese geht davon aus, dass die Beobachtungen einer bestimmten Verteilung unterliegen, welche durch den Test bestätigt werden sollte. Eine Gegenhypothese formuliert wiederum, dass eine angenommene



Verteilung die Beobachtungen nur unzureichend beschreibt, sodass diese abgelehnt werden sollte.

Ob ein statistischer Test mit einer Arbeits- oder Gegenhypothese durchzuführen ist, lässt sich unter Berücksichtigung der Folgen einer Falscheinschätzung festlegen (Hedderich & Sachs, 2020). Je größer der Stichprobenumfang  $n_{ob}$  (im Kontext der Anpassungstests auch Fallzahl genannt) ist, desto aussagekräftiger ist das zu erwartende Testergebnis.

Das mit einem Testergebnis ausgewiesene Signifikanzniveau  $\alpha$  begrenzt die Möglichkeit einer Fehldeutung (unberechtigtes Ablehnen der Nullhypothese, falsch positiv). In ähnlicher Weise wirkt der weniger häufig in der Literatur zu findende Wert der statistischen Power, definiert als  $1-\beta$  (unberechtigtes Beibehalten der Nullhypothese, falsch negativ). Die Entscheidung über das Ablehnen oder Beibehalten einer Hypothese wird über eine Prüfgröße herbeigeführt. Diese beinhaltet eine Teststatistik zu Realisierungen der angenommenen Zufallsvariable. Fällt das Testergebnis in den vom Signifikanzniveau (bzw. dem  $\beta$ -Wert) definierten Ablehnungsbereich, wird die Hypothese abgelehnt.

Beispiele für Anpassungstests im technischen Kontext sind der Kolmogoroff-Smirnoff-Test (K-S-Test) und der Anderson-Darling Test (A-D-Test). Der K-S-Test basiert auf der maximalen Differenz zwischen der empirischen Verteilungsfunktion  $F(x_i)$  und der zu prüfenden theoretischen Verteilungsfunktion  $F_0(x_i)$ , deren Teststatistik mit Gl. (13) beschrieben werden kann.

$$\hat{D} = \max_{1 \leq i \leq n} |F_0(x_i) - F(x_i)| \quad (13)$$

Die Nullhypothese wird verworfen, wenn der Wert der Teststatistik größer ist als ein in Tabellenwerken dokumentierter Schwellwert (Hedderich & Sachs, 2020). Der K-S-Test reagiert insbesondere in der Mitte der Verteilungen sensitiv auf Differenzen während Abweichungen in den Randbereichen (auch Tails genannt) wegen der vergleichsweise geringen Beträge für die Testentscheidung weniger gewichtig sind.

Zur Überprüfung der Anpassungsqualität in den Randbereichen wurde der A-D-Test entwickelt, welcher eine Modifikation des K-S-Tests darstellt.

Weil dem A-D-Test spezielle Verteilungsmodelle zugrunde liegen, müssen kritische Werte für jedes Verteilungsmodell getrennt hergeleitet werden (Hedderich & Sachs, 2020). Die Teststatistik  $\hat{A}$  zum A-D-Test wird für eine spezielle Verteilungsfunktion  $F$  berechnet durch:

$$\hat{A}^2 = -\hat{N} - \hat{S} \quad (14)$$

$$\hat{S} = \sum_{i=1}^{\hat{N}} \frac{2i-1}{\hat{N}} [\log F(X_i) + \log(1 - X_{n_{ob}+1-i})] n_{ob} \sigma^2 \quad (15)$$

### 2.3 Bodenklassifikation

Unter natürlichen Bedingungen bestehen Böden nicht aus Einkornmaterial, sondern setzen sich aus Körnern unterschiedlicher geometrischer Abmessungen zusammen (Terzaghi & Peck, 1961). Die Beschreibung dieser Zusammensetzung erfolgt anhand des Masseanteils einer Korngröße  $d$  an der Gesamtmasse einer Bodenprobe  $m$ . Deren graphische Auswertung ergibt eine probenbezogene Kornverteilungslinie (KVL). Dabei repräsentiert ein steiler Anstieg der KVL einen enggestuften und ein flacher einen weitgestuften Boden (vgl. Abbildung 3). Definitionsgemäß existiert kein negativer Anstieg einer Kornverteilung. Besitzt eine KVL einen Abschnitt mit horizontalem (oder nahezu horizontalem) Verlauf, so wird von einem Fehlkorn bzw. einer Ausfallkörnung gesprochen. Zu diesem Korngrößenbereich fehlen die Körner im beprobten Material.

Eine fachwissenschaftlich diskutierte, jedoch international weithin übliche Maßzahl zur Charakterisierung einer KVL ist die Ungleichförmigkeit  $C_U$ , welche Korngrößen zu festgelegten Masseanteilen (= Kornfraktionen  $d_p$ ) miteinander vergleicht.

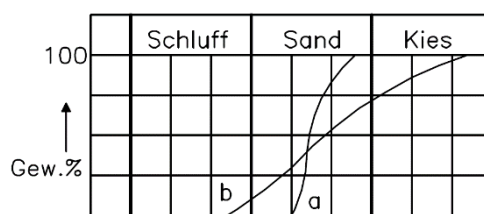
$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (16)$$

Als gleichmäßig gestuft gilt ein Boden mit  $C_U < 3$ , als eng bis mäßig gestuft mit  $5 \leq C_U \leq 15$  und als weit oder intermittierend gestuft mit  $C_U > 15$  (DIN, 2020a).

Für Korngrößen mit  $d > 0,06$  mm wird die KVL mithilfe der Siebanalyse für kleinere mithilfe der Schlämm- oder Sedimentationsanalyse bestimmt. Über die KVL hinaus werden bei bindigen Böden (Schluffe und Tone) zusätzlich die plastischen Eigenschaften (vgl. 2.5) bestimmt. Hierzu werden Ausrollversuche und Versuche am Fließgrenzengerät nach Casagrande durchgeführt.

Die gewonnenen Informationen (KVL, plastische Eigenschaften) werden schließlich dazu verwendet, die Böden den in DIN 18196 definierten Bodengruppen zuzuordnen und diese nach DIN 4022 zu benennen. Die zwei Klassifikationsschemata der deutschen Normung und eine terminologische Äquivalenzzuordnung zwischen der deutschen, der US-amerikanischen und der internationalen Bodenbenennung finden sich in Anhang 2. Die Zuordnung eines Bodens zu einer Bodengruppe schließt nicht aus, dass dieser dennoch Bestandteile aus benachbarten Bodenhauptgruppen enthält (Kuzmanić & Mikoš, 2020)

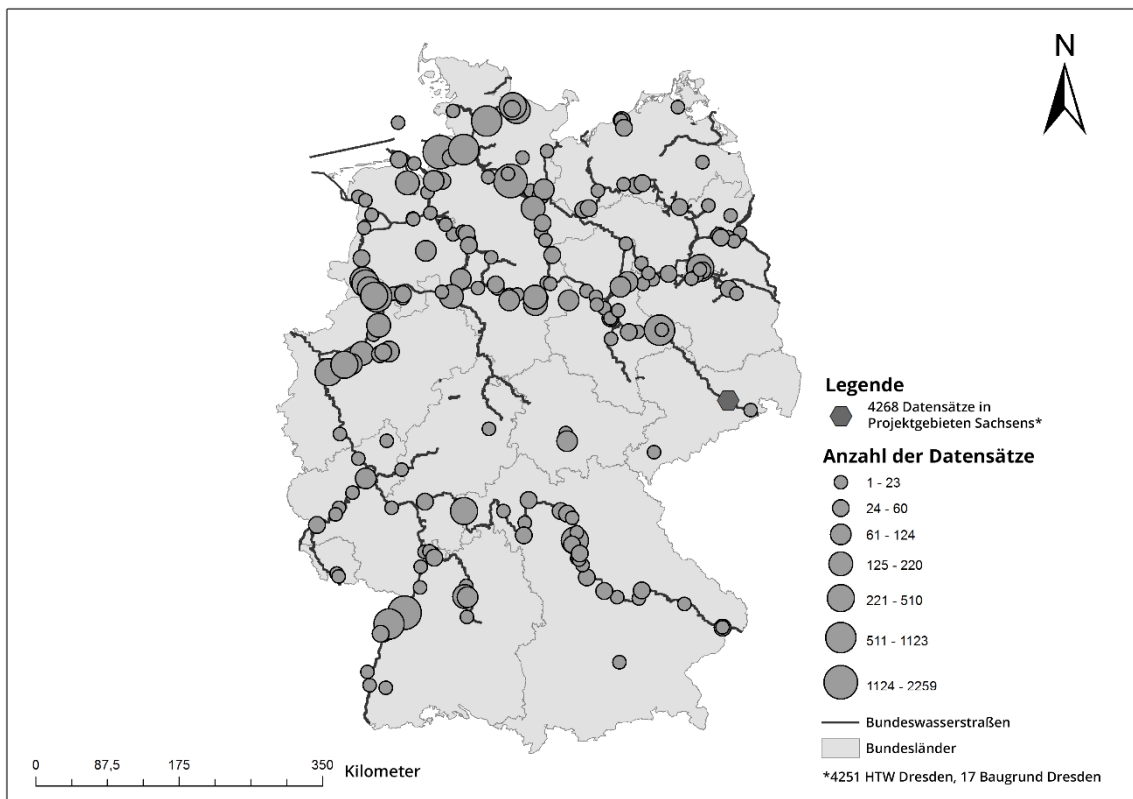
Zwar erscheint eine Klassifizierung von Böden auf Basis der KVL und der plastischen Eigenschaften willkürlich, ermöglicht jedoch deren ortsunabhängigen Vergleich (Kolymbas, 2016). Dies dient wiederum dem Ziel, die Verwendbarkeit von Böden für bauliche Zwecke beurteilen zu können. So sollen Böden einer Gruppe ähnliche bautechnische Eigenschaften aufweisen (Kempfert & Raithel, 2007). Diesem Gedanken folgend, lassen sich für gleich klassifizierte Böden Verteilungen zu ihrem Bodenverhalten gewinnen. Voraussetzung dafür bildet ein Datensatz, welcher für jede der zu untersuchenden Bodenkenngößen ausreichend Dateneinträge für eine repräsentative Stichprobe beinhaltet.



**Abbildung 3: Eng- (a) und weitgestufte (b) Kornverteilung (Kolymbas, 2016)**

## 2.4 Datengrundlage

Für diese Arbeit wurde in Kooperation mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTW) und der Baugrund Dresden Ingenieurgesellschaft mbH ein Datensatz zusammengetragen, der die Ergebnisse von Bodenklassifikationsversuchen überregional erfasst (vgl. Abbildung 4 und Anhang 3). Dies dient dazu, lokale Trends in einer Bodengruppe zu glätten und so ein Bild von der Grundgesamtheit einer Bodengruppe zu erhalten. Der ausgewertete Datensatz enthält überwiegend (78 Prozent) Datensätze, die im Rahmen von Baugrunduntersuchungen für Wasserstraßeninfrastruktur erhoben wurden (davon natürliche Fließgewässer: 72 Prozent und künstliche Wasserstraßen: 28 Prozent). Ergänzt werden diese Daten durch Ergebnisse von Klassifikationsversuchen aus der Region Dresden / Sachsen (22 Prozent). Diese Datengrundlage begünstigt die Berücksichtigung sowohl von Böden, die während der Pedogenese eine



**Abbildung 4:** Räumliche Verortung der analysierten Klassifikationsdaten; Kreise: Baugrunduntersuchungen für Wasserstraßeninfrastruktur, Sechseck: Baugrunduntersuchungen aus Dresden/Sachsen, Karte: © Esri Deutschland

Translokation erfahren haben, als auch jenen, die am Ort ihrer Entstehung Gegenstand einer Transformation waren (Scheffer et al., 2010). Die alleinige Betrachtung von flussnahen Datensätzen bringt tendenziell umfassende Stichproben zu sedimentären Böden hervor. Der Umfang an Dateneinträgen flussferner Böden, wie z. B. UL, UM/UA oder SW/SI wäre jedoch als klein zu erwarten.

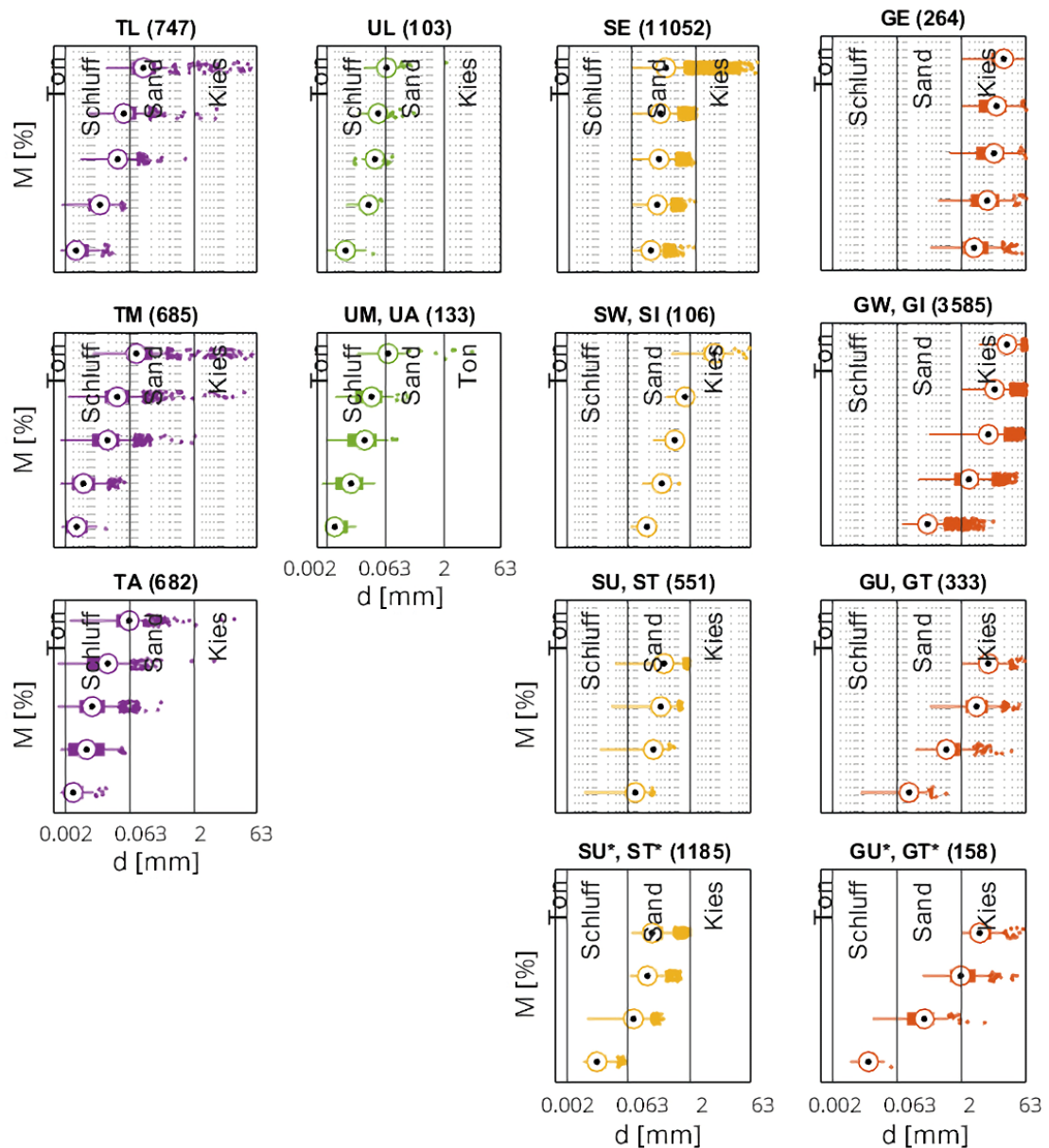
Insgesamt wurden 19.584 Datensätze (Korngrößenverteilungen) in 13 Bodengruppen eingeteilt, wobei die Differenzierung zwischen Tonen und Schluffen auf Grundlage der Einschätzung vorgenannter Kooperationspartner erfolgte. Der größte Anteil der Daten, 88 Prozent (17.234 Datensätze), entfällt auf nichtbindige Böden, die verbleibenden 12 Prozent (2.350 Datensätze) auf kohäsive Böden. Für 1.804 Datensätze der bindigen Böden sind zusätzlich Informationen zum Wassergehalt (Ausrollgrenze  $w_p$ , Fließgrenze  $w_L$ , natürlicher Wassergehalt  $w$ ) verfügbar. Für neun der 13 Bodengruppen liegen mindestens 250 Datensätze vor. Die geringsten Datenmengen umfassen die Proben für leicht plastische Schluffe (UL) mit 103 und für weit- und intermittierend gestufte Sande (SW, SI) mit 106 KVL.

Die in Abbildung 5 dargestellten Box-Whisker-Plots geben einen Überblick über die ausgewerteten Rohdaten. Für jede Bodengruppe wird die Variabilität der Korndurchmesser anhand von vier bzw. bei umfassenderer Datenverfügbarkeit von fünf ausgewählten Referenzkornfraktionen ( $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$  und  $d_{85}$ ) dargestellt. Die Medianwerte (durch einen Kreis hervorgehoben) zeigen eine mittlere, empirische KVL der jeweiligen Bodengruppe. Anhand dieser lässt sich erkennen, dass eine Bodengruppe umso stärker durch benachbarte Hauptbodengruppen (Ton, Schluff, Sand, Kies) geprägt ist, je weiter sie abgestuft ist. Wie im Falle von SE und GE zu sehen ist, liegen die Medianwerte aller Fraktionen innerhalb ihrer eigenen Bodenhauptgruppe während für SU\*, ST\* und GU\*, GT\* Schluffanteile von bis zu 10 Massenprozent gefunden werden. Bei allen Böden ist der Interquartilsbereich (durch die Kästen hervorgehoben) eng, was auf spitzgipflige Häufigkeitsverteilungen hinweist. Während die Korngrößen der klassifizierten Kiese und Sande innerhalb der jeweiligen Bodenhauptgruppen zu finden sind, lassen sich Schluff

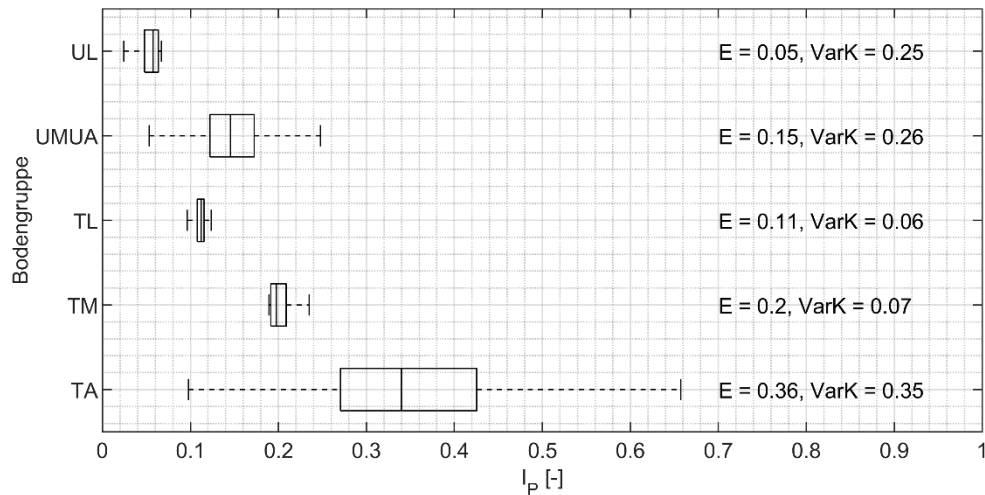
und Ton aufgrund der konsistenzbasierten Klassifizierung der bindigen Böden mit dem Atterberg'schen Test nicht in der Korngröße unterscheiden.

Gelegentliche Abweichungen von den Klassifizierungsregeln (z. B. beim Anteil der Schluffkörner in SU, ST) zeigen auch, dass innerhalb einer Bodengruppe mit Anteilen angrenzender Bodenhauptgruppen von bis zu 30 Massenprozent (z. B. GU, GT) in der Bodenzusammensetzung (und damit auch in den bemessungsrelevanten Parametern) zu rechnen ist.

Für die Datensätze bindiger Böden, kann der Plastizitätsindex  $I_p$  bestimmt werden (DIN, 2020b). Kleine Werte für  $I_p$  weisen auf einen kleinen und somit gegen Feuchtigkeit sensitiven Bereich für plastisches Verhalten auf (vgl. Abbildung 6). Für leicht plastische Böden werden Werte von ca. 5 (UL) und 11 Prozentpunkten (TL) beobachtet. Im Gegensatz dazu weisen mittel- bis ausgeprägt plastische Böden (UMUA, TM, TA) eine größere Robustheit gegenüber Feuchtigkeit auf. Mit durchschnittlich 36 Prozentpunkten ist das Intervall für das plastische Bodenverhalten bei TA am größten. Die für Schluff beobachteten Variationskoeffizienten liegen bei 25 % (UL) und 26 % (UM, UA). Bei Tonen schwanken sie zwischen 6 % (TL), 7 % (TM) und 34 % (TA).



**Abbildung 5:** Visualisierung der Rohdaten für die untersuchten 13 Bodengruppen mittels Box-Whisker-Plots für die Kornfraktionen  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$  und  $d_{85}$ ; Stichprobengröße in Klammern, Whisker-Multiplikator: 1,5 x Interquartilsbereich

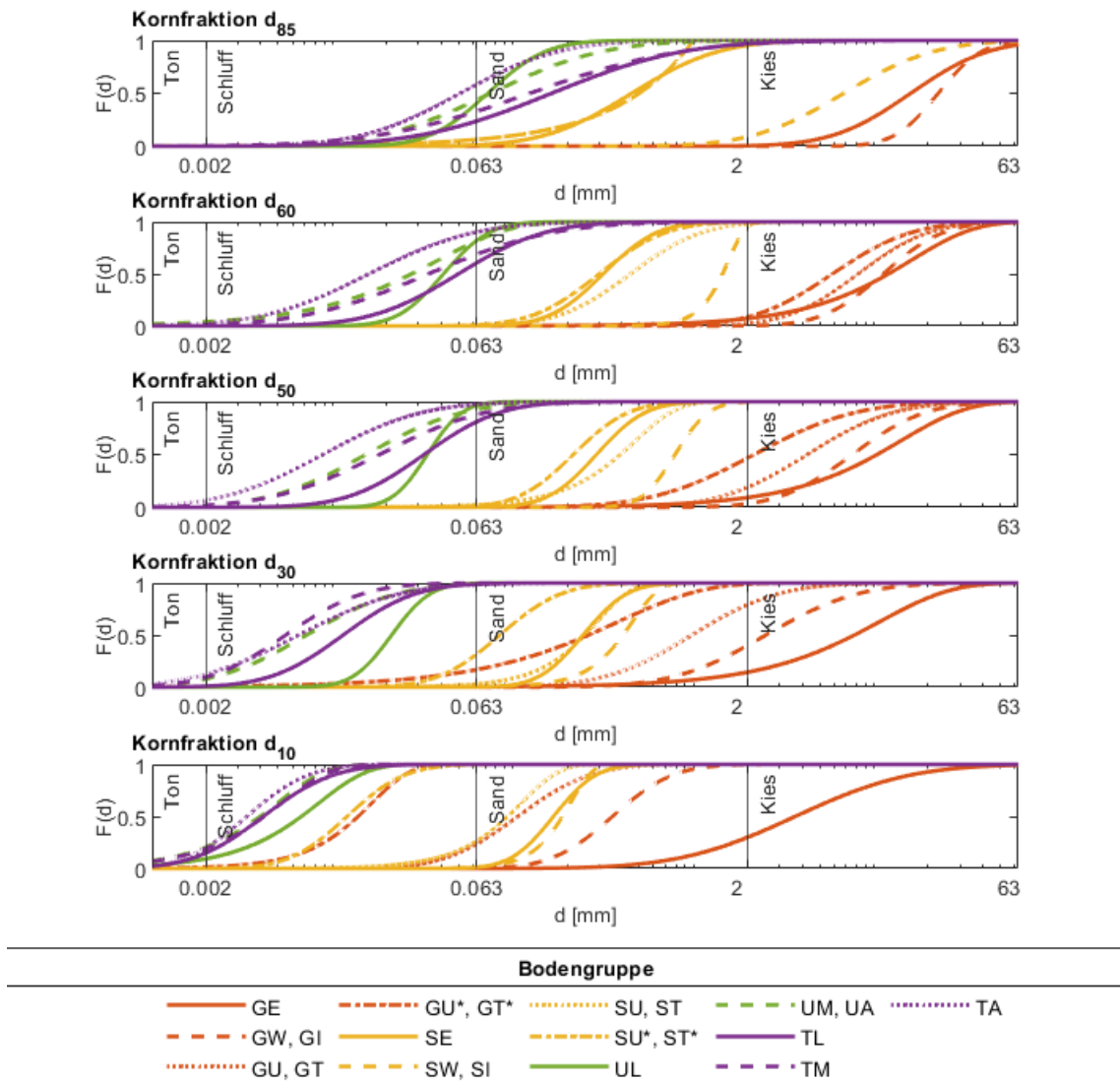


**Abbildung 6: Box-Whisker-Diagramm des Plastizitätsindex  $I_p$ ; Whisker-Multiplikator: 1,5 x Interquartilsbereichs, E: Erwartungswert, VarK: Variationskoeffizient; Anzahl der Datensätze: UL: 91, UM/UA: 109, TL: 506, TM: 512, TA: 586**

Zur Modellierung der Rohdaten wurden Verteilungen an die Kornfraktionen  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$  und  $d_{85}$  für jede Bodengruppe angepasst (vgl. Abbildung 7 und Anhang 4). Das sich daraus ergebende Wahrscheinlichkeitsmodell für die Korngröße ermöglicht in Verbindung mit den Transformationsmodellen aus 2.5.6 das Abschätzen der stabilitätsrelevanten Parameter.

Im Allgemeinen liegen die Kornfraktionsverteilungen jeder Bodengruppe innerhalb ihrer eigenen Hauptbodengruppe und zeigen dabei typische Muster, die der Klassifizierung entsprechen. Die Verteilungen der Tone (lila) und Schluffe (grün) zeigen zusätzlich, dass die Streuung der Korngrößen von kleinen zu großen Fraktionen zunimmt. Gegenüber den Ergebnissen zur  $d_{10}$ -Fraktion sind die Verteilungen der  $d_{85}$ -Fraktion deutlich flacher. Dies ist auf die konsistenzbasierte Klassifizierung zurückzuführen, bei der die Beimengungen größerer Körner aufgrund ihres untergeordneten Einflusses auf die Bodeneigenschaften vernachlässigt werden. So liegen die Ton- und Schluff-Verteilungen für die Partikelfraktion  $d_{10}$  überwiegend im Bereich der





**Abbildung 7: Unterschreitungswahrscheinlichkeit  $F(d)$  der Kornfraktionen  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$  und  $d_{85}$  für 13 Bodengruppen nach DIN 18196; ausgewertet als kumulative Dichtefunktionen**

Schluffkörner und haben einen steilen Gradienten. Bei der Kornfraktion  $d_{85}$  liegen die sichtbar flacheren Verteilungen hingegen zu großen Teilen im Bereich der Sandkörner. Bei den Sanden (gelb) und Kiesen (orange) finden sich bei den kleineren Kornfraktionen ( $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ) wiederum Beimischungen angrenzender, feinerer Bodenhauptgruppen. Beispielsweise liegen die Verteilungen der  $d_{10}$ -Fraktion bei Sanden sowie Kiesen mit hohem Feinanteil (SU\*, ST\* und GU\*, GT\*) fast vollständig im Schluffkornbereich. Bei den Kiesen sind auch

die Verteilungen der  $d_{30}$ -Fraktion im angrenzenden Sandkornbereich zu finden.

## 2.5 Bodenmechanische Kenngrößen

### 2.5.1 Allgemeines

Die Bodenmechanik erfasst zur technischen Beurteilung von Böden deren Formänderungs-, ihre Festigkeits- und ihre geohydraulischen Eigenschaften (Lang et al., 2011). Im Kontext der landseitigen Böschungstabilität sind neben den charakterisierenden Informationen zum Porenraum und zum Wassergehalt insbesondere die Bodenwichte, der innere Reibungswinkel, die Kohäsion und die gesättigte Durchlässigkeit relevante Kenngrößen und werden daher nachfolgend erläutert. Weitere bodenmechanische Kenngrößen finden sich z. B. in Lang et al. (2011) und Zilch et al. (2013). Zusätzlich gibt Anhang 5 ausgewählte Erfahrungen zur Variabilität von Bodeneigenschaften wieder.

### 2.5.2 Porenraum und Wassergehalt

Boden setzt sich aus dem Feststoff der Körner und den Poren zusammen. Weil letztgenannte sowohl durch Luft als auch durch Wasser gefüllt sein können, stellt Boden somit einen Drei-Phasen-Baustoff dar, dessen Eigenschaften durch die anteilige Verteilung dieser drei Phasen bedingt werden. Die Gesamtheit aller geschlossenen sowie offenen Poren wird als Porenraum bezeichnet und besitzt das Hohlraumvolumen  $V_p$  (Fuchs et al., 2017). Den Anteil des Porenraums in einem Bodenvolumen  $V$  beschreibt der Porenanteil  $n$ .

$$n = \frac{V_p}{V} = \frac{e}{e + 1} \quad (17)$$

Als Verhältnis des Porenvolumens zum Feststoffvolumen  $V_s$  wird die Porenzahl  $e$  beschrieben.

$$e = \frac{V_p}{V_s} = \frac{n}{1 - n} \quad (18)$$

Innerhalb eines Bodenvolumens bilden die Einzelkörner miteinander eine Packung, welche in Abhängigkeit der Packungsdichte Grenzwerten entgegenstrebt (vgl. Abbildung 8).

Ob ein nichtbindiger Boden locker oder dicht gelagert ist, wird anhand seiner Lagerungsdichte  $D$  beschrieben. Diese ist über den vorhandenen Porenanteil  $n$ , und die Porenanteile bei lockerster  $n_{\max}$  und dichtester Lagerung  $n_{\min}$  definiert.

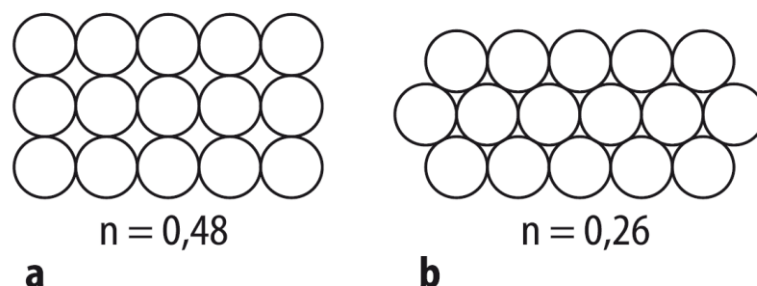
$$D = \frac{n_{\max} - n}{n_{\max} - n_{\min}} \quad (19)$$

Auf Basis der Porenzahl lässt sich die bezogene Lagerungsdichte  $I_D$  ermitteln, welche insbesondere im englischsprachigen Raum verbreitet ist.

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (20)$$

Der Wassergehalt  $w$  beschreibt das Verhältnis von der Wassermasse  $m_W$  zur Feststoffmasse  $m_d$  eines Bodenvolumens. Die Bestimmung des Wassergehalts erfolgt nach DIN EN ISO 17892-12 an einer Bodenprobe als das Massenverhältnis von Feucht- zu Trockenmasse (DIN, 2020b).

$$w = \frac{m_W}{m_d} \quad (21)$$



**Abbildung 8: Grenzporenzahl bei (a) kubisch-flächenzentrierter und (b) kubisch-raumzentrierter Packung idealer Kugeln (Fuchs et al., 2017; Zilch et al., 2013)**

Bindige Böden weisen in Abhängigkeit des Wassergehaltes Bodenzustände von fest über halbfest, steif, weich, breiig bis hin zu flüssig auf. Dabei markieren die Zustände steif, weich und breiig einen Teilbereich des plastischen Zustands. Dieser Zustand wird durch die Grenzwassergehalte der Ausrollgrenze  $w_p$  und der Fließgrenze  $w_L$  definiert. Beide Grenzwassergehalte werden mit der Durchführung von Laborversuchen an Proben bestimmt (DIN, 2020b).

### 2.5.3 Bodenwichte

Die Bodenwichte ergibt sich aus den Anteilen  $n_i$  und Dichten  $\rho_i$  der drei Phasen Luft (Index 'L'), Wasser (Index W) und Feststoff (Index S) in Verbindung mit der Gravitation  $g$ .

$$\gamma = \rho_s \cdot g = [n_L \cdot \rho_L + n_W \cdot \rho_W + n_S \cdot \rho_S] \cdot g \quad (22)$$

Für trockene Böden besteht dessen Zusammensetzung nur noch aus zwei Phasen: Feststoff und Luft. Folglich gilt für die Bodenwichte Gl. (23).

$$\gamma = [n_L \cdot \rho_L + n_S \cdot \rho_S] \cdot g \quad (23)$$

Bei dem Vergleich der mittleren Dichten von Luft ( $\rho_L = 1,2466 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ) und Feststoff ( $\rho_S = 2.650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ) ergibt sich der Verhältniswert  $\frac{\rho_L}{\rho_S} = 4,70 \cdot 10^{-4} \approx 0$ . Wird der Anteil der Luftphase anhand des Zusammenhangs  $n_L = 1 - n_K$  ausgedrückt, so lässt sich die Wichte trockener Böden vereinfachen.

$$\gamma = [(1 - n_s) \cdot \rho_L + n_s \cdot \rho_s] \cdot g$$

$$\gamma = [\rho_L - n_s \cdot \rho_L + n_s \cdot \rho_s] \cdot g$$

$$\gamma = [n_s \cdot (\rho_s - \rho_L) + \rho_L] \cdot g$$

$$\gamma = n_s \cdot \rho_s \cdot g \quad (24)$$

Da die Bodenluft mit der atmosphärischen Luft im Kontakt steht, kann diese vernachlässigt werden. Neben der als konstant angenommenen Dichte von Wasser ( $\rho_W = 1.000 \text{ kg/m}^3$ ) wird die Bodenwichte maßgeblich von der Korndichte  $\rho_s$  geprägt. Hierfür ist die mineralische Zusammensetzung der Einzelkörner ursächlich. Für vollständig gesättigte Böden lässt sich die Sättigungswichte nach Gl. (25) bestimmen.

$$\gamma = [n_s \cdot (\rho_s - \rho_W) + \rho_W] \cdot g \quad (25)$$

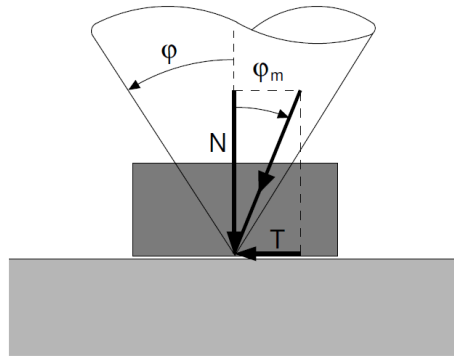
Unter feuchten Bedingungen kann der Luftporenanteil  $n_L$  unter Berücksichtigung von Gl. (26) aus der Bodenwichte eliminiert werden und es ergibt sich Gl. (27) unter Vernachlässigung der Luftdichte.

$$n_L = 1 - n_W - n_s \quad (26)$$

$$\gamma = [n_W \cdot \rho_W + n_s \cdot \rho_s] \cdot g \quad (27)$$

#### 2.5.4 Scherfestigkeit

Der innere Reibungswinkel  $\varphi$  und die wirksame Kohäsion  $c$  sind Kenngrößen zur Beschreibung der Scherfestigkeit von Boden. Ausgehend von der fachwissenschaftlich diskutierten Modellvorstellung einer Gleitkörperbewegung definiert der innere Reibungswinkel den sogenannten Reibungskegel (vgl. Abbildung 9). Dessen Mantelfläche ist mit dem Grenzzustand zwischen Wegrutschen (bzw. Gleiten) und Halten des Bodens gleichzusetzen. Solange sich die Resultierende aus Schub-  $T$  und Normalspannung  $N$  bei Erstbelas-



**Abbildung 9: Neigung des Reibungskegels  $\varphi$  und mobilisierter Reibungswinkel  $\varphi_m$  (Kolymbas, 2016)**

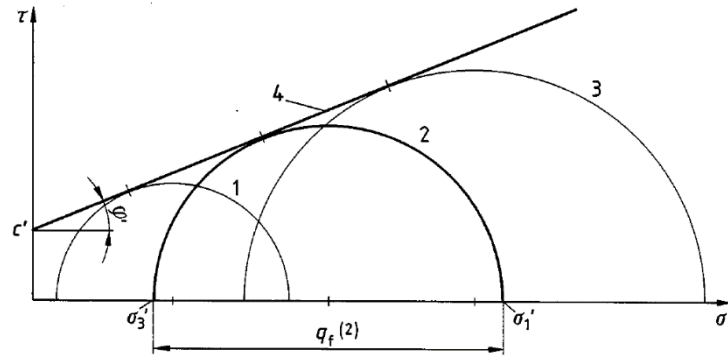
tung eines kohäsionslosen Systems innerhalb des Reibungskegels liegt (mobilisierter Reibungswinkel  $\varphi_m < \varphi$ ), findet kein Wegrutschen (bzw. Gleiten) statt (Kolymbas, 2016). Die Kohäsion  $c$  ist in der Modellvorstellung als ein Anfangswiderstand zu verstehen, welcher nach der Mobilisierung unwirksam wird.

Zur labortechnischen Bestimmung der Scherfestigkeit wird eine zu untersuchende Bodenprobe unter Aufbringen von Normal- und Schubspannungen in kontrollierte Spannungszustände versetzt. Nimmt die plastische Verformung bei konstanter Spannung zu, so hat unmittelbar zuvor der Grenzzustand vorgelegen ( $\varphi_m = \varphi$ ). Zur Durchführung derartiger Analysen sind (1) der Rahmenscher- und (2) der Triaxialversuch die zwei üblichen Laborversuche. Zu ihnen finden sich vertiefende Informationen z. B. in Kempfert und Raithel (2007), Lang et al. (2011), Zilch et al. (2013) oder Kolymbas (2016).

Schließlich lässt sich der Grenzwert der aufnehmbaren Schubspannung  $\tau_f$  für den drainierten Zustand als Funktion der in der Bruchfuge wirksamen Normalspannung  $\sigma'$  nach Gl. (28) ausdrücken (nach Mohr aus Zilch et al., 2013).

$$\tau_f = c + \sigma \cdot \tan\varphi \quad (28)$$

Eine graphische Darstellung dessen zeigt das  $\sigma'$ - $\tau'$ -Diagramm (vgl. Abbildung 10), in welchem die Hauptspannungen  $\sigma'_1$  und  $\sigma'_3$  den oberen und den unteren Randwert eines Kreises möglicher Spannungszustände markieren. Der



**Abbildung 10: Modellvorstellung zur Grenzbedingung nach Mohr-Coulomb im  $(\tau-\sigma')$ -Diagramm; 1, 2 und 3: Spannungskreise im Grenzzustand, 4: gerade Umhüllende als Grenzbedingung aus DIN 18137**

Radius der Kreise ist durch  $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$  definiert. Eine Tangente entlang der Kreise verschiedener Spannungszustände bildet den Zusammenhang aus Gl. (28) ab.

Da die Wirkung des Porenwassers auf die Scherfestigkeit in der Normalspannung  $\sigma'$  berücksichtigt ist (Zilch et al., 2013), lässt sich der Grenzwert der Schubspannung  $\tau_f$  in gleicher Weise für den undrainierten Zustand beschreiben (vgl. Gl. (29)).

$$\tau_f = c_u + \sigma \cdot \tan \varphi_u \quad (29)$$

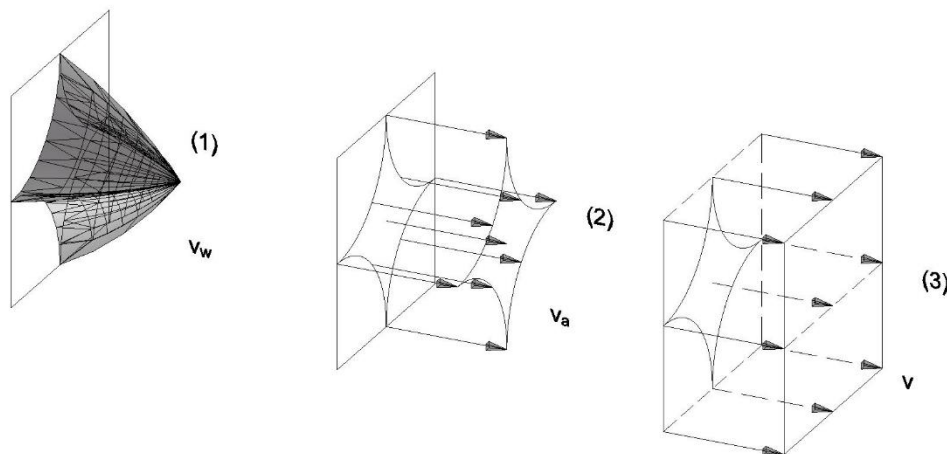
Mit dem undrainierten Zustand wird im bodenmechanischen Kontext der Fall einer schnellen Belastung beschrieben. In diesem Fall kann sich das im Porenraum eingeschlossene Porenwasser aufgrund seiner Viskosität nicht schnell genug der Kraftwirkung entziehen, sodass zunächst das nahezu inkompressible Wasser einen Teil des Lastabtrags übernimmt. Da das Korngerüst erst nach dem Drainieren des Bodens am Lastabtrag beteiligt ist, ist der anfängliche Widerstand eines Bodens gegen schnelle Belastungen nur durch die undrainierte Kohäsion bedingt (Kolymbas, 2016). Wird diese bei einer dynamischen Belastung überschritten, besteht für den Boden die Gefahr der Bodenverflüssigung (Tamáskovics, 2013). Für Konstruktionen, die keine schnelle Belastung erfahren (z. B. Flussdeiche) sind die Scherparameter des drainierten Zustands relevant (Zilch et al., 2013).

### 2.5.5 Gesättigte Durchlässigkeit

Die gesättigte Durchlässigkeit  $k_f$  (auch Permeabilität genannt) ist eine Kenngröße zur Abschätzung der Filtergeschwindigkeit von Boden  $v$ . Diese ist eine vereinfachte Modellvorstellung der Sickerströmung in porösen Medien und stellt ebenso wie die in der Grundwassermodellierung übliche Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$  eine Approximation (vgl. Abbildung 11) der komplexen, dreidimensionalen wahren Sickergeschwindigkeit  $v_w$  dar (Bear, 2007; Verruyt, 1982). Die Entwicklung der Filtergeschwindigkeit geht auf Henry Darcy zurück. Dieser hat in den 1850er Jahren die Sickerströmung  $Q$  durch einen Messquerschnitt der Fläche  $A$  untersucht. In seinen Untersuchungen hat er eine Proportionalität zwischen der Filtergeschwindigkeit  $v$  und dem hydraulischen Gradienten  $i$  feststellen können und die gesättigte Durchlässigkeit  $k_f$  als Proportionalitätskonstante eingeführt.

$$v = -\frac{Q}{A} \cdot i = -k_f \cdot i \quad (30)$$

Diese besitzt die Einheit Meter pro Sekunde und beschreibt, wie gut ein Fluid durch einen Boden hindurch zu sickern vermag.



**Abbildung 11:** Ebene Modellvorstellung zur (1) wahren Sickergeschwindigkeit  $v_w$ , (2) Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$  und (3) Filtergeschwindigkeit  $v$  in einem porösen Medium



## **2.5.6 Transformationsmodelle und ihre physikalischen Grundzüge**

### **2.5.7 Allgemeines**

Klassifikationsversuche werden im wasserbaulichen Kontext z. B. für die Erfassung der Bodenschichtung und die Erstellung eines Bodenmodells circa zehnfach häufiger durchgeführt als Laborversuche zur Bestimmung technischer Kenngrößen (E. Kunz, Persönliche Mitteilung, 31. Januar 2019). Um die umfassende Datengrundlage der Klassifikationsversuche auch einer technischen Nutzung zuzuführen, gibt es im Fachgebiet der Bodenmechanik seit den 1960er Jahren das Bestreben auch aus diesen gleichsam technische Kenngrößen abzuleiten (ISSMGE-TC304, 2021b). Dafür werden i. d. R. Transformationsmodelle eingesetzt, deren empirische Korrelationsterme einerseits auf physikalischen und andererseits auf statistischen Zusammenhängen sowie Erfahrungen basieren (Ameratunga et al., 2016).

Derartige Modelle finden in den Regelwerken der Bodenmechanik weltweit Verwendung (Zhou et al., 2019). Infolge der zugrundeliegenden Empirie sind Erfahrungen im Umgang mit Böden eine Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Korrelationsterme (Engel & Lauer, 2017). Nachfolgend werden Transformationsmodelle für die Porenzahl, die Bodenwichte, den inneren Reibungswinkel und die gesättigte Durchlässigkeit sowie ihren Grundgedanken vorgestellt. Für eine indirekte Bestimmung der Kohäsion ist im Zuge der Literaturrecherche keine auf der in 2.4 beschriebenen Datengrundlage basierendes Transformationsmodell gefunden worden, sodass die Scherfestigkeit ausschließlich über den inneren Reibungswinkel beschrieben wird. Aufgrund der geringeren Spannungszustände (vgl. Gl. (28)) spielt die Kohäsion bei niedrigen Flussdeichen eine relativ größere Rolle als bei hohen. Daher stellt ihre Vernachlässigung insbesondere für niedrige Flussdeiche eine Quelle zusätzlicher epistemischer Ungewissheit dar.

### **2.5.8 Transformationsmodell zur Porenzahl**

Der in einem Boden vorhandene Porenraum ist eine dreidimensionale, räumliche Größe, welcher von den Partikeln der festen Phase eingeschlossen

wird (Kolymbas, 2016; Zilch et al., 2013). Da Boden als Lockergestein aus unterschiedlich großen Partikeln eine bestehende Pore durch ein in räumlicher Nähe befindliches kleineres Partikel auffüllen kann, besteht eine Abhängigkeit vom effektiven Durchmesser der bodenbildenden Partikel. Es ist zu erwarten, dass der Porenraum von enggestuften Böden tendenziell größer als der Porenraum weitgestufter Böden ist. Im Falle eines Einkornmaterials mit ideal runden Körnern ergibt sich infolge der unterschiedlichen Packungsanordnungen:  $e_{\min}=0,35 \leq e \leq 0,92 = e_{\max}$ . Um den Porenraum bei dichtester sowie lockerster Lagerung von Böden beschreiben zu können, kann die Porenzahl  $e$  über den mittleren Durchmesser  $d_{50}$  sowie die Ungleichförmigkeit  $C_U$  abgeschätzt werden (Jänke, 2000).

$$e_{\min} \approx \frac{0.77 \cdot r_J^{1.05}}{C_U^{0.338 \cdot r^{0.127}} \cdot d_{50}^{0.0473 \cdot r^{0.72}}} \quad (31)$$

$$e_{\max} \approx 1.976 \cdot e_{\min} - \frac{0.332}{C_U} \quad (32)$$

Neben den geometrischen Größen berücksichtigt Jänke (2000) die Kornrauheit  $r_J$ , welche für gebrochenes, scharfkantiges Material den Wert 1,0 besitzt und für rundes, glattes Material entsprechend Jänkes Ausrieselversuchen abnimmt. Ist nun die bezogene Lagerungsdichte  $I_D$  eines Bodens bekannt (z. B. infolge einer Beprobung oder durch definierte Planungsrandbedingungen), kann anhand der empirisch geschätzten Grenzwerte der Porenzahl ( $e_{\min}$ ,  $e_{\max}$ ) die einem Boden zugehörige Porenzahl durch

$$e = e_{\max} - I_D \cdot (e_{\max} - e_{\min}) \quad (33)$$

bestimmt werden. Unter Verwendung von Gl. (17) kann die Porenzahl  $e$  in die Porosität  $n$  überführt werden. Einen Überblick zu weiteren Schätzmethoden zur Charakterisierung der Porosität  $n$  geben Fuchs et al. (2017).

### 2.5.9 Transformationsmodell zur Bodenwichte

Die Bodenwichte hängt im Wesentlichen von den Volumenanteilen der drei im Boden enthaltenen Phasen ab (vgl. 2.5). Entsprechend besitzt die Lagerungsdichte einen Einfluss auf die mittlere Dichte und somit auf die Bodenwichte.

Aus dem Verhältnis von der Korndichte  $\rho_s$  zur Trockendichte  $\rho_d$  ergibt sich:

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \rightarrow \rho_s = (e + 1) \cdot \rho_d \quad (34)$$

Somit folgt für die Bodenwichte:

$$\begin{aligned} \gamma &= \rho_s \cdot g = (e + 1) \cdot \rho_d \cdot g \\ \gamma &= (e + 1) \cdot (n \cdot (\rho_L - \rho_s) + \rho_s) \cdot g \end{aligned} \quad (35)$$

Wird der Porenanteil  $n$  über die Porenzahl  $e$  beschrieben (vgl. Gl. (17)) und die Dichte von Luft vernachlässigt folgt für trockene Böden:

$$\begin{aligned} \gamma &= (e + 1) \cdot \left( -\frac{e}{1 + e} \cdot \rho_s + \rho_s \right) \cdot g \\ \gamma &= \rho_s (e + 1) \cdot \left( 1 - \frac{e}{1 + e} \right) \cdot g \end{aligned} \quad (36)$$

### 2.5.10 Transformationsmodelle zum inneren Reibungswinkel

Bei der Formulierung von empirischen Korrelationstermen zwischen den Ergebnissen von Klassifikationsversuchen und den Scherparametern lässt sich zwischen Termen für nichtbindige und bindige Böden unterscheiden. Für beide Fälle existieren Korrelationsbeziehungen, die eine näherungsweise Bestimmung des effektiven Reibungswinkels für den drainierten Zustand erlauben.

Im Kontext der nichtbindigen Böden wird die Beschreibung des effektiven Reibungswinkels, je nach Autor, auf die Einflussgrößen Korngröße, Kornverteilung, Lagerungsdichte, Kornform sowie Kornrauheit zurückgeführt.

Mogami und Yoshikoshi (1968) beschreiben einen Zusammenhang zwischen dem Reibungswinkel  $\varphi$  und der Porenzahl  $e$ .

$$\sin \varphi \approx \frac{k}{1 + e} \quad (37)$$

Darin führen sie auf das Einzelkorn bezogene Einflüsse in dem Koeffizienten  $k$  zusammen. Nach Bourdeau lässt sich  $k$  anhand der Ungleichförmigkeit  $C_U$  zu

$$k \approx 1,4 - \log C_U \quad (38)$$

bestimmen (aus Engel, 2002). In Anlehnung an diese Formulierung schlägt Witt (2017) für natürliche Böden (Gl. (39)) und gebrochenes Material (Gl. (40)) angepasste Terme vor.

$$k \approx 1,5 - 0,475 \log C_U \quad (39)$$

$$k \approx 1,1 - 0,350 \log C_U \quad (40)$$

Moroto & Shimobe formulieren für  $k$  hingegen eine Fallunterscheidung (aus Engel, 2002). Für Böden mit einer unterschiedlichen Kornform und einer Ungleichförmigkeit von ungefähr zwei bestimmt sich  $k$  nach (Gl. (41)). Für Böden mit runden Körnern und unterschiedlicher Ungleichförmigkeit ist (Gl. (42)) anwendbar. In Gl. (42) stellt  $R_r$  ein Maß für die Kornrundheit dar und lässt sich anhand von  $R_r \approx 0,397 / (e_{\max}^2 \cdot \sqrt{C_U})$  abschätzen (Engel, 2002).

$$k \approx 1,29 e_{\min} + 0,314 \quad (41)$$

$$k \approx 0,26 e_{\min} + 0,544 R_r \quad (42)$$

Da bindige Böden anhand ihrer Konsistenz klassifiziert werden (vgl. 2.2), basieren deren Korrelationsterme auf den Wassergehalten (vgl. 2.5) und den von ihnen abhängigen Parametern. So lassen sich aus der Fließgrenze  $w_L$  und der Plastizitätszahl  $I_P$  die Breiwasserszahl  $w_0$  (vgl. Gl. (43)) und die Einheitswasserszahl  $w_1$  (vgl. Gl. (44)) abschätzen (Engel, 2002).

$$w_0 \approx 1,959 w_L^{0,822} I_P^{0,107} - 0,1378 \quad (43)$$

$$w_1 \approx 0,6699 w_L^{1,006} I_P^{-0,1584} - 0,0482 \quad (44)$$

Aus den Wasserzahlen lassen sich im Folgenden der Steifezahlbeiwert  $v_{nc}$  sowie der effektive Reibungswinkel bei Erstbelastung  $\varphi_{nc}$  bestimmen (Engel, 2002).

$$v_{nc} \approx \left(0,28 + \frac{w_1}{w_0^2}\right) \left(15 + 0,6 \frac{w_1^2}{w_0^4}\right) \quad (45)$$

$$\tan \varphi_{nc} \approx 0,075 + \frac{0,1 + \frac{w_1}{w_0^2}}{1 + 1,43 \frac{w_1}{w_0^2}} \quad (46)$$

Auf Grundlage von  $v_{nc}$  und  $\varphi_{nc}$  kann schließlich eine Abschätzung des effektiven Reibungswinkels  $\varphi$  erfolgen (Engel, 2002).

$$\tan \varphi \approx \tan \varphi_{nc} \left(1 - 0,35 \sqrt{\frac{1}{v_{nc}} - 0,03}\right) \quad (47)$$

In der Literatur findet sich eine Vielzahl weiterer Korrelationsbeziehungen zur Bestimmung des inneren Reibungswinkels. Eine Auswahl an Termen wird mit Tabelle 1 gegeben.

**Tabelle 1: Ausgewählte Transformationsmodelle des inneren Reibungswinkels**

Nr.	Autor	Term	Quelle
Modelle nichtbindiger Böden			
1	Chan (1948)	$\varphi + a \cdot \log e = \text{const} \approx 60$	
2	Engelund (1960)	$\varphi = 36 + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4$	Kézdi
3	Winterkorn (1960)	$\tan \varphi = \frac{c}{e - e_{min}}$	(1969)
4	Caquot & Kerisel (1967)	$\tan \varphi = \frac{0,55}{e}$	Caquot und Kérisel (1967)
5	Kézdi (1969)	$\tan \varphi = \frac{1,26\sqrt{e-0,2}}{\exp 2(e-0,2)}$	Kézdi (1969)
6	Teferra (1974)	$\frac{1}{\tan \varphi_f} \approx \left(2,105 + 0,097 \frac{d_{85}}{d_{15}}\right) e_a + 0,0845 - 0,398 \left(2,105 + 0,097 \frac{d_{85}}{d_{15}}\right)$	Teferra (1974)
7	Schultze (1975)	$\cot \varphi = 3,358 \cdot e + 0,005$	Schultze (1975)
8	Engel (2002)	$\cot \varphi = \cot \varphi_{min} - I_d(\cot \varphi_{min} - \cot \varphi_{max})$	Engel (2002)
Modelle bindiger Böden			
9	Schultze (1975)	$\varphi \approx 9,30 - 16,07 \log I_p$	Schultze (1975)
10	Kenney	$\sin \varphi = 0,81 - 0,233 \log I_p$	
11	Horn	$\varphi_f \approx 11,76 - 14,7 \log I_p \pm 3,37$	
12a	Witt (2017)	$\tan \varphi_{nc} = 0,05 + \frac{0,11}{w_L} - 0,043 \ln I_p$	Witt (2017)
12b	Witt (2017)	$\tan \varphi_{oc} = 0,103 + \frac{0,04764}{w_L} - 0,145 \ln I_p$	

### 2.5.11 Transformationsmodelle zur gesättigten Durchlässigkeit

Mit ihren Gesetzen zur laminaren Durchströmung horizontaler Rohrleitungen haben Hagen und Poiseuille die Grundlage für die empirische Beschreibung der gesättigten Durchlässigkeit geschaffen (aus Kolymbas, 2016). Sie haben die Strömungsgeschwindigkeit eines Fluids in der Rohrleitung auf deren Radius  $r$ , die Wichte  $\gamma$  sowie die Zähigkeit des Fluids  $\nu$  und den hydraulischen Gradienten  $i = \Delta p / \Delta s$  zurückführen können.

$$v = \frac{r^2 \Delta p}{4\nu \Delta s} = \frac{r^2 \gamma_w \Delta \left( \frac{p}{\gamma_w} \right)}{4\nu \Delta s} \quad (48)$$

Für die Transformationsmodelle wird aus  $(r^2 \gamma_w) / 4\nu$  der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  abgeleitet. Dabei muss der Term auf die unregelmäßigen, geometrischen Verhältnisse eines Porenkanals im Boden übertragen werden. Hierfür werden die geometrischen Größen und Konstanten erneut in einem Koeffizienten  $k$  zusammengefasst. Die im deutschsprachigen Raum geläufigsten Korrelationen von Hazen und Beyer führen die Geometrie eines Porenkanals auf den Durchmesser einer wirksamen Kornfraktion  $d_{eff}$  zurück (Fuchs et al., 2017).

$$k_f = k \cdot d_{eff}^2 \cdot \frac{\rho \cdot g}{\eta} \quad (49)$$

Bei der Formulierung der empirischen Korrelationen lassen sich für den Koeffizienten  $k$  zum einen Formulierungen finden, welche die Geometrie des Porenkanals auf einen oder mehrere wirksame Korndurchmesser zurückführen. Zum anderen existiert der Ansatz, eine solche Beschreibung auf Grundlage des Porenanteils bzw. der Porenzahl vorzunehmen. Gleichermäßen finden sich Mischformen beider Ansätze. Einen Überblick zu empirischen Korrelationen mit Bezug zur gesättigten Durchlässigkeit findet sich in Tabelle 2.

**Tabelle 2: Ausgewählte Transformationsmodelle der gesättigten Durchlässigkeit**

Nr.	Autor	Term	Quelle
Modelle auf Grundlage eines / mehrerer wirksamer Korndurchmesser			
1a	Hazen	$k_f \approx 100 \cdot (d_{10})^2$	Kolymbas (2016)
1b	Hazen	$k_f = 0,0116 \cdot (0,7 + 0,03 \cdot t) \cdot d_{10}^2$	Matthess und Ubell (1983)
1c	Hazen	$k_f = 0,0116 \cdot d_{10}^2$	Zilch et al. (2013)
2a	Beyer	$k_f = \left( \frac{268}{\frac{d_{60}+3,4}{d_{10}}} + 55 \right) \cdot d_{10}^2$	Engel (2002)
2b	Beyer	$k_f \approx \left( \frac{A}{A+B} + C \right) \cdot d_{10}^2$	Engel (2002)
2c	Beyer	$k_f \approx \left( \frac{A}{C_u+B} + C \right) \cdot d_{10}^2$	Engel und Lauer (2017)
3	Jáky	$k_f = 100 \cdot d_m^2$	Kézdi (1969)
4	Seelheim	$k_f = 0,00357 \cdot d_{50}^2$	Matthess und Ubell (1983)
Modelle auf Grundlage des Porenanteils / der Porenzahl			
5	Matthess und Ubell	$k_f = C \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2}$	Kolymbas (2016)
6	Kozeny-Carman	$k_f = \frac{1 \cdot \gamma_w \cdot e^3}{C_K - C \cdot S^2 \cdot \mu_w \cdot (1+w)}$	Ameratunga et al. (2016)
7	Taylor, Lambe und Whitman	$\log k_f = \log k_0 - \frac{e_0 - e}{C_k}$	Ameratunga et al. (2016)
Kombinierte und weitere Modelle			
8	Terzaghi	$k_f = 0,05 \cdot \frac{n^2}{1-n^2} \cdot d_{10}^2$	unbekannt
9	Terzaghi	$k_f = 200 \cdot d_w^2 \cdot e^2$	Kézdi (1969)
10	Chapuis	$k_f = 2,4622 \cdot \left[ d_{10}^2 \cdot \left( \frac{e^3}{1+e} \right) \right]^{0,7825}$	Ameratunga et al. (2016)
11	Zunker	$k_f = \frac{0,011}{\eta} \cdot \left( \frac{n}{1-n} \right)^2 \cdot d_{50}^2$	Matthess und Ubell (1983)



## 2.6 Stochastische Eigenschaften

### 2.6.1 Allgemeines

Allgemeingültige Informationen zu stochastischen Bodeneigenschaften sind in der internationalen Literatur insgesamt spärlich zu finden (Schwiersch et al., 2022). Dabei sind der Umgang und die Quantifizierung bodenmechanischer Ungewissheit seit der Begründung der modernen Bodenmechanik durch Karl Terzaghi im Fokus der geotechnischen Forschung. Seitdem werden immer wieder bodenmechanische Ungewissheiten identifiziert und in der Literatur formuliert. So beschreibt Kolymbas (2016) eine nach wie vor bestehende Wissenslücke um die physikalische Ursache der Kohäsion, welche zu den epistemischen Ungewissheiten zu zählen ist. Auch Schwiteilo und Herle (2017) identifizieren und quantifizieren die Ungewissheit bei der Durchführung von Ödometer- und Rahmenscherversuchen. In Ergänzung dazu widmen sich Löffman und Korkiala-Tanttu (2019) sowie Zhou et al. (2019) mit ihren Untersuchungen zu Kenngrößen von Tonen vor der finnischen Ostseeküste und in Shanghai der Erfassung von aleatorischen Ungewissheiten.

Eine größere Sammlung stochastischer Bodeneigenschaften wird in Baecher und Christian (2003) gegeben und durch Studien zu einzelnen Kenngrößen wie z. B. von Lacasse und Nadim (1996), Tan et al. (2006) oder Uzielli et al. (2006) ergänzt.

### 2.6.2 Ergebnisse der Literaturrecherche

Die über Jahrzehnte gewonnenen Erkenntnisse zu typischen Bodenkennwerten sind in kontinuierlich überarbeiteten Tabellenwerken und Handbüchern gleichermaßen der Wissenschaft und der Baupraxis zugänglich gemacht worden. Üblicherweise finden sich darin Angaben zu Erfahrungswerten und -intervallen (Albert, 2014; Arbeitsausschuss Ufereinfassungen et al., 2012; Vismann, 2018)). In wissenschaftlichen Veröffentlichungen finden sich seit der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts neben derartigen Informationen auch Hinweise stochastischer Art auf die Grundgesamtheit bodenmechanischer Parameter (Benson, 1993; CUR, 1990; Lacasse & Nadim, 1996; Lee

et al., 1983; Lumb, 1974; Phoon & Kulkhawy, 1999; Türke, 1999; Uzielli et al., 2006). Diese weitergehenden Informationen beinhalten neben Angaben zu empfohlenen Verteilungstypen außerdem Intervalle des Erwartungswerts sowie des Variationskoeffizienten. In Tabelle 3 findet sich eine auf die untersuchten Bodengruppen zugeschnittene Zusammenfassung. Die darin ausgewiesenen Erwartungswerte und Standardabweichungen basieren auf den Mittelwerten der jeweils berichteten Intervalle. Sofern mehrere Autoren oder Autorinnen Intervalle für gleiche Bodengruppen angegeben haben, wurden diese vereinigt.

**Tabelle 3: Mittlere stochastische Eigenschaften ausgewählter, bodenmechanischer Parameter; weiterführende Informationen inkl. Referenzen finden sich in Anhang 6**

Bodengruppe	Bodenwichte [kN/m <sup>3</sup> ]			Reibungswinkel [°]			Kohäsion [kN/m <sup>2</sup> ]			Porosität [-]			Wassergehalt [-]		
	Typ	E	σ	Typ	E	σ	Typ	E	σ	Typ	E	σ	Typ	E	σ
GE		17,2	1,7		36,4	3,6		0	0						
GW, GI		19,6	2		36,9	3,7		0	0		0,3	0,06			
GU, GT		20,8	2,1		38	3,8		3,5	1,1						
GU*, GT*		19,6	2		35,5	3,6		10	3					0,2	0,06
SE		17,2	1,7		35,3	3,5		0	0						
SW, SI		18,8	1,9		35,5	3,6		0	0						
SU, ST	Nor- mal	18,9	1,9	Nor- mal	34,5	3,5	Log- nor- mal	3	0,9		0,4	0,08	Gam- ma		
SU*, ST*		18,9	1,9		32	3,2		9,3	2,8					0,4	0,08
UL		18,8	1,9		30,1	9		5,6	1,7						
UM, UA		18,2	1,8		27,9	8,4		8,4	2,5						
TL		20,2	2		26,9	8,1		15,6	4,7		0,5	0,1			
TM		19,5	2		24,3	7,3		20	6					0,4	0,12
TA		18,4	1,8		21,6	6,5		23,1	6,9						

### 2.6.3 Ergebnisse aus der Transformation von Klassifikationsdaten

Für die nachfolgenden Ergebnisse sind ausgewählte Transformationsmodelle aus 2.5.6 in Verbindung mit der Annahme einer bezogenen Lagerungsdichte von  $I_D=0,5$  auf den in 2.4 vorgestellten Datensatz angewandt worden. Dafür war eine Annahme hinsichtlich der bezogenen Lagerungsdichte zu treffen, weil die Informationen zur natürlichen Lagerung eines Bodens bei der Gewinnung von Klassifikationsdaten verloren gehen. Somit liegt den im Weiteren vorgestellten Ergebnissen die deterministische Annahme von  $I_D=0,5$  zugrunde.

Die erzielten Ergebnisse (vgl. Tabelle 4) sind für ca. zwei Drittel der 13 untersuchten Bodengruppen als plausibel anzusehen. Infolge fehlender Transformationsmodelle für die Kohäsion, wird für die Scherfestigkeit ausschließlich der innere Reibungswinkel stochastisch beschrieben. Die verwendeten Lagemaßzahlen entsprechen für die Porenzahl, die Trocken- und Sättigungswichte und den inneren Reibungswinkel dem arithmetischen (vgl. Gl. (3)) und im Falle der gesättigten Durchlässigkeit dem geometrischen Mittel (vgl. Gl. (4)). Als Streuungsmaßzahl wurde der Variationskoeffizient nach Gl. (7) herangezogen.

Für die Porenzahl nichtbindiger Böden zeigt sich, dass deren Erwartungswert von eng zu weit gestuft abnimmt. Dabei zeigen sich für SE der größte ( $\mu_{SE}(e)=0,64$ ) und für  $SU^*$ ,  $ST^*$  der kleinste Wert ( $\mu_{SU^*,ST^*}(e)=0,31$ ). Dies erscheint vor dem Hintergrund der von Marsily (1993) benannten Grenz-porenzahlen idealer, glatter Sphären in Abhängigkeit möglicher Packungen (locker, dicht) plausibel, da eng gestufte Böden Einkornmaterialien am nächsten kommen. Die Plausibilität weit gestufter Böden stützt sich auf die in 2.4 beschriebenen hohen Feinkorngehalte bei z. B. GU, GT ( $\mu_{GU,GT}(e)=0,20$ ) und  $GU^*$ ,  $GT^*$  ( $\mu_{GU^*,GT^*}(e)=0,11$ ).

Bei kohäsiven Böden ist zu beobachten, dass die Porenzahl mit zunehmender Plastizität steigt. Dies entspricht der Vorstellung, dass ihr typisches plastisches Verhalten mit einem teilweise gesättigten Zustand zusammenhängt, bei welchem das Entweichen der im Porenraum enthaltenen Luft mit

abnehmendem Porenraum schwieriger wird. Zusätzlich fällt auf, dass der Variationskoeffizient der bindigen Böden im Durchschnitt größer ist als jener der nichtbindigen. Die beobachteten Variationskoeffizienten liegen im Bereich der unteren Grenze der Erfahrungswerte von 7 - 30 % (Uzielli et al., 2006) und 15 - 30 % (Lumb, 1974). Dies ist auf die alleinige Analyse nur einer relativen Lagerungsdichte von  $I_D=0,5$  zurückzuführen. Der Autor erwartet einen höheren Variationskoeffizienten, sollten die Ergebnisse um Analysen weiterer Lagerungsdichten ergänzt werden.

Die Bodenwichte wird wesentlich durch die Volumenanteile der Phasen geringerer Dichte (Luft, Wasser) bestimmt, schließlich besitzen bodenbildende Minerale deutlich größere Werte für die Korndichte und weisen zusätzlich eine vergleichsweise geringe Streuung auf (Kempfert & Raithel, 2007; Scheffer et al., 2010). Daher stellen Analysen zur Trocken- und Sättigungswichte untere und obere Grenzen bei konstanten Lagerungsbedingungen dar. Folglich finden sich die Trends zur Porenzahl gleichermaßen auch bei den nach Gl. (25) ermittelten Ergebnissen der Trocken- und Sättigungswichte.

Die beobachteten Erwartungswerte liegen überwiegend in den Erfahrungsintervallen nach Engel (2014) und die Variationskoeffizienten bestätigen die Beobachtungen von Lee et al. (1983), Lumb (1974) und Uzielli et al. (2006). Insgesamt können die Ergebnisse für die Untersuchung der Trocken- und Sättigungswichte daher als plausibel angesehen werden.

Der innere Reibungswinkel liegt für acht der 13 Bodengruppen mit seinem Erwartungswert innerhalb üblicher Erfahrungsintervalle (vgl. Engel, 2014). Aufgrund der Überlagerung der Eingangsverteilungen (Fraktionen  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  und  $d_{60}$  sowie der Porenzahl  $e$ ) weisen die Ergebnisse unterschiedliche Verteilungstypen (Normal-, Lognormal- und Weibullverteilungen sowie empirische Häufigkeitsverteilungen) auf. Die beobachteten Variationskoeffizienten zwischen 0,66 % und 17,7 % bestätigen die Erwartungen von 2 % bis 15 % für nichtbindige (ISSMGE-TC304, 2021a; Lee et al., 1983; Lumb, 1974; Uzielli et al., 2006) und 12 % bis 56 % für bindige Böden (ISSMGE-TC304, 2021a; Lee et al., 1983).

Die gesättigte Durchlässigkeit nimmt im Erwartungswert sowohl mit zunehmender Ungleichförmigkeit (nichtbindige Böden) als auch mit zunehmender Plastizität (bindige Böden) ab. Weiterhin bestätigen die Ergebnisse die übliche Verwendung von Lognormalverteilungen zur stochastischen Modellierung der Permeabilität. Bei den Variationskoeffizienten lassen sich weder Trends innerhalb der Bodenhauptgruppen finden noch bestätigen sie mit Werten zwischen 0,73 (SW, SI) und 12,5 (TM) die Angaben von Lumb (1974) und Lee et al. (1983) von  $\text{Var}K_{kf}=2,0\dots3,0$ .

Die Ergebnisse von SU, ST sowie der Tone zur gesättigten Durchlässigkeit zeigen keine Übereinstimmung mit den Erfahrungswerten. Dies ist insbesondere für Tone damit zu erklären, dass sie sich hinsichtlich ihrer Korngröße nicht von den Schluffen unterscheiden lassen, selbige jedoch eine wesentliche Eingangsvariable der Transformationsmodelle darstellt. Dies hat zur Folge, dass die Ergebnisse bindiger Böden mit einem hohen Maß an epistemischer Ungewissheit einhergehen.

In Summe rechtfertigen die Analyseergebnisse die in früheren Forschungsarbeiten, wie z. B. in Weißmann (2014), Möllmann (2009) und Zesch et al. (2007), getroffenen Annahmen zu stochastischen Bodeneigenschaften. Lediglich schätzen die Autoren den Erwartungswert des Reibungswinkels deutlich geringer ein als es die Analyseergebnisse nahelegen. Vor dem Hintergrund der noch spärlicheren Verfügbarkeit stochastischer Bodeninformationen zum Zeitpunkt vorgenannter Studien ist davon auszugehen, dass die Autoren für ihre Analysen gezielt ingenieurkonservative Annahmen getroffen haben. Dies hat zur Folge gehabt, dass sie die Versagenswahrscheinlichkeit tendenziell überschätzen (vgl. Kapitel 3) und sich somit rechnerische Stabilitätsreserven ergeben.

Die eingangs vorgestellte und für die Anwendung der Methodik notwendige Annahme einer bezogenen Lagerungsdichte ist ursächlich für die geringe Ergebnisstreuung und eine nicht quantifizierte epistemische Ungewissheit. In Anbetracht dessen erlaubt der ausgewertete Klassifikationsdatensatz lediglich eine Schätzung stabilitätsrelevanter Bodenkenngrößen unter Verwendung von Transformationsmodellen.

**Tabelle 4: Mit Transformationsmodellen bestimmte, stochastische Eigenschaften ausgewählter Bodenkenngrößen; VarK in [%]**

Übersicht zu stochastischen Bodeneigenschaften, VarK in [%], Verteilungstypen (Typ):															
Boden- gruppe	Porenzahl $e [-]$		Trockenwichte $\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]		Sättigungswichte $\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]		Reibungswinkel $\varphi$ [°]		Gesättigte Durchlässigkeit $k_f$ [m/s]						
	Typ	E	VarK	Typ	E	VarK	Typ	E	VarK	Typ	E	VarK			
GE	emp (N)	0,50	7,60	emp (N)	15,90	1,87	emp (N)	20,62	1,20	emp (N)	39,13	4,23	LN	8,08E-2	1,183
GW, GI	LN	0,25	2,93	LN	20,81	0,58	LN	22,77	0,33	LN	39,10	0,66	WB	2,66E-4	320
GU, GT	LN	0,19	2,96	LN	21,80	0,48	LN	23,38	0,28	N	39,96	3,55	WB	1,63E-5	882
GU*, GT*	emp (N)	0,11	10,20	emp (N)	23,40	1,03	emp (N)	24,38	0,61	WB	36,76	8,47	LN	7,73E-8	106
SE	LN	0,64	4,82	LN	15,90	1,87	LN	19,71	0,94	LN	35,13	2,11	WB	3,27E-4	153
SW, SI	emp (N)	0,42	1,18	emp (N)	18,36	0,35	emp (N)	21,24	0,19	WB	40,72	1,08	LN	3,61E-4	73
SU, ST	emp (N)	0,48	6,62	emp (N)	17,55	2,22	emp (N)	20,74	1,17	emp (N)	34,84	1,90	LN	8,33E-5	166
SU*, ST*	LN	0,31	4,96	LN	19,87	1,17	LN	22,188	0,65	LN	27,84	1,16	WB	1,69E-6	348
UL	emp (N)	9,49	8,61	emp (N)	17,46	3,05	emp (N)	20,68	1,60	LN	29,22	7,51	LN	3,74E-6	115
UM, UA	emp (N)	0,52	15,82	emp (N)	17,16	5,12	emp (N)	20,50	2,67	N	21,51	11,88	LN	4,44E-7	1,521
TL	LN	0,42	8,23	emp (N)	18,36	2,41	emp (N)	21,24	1,30	LN	26,02	5,32	LN	1,32E-6	635
TM	emp (N)	0,47	17,80	emp (N)	17,77	5,91	emp (N)	20,87	3,13	WB	20,24	5,72	LN	5,04E-7	1,275
TA	LN	0,58	16,88	emp (N)	16,48	6,09	LN	20,07	3,12	LN	16,16	17,7	LN	1,89E-7	1,240

### 2.6.4 Möglichkeiten zur Ergebnisvalidierung

Wenngleich die Ergebnisse als plausibel angesehen werden, so steht ihre Validierung noch aus. Für diese bedarf es eines geeigneten Datensatzes, welcher die Ergebnisse aus Feld- und Laborversuchen zu den jeweiligen Bodenkenngrößen umfasst und so den indirekten Weg über die Transformationsmodelle umgeht. Zur Gewinnung eines solchen Datensatzes müssten Probandaten in einem flächendeckenden Datensatz zusammengetragen werden und so viele Metainformationen zu den Bodenproben als möglich enthalten. Hierfür böten sich im ersten Schritt die Ergebnisse zu Probenahmen im Rahmen von öffentlichen Projekten an. Hindernis ist dabei, dass Bodenanalysen vielfach projektbasiert abgelegt sind und die Datenakquise so entweder mühsam und von Dritten abhängig ist oder den Zugang zu und die Kenntnis von behördlichen Ablagestrukturen voraussetzt. Weitere Möglichkeiten zur Validierung der stochastischen Bodeneigenschaften sind

- Intervallrechnungen auf Grundlage von Ingenieurtabellen, wie z. B. Albert (2014), Arbeitsausschuss Ufereinfassungen et al. (2012) oder DIN (2010),
- vergleichende Analysen mit Bodeninformationen, welche infolge des Geologiedatengesetzes (GeolDG, 2020) veröffentlicht wurden oder
- die Zusammenarbeit mit inhaltlich ähnlich ausgerichteten Forschungs- und Entwicklungsprojekten, wie z. B. dem in Kunz (2021) vorgestellten Projekt GeoValML (vgl. 5.2).



## 3 Das Versagen von Flussdeichen<sup>3</sup>

### 3.1 Einführung

Versagen beschreibt einen unerwünschten Systemzustand und kann im Allgemeinen sowohl strukturell als auch funktional definiert werden. Strukturelles Versagen liegt dann vor, wenn die Einwirkungen auf ein System  $S$  die Systemwiderstände  $R$  übersteigen (Plate, 1993). Visuelle Beispiele für einen strukturellen Versagenszustand sind das Auftreten von unzulässigen Verformungen oder Rissen. Diese Definition findet sich insbesondere in Literatur des konstruktiven Ingenieurbaus bzw. der Tragwerksplanung wie z. B. in Spaethe (1992) oder Schneider und Schlatter (1996). Funktionales Versagen liegt vor, sofern ein System seine Funktion nicht mehr erfüllt (Plate, 1993). Folglich ist die Definition der Deichfunktion für die Identifikation von Versagen relevant. Tabelle 5 fasst Beispiele von möglichen Deichfunktionen zusammen und verknüpft diese mit Bedingungen zur Funktionserfüllung. Von der Gerinnehydraulik und der hydraulisch abschirmenden Wirkung von Flussdeichen ausgehend lässt sich funktionales Deichversagen verbal z. B. als unplanmäßige Flutung von Schutzgebieten definieren (CIRIA, 2013).

---

<sup>3</sup> Teile des Kapitels wurden bereits in Schwiersch und Stamm (2022) veröffentlicht.

**Tabelle 5: Beispiele für Deichfunktionen und ihre Bedingungen der Funktionserfüllung; abweichende Abflussverhältnisse im Hinterland  $Q_{HL}$  oder abweichende Versagenswahrscheinlichkeiten  $P_f$  entsprechen funktionalem Versagen**

Nr.	Funktionsbeschreibung	Funktionserfüllung
1	Verhindern einer Überflutung	$Q_{HL} = 0$
2	Verhindern einer Überflutung bis BHQ	$Q_{HL} = 0$ , wenn $Q \leq BHQ$ $Q_{HL} = Q_1$ , wenn $Q > BHQ$ mit $Q_1 \leq Q$
3	Verhindern einer Überflutung für BHQ	$Q_{HL} = 0$ , wenn $Q \leq BHQ$ $Q_{HL} = \Delta Q = Q - BHQ$ , wenn $Q > BHQ$
4	Minderung des HWR auf einen Risikobemessungswert	$P_f(t) \cong P_{f,erf}(t)$

Einflussgrößen auf das Flussdeichversagen sind gleichermaßen innere wie äußere Lasten (z. B. Eigengewicht, innerer und äußerer Wasserdruck, Strömungskräfte bei Durchsickerung, Schubspannungen bei Überströmen), Bodeneigenschaften und ihre zeitliche Veränderlichkeit sowie anthropogene und biologische Aktivitäten wie z. B. von Wühltieren oder Vegetation (CIRIA, 2013). In Verbindung mit Hochwasserereignissen der jüngeren Vergangenheit traten in Deutschland 2002 und 2013 Versagensfälle an Flussdeichen auf. Zuletzt waren die Einzugsgebiete der Oder, der Elbe und der Donau besonders betroffen (Horlacher & Carstensen, 2007; LfULG, 2015). Wie schwierig sich die Prognose von Flussdeichversagen gestaltet, zeigt ein in der Saalemündung bei Breitenhagen 2013 aufgetretener Deichbruch beispielhaft, bei welchem der örtliche Deichquerschnitt vorab als stabil eingeschätzt war (Drews, 2017; GGU, 2013; Kool et al., 2019; Kool et al., 2020). International sind Deichbruchdaten im Zeitraum von 2016 bis 2022 im Rahmen des SAFELevee Projekts (TU Delft, 2016) in der International Levee Performance Database (ILPD) zusammengeführt worden. Die darin gesammelten Informationen zu Versagensfällen erlauben unter anderem Analysen zur Versagenhäufigkeit und den Vergleich von Charakteristiken einzelner Versagensfälle (Özer et al., 2020).

## 3.2 Versagensmechanismen

Versagen ist die Folge eines als Versagensmechanismus bezeichneten Prozesses. Dieser zeitabhängige Prozess wirkt sich auf eine Deichkomponente aus und hat in der Regel eine Minderung ihrer strukturellen Eigenschaften zur Folge. Dieser kann zu einer Degradation und Beschädigung einer oder mehrerer physikalischer Deichkomponenten führen (CIRIA, 2013). Versagensmechanismen lassen sich im Allgemeinen in hydraulische, geohydraulische und geostatische Mechanismen unterteilen (Bachmann, 2012).

- Hydraulische Versagensmechanismen gehen mit einer Wasserbewegung über das Deichbauwerk einher. Während im Küstenbereich der Übertritt von Wellen (Wellenüberlauf, engl.: Overtopping) von Relevanz ist (Kortenhaus, 2003), ist es im Binnenbereich zumeist das Überströmen (engl.: Overflow, Lendering et al., 2018). Hydraulische Versagensmechanismen treten vielfach durch das Unterschätzen der hydrologischen Bemessungsgrundlagen (Abfluss, Wasserstand) auf (Horlacher & Carstensen, 2007; Pohl, 2017; Stamm & Graw, 2021).
- Ursächlich für geohydraulische Versagensmechanismen ist der Materialaustrag aus dem Deichquerschnitt oder Untergrund in Richtung der Sickerströmung. Dies kann zum einen innerhalb des Deichquerschnitts durch Suffosion eingeleitet werden und zur Röhrenbildung (Piping, innere Erosion) führen oder andererseits im Untergrund in Form von hydraulischem Grundbruch auftreten. Bei letzterem wird eine gering durchlässige Deckschicht (z. B. aus Auelehm) durch einen gespannten Grundwasserleiter aufgebrochen und es kommt landseitig zur Qualmwasserbildung. Der daraus resultierende Materialaustrag führt schließlich zur Reduktion der Widerstandsfähigkeit und so letztlich zum Versagen.
- Unter geostatischen Versagensmechanismen sind Gleitkörperbewegungen zu verstehen. Dabei können sich diese auf den Deichquerschnitt selbst beschränken (Mikrostabilität) oder den Untergrund einschließen (Makrostabilität). Beispiele für Mikrostabilität sind der Böschungsbruch oberhalb des Deichlagers und das translatorische

Gleiten infolge des horizontalen Wasserdrucks (CIRIA, 2013). Der Böschungsbruch mit Kolkbildung und Setzungen (CIRIA, 2013) sind der Makrostabilität zuzuordnen. Im Zuge geostatischer Mechanismen tritt erst dann Wasser in das Schutzgebiet über, wenn so viel Material umgelagert wurde, dass ein Fließquerschnitt freigegeben ist.

Darüber hinaus stellen das Versagen an Bauwerken im Deich und die manuelle Schlitzung Sonderfälle dar. Einen Überblick zu Versagensmechanismen geben Kortenhaus (2003), Bachmann (2012), CIRIA (2013) und Expertise Network for Flood Protection (2017). Im Rahmen dieser Arbeit wird sich auf geostatische Versagensmechanismen im Sinne von Böschungsbruch (Mikrostabilität) und Böschungsbruch mit Kolkbildung (Makrostabilität) beschränkt, weil ihnen ein bodenmechanischer Prozess zugrunde liegt. Daher eignen sie sich, um das methodische Vorgehen für Eingangsparameter der Widerstandsseite zu zeigen.

Die Berechnung der Böschungsstabilität erfolgt über den Vergleich der Einwirkungen  $S$  und des Widerstands  $R$  eines Gleitkörpers entlang einer Gleitfläche. Für gestreckte Gleitflächen kann dies nach dem vereinfachten Verfahren von Janbu (Lang et al., 2011) erfolgen. Für häufig verwendete, kreiszylindrische Gleitflächen existieren zum einen lamellenbasierte Verfahren wie z. B. nach Bishop (vgl. DIN, 2021) und nach Krey (vgl. Türke, 1999) und lamellenfreie Verfahren wie z. B. nach Fellenius (vgl. Lang et al., 2011).

Das lamellenbasierte Verfahren nach Bishop entspricht in Deutschland dem Stand der Technik (DIN, 2021). Dabei handelt es sich um ein iteratives Verfahren, für welches die Stabilität mit einem Anfangswert zu schätzen ist. Das Verfahren nach Krey ist hingegen nicht iterativ, legt der Systemanalyse jedoch die gleiche kreiszylindrische Gleitfläche zugrunde und beurteilt den kritischen Zustand ( $S=R$ ) gleichwertig (Türke 1999). Daher besitzt es gegenüber dem Verfahren nach Bishop bei der Implementierung in numerischen, probabilistischen Analysen Vorteile in Hinblick auf die benötigte Rechenzeit, sodass es im Rahmen dieser Arbeit Anwendung findet.

Die Einwirkungen  $S$  und die Widerstände  $R$  bestimmen sich nach Krey für einen Flussdeich ohne veränderliche Einwirkungen (wie z. B. Verkehrslasten oder Lasten aus Maßnahmen des operativen Hochwasserschutzes) als

Momente nach Gl. (50) und Gl. (51). Darin sind  $T_i$  die Tangentialkraft und  $G_i$  die Gewichtskraft einer Lamelle der Breite  $b_i$  in der mit dem Winkel  $\alpha$  geneigten Gleitfläche. Mit  $\varphi$  wird der Reibungswinkel und mit  $c$  die Kohäsion des Bodens benannt. Den Hebelarm definiert der Radius  $r$ .

$$S = \sum_{i=1}^n G_i \cdot r \cdot \sin \alpha_i \quad (50)$$

$$R = \sum_{i=1}^n T_i \cdot r = \sum_{i=1}^n \left( \frac{G_i \cdot \tan \varphi + c \cdot b_i}{\sin \alpha_i \cdot \tan \varphi + \cos \alpha_i} \right) \cdot r \quad (51)$$

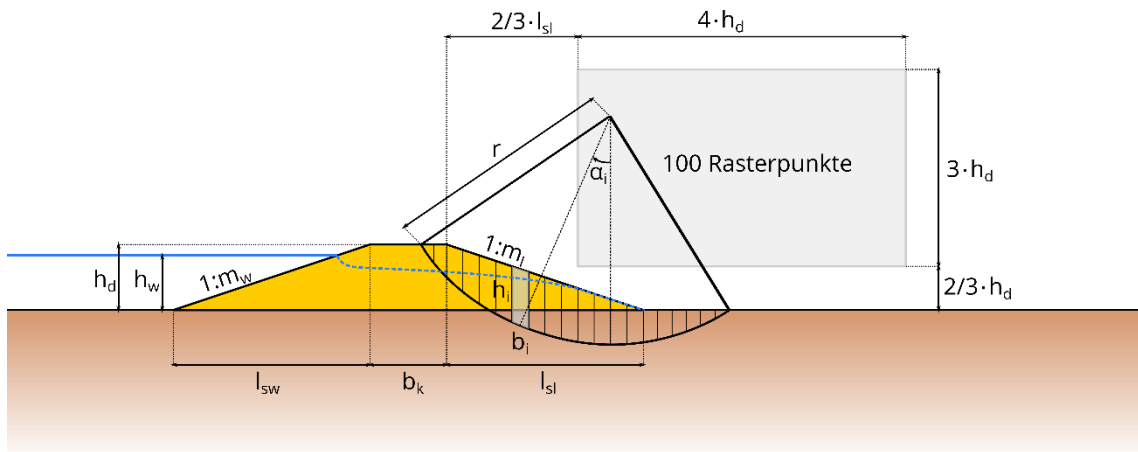
Die Gewichtskraft  $G_i$  berechnet sich aus der Gravitationskonstanten  $g$ , der Querschnittsfläche einer Lamelle  $A_i$ , der Feuchtwichte eines jeden Bodens  $\rho_{m,j}$  sowie dessen prozentualem Anteil an der Querschnittsfläche  $p_{M,i,j}$

$$G_i = g \cdot A_i \cdot \sum_{j=1}^m \rho_{f,j} \cdot \frac{p_{M,i,j}}{100} \quad (52)$$

Die Feuchtwichte  $\rho_m$  bestimmt sich wiederum aus der Korndichte  $\rho_K$ , dem Porenanteil  $n$  und dem Wassergehalt  $w$ .

$$\rho_m = (1 - n) \cdot \rho_K \cdot (1 + w) \quad (53)$$

In Abbildung 12 findet sich eine schematische Darstellung eines homogenen Flussdeichquerschnitts auf einem bindigen Untergrund und dessen Parametrisierung für die in dieser Arbeit verwendete, automatisierte Stabilitätsanalyse nach Krey unter Verwendung numerischer Verfahren. Die darin skizzierte Sickerlinie berücksichtigt die von Kozeny und Casagrande vorgeschlagene Näherung der geohydraulischen Verhältnisse unter Verwendung einer quadratischen Parabel (vgl. Erb, 1965 und Bachmann 2011). Für homogene Deiche und stationäre Verhältnisse ist der Verlauf der Parabel durch die



**Abbildung 12: Parametrisierung eines homogenen Deichquerschnitts auf bindigem Untergrund für die automatisierte Stabilitätsanalyse**

äußere Kubatur des Deiches bestimmt. Diese Näherung reduziert den Aufwand einer geohydraulischen auf den einer geometrischen Analyse. Dieses Vorgehen ist von Pavlowsky und Dachler (aus Davidenkoff (1957)) mittels empirischer Äquivalenzbreiten für eine vereinfachte Analyse zonierter Querschnitte erweitert worden.

Zur Beurteilung der Stabilität stehen im Allgemeinen vier Konzepte zur Verfügung, welche die Einwirkungen und Widerstände auf unterschiedliche Weise vergleichen. Einen Überblick zu Stabilitätskonzepten gibt Tabelle 6. Während mit dem globalen Sicherheitsfaktor und dem Ausnutzungsgrad nach Teilsicherheitskonzept ein Verhältnis aus Einwirkung und Widerstand für die Stabilitätsaussage maßgebend ist, ist es bei der Zuverlässigkeit eine Differenz. Die Versagenswahrscheinlichkeit bestimmt sich über die probabilistische Auswertung der Zuverlässigkeit unter Verwendung von Zufallsvariablen. Schließlich ergibt sich die hier verwendete Grenzzustandsgleichung für den landseitigen Böschungsbruch nach Krey entsprechend Gl. (54).

**Tabelle 6: Konzepte zur Beurteilung der Stabilität**

Konzept	Vergleich	Stabilitätsnachweis
Globaler Sicherheitsfaktor	$\eta = \frac{R}{S}$	$\eta \geq \eta_{\min}$
Ausnutzungsgrad / Teilsicherheit	$\mu = \frac{S}{R}$	$\mu \leq 1,0$
Zuverlässigkeit	$z = R - S$	$z \geq 0$
Versagenswahrscheinlich- keit (vgl. 3.3)	$P_f = \int_{-\infty}^0 f_z(z) dz$	$P_f \leq P_{f,\min}$

### 3.3 Versagenswahrscheinlichkeit

Die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  bezeichnet die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Versagens. Sie errechnet sich anhand der Gl. (54) und Gl. (55) als die Wahrscheinlichkeit einer negativen Zuverlässigkeit. Damit ist sie gleich der Unterschreitungswahrscheinlichkeit  $P_u$  von  $z=0$  und somit der Eintrittswahrscheinlichkeit des negativen Wertebereichs für  $z$ . Sie lässt sich durch Integration der Dichtefunktion  $f(z)$  nach (55) berechnen.

$$z = \sum_{i=1}^n \left( \frac{G_i \cdot \tan \varphi + c \cdot b}{\sin \alpha_i \cdot \tan \varphi + \cos \alpha_i} \right) \cdot r - \sum_{i=1}^n G_i \cdot r \cdot \sin \alpha_i \quad (54)$$

$$P_f = P_u(z = 0) = P(z < 0) = \int_{-\infty}^0 f_z(z) dz \quad (55)$$

Aufgrund der zum Teil nicht normalverteilten Eingangsvariablen (vgl. 2.6) und der vielfach nichtlinearen Grenzzustandsgleichungen (vgl. z. B. Gl. (54)) ergibt sich für  $f(z)$  zumeist eine komplexe Dichtefunktion, deren Integration nicht trivial möglich ist. Um  $P_f$  dennoch abzuschätzen, stehen gleichermaßen analytische (z. B. FOSM, FORM, SORM) und numerische Verfahren wie die Monte-Carlo-Simulation (MCS) zur Verfügung. Einen Überblick zu analytischen Approximationsverfahren geben Schneider und Schlatter (1996), Baecher und

Christian (2003) und Ang und Tang (2006). Während Baecher und Christian (2003) und DWA (2022) eine Einführung zur MCS geben, finden sich in Möllmann (2009) und Huber (2011) zusätzlich Optimierungsansätze. Die in dieser Arbeit verwendete Implementierung der MCS ist Gegenstand der Open-Source-Software PROMAIDES (Bachmann, 2021). Im Zuge der MCS wird  $P_f$  durch das  $n_{sim}$ -fache Wiederholen der Stabilitätsanalyse unter verteilungskonform variabler Eingangsgrößen angenähert. Dabei wird die Anzahl der zu Versagen führenden Parameterkombinationen in der Zählvariablen  $n_f$  erfasst. Die angenäherte Versagenswahrscheinlichkeit  $P_{f,MCS}$  ergibt sich so nach Gl. (56) und Gl. (57).

$$\lim_{n_{sim} \rightarrow \infty} P_{f,MCS} = P_f = \frac{n_f}{n_{sim}} \quad (56)$$

$$\lim_{n_{sim} \rightarrow n_p} P_{f,MCS} \approx P_f = \frac{n_f}{n_p} \quad (57)$$

Je größer  $n_p$  ist, desto genauer ist die Näherung von  $P_f$ . Allerdings geht eine Erhöhung von  $n_p$  mit einer längeren Berechnungszeit einher, sodass es gängige Praxis ist  $n_p$  um eine Größenordnung größer zu wählen als die Versagenswahrscheinlichkeit erwartet wird. So lässt sich die tatsächlich durchzuführende Anzahl an Simulationen anhand von  $n_p = 10/P_f$  abschätzen. Die Standardabweichung des Approximationsergebnisses lässt sich mit Hilfe von Gl. (58) überschlagen (DWA, 2022).

$$\sigma_{P_f} \approx P_f \cdot \sqrt{\frac{1 - P_f}{n \cdot P_f}} \quad \text{mit } n = n_p \quad (58)$$

Für eine erwartete Versagenswahrscheinlichkeit der Größenordnung  $P_f \approx 1 \cdot 10^{-3}$  sind demzufolge  $n_p \geq 1 \cdot 10^4$  Simulationen durchzuführen und das Ergebnis besäße eine Standardabweichung von  $\sigma_{P_f} \leq 3,16 \cdot 10^{-4}$ .

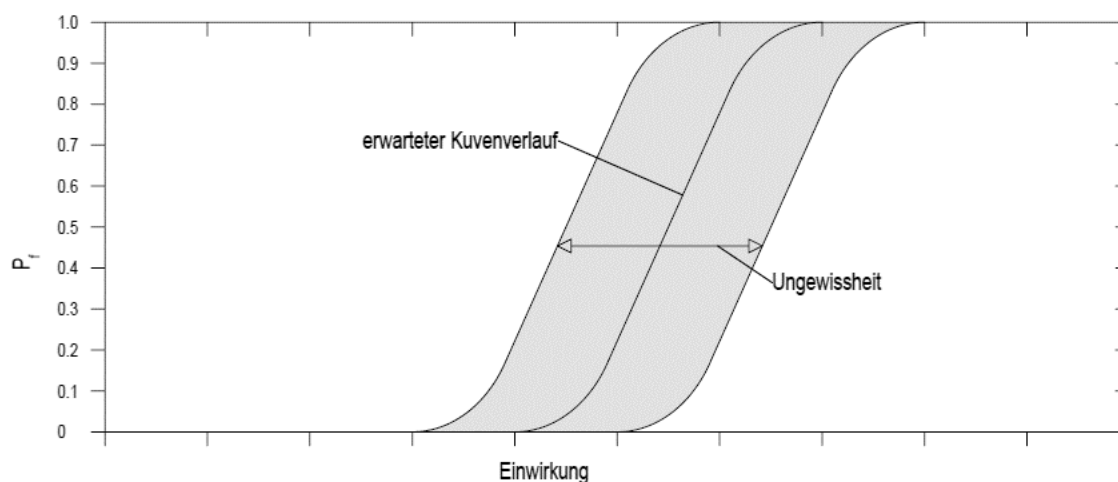
Weiterhin besteht die Möglichkeit, Versagenswahrscheinlichkeiten über statistische Analysen beobachteter Versagensfälle (Frequenzanalysen) sowie über Expertenschätzungen zu bestimmen. Für erstgenannte Methode ist eine ausreichende internationale Datengrundlage Voraussetzung wie sie



z. B. durch die ILPD (Özer et al., 2020) bereitgestellt wird. Da Frequenzanalysen im Kontext von Flussdeichen bislang unüblich sind, wird an dieser Stelle auf die in Proske (2021) behandelte allgemeine Einsturzhäufigkeit von Bauwerken verwiesen.

Voraussetzung für die Bestimmung von  $P_f$  ist die Kenntnis der Verteilungen aller Eingangsvariablen. Dies schließt sowohl Verteilungen zur Einwirkung als auch zum Widerstand ein. Jedoch fällt die statistische Analyse beider Größen vielfach in die Zuständigkeit unterschiedlicher Ressorts. Während die Einwirkungen häufig durch das Fachgebiet der Hydrologie in Form von Wasserständen und Abflüssen überwacht werden, findet eine Beurteilung der Bodeneigenschaften i. d. R. durch bodenmechanische bzw. geotechnische Labore, z. B. mittels Laborversuchen oder Rückrechnungen, statt. Für den Fall der einseitigen Kenntnis von Verteilungen (ausschließlich zur Einwirkung oder zum Widerstand) haben sich in der wissenschaftlichen Praxis ingenieurmäßige Herangehensweisen etabliert, welche zumindest relative Schlüsse (größer / kleiner) auf den Versagenszustand erlauben.

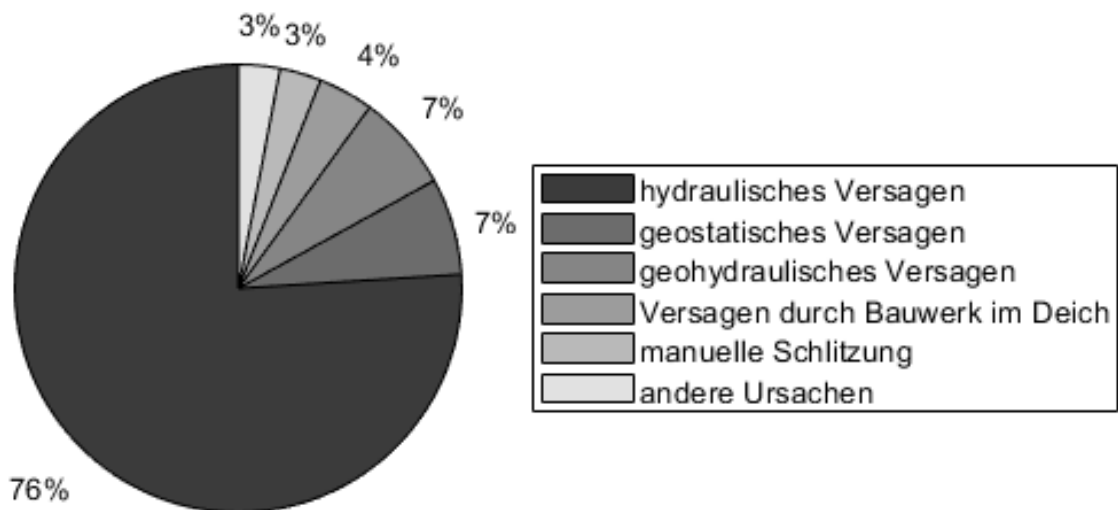
Bei fehlender stochastischer Grundlage der Einwirkungen kann eine einseitig-probabilistische Einschätzung des (Deich-)Widerstands durch Fragility-Curves (FRC) vorgenommen werden (Bachmann et al., 2007; Bachmann et al., 2013; Lendering et al., 2018; López Acosta et al., 2019). Hierbei wird die Belastung als diskrete, deterministische Größe berücksichtigt. Durch eine Raster-Analyse werden die mit Änderungen der Einwirkung einhergehenden Änderungen der Versagenswahrscheinlichkeit ersichtlich. Die Eintrittswahrscheinlichkeit der diskreten Einwirkungen können so auch nachträglich in eine Analyse einfließen. Bei den mittels FRC errechneten Versagenswahrscheinlichkeiten handelt es sich um bedingte Wahrscheinlichkeiten. Eine schematische Darstellung einer FRC wird mit Abbildung 13 gegeben.



**Abbildung 13: Schematische Darstellung einer Fragility-Curve (verändert nach Flikweert & Simm, 2008)**

Die in dieser Arbeit vorgestellten Analysen sind das Ergebnis einseitig probabilistischer Analysen. Wenngleich die Widerstände mittels Zufallsvariablen stochastisch berücksichtigt werden, so wird die hydraulische Belastung als konstant angenommen. Ein derartiges Vorgehen veranschaulicht wie sich die entwickelte Methodik mit dem etablierten Konzept der Bemessungshochwasser  $BHQ_1$ ,  $BHQ_2$  und  $BHQ_3$  vereinbaren lässt. An diese Arbeit anknüpfende Forschungsarbeiten streben eine Erweiterung um instationäre, probabilistische Einwirkungen (Öttl, 2022) und die Verknüpfung mit der Quantifizierung von Hochwasserkonsequenzen an. Dazu zählen u. a. die ökonomischen Schäden, die Anzahl betroffener oder gefährdeter Personen oder die Disruption von kritischen Infrastrukturen (Bachmann, Kosh Bin Ghomash & Schotten, 2021; Schotten, 2022), an.

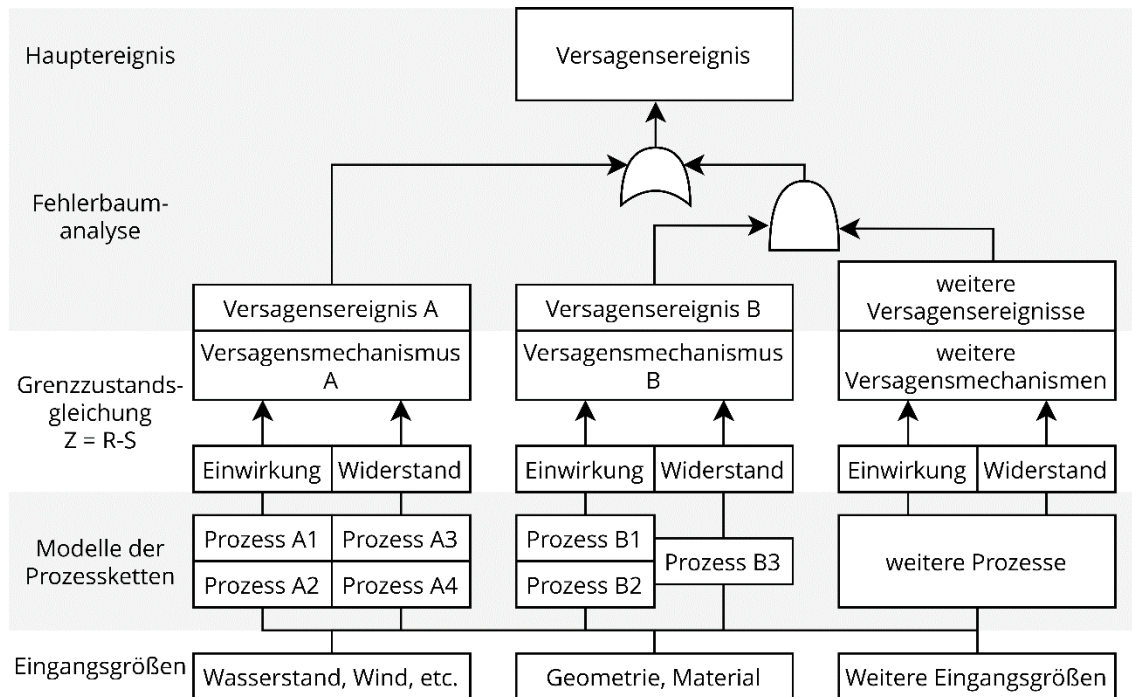
Während sich die Analysen zu den Steuerungsgrößen des HWR in dieser Arbeit auf die Mikro- und Makrostabilität der landseitigen (Fluss-)Deichböschung beschränken, versagen Flussdeiche auch infolge weiterer Versagensmechanismen. So stellt geostatisches Versagen in Untersuchungen von Heyer (2011) nach hydraulischem Versagen den zweithäufigsten Versagensmechanismus dar (vgl. Abbildung 14).



**Abbildung 14: Deichbrüche nach Hauptursache, verändert nach Heyer (2011)**

Um die Gesamtheit an denkbaren Versagensmechanismen in die Beurteilung der Versagenswahrscheinlichkeit einzuschließen, können ereignisbezogene Fehlerbäume oder Ereignisablaufdiagramme entwickelt werden. Die Erstellung eines Fehlerbaumes ist eine deduktive Methode (Weißmann, 2014), mit deren Hilfe die Abfolge einzelner Teilprozesse bis hin zum Gesamtversagen eines (Fluss-)Deiches beschrieben werden kann. Eine verfahrenseigene Annahme ist die Unabhängigkeit der einzelnen Versagensmechanismen. Deren Verknüpfung erfolgt durch Knoten, welche die logischen Operatoren der Booleschen Algebra darstellen. Beginnend bei den Wurzeln des Fehlerbaumes werden die Knoten nacheinander berechnet. Die Versagenswahrscheinlichkeit, die sich an einem Knoten berechnet, wird zusammen mit anderen Knoten bzw. Versagenswahrscheinlichkeiten als Eingangswahrscheinlichkeit für den Knoten des nächsten Teilprozesses verwendet bis schließlich die Wahrscheinlichkeit des sogenannten Top-Ereignisses, wie z. B. „Flutung des Schutzgebiets“, berechnet werden kann (Kortenhaus, 2003). Eine umfassende Erläuterung der Rechenregeln an Knotenpunkten findet sich in Weißmann (2014).

Letztlich können Fehlerbäume eine Vielzahl an Ereignisfolgen darstellen, die alle zum gleichen unerwünschten Ereignis führen. Dieses Prinzip erfordert, dass Fehlerbäume vom Top-Ereignis ausgehend in Richtung der Initialereignisse und damit schrittweise von einer Wirkung zu den unmittelbar vorgeschalteten Ursachen entwickelt werden (DWA, 2022). Eine schematische Darstellung eines ganzheitlichen Modells zur Beschreibung der Versagenswahrscheinlichkeit gibt Abbildung 15.



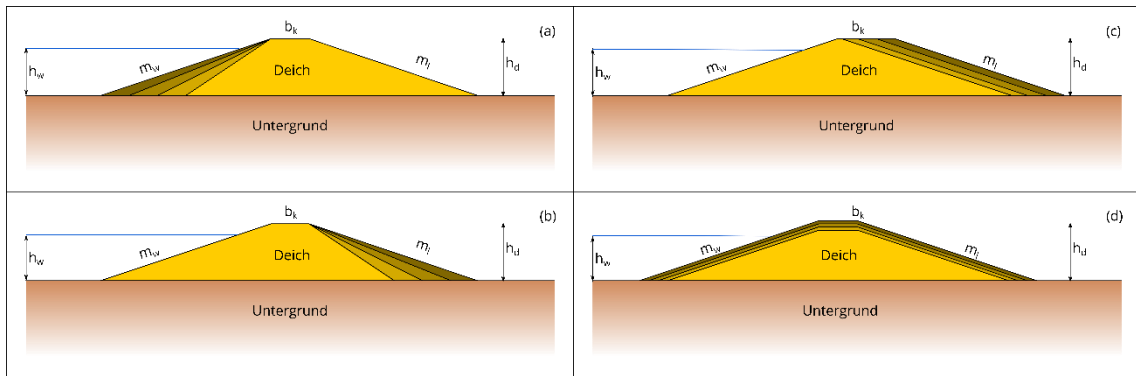
**Abbildung 15: Modellhafte Beschreibung eines Versagensereignisses (verändert nach Bachmann, 2012)**

### 3.4 Steuerung der Versagenswahrscheinlichkeit

Grundsätzlich kann die Steuerung der Versagenswahrscheinlichkeit über die Eingangsgrößen der Zuverlässigkeit erfolgen. Während die Einflussnahme auf Kenngrößen der Einwirkungen eine Veränderung des hydraulischen Systems bedarf, erscheinen Kenngrößen des Widerstands (z. B. Geometrie, Materialauswahl) vergleichsweise leicht veränderlich. Zwar existieren bereits allgemeine Erfahrungen zum Einfluss geometrischer oder materialtechnischer Eingangsvariablen auf die Flussdeichstabilität, jedoch sind diese entweder deterministischer (Davidenkoff, 1957; Haselsteiner, 2007; Möllmann, 2009; Weißmann, 2014) oder qualitativer Natur (DIN, 2013; DWA, 2011). Die probabilistische Einschätzung von z. B. der Böschungstabilität erfolgt i.d.R. für definierte Flussdeichquerschnitte mit stochastischen Materialeigenschaften. Werden entweder die geometrischen oder die materialtechnischen Eingangsvariablen verändert, führt dies auch zu einer Änderung der Stabilitätseinschätzung. Diese Veränderlichkeit kann gleichermaßen eine Folge der epistemischen Ungewissheiten oder der gezielteren Beeinflussung von Eingangsvariablen im Rahmen einer Variantenuntersuchung sein.

Zur Quantifizierung der Veränderlichkeit werden für einen an den deutschen Mindestanforderungen orientierten, homogenen Referenzdeich (vgl. Abbildung 12) der Höhe  $h_d=4,5$  m, der Kronenbreite  $b_k=3,5$  m und sowohl wasser- als auch landseitig der Böschungsneigung  $m_w=m_l=3$  Stabilitätsanalysen durchgeführt. Der Referenzdeich besitzt somit eine Querschnittsfläche von  $A=76,5$  m<sup>2</sup> und weist bei einem deterministischen Wasserstand von  $h_w=4,0$  m den Mindestfreibord  $f_{\min}=0,5$  m auf.

Die Stabilitätsanalysen berücksichtigen eine geometrische Veränderlichkeit (vgl. Abbildung 16) durch die alleinige Änderung einer der vier geometrischen Eingangsvariablen ( $h_d$ ,  $b_k$ ,  $m_w$ ,  $m_l$ ). Die Integration der materialtechnischen Veränderlichkeit erfolgt über die stochastischen Größen: Erwartungswert  $E$  und Variationskoeffizient  $VarK$ , jeweils für den inneren Reibungswinkel  $\varphi$ , die Kohäsion  $c$  und die Porosität  $n$ . Ausgehend vom



**Abbildung 16: Modifizierungen des Referenzsystems zur Einflussanalyse geometrischer Randbedingungen auf den Grenzzustand; Einflüsse: (a) wasserseitige Böschung  $m_w$ , (b) luftseitige Böschung  $m_l$ , (c) Kronenbreite  $b_k$  und (d) Deichhöhe  $h_D$**

Referenzsystem (Tabelle 7) werden zur Berücksichtigung der materialtechnischen Veränderlichkeit entweder  $E$  oder  $VarK$  für die vorgenannten bodenmechanischen Variablen verändert. Dabei orientieren sich die Änderungen an den in der Literatur berichteten Erfahrungsintervallen (vgl. Tabelle 3) und den Empfehlungen nach Bachmann et al. (2011). Die Korndichte und die Vorsättigung werden infolge einer allgemein geringen Variabilität (Korndichte, vgl. Kapitel 2) oder spärlichen Literaturempfehlungen (z. B. für die Vorsättigung) mit unveränderlichen, stochastischen Eigenschaften in die Analyse einbezogen.

Für die Evaluation der Analyseergebnisse werden die modifizierten Variablen  $X_i'=(A, E, VarK)$  über ihre Ausprägung im Referenzzustand  $X_i$  nach Gl. (59) normiert, sodass sich die Untersuchungsintervalle der materialtechnischen Analyse zu  $[0,7 \cdot E_{rel} < E_{rel} < 1,3 \cdot E_{rel}]$  und  $[0,3 \cdot VarK_{rel} < VarK_{rel} < 5 \cdot VarK_{rel}]$  definieren lassen (vgl. Tabelle 8).

$$X_{i,rel} = \frac{X_i}{X_i'} \text{ mit } X_i = (A, E, VarK) \quad (59)$$

Auf diese Weise ergibt sich die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  als Funktion von  $X_{i,rel}$ .

$$P_f = f(X_{i,rel}) \quad (60)$$

**Tabelle 7: Materialtechnische Zufallsvariablen für den Referenzzustand, basierend auf: Tabelle 3 und Empfehlungen von Bachmann et al. (2011), in Klammern: stochastisch unveränderliche Variablen**

Boden- gruppe	Variable	Einheit	Verteilungs- typ	E	VarK
SU, ST	$\varphi$	°	Normal	34,5	10 %
	c	kN/m <sup>2</sup>	Lognormal	3,0	30 %
	n	-	Normal	0,4	20 %
	$(\rho_g)$	(kg/m <sup>3</sup> )	(Normal)	(2.650)	(10 %)
	(w)	(-)	(Exponen- tial)	(0,075)	(30 %)
TL	$\varphi$	°	Normal	26,9	30 %
	c	kN/m <sup>2</sup>	Lognormal	15,6	30 %
	n	-	Normal	0,33	8 %
	$(\rho_g)$	(kg/m <sup>3</sup> )	(Normal)	(2.650)	(10 %)
	(w)	(-)	(Exponen- tial)	(0,075)	(30 %)

In der Praxis wird der Kohäsion in Stabilitätsanalysen eine besondere Rolle zugesprochen, da ihre physikalische Ursache und ihre allgegenwärtige Wirksamkeit in der bodenmechanischen Fachgemeinschaft diskutiert wird (Kolymbas, 2016). Dem wird durch ingenieurmäßig konservative Analysen Rechnung getragen, welche die Kohäsion teilweise vernachlässigen oder nur anteilig einbeziehen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden sowohl für den Deichstützkörper als auch für den Deichuntergrund zwei Fälle betrachtet, von denen einer die Kohäsion berücksichtigt und einer sie vernachlässigt. Auf diese Weise lassen sich die Einflüsse der potentiellen Steuerungsgrößen und der Kohäsion auf die Versagenswahrscheinlichkeit identifizieren. Somit ergeben sich schließlich die in Tabelle 9 definierten Szenarien.

**Tabelle 8: Untersuchungsintervalle der geometrischen und materialtechnischen Eingangsvariablen sowie der Analyse zugehörige Intervallgrenzen**

Nr.	Variable	Einheit	Intervallgrenzen von $X_i$		Intervallgrenzen von $X_{i,rel}$	
			von	bis	von	bis
Geometrische Eingangsvariablen						
1	$h_D$	m	4,0	6,0	0,81	1,69
2	$b_K$	m	0,1	8,0	0,80	1,26
3	$m_w$	-	1,5	5,0	0,80	1,26
4	$m_l$	-	1,5	5,0	0,80	1,26
Materialtechnische Eingangsvariablen						
5	$E(\varphi)$	°	24,2	44,9	0,7	1,3
6	$E(c)$	kN/m <sup>2</sup>	2,1	5,1	0,7	1,3
7	$E(n)$	-	0,3	0,5	0,7	1,3
8	VarK( $\varphi$ )	%	3,0	50	0,3	5,0
9	VarK( $c$ )	%	9,0	150	0,3	5,0
10	VarK( $n$ )	%	6,0	100	0,3	5,0

Zu den zehn als veränderlich berücksichtigten Eingangsvariablen ergeben sich für jedes Szenario nach Tabelle 9 diskrete Funktionsverläufe entsprechend Gl. (60). Dies bedeutet, zu acht Variablen ergeben sich je vier und zu den zwei Analysen der Kohäsion ergeben sich je zwei Funktionen. Eine Zusammenstellung der Analyseergebnisse gibt Abbildung 17. Für den Referenzzustand (Abszissenwert 1,0) ist die erwartete Versagenswahrscheinlichkeit aus Szenario 1 mit  $4,2 \cdot 10^{-1}$  über 600-fach größer als für Szenario 3 mit  $6,8 \cdot 10^{-4}$ . Dies verdeutlicht die Relevanz des ingenieurtechnischen Umgangs mit der Kohäsion bei der Modelldefinition.



**Tabelle 9: Definition von Szenarien zur Berücksichtigung der Kohäsion**

Szenario	Kohäsion	
	Deichkörper	Untergrund
1	Nein	Nein
2-1	Ja	Nein
2-2	Nein	Ja
3	Ja	Ja

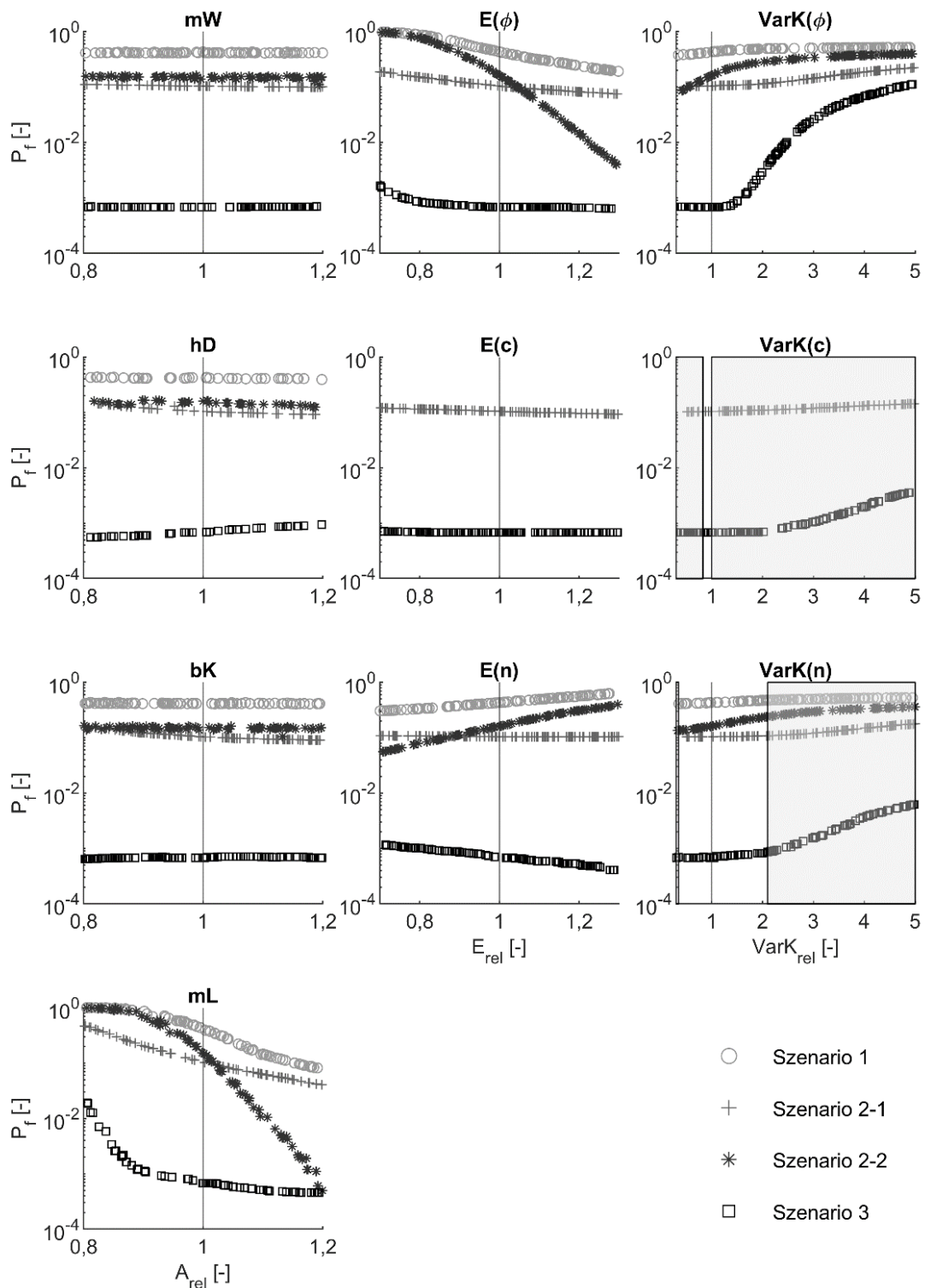
Die landseitige Böschungsneigung  $m_l$ , der Erwartungswert des inneren Reibungswinkels  $E(\varphi)$ , sein Variationskoeffizient  $\text{VarK}(\varphi)$  und der Erwartungswert der Porosität  $E(n)$  besitzen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit eines landseitigen Böschungsbruchs. Hingegen lassen sich aus den Ergebnissen bei der wasserseitigen Böschungsneigung  $m_w$ , der Kronenbreite  $b_K$ , dem Erwartungswert der Kohäsion  $E(c)$  sowie ihres Variationskoeffizienten  $\text{VarK}(c)$  keine Einflüsse erkennen. Vor dem Hintergrund des in Abbildung 12 veranschaulichten Gleitkreises wird deutlich, dass die wasserseitige Böschungsneigung keinen und die Kronenbreite lediglich einen kleinen Einfluss auf die Geometrie des Gleitkörpers besitzen. Mit einem Erwartungswert von  $3 \text{ kN/m}^2$  und einem Variationskoeffizienten von 30 Prozent ist die kohäsive Wirkung des Deichkörpers sowohl allgemein als auch im Vergleich zu der des Untergrundes klein (vgl. Tabelle 7). Der kohäsionsbedingte Anteil am Gesamtwiderstand des Gleitkörpers nach Gl. (51) wird beim Böschungsbruch mit Kolkbildung infolge der im Untergrund ausgebildeten Gleitfuge maßgeblich durch die Eigenschaften des Untergrunds geprägt. Das bedeutet, dass Änderungen an den Werten der Kohäsion im Deichkörper für die Szenarien 2-2 und 3 keine Auswirkungen auf die Stabilitätsaussage haben. Entsprechend herrscht Makrostabilität vor.

Im Detail lässt sich für die landseitige Böschungsneigung  $m_l$  in allen Szenarien ein negativ korrelierter Trend erkennen. Das bedeutet, je flacher die Böschung bzw. je größer infolgedessen die relative Querschnittsfläche ist, desto kleiner ist die Versagenswahrscheinlichkeit der landseitigen Deichböschung. In den Szenarien 1 und 2-1 ist die Reduktion der Versagenswahrscheinlich-

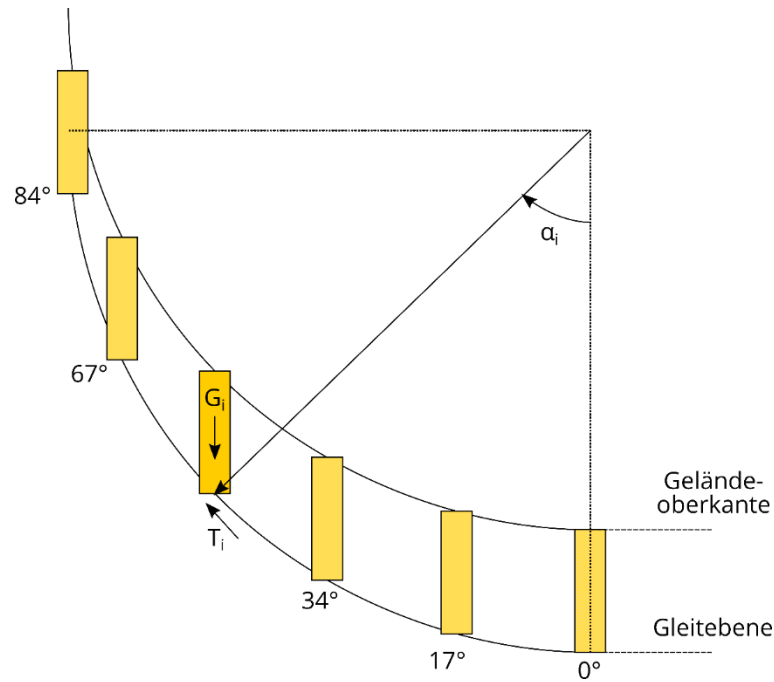
keit kleiner als in den Szenarien 2-2 und 3, wobei die kleinste errechnete Versagenswahrscheinlichkeit mit einem Wert von  $4,6 \cdot 10^{-4}$  für Szenario 3 bei 20 Prozent gesteigerter Querschnittsfläche (entspricht einer Böschungsneigung von  $m_1=5$ ) einhergeht. Auch der Erwartungswert des Reibungswinkels  $E(\varphi)$  zeigt einen negativ korrelierten Trend und weist den größten Einfluss für Szenarien mit kohäsivem Untergrund aus. Der Einfluss aus dem Untergrund bestätigt sich erneut in den Ergebnissen zum Variationskoeffizienten des inneren Reibungswinkels  $\text{VarK}(\varphi)$ . Dessen Trend ist jedoch positiv korreliert, das heißt: je stärker der innere Reibungswinkel streut, desto größer ist die zu erwartende Versagenswahrscheinlichkeit. Im Kontext des inneren Reibungswinkels und innerhalb der berücksichtigten Werteintervalle reduziert sich die Versagenswahrscheinlichkeit auf  $6,4 \cdot 10^{-4}$  (im Falle von  $1,3 \cdot E(\varphi)=45^\circ$ ) bzw. auf  $6,8 \cdot 10^{-4}$  (im Falle von  $0,3 \cdot \text{VarK}(\varphi)=3\%$ ).

Auffällig ist, dass sich bei den Ergebnissen zum Erwartungswert der Porosität  $E(n)$  für kohäsionslose Deichquerschnitte positiv und für kohäsive Deichquerschnitte keine oder negativ korrelierte Trends zeigen. Eine Zunahme von  $E(n)$  bedeutet die Zunahme des Porenanteils in einem definierten Bodenvolumen. Da die Poren i. d. R. entweder durch Wasser oder Luft gefüllt sind, bedeutet die Porenzunahme eine Reduktion der mittleren Dichte und in Verbindung mit der Erdbeschleunigung auch der Bodenwichte. Demzufolge sinkt bei der Zunahme von  $E(n)$  die Gewichtskraft einer Bodenlamelle  $G_i$ .  $G_i$  besitzt nach Gl. (54) sowohl Einfluss auf die treibenden als auch auf die haltenden Momente des Gleitkörpers, sodass der Einfluss der Porosität der Anschaulichkeit halber im Folgenden an einer deterministischen Intervallrechnung gezeigt wird.

Betrachtet man an einem Gleitkreis eine einzelne Lamelle, so lassen sich die Werte für die Einwirkung  $S$  (treibendes Moment), den Widerstand  $R$  (haltendes Moment) und die Zuverlässigkeit  $z$  für unterschiedliche Positionen der Lamelle entlang der Gleitebene bestimmen (vgl. Abbildung 18). Wird die Porosität über ein Werteintervall in die Analyse einbezogen, zeigen sich unter Verwendung von Gl. (52), Gl. (53) und Gl. (54) die Einflüsse der Gleitflächenneigung  $\alpha$  und der Porosität  $n$  auf die Zuverlässigkeit  $z$ .



**Abbildung 17:** Veränderlichkeit der Wahrscheinlichkeit eines landseitigen Böschungsversagens (Mikro- und Makro-stabilität) hinsichtlich der Geometrie ( $m_W$ ,  $h_D$ ,  $b_K$ ,  $m_L$ ), sowie der Materialeigenschaften ( $E$ ,  $CoV$ ); Referenzsystem: 1, grau hinterlegte Bereiche: nicht durch Literatur validiert



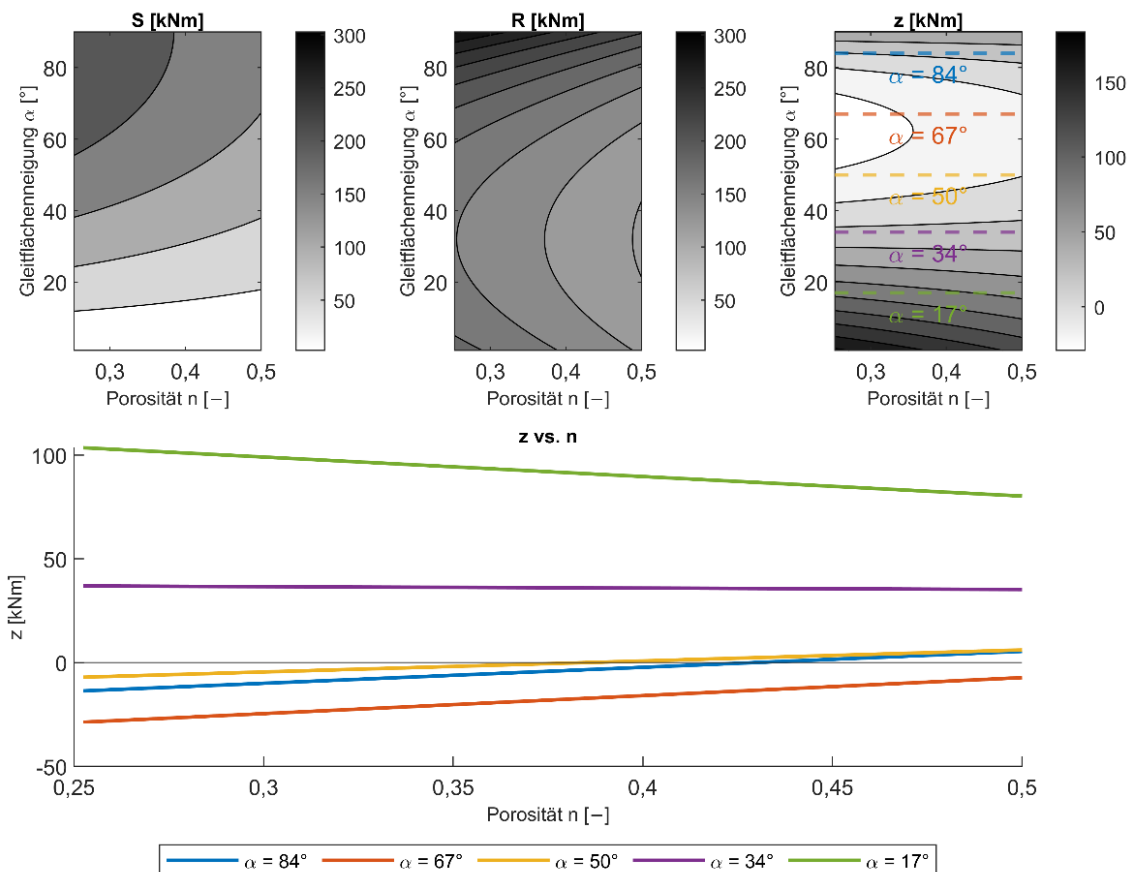
**Abbildung 18: Modellvorstellung zur Analyse der Zuverlässigkeit einer Einzellamelle bei unterschiedlichen Positionen entlang einer kreiszylindrischen Gleitebene**

Für eine trockene Lamelle der Breite  $b=0,5$  m und der Höhe  $h=2,0$  m mit einem Reibungswinkel von  $\varphi=32^\circ$ , einer Kohäsion von  $c=10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$  und einer Korndichte von  $\rho_K=2650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , ergibt sich  $z$  über den Intervall  $n=[0,25\dots0,5]$  entsprechend Abbildung 19. Der größte Wert der Einwirkung ( $S=G \cdot r \cdot \sin \alpha$ ) ergibt sich für den größten Öffnungswinkel und die kleinste Porosität (im Beispiel  $S=243 \text{ kNm/m}$ ). Bei konstantem  $\alpha$  nimmt  $S$  linear mit  $n$  ab. Hingegen geschieht diese Abnahme von  $S$  bei konstantem  $n$  entsprechend des Sinusfunktionswerts für  $\alpha$ , sodass  $S$  bei horizontaler Gleitfläche infolge  $\sin 0^\circ = 0$  zu Null wird.

Beim Widerstand  $R$  ist auffällig, dass sich für  $\alpha=34^\circ$  ein Minimum von  $160,5 \text{ kNm/m}$  ergibt, sodass aus  $G$  sowohl im steilen Bereich der Böschung ( $R_{90^\circ}=302,9 \text{ kNm/m}$ ) als auch im horizontalen Böschungsbereich ( $R_{0^\circ}=187,5 \text{ kNm/m}$ ) größere Widerstände resultieren. Dies hat seine Ursache im Divisor von  $R$  (vgl. Gl. (51)), welcher gleichermaßen den Sinus und den Kosinus des Öffnungswinkels in die Berechnung der mobilisierten Tangentialkraft einbezieht.

Nach der Superposition von Einwirkung und Widerstand entsprechend Gl. (54) ergibt sich ein Minimum der Zuverlässigkeit bei einem Öffnungswinkel von  $\alpha=63^\circ$ . Nach Auswertung der Ergebnisse für diskrete Öffnungswinkel gegenüber der Porosität zeichnen sich für  $z$  gegenläufige Trends ab. Während für die Lamelle mit einer um  $17^\circ$  geneigten Aufstandsfläche eine Abnahme von  $z$  zu beobachten ist, verhält es sich für Lamellen mit stark geneigten Aufstandsflächen ( $\alpha=50^\circ, 67^\circ, 84^\circ$ ) gegenteilig. Wie am Beispiel von  $\alpha=34^\circ$  gesehen werden kann, erfolgt mit diesem Winkel die Trendumkehr.

Aus der beispielhaft ausgeführten Analyse lässt sich für die Böschungstabilität im Allgemeinen ableiten, dass positiv korrelierte Trends zustande kommen, wenn die oberen Gleitkreislamellen (im Beispiel:  $\alpha>34^\circ$ ) und somit Mikro-stabilität für die Stabilitätsaussage maßgebend sind. Im Gegensatz dazu



**Abbildung 19:** Einfluss der Gleitflächenneigung  $\alpha$  und der Porosität  $n$  auf die Einwirkung  $S$ , den Widerstand  $R$  und die Zuverlässigkeit  $z=R-S$  für eine trockene Böschungslamelle mit folgenden Eigenschaften: Breite: 0,5m, Höhe: 2,0m, Reibungswinkel:  $32^\circ$ , Kohäsion:  $10 \text{ kN/m}^2$

bestehen negativ korrelierte Trends im Fall von Makrostabilität und werden maßgebend durch die unteren Gleitkreislamellen (hier:  $\alpha < 34^\circ$ ) geprägt. Für die Analyseergebnisse aus Abbildung 17 bedeutet dies Mikro- und Makrostabilität für die nichtkohäsiven Deichquerschnitte (Szenarien 1 und 2-2) und Makrostabilität für das vollständig kohäsive System in Szenario 3. In Szenario 2-1 herrscht ein Versagensmechanismus zwischen Mikro- und Makrostabilität vor.

In Zusammenhang mit der Deichhöhe  $h_D$  zeigen sich für kohäsionslose Deichquerschnitte leicht negativ korrelierte Trends. Im Falle kohäsiver Deichquerschnitte tritt bei kohäsionslosem Untergrund (Szenario 2-1) eine Ab- und bei kohäsivem Untergrund (Szenario 3) eine Zunahme der Versagenswahrscheinlichkeit auf. Ursächlich für den Trend in Szenario 2-1 ist die zusätzliche, stabilisierende Tangentialkraft, welche sich aus einer längeren Gleitfläche im kohäsiven Deichquerschnitt (vgl. Gl. (51)) ergibt. Da Mikro- und Makrostabilität vorherrscht, erhöht sich der Widerstand im oberen Böschungsbereich und die Versagenswahrscheinlichkeit nimmt ab. Bei Szenario 3 hingegen wird der wirksame Widerstand maßgeblich durch die Festigkeitseigenschaften des Untergrundes bestimmt, sodass eine Erhöhung des Deiches und die damit einhergehende Zunahme des treibenden Moments die zuvor beschriebene Steigerung der Tangentialkraft überprägt.

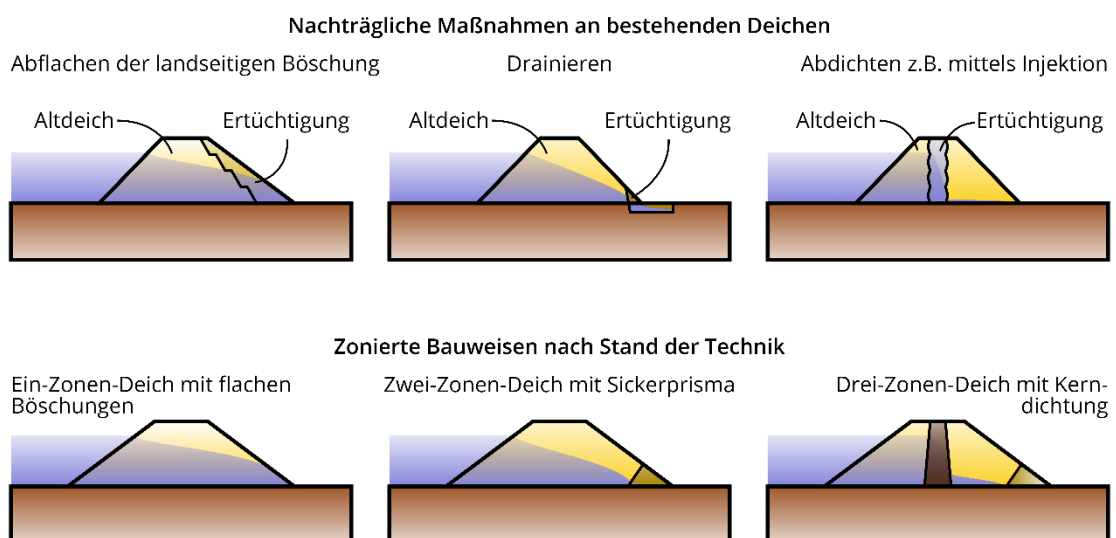
In Bezug auf das HWRM (vgl. Kapitel 1) dienen die hier ausgeführten Erkenntnisse der Identifikation von Steuerungsvariablen für die Überflutungs- bzw. Versagenswahrscheinlichkeit. So lassen sich aus Abbildung 17 insbesondere

- die landseitige Böschungsneigung  $m_w$ ,
- die Erwartungswerte des inneren Reibungswinkels  $E(\varphi)$  und der Porosität  $E(n)$  und
- der Variationskoeffizient des inneren Reibungswinkels  $\text{VarK}(\varphi)$

als Steuerungsgrößen ableiten. Auch wenn die Gültigkeit der quantifizierten Empfehlung auf den Versagensmechanismus des landseitigen Böschungsbruchs und Böschungsbruch mit Kolkbildung in homogenen Deichen beschränkt ist, so bestätigen sie gleichsam die im geltenden Regelwerk bislang rein qualitativ formulierten Empfehlungen (vgl. DWA (2011)).

### 3.5 Übertragbarkeit auf gegliederte und bestehende Deiche

Als Folge einer mitunter iterativen Entstehungs- und Belastungsgeschichte weisen bestehende Deiche vielfach sowohl in Deichlängsachse als auch quer dazu heterogene Eigenschaften auf (vgl. Abbildung 20 und z. B. GGU, 2013). Ursache dafür ist u. a., dass seit dem Beginn des industrialisierten Deichbaus gegen Mitte des 19. Jahrhunderts das geltende Regelwerk kontinuierlich im Sinne neuer, wissenschaftlicher Erkenntnisse überarbeitet und bestehende Deiche an dieses angepasst worden ist (Schmidt, 2000). Diese Anpassung ist im Laufe der Jahre und wird auch heute noch unter Verwendung der vorhandenen Bausubstanz vorgenommen worden (DWA, 2011; Ehlers & Winkel, 1950; Engels, 1923). Beispielsweise wird die landseitige Böschung für eine größere Böschungstabilität abgeflacht oder werden Drainagen bzw. Dichtungen als zusätzliche Querschnittskomponenten in ein Bestandsbauwerk integriert, um die geohydraulischen Verhältnisse so vorteilhaft zu beeinflussen. Auch die im geltenden Regelwerk empfohlenen, zonierten Bauweisen setzen sich aus unterschiedlichen Querschnittskomponenten zusammen,

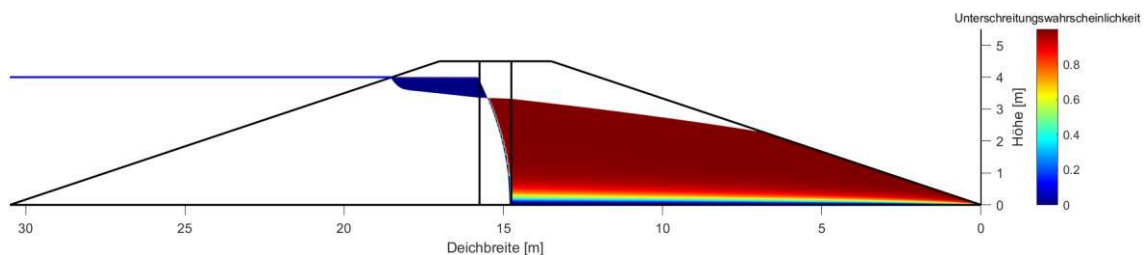


**Abbildung 20:** Beispiele für die Modifikation von bestehenden (oben) und die Gestaltung von gegliederten Deichen (unten)

welche mit Unstetigkeiten der bodenmechanischen Eigenschaften einhergehen.

Während die Lage der stationären Sickerlinie bei homogenen Deichen durch die äußere Kubatur in das System eingepägt ist (vgl. Davidenkoff, 1957), ist diese bei Mehrzonen- und Bestandsdeichen von der gesättigten Durchlässigkeit der einzelnen Bodenzonen abhängig. Nimmt diese in Strömungsrichtung von einer Zone zur nächsten zu, sinkt tendenziell die Sickerlinie herab (drainierende Wirkung). Das Gegenteil ist der Fall, wenn die Durchlässigkeit abnimmt (dichtende Wirkung). Wie stark diese Effekte sind, bedingt das Verhältnis der  $k_f$ -Werte angrenzender Bodenzonen (Schwiersch et. al, 2021). In der Regel wird beim Deichneubau eine Querschnittszonierung gewählt, bei welcher die Sickerlinie innerhalb des Deichquerschnitts verbleibt und so ein größerer Querschnittsanteil mit den Materialeigenschaften des ungesättigten Zustands in die Stabilitätsanalysen eingeht. In diesem Fall bedarf die Verortung der stationären Sickerlinie der geohydraulischen Analyse.

Mit einer geohydraulischen Studie zu Deichregelquerschnitten konnten Schwiersch et. al (2021) zeigen, dass die Lage der Sickerlinie in Mehrzonenweichen auch unter stationären Randbedingungen ungewiss ist (vgl. Abbildung 21). Ursächlich dafür sind die möglichen, ungünstigen Realisierungskombinationen der gesättigten Durchlässigkeit, welche das Analyseergebnis als Zufallsvariablen prägen. So kann die hydraulische Wirkung einer Kerndichtung reduziert sein, wenn gleichzeitig ein vergleichsweise gering durchlässiger Stützkörper (z. B. infolge starker Verdichtung und weiter Stufung) und eine relativ stark durchlässige Dichtung (z. B. infolge unzureichender Verdichtung und enger Stufung) vorliegen. Unter Annahme stochastischer Unabhängigkeit besteht gleichfalls die Möglichkeit, dass die



**Abbildung 21: Beispiel einer ungewissen Sickerlinie für einen Deich mit Kerndichtung (aus Schwiersch et. al, 2021)**



Durchlässigkeit eines groben für den Drainagekörper gedachten Materials (z. B. GW, GI) geringer ausfällt als die eines vergleichsweise feinen Stützkörpers (z. B. SU, ST). Dies hätte anstelle einer drainierenden eine dichtende Wirkung zur Folge. Es stellt sich die Frage, ob dies bei der Bauausführung durch die Bauüberwachung ausgeschlossen werden könnte? In diesem Fall sind für die geohydraulischen Analysen zusätzlich Fragen der bedingten Wahrscheinlichkeiten zu beantworten.

Vor diesem Hintergrund ist die Übertragbarkeit der zuvor beschriebenen Methodik auf bestehende und gegliederte Deiche erst nach methodischen Erweiterungen gegeben. Maßgeblich sind hierfür die Integration einer probabilistischen, geohydraulischen Analyse sowie die mathematische Erfassung bedingter Wahrscheinlichkeiten bei den geostatistischen Kenngrößen. In der Folge bedeutet dies außerdem eine gesteigerte Komplexität der zu untersuchenden Szenarien (in Analogie zu Tabelle 9), um Auswirkungen der kohäsiven Wirkung zusätzlicher, bindiger Bodenzonen zu erfassen. Es ist davon auszugehen, dass sich aus der Methodenerweiterung ein deutlich gesteigerter Berechnungsaufwand im Zuge der MCS-basierten Zuverlässigkeitsanalyse ergibt. Daher bietet es sich an, in diesem Zusammenhang den Aufwand der MCS durch die Verwendung erweiterter Verfahren wie z. B. der geschichteten MCS oder Importance-Sampling-Ansätze (DWA, 2022) zu reduzieren.

### **3.6 Ungewissheiten im Kontext**

Trotz der Berücksichtigung ungewisser Eingangsvariablen bleiben die zuvor erläuterten Ergebnisse von Ungewissheiten behaftet. Die Analysen stützen sich auf einseitig probabilistische Analysen der Widerstandsseite. Somit wird die stochastische Beurteilung der Einwirkungen, konkret des Wasserstands und der Wasserstandsdauer, vernachlässigt. Vor dem Hintergrund der Ungewissheiten in der Prozesskette vom meteorologischen Ereignis bis zum Flussdeichversagen ist dies eine Vereinfachung, welche zwar die dezidierte Auseinandersetzung mit den Widerständen erlaubt, gleichzeitig eine Reihe von Ungewissheiten der Prozesskette vernachlässigt. Schließlich müssen vor einem Versagensereignis zunächst

- ein meteorologisches Ereignis, welches viel Niederschlag in das Einzugsgebiet einträgt,
- ein hydrologisches Ereignis, das eine zu Hochwasser führende Abflussbildung befördert,
- ein hydraulisches Ereignis, das mit langanhaltenden und/oder hohen Wasserständen einhergeht, und
- ein Ereignis unzureichenden Widerstands eintreten.

Für eine präzise, stochastische Einschätzung eines hydraulischen (Belastungs-) Ereignisses sind die ersten drei der vorangegangenen Ereignisse durch geeignete Modelle bezüglich ihrer phänomenologischen Ausprägung und ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit zu analysieren (Hawkes et al., 2008; Sánchez-Arcilla et al., 2007). Während die Ereignisausprägung einer aleatorischen Ungewissheit unterliegt, fügen unsere Vorstellungen und Modelle den Ergebnissen epistemische Ungewissheiten hinzu. Tabelle 10 fasst Beispiele sowohl aleatorischer als auch epistemischer Ungewissheiten in der Prozesskette zusammen.

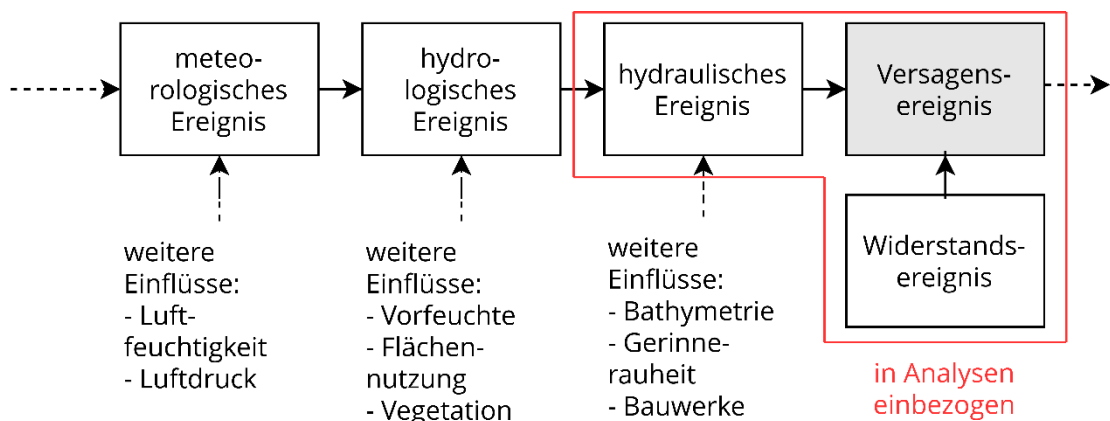
Unter den für diese Arbeit definierten Randbedingungen (vgl. Abbildung 22) werden geotechnische Prozesse nicht betrachtet, für die es in den herkömmlichen Berechnungsverfahren bislang keine praxistaugliche Integration gibt. So wird nicht berücksichtigt, dass Deiche einem saisonalen Quellen und Schwinden unterliegen (Özer et al., 2019), dass bei anhaltender

**Tabelle 10: Beispiele ungewisser Größen in der Prozesskette der Einwirkungen**

Teilprozess	Von Ungewissheit behaftete Größen	
	Aleatorisch	Epistemisch
Meteorologisches Ereignis	Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur	Meteorologische Modelle, Messsysteme
Hydrologisches Ereignis	Vorfeuchte, Abflussbeiwerte, Vegetationsphase	Hydrologische Modelle, Karten, Kalibrierung
Hydraulisches Ereignis	Bathymetrie, Gerinnerrauheit, Bauwerke	Hydraulische Modelle, Kalibrierung

Trockenheit extensive und intensive Rissbildung in der Deichoberfläche auftritt (Bottema et al., 2019/2019; Jamalnia et al., 2020) sowie, dass Alterungsprozesse von Flussdeichen zur Veränderung der bodenmechanischen Kenngrößen führen (Haselsteiner, 2017; Sackmann, 2001). Ein Versuch mit derartigen Ungewissheiten umzugehen ist diese zur Verbesserung einer Wahrscheinlichkeitsschätzung heranzuziehen (Stichworte: Bayes-Wahrscheinlichkeit, Bayes-Updating) (Kool et al., 2019; Kool et al., 2020).

Zuletzt vernachlässigt die Grenzzustandsgleichung des hier berücksichtigten Versagensmechanismus und dessen Stabilitätsaussage die Deichlängsausdehnung. Somit nimmt die ausschließliche Analyse eines vertikal ebenen Systems (hier: homogener Flussdeichquerschnitt) implizit einen infiniten Deich an. Im Versagensfall würde das Versagensereignis entsprechend über die vollständige Deichlänge gleichzeitig auftreten.

**Abbildung 22: Zu einem Versagen führende Prozesskette**

In der Realität unterliegt eine Deichlinie jedoch sowohl einer geometrischen als auch einer materialtechnischen Variabilität. Beispielsweise ist die für einen deterministischen Wasserstand bemessene Deichhöhe in einer Senke relativ größer als außerhalb. Ebenso können die Materialeigenschaften Unstetigkeiten aufweisen, sollten für die Schüttung eines Deiches z. B. aus logistischen Gründen zwei Lagerstätten zur Materialbeschaffung herangezogen worden sein. Da die Deichlinie in gedämpfter Form dem Gewässerverlauf folgt und sich so Unterschiede im Abstand zur Gewässerachse ergeben, sind schließlich auch die Einwirkungen auf einen Deich (Wasserstand, Schubspannungen) ortsbezogene Größen. Daher ist die für eine probabilistische Berücksichtigung der Deichgeometrie notwendige, stochastische Datengrundlage schwerlich zu gewinnen wie Abtahi (2018) für das Einzugsgebiet der Elbe zeigt.

Diesem Umstand wird bei der Planung von Deichen dadurch Rechnung getragen, dass Deichquerschnitte für einen definierten Abschnitt der Deichlinie als repräsentativ angenommen werden. So ist eine Deichlinie letztlich in eine endliche Menge Deichabschnitte diskretisiert.

## **4 Die hochwasserrisikobasierte Querschnittsgestaltung**

### **4.1 Einführung**

Die Konsequenzen von Hochwasser C(E) besitzen sowohl eine räumliche als auch eine zeitliche Dimension und lassen sich in direkte (eine Folge des Volumenstroms) und indirekte sowie tangible (materielle) und intangible (immaterielle) kategorisieren (vgl. Abbildung 23). Während sich tangible Konsequenzen mit ökonomischen Kennzahlen erfassen lassen, ist dies für intangible Konsequenzen schwerlich möglich. Für die in dieser Arbeit entwickelte Methodik wird sich aufgrund ihrer monetären Bewertung in [EUR] auf die Berücksichtigung direkter und tangibler Konsequenzen beschränkt.

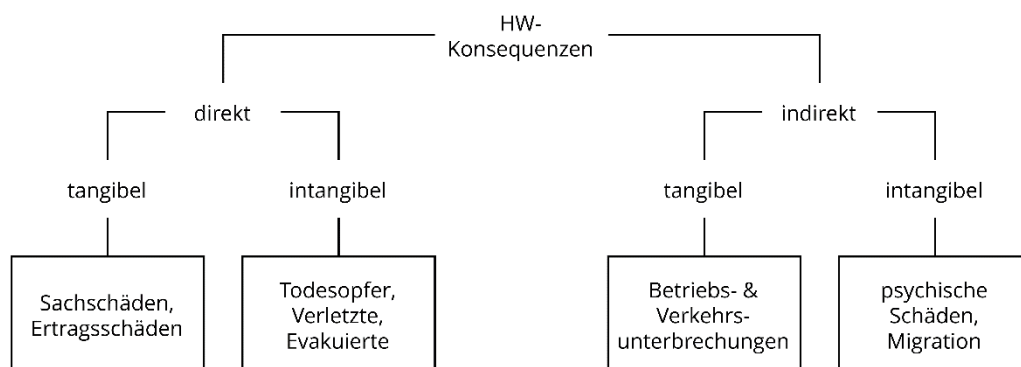
Die monetären Schadenssummen für direkte und tangible Konsequenzen ausgewählter Flusshochwasser, wie z. B. in Höhe von 0,3 Mrd. EUR an der Oder (1997), sowie 8,9 Mrd. EUR (2002) und 8,6 Mrd. EUR (2013) an der Elbe (IKSE, 2004; IKSO, 1999; LfULG, 2015), verdeutlichen die gesellschaftliche Relevanz von Maßnahmen zur Reduktion von Hochwasserkonsequenzen.

Die Quantifizierung der direkt-tangiblen Konsequenzen erfolgt nach Gl. (61) unter Einbeziehung der Exposition  $Ex$  (Ausgesetztheit) und der Vulnerabilität  $V$  (Verletzlichkeit) (Merz, 2006). Für einen methodischen Überblick zur Erfassung intangibler Konsequenzen, wie z. B. von erwarteten Todesfällen, wird auf Jonkman et al. (2008) verwiesen.

$$C(E) = Ex(E) \cdot V(E) \quad (61)$$

Mittels hydrodynamischer Simulationen lässt sich prüfen, inwiefern zunächst ein Schutzbauwerk (z. B. ein Flussdeich) und nach dessen Versagen, der Brechenbildung (vgl. z. B. Tadesse & Fröhle, 2020) und der instationären Wellenausbreitung im Überflutungsgebiet (vgl. z. B. Tedla et al., 2021; Viero et al., 2013) ein Objekt dem Flusswasser ausgesetzt ist. Aus der Verschneidung der örtlichen Wasserstände mit gebäude- bzw. flächennutzungstypischen Schadensfunktionen lässt sich das monetäre Ausmaß der Konsequenzen abschätzen (Bold & Pfeiffer, 2004; Schanze, 2015). Anschließend lässt sich unter Verwendung von Gl. (2) das bestehende HWR ermitteln.

Die gezielte Veränderung des HWR ist Aufgabe des HWRM. Um dieser nachzukommen, bedarf es geeigneter Werkzeuge zur gezielten Einflussnahme (HWRM-Maßnahmen). Der Deichbau bildet dabei eines der wichtigsten Werkzeuge, um einen linearen Hochwasserschutz zu gewährleisten und besitzt gleichzeitig wegen der z. T. sehr großen Deichlängen großen Einfluss



**Abbildung 23: Klassifizierung und Beispiele von Hochwasserkonsequenzen (HW-Konsequenzen), verändert nach Merz (2006)**

auf die mit dem Bau verbundenen Kosten. Das Nutzen-Kosten-Verhältnis kann dann baulich über die Steuerung der Versagenswahrscheinlichkeit (vgl. 3.4) positiv beeinflusst werden. Neben derartigen HWRM-Maßnahmen lässt sich außerdem die Vulnerabilität z. B. mit Maßnahmen der HWR-Kommunikation vorteilhaft verändern (Müller, 2010; Patt & Jüpner, 2020).

Dieses Kapitel stellt im Folgenden eine Methodik für das HWRM bereit, welche sowohl die Versagenswahrscheinlichkeit als auch die monetär bewerteten Konsequenzen im Überflutungsgebiet (nachfolgend Schadenspotential genannt) in die konstruktive Gestaltung von repräsentativen Flussdeichquerschnitten einbezieht.

## 4.2 Risikooptimierung

### 4.2.1 Allgemeines

Verfahren zur risikobasierten Bemessung wurden bereits zur Einführung der Eurocodes in den 1990er und 2000er Jahren diskutiert (Ang & Tang, 2006; Plate, 1993; Schneider & Schlatter, 1996). Das Ziel dieser Verfahren ist es, ein bestehendes Risiko auf ein vertretbares Maß zu reduzieren. Dieses Maß kann je nach Dimensionalität der Ereigniskonsequenzen anhand

- des ökonomischen Optimums,
- des individuellen Risikos (auch: lokales, individuelles Risiko, LIR),
- des gesellschaftlichen Risikos,
- des Life-Quality-Indexes (LQI) oder
- des Indexes der sozialen und ökologischen Auswirkungen (SERI = social and environmental repercussion index)

festgesetzt werden. Bei der Suche des ökonomischen Optimums stellt sich vor dem Hintergrund einer monetären Bewertung von Kosten und Nutzen die Frage: Bis zu welchem Investment (Kosten) vergrößert sich die Wirksamkeit der Mittelverwendung (Nutzen)? Infolge der Beschränkung auf direkte und tangible Konsequenzen umfasst die in dieser Arbeit durchgeführte Optimierung das ökonomische Optimum und vernachlässigt so die weiteren Optimierungsansätze. Beim LIR handelt es sich um eine Messgröße des Risikos,

welche im wasserbaulichen Kontext ausdrückt mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Person, die sich ständig an einem bestimmten Ort aufhält, infolge einer Überschwemmung stirbt (Expertise Network for Flood Protection, 2017). Mit dem gesellschaftlichen Risiko lassen sich direkte, intangible Konsequenzen in Risikoanalysen einbeziehen. Hinweise zur Abschätzung dafür notwendiger Kennzahlen wie der Mortalität oder der Gesamtzahl Betroffener finden sich in Jonkman (2005). Der von Sykora et al. (2017) und Roubos et al. (2018) zur Bemessung verwendete LQI bezieht die soziale Zahlungsbereitschaft für die Rettung eines weiteren Lebens oder für das Verhindern weiterer Verletzungen ein (Roubos et al., 2018). Einen Vorschlag für Bemessungszielgrößen unter Verwendung des LQI geben Fischer et al. (2012). Mit dem SERI wurde ein vorwiegend in Spanien verfolgter Versuch unternommen, die Klassen der Hochwasserkonsequenzen (vgl. Abbildung 23) ganzheitlich der Risikooptimierung zuzuführen. Hierzu finden sich einleitende Gedanken in Roubos et al. (2018).

Im Allgemeinen beschäftigt sich die Optimierung als Teildisziplin der Mathematik mit der Analyse von Zielfunktionen und versucht Parameter zu bestimmen, bei denen sowohl ein- als auch mehrdimensionale Systeme ein Maximum bzw. Minimum auf der Zielfunktion besitzen. Eine Einführung in Optimierungsverfahren geben Papageorgiou et al. (2012).

Eine eindimensionale Zielfunktion  $g(x)$  besitzt an der Stelle  $x^*$  das Optimum  $g(x^*)$ . An dieser Stelle ist die Steigung von  $g(x)$  gleich Null, sodass die Bedingung aus Gl. (62) gilt und sich das Optimum mittels Kurvendiskussion bestimmen lässt.

$$g'(x^*) = 0 \tag{62}$$

Im mehrdimensionalen Fall entspricht die Zielfunktion einer Hyperebene, welche neben dem globalen Minimum bzw. Maximum eine Vielzahl lokaler Minima bzw. Maxima aufweisen kann. Die globalen Optima zu identifizieren ist dann auf analytischem Weg schwerlich möglich, sodass Optimierungen im technischen Kontext zumeist durch die Verwendung numerischer Verfahren unterstützt werden.

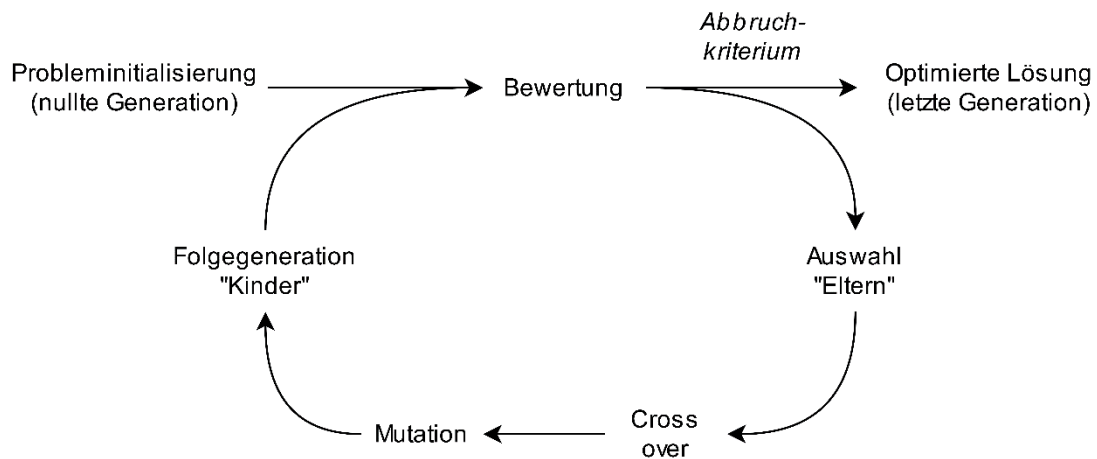


Üblicherweise werden die kalkulatorischen, die aufzählenden und die genetischen Algorithmen zur Bestimmung von numerischen Lösungen herangezogen (Tang et al., 1996). Dabei nehmen die genetischen Algorithmen infolge ihrer besonderen Grundidee, ihrer breiten Anwendbarkeit und ihrer Robustheit eine Sonderrolle ein und werden daher in 4.2.2 in einem eigenen Unterkapitel gefasst. Die kalkulatorischen Optimierungsverfahren bedienen sich der Bedingung aus Gl. (62) und nähern sich iterativ dem Optimum (Gill et al., 1981). Eine Auswahl kalkulatorischer Verfahren findet sich in Papageorgiou et al. (2012). Das prominenteste aufzählende Verfahren ist die auf Richard Bellman zurückgehende, dynamische Programmierung (Bellmann, 1957), mit der er in den 1940er Jahren gezeigt hat, dass sich ein Optimierungsproblem in Teilprobleme zerlegen und durch die geschickte Kombination von Zwischenlösungen zu einer optimierten Näherungslösung zusammensetzen lässt (Papageorgiou et al., 2012).

#### 4.2.2 Genetischer Algorithmus

Im Gegensatz zu den vorgenannten, strukturierten Vorgehensweisen zielen genetische Algorithmen darauf, zufällig eine optimierte Lösung herbeizuführen. Dafür bedienen sie sich Mechanismen, die in der natürlichen Evolution beobachtete Prozesse nachahmen (Tang et al., 1996).

Im Untersuchungsraum, welcher durch Untersuchungsintervalle der Eingangsvariablen definiert wird, werden  $n_{\text{Pop}}$  zufällige Realisierungen initialisiert (nullte Generation), deren Ergebniswerte auf der Zielfunktion eine Bewertung in Bezug auf das Optimierungsproblem erlauben. Aus den  $n_{\text{Pop}}$  Lösungen wird eine Gruppe ausgewählt, die üblicherweise als Eltern bezeichnet wird. Deren Konfigurationen (Werte der Eingangsvariablen bzw. „Gene“) werden wiederum – in Anlehnung an die evolutionären Prozesse – als Chromosomen bezeichnet. Als Folge der Rekombination von Eltern-Chromosomen (Crossover) und der zufälligen Veränderung einzelner Gene (Mutation) entsteht eine als Kinder bezeichnete Gruppe neuer Lösungsvorschläge. Während das Crossover die iterative Suche nach einem Optimum (vgl. Abbildung 24) auf einen in vorangegangenen Iterationsschritten als aussichtsreich identifizierten Teil des Untersuchungsraums eingrenzt, öffnet die Mutation den



**Abbildung 24: Ablauf der iterativen Optimierung mit Hilfe eines genetischen Algorithmus**

Pool möglicher Lösungen. Schließlich ergibt sich die approximierte, optimale Lösung durch das Erreichen eines Abbruchkriteriums (z. B. relative Abweichung der Ergebnisse, Anzahl an Iterationen).

Für die Performanz eines genetischen Algorithmus sind die Auswahl der Eltern, die Art des Crossovers und die Mutation daher elementare Steuerungsgrößen. Die Auswahl der Eltern ahmt das Überleben des Stärkeren in der Natur nach. Gängige Auswahlverfahren sind die Glücksradauswahl, die Turnier-Auswahl, die Auswahl nach Rang oder die zufällige Auswahl (Winston, 2010). Einen Überblick zu Vor- und Nachteilen der einzelnen Auswahlverfahren geben Tang et al. (1996). Da die Auswahl besserer Ergebnisse bei der Glücksradauswahl wahrscheinlicher ist, diese den Untersuchungsraum jedoch nicht beschränkt, wird sie für die Implementierung des in 4.3 ausgeführten Beispiels gewählt.

Weiterhin wird jedem Kind mit dem Vektor  $p_p$  eine Auswahlwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit seiner Bewertung auf der Zielfunktion zugewiesen. Diese lässt sich über ein Exponentialmodell nach Gl. (63) definieren (Heris, 2015). Darin charakterisieren  $\beta$  einen Koeffizienten zur Auswahl-Priorisierung und  $\psi'$  die normierten Werte der Zielfunktion eines Kindes.

$$p_{P,i} = e^{-\beta \cdot \psi'} \quad (63)$$

Geht  $\beta$  gegen  $\infty$ , wird  $p_p$  gleich Null. Entsprechend wird immer das beste Ergebnis einer Folgegeneration gewählt. Im Umkehrschluss führt  $\beta=0$  dazu,

dass alle Ergebnisse die gleiche Auswahlwahrscheinlichkeit zugewiesen bekommen und keine Priorisierung erfolgt. Die Auswahl selbst erfolgt durch den Vergleich von  $p_p$  mit einem skalierten Vektor gleichverteilter Zufallszahlen  $r_{eq}$ . Dabei wird immer das erste Ergebnis ausgewählt, bei welchem  $r_{eq}$  kleiner ist als die kumulierte Wahrscheinlichkeit von  $p_p$ .

Die Rekombination der Eltern zur Erzeugung von Kindern des nächsten Iterationsschritts kann mittels One-Point-, Two-Point- oder Uniform Crossover erfolgen. Während die Anwendung von One- und Two-Point-Crossover vorwiegend für binäre Systeme (Parameterwerte „Null“ und „Eins“) üblich ist, empfiehlt sich für kontinuierliche Größen das Uniform Crossover (Heris, 2015; Syswertda, 1989). Im Falle zweier Kinder  $y_1$  und  $y_2$  werden diese mithilfe eines Zufallsvektors  $r_{eq}=[-\gamma, 1+\gamma]$  aus den ausgewählten Eltern  $x_1$  und  $x_2$  gebildet. Der Koeffizient  $\gamma$  sichert hierbei, dass Veränderungen in alle Richtungen des mehrdimensionalen Untersuchungsraums erfolgen können.

$$y_1 = r_{eq} \cdot x_1 + (1 - r_{eq}) \cdot x_2 \quad (64)$$

$$y_2 = r_{eq} \cdot x_2 + (1 - r_{eq}) \cdot x_1 \quad (65)$$

Die Mutation ermöglicht die zufällige Veränderung von Lösungskandidaten und kann für binäre Chromosomen z. B. mittels Bit Flap effizient umgesetzt werden (Tang et al., 1996). Dafür werden die Informationen einer Sequenz an zufälliger Stelle von „0“ auf „1“ geändert. Bei der beispielhaften Anwendung (vgl. 4.3) bestimmt sich die Anzahl der Mutationen pro Chromosom  $n_m$  in Abhängigkeit der Mutationsrate  $\mu$ . Durch die Umsetzung normalverteilter Zufallszahlen  $r_{norm}$ , entspricht  $n_m$  einer Schätzung (vgl. Gl. (66)).

$$n_m \approx \mu \cdot n_{Pop} \quad (66)$$

Anschließend erfolgt die Mutation eines Kindes  $y_i$  zu  $y_i'$  an der  $j$ -ten Stelle unter Verwendung von Gl. (67). Dabei markiert  $\sigma$  die Schrittweite der Mutation.

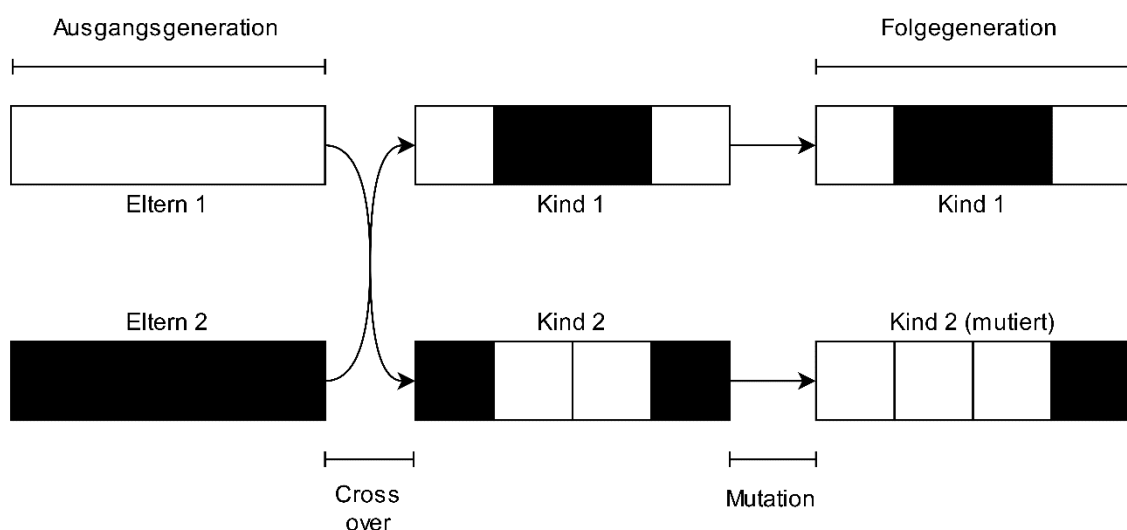
$$y_i'(j) = y_i(j) + \sigma \cdot r_{norm}(j) \quad (67)$$

Weitere Mutationsverfahren sind die Swap-Mutation, die Scramble-Mutation und die Inverse-Mutation (Saddawi, 2015). Abbildung 25 zeigt exemplarisch die Überführung zweier Chromosomen der Eltern in zwei Kinder inklusive Crossover und Bit Flap Mutation.

### 4.2.3 Ökonomisches Optimum einer HWRM-Maßnahme

Vor dem Hintergrund begrenzter öffentlicher Finanzmittel (vgl. Anhang 7) und Ihrer Zuteilung für Maßnahmen des HWRM als Resultat einer politischen Diskussion bedarf es der wirtschaftlich optimierten Mittelverwendung (Haselsteiner, 2007). Hierfür bilden die Gesamtkosten des HWRM  $C_{ges}$  die Entscheidungsgrundlage, welche sich zum einen aus den Zuverlässigkeitskosten  $C_{zuv}$  und den von der Gesellschaft zu tragenden Risikokosten  $C_{ris}$  zusammensetzen (vgl. Gl. (68)).

Die Zuverlässigkeitskosten berücksichtigen den Baukostenanteil, der unmittelbar mit der Zuverlässigkeit z. B. eines Flussdeiches zusammenhängt. So können diese u. a. die Lieferung und den Einbau von Material oder die Vor- und Nachbereitung von Oberflächen beinhalten. Hingegen finden Bau- nebenkosten, wie beispielsweise Baustelleneinrichtungskosten, Kosten für den bauzeitlichen Hochwasserschutz oder das unternehmerische Wagnis



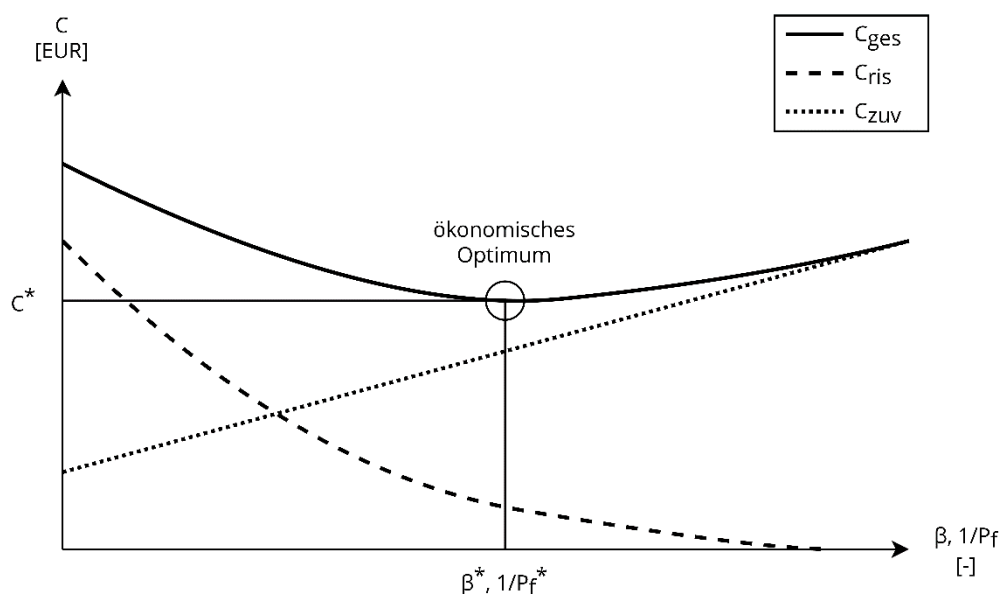
**Abbildung 25:** (Two-Point-)Crossover und (Bit Flap) Mutation von einer Eltern- zu einer Kindergeneration

keine Berücksichtigung. Entsprechend sind für die tatsächlichen Baukosten höhere Werte als für  $C_{zuv}$  zu erwarten.

Als Risikokosten wird hier das monetär bewertete Hochwasserrisiko nach Gl. (2) definiert.

$$C_{ges} = C_{ris} + C_{zuv} \quad (68)$$

Es wird angenommen, dass sich  $C_{ris}$  und  $C_{zuv}$  gegenseitig bedingen. Höhere Investitionen in die Zuverlässigkeit einer HWRM-Maßnahme mindern also die Risikokosten. Infolgedessen ergibt sich das ökonomische als das mathematische Optimum der Gesamtkosten (vgl. Abbildung 26).



**Abbildung 26: Ökonomisches Optimum der Gesamtkosten als Ergebnis einer Abwägung zwischen Zuverlässigkeits- und Risikokosten**

### 4.3 Risikooptimierung am Beispiel des landseitigen Böschungsbruchs homogener Flussdeiche

#### 4.3.1 Allgemeines

Am Beispiel des in 3.4 eingeführten, homogenen Referenzdeichs werden die methodischen Ausführungen aus 4.2 zur Risikooptimierung veranschaulicht. In diesem Zuge wird geprüft, inwiefern unterschiedlichen Schadenspotentialen SP eine jeweils optimierte Querschnittskonfiguration zugewiesen werden kann. Dazu werden eingangs folgende Annahmen getroffen.

- Der Deichquerschnitt ist ein repräsentatives Querprofil für einen Deichabschnitt.
- Für den Deichabschnitt ist ausschließlich der landseitige Böschungsbruch maßgebend, sodass dessen Eintrittswahrscheinlichkeit das Hochwasserrisiko bedingt.
- Kommt es zu Versagen wird zwingend das gesamte Schadenspotential aktiviert, sodass die Risikokosten nach Gl. (69) beschrieben werden können.

$$HWR = C_{ris} = P_f \cdot SP \quad (69)$$

Mit Verweis auf 3.4 werden die landseitige Böschungsneigung, die Erwartungswerte vom inneren Reibungswinkel und von der Porosität sowie der Variationskoeffizient des inneren Reibungswinkels als Steuerungsgrößen für die Gesamtkostenfunktion berücksichtigt. Dabei ist der Untersuchungsraum durch die in Tabelle 11 gegebenen Intervalle der Steuerungsvariablen definiert.

**Tabelle 11: Steuerungsvariablen der Optimierung und ihre Suchintervalle**

Nr.	Variable	Symbol	Einheit	Suchintervall	
				von	bis
1	Landseitige Böschungsneigung	$m_L$	-	1,5	5
2	Erwartungswert des inneren Reibungswinkels	$E(\varphi)$	°	24,2	44,9
3	Erwartungswert der Porosität	$E(n)$	-	0,3	0,5
4	Variationskoeffizient des inneren Reibungswinkels	$\text{VarK}(\varphi)$	%	3,0	50,0

### 4.3.2 Zuverlässigkeitskostenfunktion

Für dieses Beispiel wurde im Gespräch mit Praxispartnern ein Modell der Zuverlässigkeitskosten auf Grundlage des in Tabelle 12 gegebenen Leistungsverzeichnisses (Positionen  $i$  sowie überschlägigen Einheitspreisen  $P_i$ ) entwickelt. Infolge der stark vereinfachten Projekttrandbedingungen vernachlässigen die darin aufgeführten Kosten preisrelevante Effekte, die sich aus den örtlichen Anforderungen an die Bauverfahren und den Bauablauf ergeben (z. B. regionale Baupreise, Kosten für bauzeitlichen Hochwasserschutz, lokale Inflation).

Für das angenommene Modell der Zuverlässigkeitskosten (vgl. Gl. (70)) werden anhand des Referenzdeichquerschnitts Grundkosten  $C_0$  bestimmt, die über eine Reihe von Koeffizienten  $\kappa_i$  manipuliert werden. Im Einzelnen werden kostenrelevante Einflüsse infolge der landseitigen Böschungsneigung  $\kappa_{mL}$ , der Erwartungswerte vom inneren Reibungswinkel  $\kappa_{E\varphi}$  und von der Porosität  $\kappa_{En}$  sowie des Variationskoeffizienten des inneren Reibungswinkels  $\kappa_{\text{VarK}\varphi}$  zugrunde gelegt.

$$C_{zuv} = C_0 \cdot \kappa_{mL} \cdot \kappa_{E\varphi} \cdot \kappa_{En} \cdot \kappa_{\text{VarK}\varphi} \quad (70)$$

**Tabelle 12: Leistungsverzeichnis mit ausgewählten Positionen für die Herstellung eines homogenen Flussdeiches**

Position i	Bezeichnung	Preis P <sub>i</sub>
1	Oberboden abtragen und lagern	2,50 EUR/m <sup>3</sup>
2	Oberboden aufnehmen und andecken inkl. Einsaat	1,20 EUR/m <sup>2</sup>
3	Planum Deichlager herstellen	1,00 EUR/m <sup>2</sup>
4	Boden für homogenen Deich liefern und einbauen	15,00 EUR/m <sup>3</sup>
5	Oberflächenschutz durch Erosionsmatten	1,50 EUR/m <sup>2</sup>

Die Grundkosten  $C_0$  ergeben sich unter Berücksichtigung der Aufstandsweite  $b_g$ , der in den Querschnitt projizierten Deichumfanglänge  $l_o$  und der Querschnittsfläche  $A_D$ , vgl. Gl. (71), Gl. (72) und Gl. (73), und dienen einer breitenbezogenen Mengenermittlung.

$$b_g = (m_L + m_W) \cdot h_D + b_K \quad (71)$$

$$l_o = h_D \cdot \left( \sqrt{1 + m_W^2} + \sqrt{1 + m_L^2} \right) + b_K \quad (72)$$

$$A_D = \frac{1}{2} \cdot (2 \cdot b_K \cdot h_D + (m_W + m_L) \cdot h_D^2) \quad (73)$$

Bei einer angenommenen Schichtdicke des Oberbodens von  $t_{OB}=1,0$  m ergeben sich die Grundkosten für den Referenzdeich entsprechend Tabelle 13 zu  $C_0=1.340,54 \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$ .

Zur Modellbildung sind die Koeffizienten  $\kappa_i$  an Veränderungen der Deichkonfiguration gegenüber dem Referenzzustand geknüpft (normierte Vorgehensweise nach Gl. (63)). Eine Veränderung der landseitigen Böschungsneigung führt zur Veränderung der Deichkubatur, welche sich in Verbindung mit den Gl. (71), Gl. (72) und Gl. (73) auf die Zuverlässigkeitskosten nach Tabelle 12 auswirkt. Vor dem Hintergrund der in 3.4 gezogenen



Schlüsse, führt eine flachere Böschung also gleichermaßen zu größeren Zuverlässigkeitskosten als auch zu einer kleineren Versagenswahrscheinlichkeit.

Die Veränderung der Erwartungswerte sowohl des inneren Reibungswinkels als auch der Porosität beeinflusst das Widerstandsmoment eines betrachteten Gleitkörpers. Hierzu wird angenommen, dass eine Steigerung des Erwartungswerts und somit des Widerstands nur durch die Inkaufnahme längerer Transport- bzw. Lieferstrecken möglich ist. Aufgrund von einem gesteigerten Kraftstoffverbrauch sowie zusätzlichen Ungewissheiten im Kontext der Baustellenlogistik geht eine Steigerung der Erwartungswerte daher mit höheren Zuverlässigkeitskosten einher.

Zuletzt wird angenommen, dass sich der Variationskoeffizient des inneren Reibungswinkels durch die örtliche Bauüberwachung beeinflussen lässt. Je größer der finanzielle Aufwand für die Qualitätsprüfung ist, desto kleiner sind die Parameterstreuung und die Versagenswahrscheinlichkeit. Die zuvor formulierten Gedanken aufgreifend werden den Koeffizienten  $\kappa_i$  die mit den Gl. (74), Gl. (75) und Gl. (76) definierten Modelle zugrunde gelegt. Darin enthaltene Konstanten wurden in Simulationsläufen zur Vorbereitung der Modellbildung abgeschätzt. Gegenstand dieser Rechnungen waren alle Untersuchungsmodelle zum Szenario 3 der in 3.4 identifizierten Steuerungsgrößen.

**Tabelle 13: Grundkosten für den Referenzdeichquerschnitt**

Position i	Formel für breitenbezogene Analyse	Preis des Referenzdeichs $P'_i$ in $\left[\frac{\text{EUR}}{\text{m}}\right]$
1	$P'_1 = b_g \cdot t_{OB} \cdot P_1$	76,25
2	$P'_2 = l_o \cdot P_2$	38,35
3	$P'_3 = b_g \cdot P_3$	30,50
4	$P'_4 = A_D \cdot P_4$	1.147,50
5	$P'_5 = l_o \cdot P_5$	47,94
$\Sigma$	$C_0 = \sum_{i=1}^5 P'_i$	<b>1.340,54</b>

$$\kappa_{m_L} = 0,4017 \cdot m_{L,rel} + 0,5972 \quad (74)$$

$$\kappa_E(X_i) = 0,328 \cdot e^{1,116 \cdot E_{rel}(X_i)} \quad (75)$$

$$\kappa_{VarK(X_i)} = \frac{0,856}{VarK_{rel}(X_i)} + 0,1427 \quad (76)$$

Im definierten Untersuchungsraum (vgl. Tabelle 11) ergeben sich für die Zuverlässigkeitskosten ein theoretischer Mindestwert von  $C_{zuv,min} = 182,53 \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$  sowie ein gleichsam theoretischer Höchstwert von  $C_{zuv,max} = 9.437,69 \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$ .

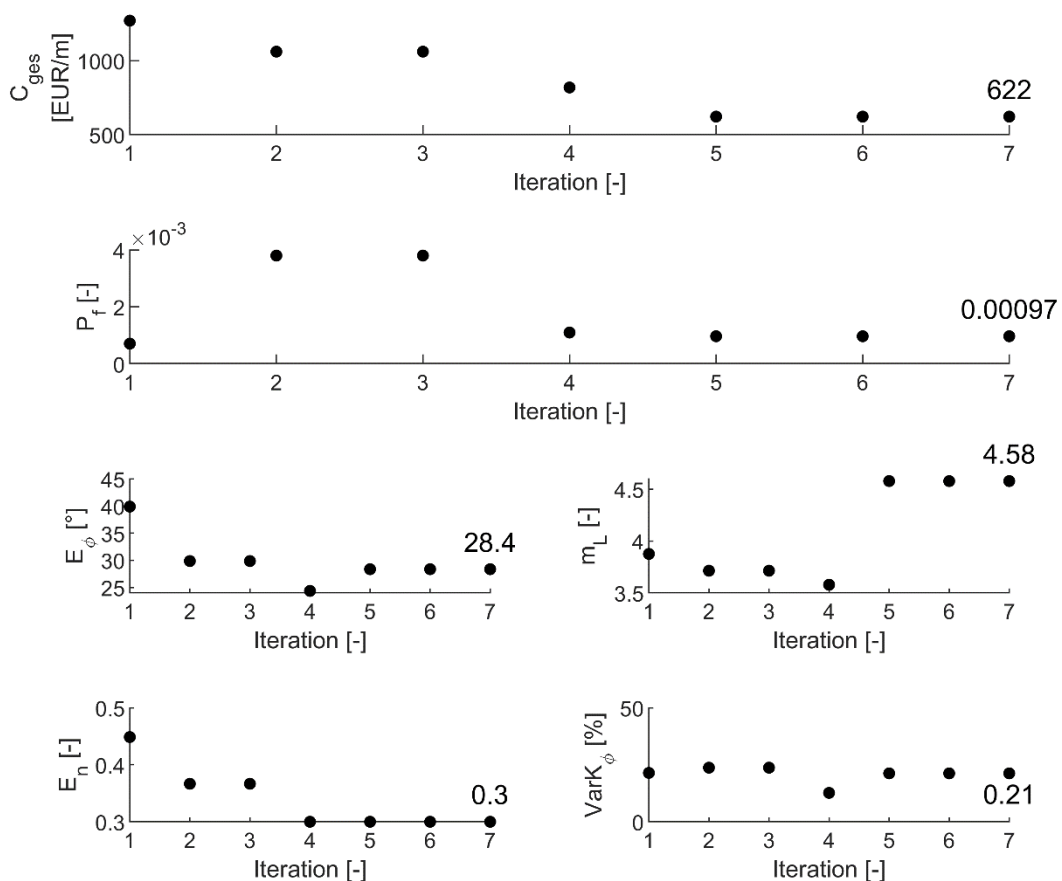
### 4.3.3 Ergebnisse

Für den homogenen Referenzdeich aus Kapitel 3 wird die Querschnittsoptimierung im kohäsiven System (Szenario 3 nach Tabelle 9) für neun auf die Deichlänge bezogene Schadenspotentiale ( $SP = 1 \frac{\text{EUR}}{\text{m}}, 10 \frac{\text{EUR}}{\text{m}}, \dots, 100 \text{ Mio.} \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$ ) durchgeführt. Aus Voruntersuchungen haben sich  $\beta=1$  (mäßige Priorisierung) und  $\gamma=0,5$  als wirksame Attributionen der Auswahl und des Crossovers herausgestellt. Infolge einer begrenzten Rechenkapazität wird die Streuung der untersuchten Lösungsvorschläge mit  $n_{pop}=12$  und  $\mu=0,8$  durch eine vergleichsweise kleine Generationsgröße<sup>4</sup> und hohe Mutationsrate bei einer Schrittweite von  $\sigma=0,125$  geprägt. In den Voruntersuchungen wurde weiterhin festgestellt, dass bei einer überwiegenden Mehrheit der Analysen nach fünf bis sieben Iterationsschritten keine merkliche Verbesserung der Gesamtkosten zu beobachten war. Infolgedessen werden alle Analysen für sieben Iterationsschritte und zur Eingrenzung der Ergebnisstreuung dreifach durchgeführt. Abbildung 27 zeigt einen beispielhaften Simulationslauf, in dem die Gesamtkosten über die Simulation stetig abnehmen, während bei der Versagenswahrscheinlichkeit von Iterationsschritt zu Iterationsschritt sowohl Steigerungen als auch Abnahmen zu beobachten sind.

---

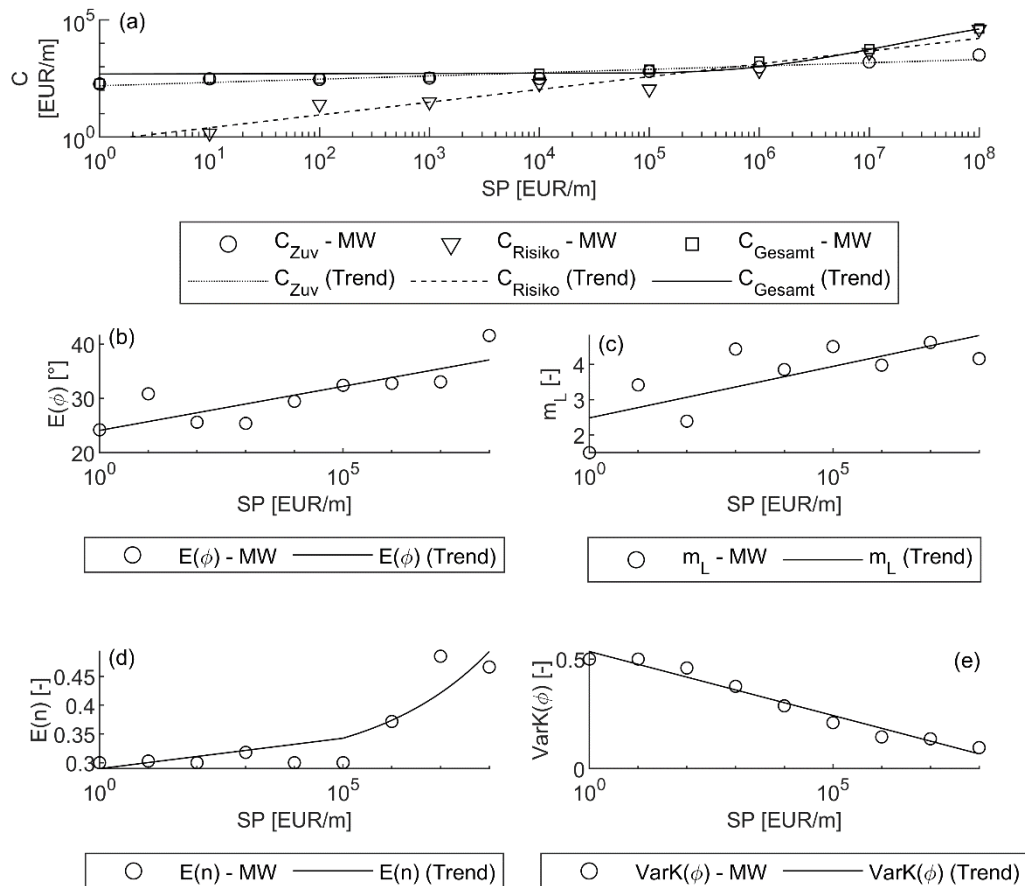
<sup>4</sup> Die Generationsgröße wird durch die Rechnerkapazität beschränkt. Für die hier vorgestellte Analyse wird diese entsprechend der Anzahl verfügbarer CPU-Kerne als Vielfaches von vier gewählt.

Diese werden durch Veränderungen der vier benannten Steuerungsvariablen hervorgerufen und führen zu einer Minderung der Gesamtkosten. Dieser Effekt lässt sich vom ersten auf den zweiten Iterationsschritt beobachten: es steigen die Versagenswahrscheinlichkeit und folglich auch die Risikokosten. Diese Änderung muss durch eine betragsmäßig größere Abnahme der Zuverlässigkeitskosten überprägt werden. Es lassen sich hierzu eine Zunahme von  $\text{Var}K(\varphi)$  sowie die Abnahme von  $m_L$ ,  $E(\varphi)$  und  $E(n)$  nachvollziehen. Während das Abflachen der Deichböschung eine Steigerung der Zuverlässigkeitskosten verursacht, bedingen die weiteren Parameteränderungen deren Minderung (vgl. Gl. (74) bis Gl. (76)). Aus Iterationsschritt 5 geht schließlich die Dominanz von  $m_L$  auf die Gesamtkosten hervor, denn es zeigen sich anschließend kaum mehr nennenswerte Veränderungen.



**Abbildung 27:** Beispiel eines Simulationslaufs bei einem Schadenspotential von 100.000 EUR/m und Ergebniswerte des optimierten Zustands

Aus den Simulationsläufen ergeben sich für die untersuchten Schadenspotentiale die in Abbildung 28 dargestellten Optimierungsergebnisse. Mit den Schadenspotentialen steigen stetig die Risiko- und die Zuverlässigkeitskosten und infolgedessen auch die Gesamtkosten. Für  $SP \leq 1 \text{ Mio. } \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$  übersteigen die Zuverlässigkeits- die Risikokosten. Für größere Schadenspotentiale ist es umgekehrt.



**Abbildung 28:** Optimierungsergebnisse für die Kosten und Steuerungsvariablen ; (a) Gesamt-, Risiko- und Zuverlässigkeitskosten, (b) Erwartungswert des inneren Reibungswinkels, (c) Böschungsneigung landseitig, (d) Erwartungswert der Porosität, (e) Variationskoeffizient des inneren Reibungswinkels für  $1 \frac{\text{EUR}}{\text{m}} < SP < 100 \text{ Mio. } \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$ ; MW: gemittelte Werte, Trends finden sich in Anhang 8, Ergebnisse basieren auf Szenario 3 der Analysen aus 3.4.

Im Allgemeinen empfiehlt sich für Gebiete mit größeren Schadenspotentialen höhere Zuverlässigkeitskosten in Kauf zu nehmen als für solche mit geringeren. Dies geht gleichsam aus der Trendanalyse aller Steuerungsvariablen hervor. Die mittels Regressionsanalyse bestimmten Trends können Anhang 8 entnommen werden. Dem niedrigsten Schadenspotential von  $1 \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$  zugeordnet findet sich der Mindestwert der Zuverlässigkeitskosten in Höhe von  $182,53 \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$ . Dieser hypothetische Fall unterstreicht die methodische Richtigkeit der Analyse, ignoriert jedoch, dass im Fall  $SP \approx 0$  die Errichtung eines Flussschleimes unwahrscheinlich ist. In der Realität besitzt die Entscheidung für oder gegen den Bau eines Deiches weitere als nur eine ökonomische Dimension (vgl. 5.3), sodass die dargelegte Implementierung der rein ökonomischen Betrachtung auch ohne Investitionskriterium als ausreichend aufzufassen ist.

Für eine Anwendbarkeit der Erkenntnisse sind zum einen die Kostenaufteilung und zum anderen der Zusammenhang zwischen optimierten Zuverlässigkeitskosten und Schadenspotentialen von Interesse. Die relative Kostenaufteilung (vgl. Abbildung 29) zeigt, dass der Anteil der Zuverlässigkeitskosten  $r_{zuv}$  (vgl. Gl. (77)) mit einem zunehmenden Schadenspotential sinkt, während sich der Anteil der Risikokosten  $r_{ris}$  (vgl. Gl. (78)) gegenteilig verhält. Bis zu einem Schadenspotential von  $100.000 \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$  bilden die Zuverlässigkeitskosten mit über 80 Prozent den größeren Anteil an den Gesamtkosten. Bei einem Schadenspotential von  $1 \text{ Mio.} \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$  sind die Anteile ungefähr gleich groß und anschließend übersteigen die Risikokosten die Zuverlässigkeitskosten.

$$r_{zuv} = \frac{C_{zuv}}{C_{ges}} \quad (77)$$

$$r_{ris} = \frac{C_{ris}}{C_{ges}} = \frac{SP \cdot P_f}{C_{ges}} \quad (78)$$

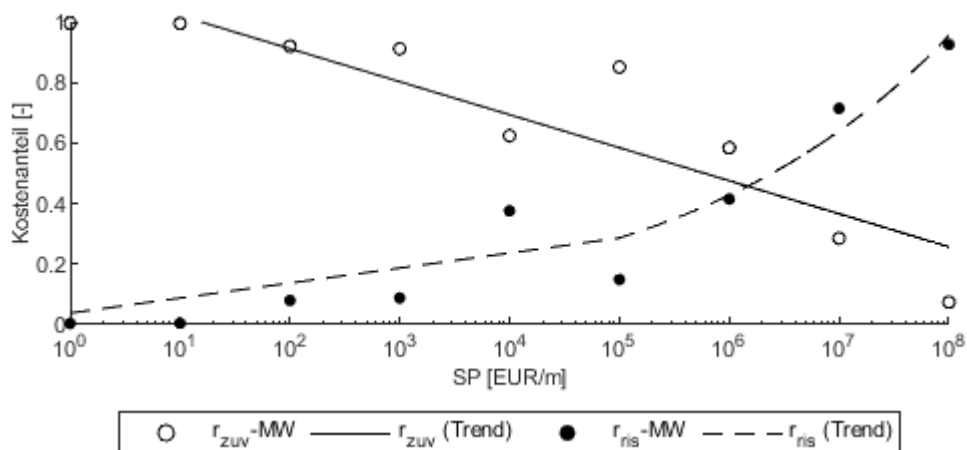
Sind die Zuverlässigkeitskosten für ein Deichbauprojekt bekannt (z. B. durch das Vorliegen eines Angebots), so lässt sich aus Gl. (77) und Gl. (78) die mit

dem Bau zu erzielende Versagenswahrscheinlichkeit  $P_{f,erf}$  nach Gl. (79) bestimmen.

$$P_{f,erf} = \frac{C_{zuv} \cdot r_{ris}}{r_{zuv} \cdot SP} \quad (79)$$

Aus Abbildung 30 geht der Zusammenhang zwischen den optimierten Zuverlässigkeitskosten und dem Schadenspotential hervor. Infolge  $C_{zuv,min}$  ergibt sich ein unterer Abszissengrenzwert. Aus dem Minimum der Versagenswahrscheinlichkeit  $P_{f,min} = 2,7 \dots 4,3 \cdot 10^{-4} \approx 3,0 \cdot 10^{-4}$  ( $P_{f,min}$  schwankt infolge des numerischen Verfahrens) ergibt sich bei einem Schadenspotential von  $10 \text{ Mio. } \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$  eine Anwendungsgrenze für homogene Flussdeiche<sup>5</sup>. Bei größeren Schadenspotentialen lässt sich innerhalb der Suchintervalle keine Minderung der Versagenswahrscheinlichkeit durch höhere Zuverlässigkeitskosten hervorgerufen. Daher steigen die Gesamtkosten ab diesem Grenzwert mit  $\Delta C_{ges} \approx P_{f,min} \cdot \Delta C$ . Somit kommt der obere Grenzwert der Zuverlässigkeitskosten  $C_{zuv,max} = 9.437,69 \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$  infolge einer nicht weiter sinkenden Versagenswahrscheinlichkeit nicht zum Tragen.

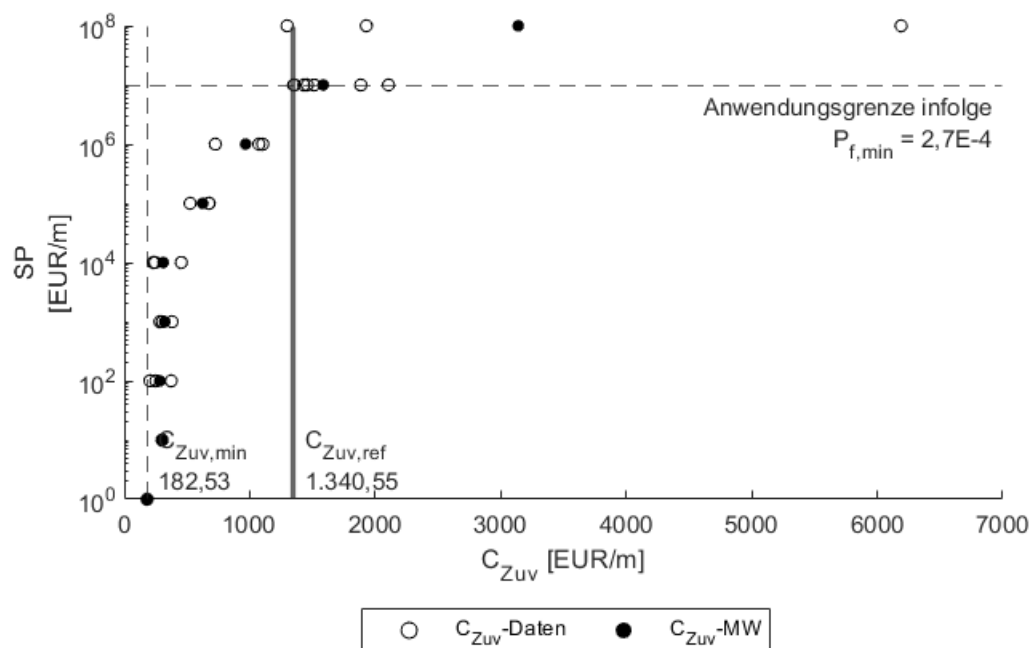
Aus der Darstellung lassen sich nun sowohl Anwendungsbereiche einzelner Zuverlässigkeitskosten als auch Empfehlungen für Zuverlässigkeitskosten bei definierten Schadenspotentialen ableiten. So empfiehlt sich die



**Abbildung 29: Relative Zuverlässigkeits-  $r_{zuv}$  und Risikokosten  $r_{ris}$  für**

$$1 \frac{\text{EUR}}{\text{m}} < SP < 100 \text{ Mio. } \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$$

<sup>5</sup> Die Anwendungsgrenzen gelten nur für Flussdeiche, die ähnliche Konfigurationen wie der Referenzdeich aufweisen.



**Abbildung 30: Optimierte Zuverlässigkeitskosten  $C_{Zuv}$  homogener Flusdeiche für  $1 \frac{\text{EUR}}{\text{m}} < SP < 100 \text{ Mio.} \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$ ; Daten: Simulationsergebnisse, MW: gemittelte Werte**

Verwendung des Referenzdeiches zum Beispiel für Schadenspotentiale von  $1 \text{ Mio.} \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$  bis  $10 \text{ Mio.} \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$ , oder es sind aber für ein Schadenspotential von  $1 \text{ Mio.} \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$  Zuverlässigkeitskosten in Höhe von ca.  $700 \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$  bis  $1.100 \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$  zu erwarten.

## **5 Der Beitrag zu einem ganzheitlichen HWRM**

### **5.1 Einführung**

Als natürliche Phänomene folgen Hochwasser physikalischen Grundsätzen, welche im HWRM unabhängig von gesellschaftlichen Belangen Gültigkeit besitzen. Entsprechend gilt es im Hochwasserfall, das Wasservolumen einer endlichen Welle so zu steuern, dass die geringstmöglichen negativen Konsequenzen im Flusseinzugsgebiet auftreten (Minimierung des Risikos).

Gekoppelt an die örtlichen hydraulischen Verhältnisse weist die Wahrscheinlichkeit eines hydraulischen Ereignisses (vgl. Gl. (1)) bzw. die Versagenswahrscheinlichkeit (vgl. Gl. (2)) eine räumliche Abhängigkeit entlang der Gewässerlängsachse auf. Wird Wasser im Ereignisfall z. B. infolge Versagen in ein Überflutungsgebiet abgeschlagen, so reduziert dies sowohl den Abfluss als auch die Wasserstände unterstrom und realisiert im Überflutungsgebiet gleichzeitig die Konsequenzen einer unplanmäßigen Flutung. Es kommt zur Retention der Hochwasserwelle und zur Entlastung des Systems für Unterlieger. Im Umkehrschluss bedeutet dies auch, dass sich die Hochwassersituation verschärft, sollte eine Retention der Hochwasserwelle wider Erwarten ausbleiben. Dies kann beispielsweise durch einen geringen Rückhalt von Nie-



derschlag in der Fläche, das Nichtversagen eines weniger zuverlässig geplanten Abschnitts oder durch eine ungenügende Synchronisierung der Polderaktivierung mit dem Verlauf der HW-Welle hervorgerufen werden.

In Bezug auf den Entwurf von baulichen Maßnahmen, lässt sich daraus für ein ganzheitliches HWRM ableiten, dass sowohl die Über- als auch die Unterbemessung selbiger für die Risikominderung eines ganzen Einzugsgebiets nachteilig sind. Dementsprechend bedarf es einer möglichst präzisen Beschreibung der Zuverlässigkeit baulicher Maßnahmen und ihrer Auswirkungen auf die Hydraulik des Einzugsgebiets. Auf diese Weise können Maßnahmenentwürfe durch die Kenntnis ihrer Versagenswahrscheinlichkeiten und potentieller Konsequenzen anhand ihrer Risikowerte verglichen werden. Dies verbessert die Vergleichbarkeit von HWRM-Maßnahmen gegenüber dem Status quo, für welchen vielfach das Senken des lokalen Hochwasserstands genügt.

Vor diesem Hintergrund sind für ein Einzugsgebiet somit u. a. Maßnahmen des Flächenrückhalts, Gewässeraufweitungen, Deichbaumaßnahmen, temporäre Hochwasserschutzmaßnahmen und Maßnahmen des hochwasserangepassten Bauens in Verbindung mit operationellen Maßnahmen als HWRM-Maßnahmen miteinander zu vergleichen und zu einem geeigneten und integralen Maßnahmenpaket zu entwickeln.

## **5.2 Entwicklungen auf dem Gebiet des HWRM**

### **5.2.1 Allgemeines**

Mit diesem Teilkapitel wird eine aus Sicht des Autors relevante Auswahl wissenschaftlicher Erkenntnisse zu klimatischen, gesellschaftlichen und die Zuverlässigkeit betreffenden Entwicklungen zusammengefasst, welche die Einordnung des vorgeschlagenen Ansatzes unterstützen.

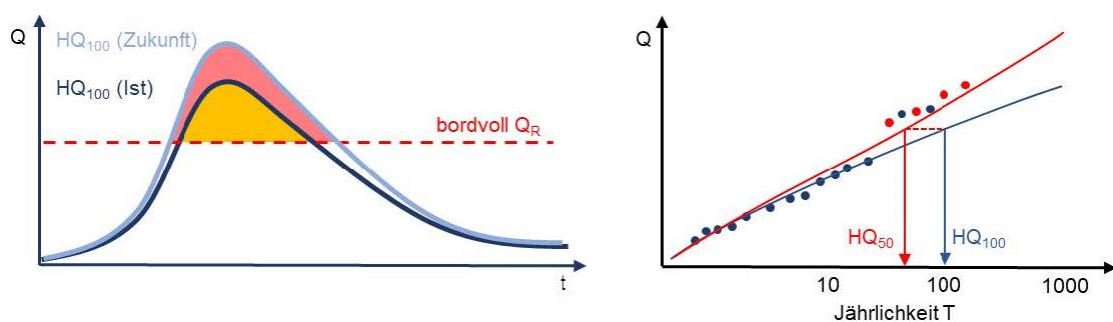
### **5.2.2 Veränderung des Wasserkreislaufs**

Wie der 1988 gegründete Weltklimarat (engl.: Intergovernmental Panel on Climate Change, kurz: IPCC) in seinem sechsten Sachstandsbericht

von 2021 / 2022 zum wiederholten Mal beschreibt, intensiviert sich der Wasserkreislauf global als Folge der sich erwärmenden Atmosphäre (IPCC, 2021). Unter anderem ist hierfür das Vermögen der Luft ursächlich pro Kelvin Temperaturzunahme 7 Prozent mehr Wasser in Form von Dampf aufzunehmen (Brown, 1951).

In der Folge werden globale Veränderungen bei der Anzahl und der Intensität von Niederschlagsereignissen erwartet (IPCC, 2021). In Mitteleuropa und so auch in Deutschland verschieben sich saisonale Zyklen: so ist von stärkeren Niederschlägen im Winter und geringeren Niederschlägen im Sommerhalbjahr auszugehen (Clark, 2007; UBA, 2011). Diese lassen sich für einzelne Messstationen im Süden Deutschlands bereits anhand der Gebietsniederschläge feststellen (Arbeitskreis KLIWA, 2021). In Bezug auf die Hochwasserabflüsse zeigen sich im selben Untersuchungsgebiet bereits ganzjährig überwiegend zunehmende Trends (Arbeitskreis KLIWA, 2021). Diese sind nicht mit der Entwicklung von mittleren Abflüssen gleichzusetzen, weil sie sich ausschließlich auf die Analyse von Extremereignissen (Monats- bzw. Jahresmaxima) beziehen. In der Praxis wird einer derartigen Änderung durch die in Abbildung 31 skizzierte Anpassung der Jährlichkeit eines hydraulischen Ereignisses Rechnung getragen (DWA, 2012).

Durch den Betrieb und den kontinuierlichen Ausbau eines flächendeckenden Pegelnetzes sowie die methodische Entwicklung der Datenauswertung (Bramer, 2019; Büttner et al., 2019; Morgenschweis, 2022; Mudersbach,



**Abbildung 31: Erwartete Änderungen (schematisch) einer Hochwasserganglinie (links) und der Jährlichkeit eines Hochwasserereignisses als Folge einer durch den Klimawandel bedingten Abflusszunahme (rechts) (Bildquelle: Mudersbach, 2020)**

2021; Papadakis et al., 2019) werden in Deutschland hydrologische und hydraulische Zeitreihen erfasst, deren Auswertung sowohl eine stochastische Beschreibung der Einwirkungen (z. B. Wasserstand und Abfluss) als auch die Identifikation von klimawandelbedingten Trends erlaubt. Folglich stehen diese Informationen auch für den risikobasierten Entwurf von HWRM-Maßnahmen zur Verfügung.

### 5.2.3 Gesellschaftliche Entwicklungen

In Reaktion auf die Hochwasserereignisse 1997 im Einzugsgebiet der Oder und 2002 im Einzugsgebiet der Elbe wurde der in Deutschland überwiegend föderal organisierte Hochwasserschutz von den obersten Landesbehörden gestärkt. Einen quantitativen Eindruck der finanziellen Ausstattung ausgewählter, zuständiger Landesbehörden gibt Anhang 7 für die Jahre 2017 bis 2022. Beispiele der vorgenannten Stärkung sind die Änderung des Sächsischen Wassergesetzes 2004 (Müller, 2022)), die Einrichtung von Landeshochwasserzentralen, die Einführung eines Lastfalls Klimaänderung in Baden-Württemberg 2005 (LfU, 2005) oder das nationale Hochwasserschutzprogramm (LAWA, 2014). Konsequenterweise wurden seit dem HW 2002 allein in Sachsen Investitionen in Höhe von ca. 3,4 Mrd. EUR für den technischen Hochwasserschutz (z. B. für die Errichtung und Sanierung von Deichen, den Bau von Poldern oder die Integration von temporären Maßnahmen in innerstädtischen Bereichen) angestrengt (Müller, 2022). In Sachsen-Anhalt wurden seit 2003 Flächen (in Summe ca. 9286 ha, davon 2020 fertiggestellt: 16 %) identifiziert, die durch die Rückverlegung von Deichen wieder dem Abflussgeschehen der Fließgewässer zugeschlagen werden können (MULE, 2021). Außerdem wurde seit dem Hochwasser 2013 im Einzugsgebiet der Elbe ein großer Anteil der Flussdeiche in Sachsen-Anhalt saniert. Dies zeigt sich anhand des von 50 % (2013) auf 72 % (2020) gesteigerten Anteils der Deichstrecken, welche mit dem Stand der Technik konform sind (MULE, 2021).

Auf Europäischer Ebene wurde 2007 die Europäische Hochwasserrisikomanagementrichtlinie eingeführt (siehe auch: EG-HWRM-RL, Europäische Gemeinschaft (2007)). Diese verlangt die grenzübergreifende Abstimmung

von HWRM-Maßnahmen und zielt auf ein HWRM für ganze Flusseinzugsgebiete. Weiterhin knüpft sie an bauliche Maßnahmen in und an Gewässern die Forderung, dass die Hochwassergefährdung durch diese nicht zunehmen darf. Nach diesem Verschlechterungsverbot ist bei der Ausweisung neuer Baugebiete auf deren Lage zum Gewässer zu achten und eine ggf. bestehende Hochwassergefährdung in die Planung einzubeziehen. Doch während Beispiele wie Winter (2003), Staatskanzlei (2022) oder Münster (2015) ungeachtet des Verbots eine zum Teil fehlgeleitete Ausweisung von Bauland in Überflutungsgebieten verdeutlichen, zeigen Serra-Llobet et al. (2022) anhand der Beispiele USA, Frankreich und Quebec (Kanada), dass ausgewiesene Überflutungsgebiete von der Gerinnehydraulik entkoppelt definiert sind.

Darüber hinaus bewirkt eine bestehende Deichlinie bei den Einwohner:innen im Hinterland ein Gefühl der absoluten Hochwassersicherheit, so dass private Investitionen in die attraktiven, gewässernahen Wohnlagen zum Anstieg der Vulnerabilität hinter einem Deich führen (Akhter et al., 2021; Ludy & Kondolf, 2012; Serra-Llobet et al., 2022).

Zusätzlich verursachen demographische Entwicklungen wie z. B. die Urbanisierung eine anthropogene Veränderung des Wasserkreislaufs. So übersteigt der allgemeine Flächenverbrauch in Deutschland mit 40 ha / Tag (Statistisches Bundesamt, 2022) nach wie vor das politische Ziel von weniger als 30 ha / Tag ab dem Jahr 2020 (Deutscher Bundestag, 2021). Dabei verringert die Flächenversiegelung das Vermögen, Wasser auf der Geländeoberfläche zurückzuhalten und steigert daher den abflusswirksamen Anteil des Niederschlags (Knieling et al., 2013). Dies zieht eine Abflusszunahme in den Fließgewässern nach sich und erhöht durch die korrespondierenden, höheren Wasserstände tendenziell die hydraulischen Einwirkungen auf HWRM-Maßnahmen (z. B. Flussdeiche).

Während also einerseits zielgerichtete Anstrengungen unternommen werden das Hochwasserrisiko auf Landesebene zu reduzieren, werden daraus entstehende positive Effekte mit den negativen Folgen einer fehlgeleiteten Ausweisung von Baugebieten und einem hohen Flächenverbrauch als Gesellschaft überlagert.

#### 5.2.4 Entwicklungen zum Prozessverständnis der Deichzuverlässigkeit

Um eine wahrscheinlichkeitsbasierte Modellierung von Zuverlässigkeit in der Geotechnik zu ermöglichen stieß Calle (1996) eine Initiative zur statistischen Erfassung von bodenmechanischen Kennwerten an. Dafür sollten die Erkenntnisse zum Verhalten ähnlicher Böden überregional zusammengetragen und einer probabilistischen Folgenutzung zugeführt werden. Nachdem die dazu nötige Recherchearbeit aufgrund vielfach projektbezogen abgelegter Bodengutachten mit einem hohen personellen Aufwand verbunden war, wird dieser mit der Veröffentlichung von Bodeninformationen aus öffentlichen Aufträgen infolge des Geologiedatengesetz (GeolDG, 2020) nun erheblich reduziert. In dem u. a. durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt GeoValML entwickelt die Bundesanstalt für Wasserbau seit 2017 ein interoperables Datenaustauschformat, welches derlei Bodeninformationen in den Fokus wasserbaulicher Anwendungen rückt (Kunz, 2021). Für die Datenauswertung liefern z. B. Lacasse und Nadim (1996), Lacasse et al. (2007) oder Länsivaara et al. (2021) methodische Grundlagen und unterstützen mit ihren eigenen Beobachtungen gleichzeitig die Validierung weiterer Ergebnisse.

Für eine verbesserte Beschreibung der Deichzuverlässigkeit widmen sich jüngere, im Kontext stehende Forschungsarbeiten den bodenmechanischen und geohydraulischen Prozessen im Deich, ihrer phänomenologischen Beschreibung und ihrer Quantifizierung.

So beschreibt Haselsteiner (2017) die Alterung von Deichen und dokumentieren Özer et al. (2019) ihre Beobachtungen zu deren Quell- und Schwindverhalten. Mit probabilistischen Analysen zur Sickerströmung sowohl in homogenen als auch in gegliederten Querschnitten weisen Schwiersch et al. (2021) auf Ungewissheiten in der gängigen geohydraulischen Analyse von Drainagekörpern und Dichtungen hin. Ebenso werden bestehende Grenzzustandsgleichungen auf ihre Aktualität hin geprüft und wie z. B. bei der inneren Erosion nach geeigneteren, mathematischen Formulierungen gesucht (Wewer et al., 2021).

In der Summe finden also eine Erweiterung des Prozessverständnisses und eine Präzisierung in der Zuverlässigkeitsbeschreibung statt. In Bezug auf

HWRM-Ansätze bedeutet dies, dass Maßnahmen des HWRM gezielter auf die örtlichen Anforderungen abgestimmt und somit effizienter gestaltet werden können.

### 5.3 Einordnung des vorgeschlagenen Ansatzes

Der Bau von Flussdeichen stellt im ganzheitlichen HWRM lediglich eine Maßnahme zur Risikominderung im Flussgebiet dar. Eine Auswahl weiterer Maßnahmen sind

- (1) die Steigerung des Flächenrückhalts im HW-Entstehungsgebiet (z. B. durch Aufforstung oder Anforderungen an die Flächennutzung),
- (2) die Retention der HW-Welle (z. B. durch den Bau von Poldern oder Gewässeraufweitungen),
- (3) die lokale Steigerung der Abflusskapazität (z. B. durch die Errichtung von Flutrinnen) und
- (4) die Reduktion negativer HW-Konsequenzen im Falle einer Flutung (z. B. durch Bauverbote oder Anforderungen hinsichtlich HW-angepassten Bauens).

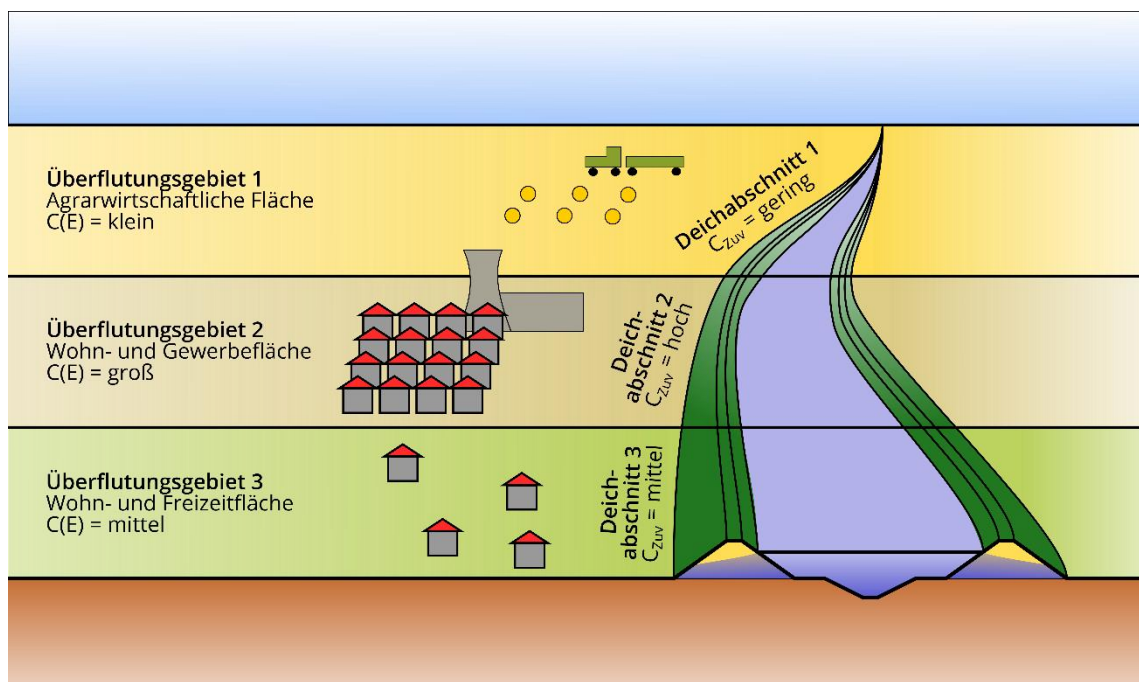
Wird für einen Gewässerabschnitt der Bau eines Flussdeiches als Mittel der Wahl angesehen, so ist für diesen Abschnitt die mit dessen Versagen assoziierte Überflutungsfläche zu bestimmen. Anhand dieser lässt sich das Schadenspotential ermitteln und auf die Länge des Deichabschnitts beziehen (linienbezogenes Schadenspotential). Über den Ort der Maßnahme innerhalb des Einzugsgebiets und die Konstruktion des Flussdeichs sind sowohl die hydraulischen als auch die geometrischen und materialtechnischen Randbedingungen definiert, sodass sich die Versagenswahrscheinlichkeit des Deichs bestimmen lässt (vgl. 3.3).

Mit Hilfe des vorgeschlagenen Ansatzes lässt sich anschließend die Optimierung für ein eingangs zu definierendes Grenzkriterium des Risikos (z. B. ökonomisches Optimum, absolute oder relative Änderung, vgl. 4.2) durchführen. Ein akzeptabler Risikowert ließe sich entweder über eine volkswirtschaftliche Analyse oder als Ergebnis eines politischen Diskurses finden. Als Ergebnis resultiert eine für die örtlichen hydraulischen und geotechnischen

Randbedingungen des Einzugsgebiets optimierte Konstruktion. In Kapitel 4 ist dies zur Veranschaulichung an einem vereinfachten, homogenen Deich unter stationären geohydraulischen Randbedingungen gezeigt worden.

Infolge der hydraulischen und geotechnischen Randbedingungen besitzt jede Konstruktion nach der Optimierung jeweils einen Wert der Versagenswahrscheinlichkeit, einen für die Zuverlässigkeits- und einen für die Risikokosten.

Für die Planung einer Deichlinie bedeutet die ökonomische Optimierung, dass höhere Zuverlässigkeitskosten für die Deichabschnitte akzeptiert werden, welche Überflutungsgebiete mit großen monetären Konsequenzen vom Gewässerschlauch trennen. Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 32 ein mögliches, stilisiertes Planungsergebnis. Dabei werden für die agrarwirtschaftlich genutzte Fläche des Überflutungsgebiets 1 kleine Konsequenzen im Versagensfall erwartet, sodass mit dem risikobasierten Planungsansatz kleine Zuverlässigkeitskosten und gleichsam eine höhere Versagenswahrscheinlichkeit für die Planung des Flussdeiches resultiert.



**Abbildung 32:** Stilisiertes Ergebnis des risikobasierten Entwurfs von Flusdeichen für einen eingedeichten Gewässerabschnitt

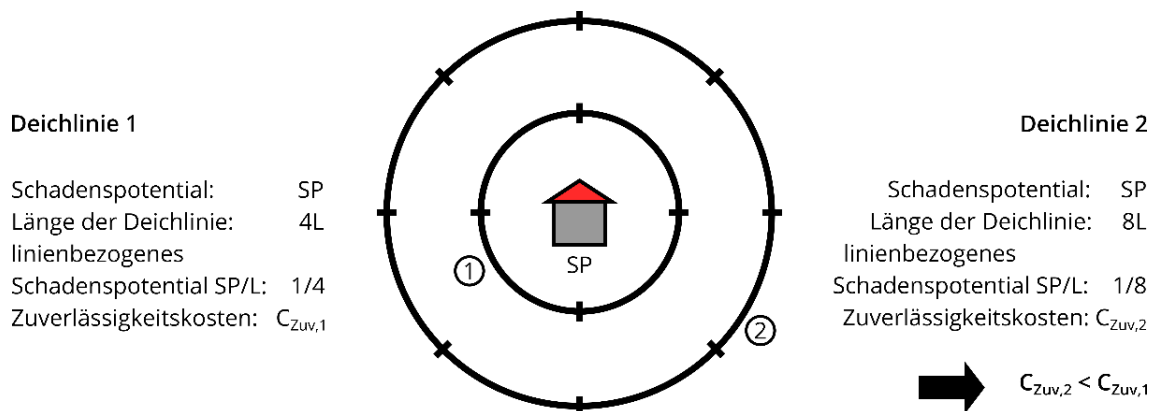
Optimierte Zuverlässigkeitskosten ermöglichen eine vergleichende Kosten-Nutzen-Analyse zwischen Planungsvarianten. Den Nutzen beschreibt die Änderung des Hochwasserrisikos im Einzugsgebiet  $\Delta HWR$  über die Nutzungsdauer des Deichabschnitts  $t_{\text{Nutzen}}$ . Entsprechend Gl. (80) lässt sich dieser mit den Zuverlässigkeitskosten vergleichen.

$$\frac{\text{Nutzen}}{\text{Kosten}} = \frac{\Delta HWR \cdot t_{\text{Nutzen}}}{C_{\text{Zuv}}} \text{ in } \left[ \frac{\text{EUR/a} \cdot \text{a}}{\text{EUR}} \right] \quad (80)$$

Dies lässt sich beispielsweise am Vergleich zweier Deichlinien veranschaulichen. Schirmen zwei Deichlinien in etwa das gleiche Überflutungsgebiet vom Gewässer ab (konstantes Schadenspotential, vgl. Abbildung 33) und wird weiterhin angenommen, dass beide Deichlinien die gleiche Versagenswahrscheinlichkeit aufweisen, so unterscheiden sie sich hinsichtlich des linienbezogenen Schadenspotentials. Je länger der Streckenverlauf ist, desto kleiner wird das linienbezogene Schadenspotential. Gleichzeitig fallen aufgrund der räumlichen Ausdehnung größere Herstellungskosten für den längeren Streckenverlauf an. Vor dem Hintergrund der Erkenntnisse aus 4.3 gehen daher kürzere Deichlinien mit

- größeren, akzeptablen Zuverlässigkeitskosten und
- kleineren, akzeptablen Risikokosten einher.

Folglich verhält es sich für längere Deichlinien umgekehrt. Mit Blick auf das Nutzen-Kosten-Verhältnis leitet sich daraus die Empfehlung ab, dass kürzere



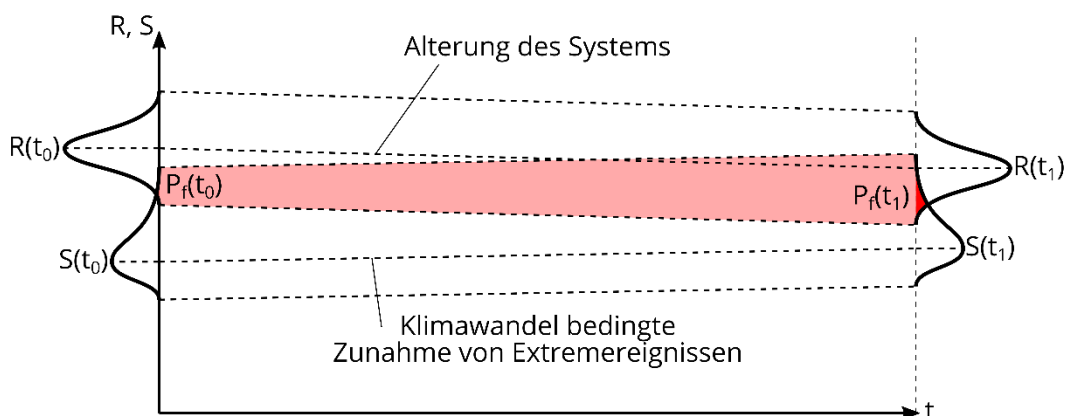
**Abbildung 33: Optimale Zuverlässigkeitskosten für zwei Deichlinien bei konstantem Schadenspotential**



Deichlinien ein besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen und eher zu realisieren sind als längere Deichlinien. Je länger die Deichlinie bei konstantem Schadenspotential wird, desto eher gilt es zu prüfen, ob die Errichtung eines Deichs die bestgeeignete Maßnahme darstellt. Dieser volkswirtschaftliche Zusammenhang gibt nicht nur der konkreten Planung, sondern gleichsam auch der HWR-Kommunikation wertvolle Argumente für ein mögliches Beteiligungsverfahren an die Hand.

Der vorgeschlagene Ansatz beschränkt sich auf homogene Deichquerschnitte und stationäre Verhältnisse. Diese systemische Vereinfachung beschränkt die Übertragbarkeit auf bestehende und gegliederte Deiche (vgl. 3.5) sowie auf weitere relevante Versagensmechanismen (wie z. B. Überströmen oder innere Erosion). Für komplexere Anwendungen, wie z. B. für zonierte Deiche bedarf der Ansatz methodischer Erweiterungen, von denen Ausgewählte in Kapitel 5.4 näher erläutert sind.

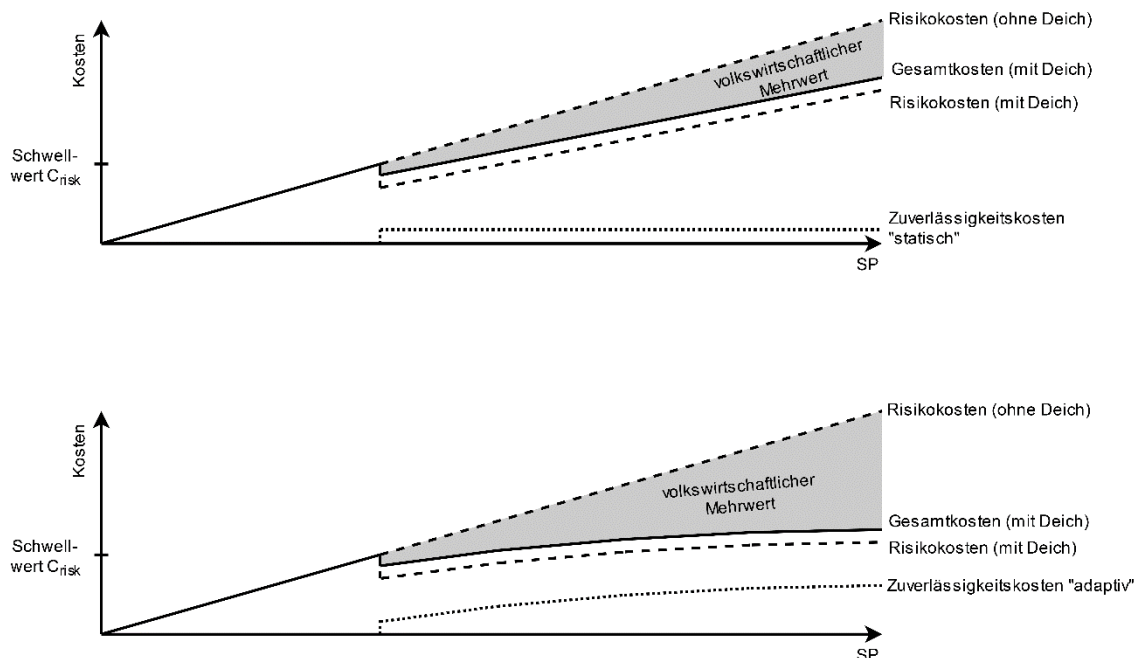
Das zu betrachtende System ist in Realität jedoch nicht stationär, denn sowohl die Einwirkungen  $S$  als auch die Widerstände  $R$  unterliegen Trends. Während die Einwirkungen u. a. aufgrund der in 5.2.2 und 5.2.3 aufgeführten Entwicklungen im Mittel ansteigen, wächst die Erkenntnis, dass die Widerstände als Folge von Alterungsprozessen im Mittel abnehmen (vgl. 5.2.4). Vor diesem Hintergrund vernachlässigt der vorgeschlagene Ansatz, dass die Versagenswahrscheinlichkeit der Flussdeiche über ihre technische Lebenszeit



**Abbildung 34:** Zeitliche Veränderung der Versagenswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung von Trends bei Widerstand  $R$  und Einwirkung  $S$ .

hinweg tendenziell zunimmt. Abbildung 34 skizziert dies anhand der Überlagerung von je einer im Mittel veränderlichen Verteilung für die Einwirkung und den Widerstand zu den Zeitpunkten  $t_0$  und  $t_1$ .

Weiterhin vernachlässigt der Ansatz den Abwägungsprozess, dessen Ergebnis der bestgeeignete Maßnahmentyp für ein Untersuchungsgebiet ist. Aus diesem Grund findet sich in den Ergebnissen des Kapitels 4 auch keine Aussage zum sogenannten Investitionspunkt (engl.: point of invest) und es wird implizit davon ausgegangen, dass ausschließlich Flussdeiche geplant werden. Dennoch sollte die Errichtung eines Flussdeichs grundsätzlich mit einem volkswirtschaftlichen Mehrwert einhergehen, sodass für die praktische Anwendung des Ansatzes ein Schwellwert der Risikokosten nötig ist, ab welchem der Bau eines solchen angedacht wird. Für die Festlegung eines Schwellwerts sind neben den direkt-tangiblen Konsequenzen weitere Konsequenzklassen einzubeziehen (vgl. Abbildung 23), sodass u. a. auch Kriterien der Nachhaltigkeit oder der ökologischen Auswirkungen Berücksichtigung finden.

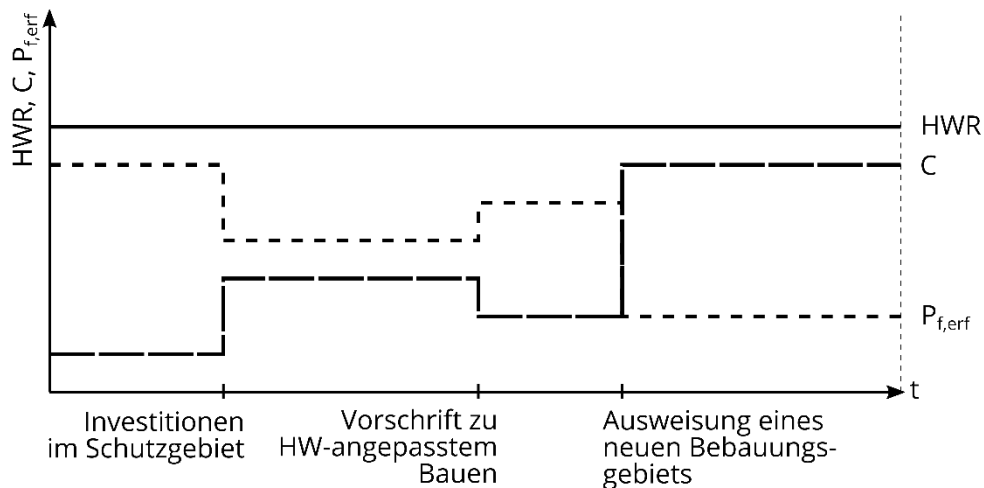


**Abbildung 35:** Schematischer Verlauf der Gesamtkostenfunktion im Falle einer Investition in einen Flussdeich unter Berücksichtigung von (a) statischen und (b) optimierten Zuverlässigkeitskosten.

Abbildung 35 verdeutlicht den volkswirtschaftlichen Mehrwert oberhalb eines solchen Schwellwerts sowohl für statische als auch optimierte Zuverlässigkeitskosten. Darüber hinaus skizziert sie die insbesondere bei großen Schadenspotentialen vorteilhafte Wirkung optimierter Zuverlässigkeitskosten.

In Wechselwirkung mit den Zuverlässigkeitskosten ergeben sich gleichsam optimierte Versagenswahrscheinlichkeiten. Anhand dieser können die Risikokosten eingeschätzt und ein Flussdeichentwurf mit weiteren HWRM-Maßnahmen im Einzugsgebiet wie z. B. den eingangs Genannten, abgestimmt und nach Baufertigstellung ein kontinuierliches HWR-Monitoring betrieben werden. Auf dieser Grundlage lassen sich Entwicklungen, die zur Steigerung des HWR beitragen, frühzeitig identifizieren und es kann ihnen entgegengewirkt werden.

Letztlich stellt die praktische Umsetzung einer nach dem hier vorgestellten Ansatz optimierten Deichlinie einen langwierigen u. a. mit Planfeststellungsverfahren verbundenen Prozess dar. Im Gegensatz dazu, sind die Nutzung des Überflutungsgebiets und somit auch die HW-Konsequenzen kurz- bis mittelfristig veränderlich. Um den Wert des HWR in einem Gebiet konstant zu halten, bedeute dies eine womöglich kontinuierliche Veränderung der Zuverlässigkeitsanforderungen an den Flussdeich. Werden z. B. Investitionen in ein Schutzgebiet getätigt, steigen i. d. R. die HW-Konsequenzen an und muss die zur Begrenzung des HWR erforderliche Versagenswahrscheinlichkeit sinken (vgl. Abbildung 36).



**Abbildung 36: Zeitliche Entwicklung der erforderlichen Versagenswahrscheinlichkeit  $P_{f,erf}$  und der Konsequenzen  $C$  im Falle eines konstanten HWR-Wertes**

Eine Veränderung der erforderlichen Versagenswahrscheinlichkeit bedarf i. d. R. baulicher Anpassungen, welche durch mittel- bis langfristige Planungsprozesse geleistet werden können. Daher sind mittel- bis langfristig gültige Planungsrandbedingungen bzw. vorausschauendes Handeln von Entscheider:innen nötig. In der Konsequenz kann dies z. B. umfangreiche Studien im Vorfeld eines Deichbauprojekts zur Prognose des Schadenspotentials oder risikobasierte Vorgaben an die Siedlungsentwicklung bedeuten.

Letztlich ist der vorgestellte Ansatz als ein Element des in den letzten zwei Jahrzehnten angestoßenen Paradigmenwechsel vom Hochwasserschutz zum Hochwasserrisikomanagement zu verstehen. Dieser beinhaltet den Wechsel von der Deterministik zur Probabilistik und die damit verknüpften methodischen Entwicklungen zur Schaffung stochastischer Planungsgrundlagen und zur Implementierung probabilistischer Entwurfsmodelle. Durch den vorgestellten Ansatz wird die methodische Lücke zwischen der Probabilistik und dem risikobasierten, konstruktiven Planen geschlossen. Dies gelingt durch die Bestimmung bodenmechanischer Verteilungen, die Anwendung probabilistischer Verfahren auf die Böschungstabilität sowie die Verknüpfung der probabilistisch begründeten Stabilitätsaussagen mit

den Hochwasserkonsequenzen und Zuverlässigkeitskosten. Vor dem Hintergrund vorangegangener Forschung (vgl. 5.2) schafft sie somit pilothaft die Grundlage für weitere risikobasierte Planungsansätze im HWRM.

## 5.4 Fazit und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines risikobasierten Planungsansatzes für HWRM-Maßnahmen. Am Beispiel homogener Flussdeichquerschnitte wird für die erste, eingangs genannte Handlungsoption – die Steuerung der Versagenswahrscheinlichkeit – eine Methodik entwickelt.

Im Zuge der Methodikentwicklung fokussiert diese Arbeit eingangs auf die Schaffung der für probabilistische Analysen notwendigen, stochastischen Datengrundlage. Dies gelingt für Bodenkenngrößen nur unter Verwendung von Transformationsmodellen. In der Folge wird ein überregional zusammengetragener Klassifikationsdatensatz, welcher Informationen zur Kornverteilung und zu den plastischen Bodeneigenschaften beinhaltet, für statistische Analysen zugänglich und erlaubt die stochastische Modellierung von entwurfsrelevanten Bodenkenngrößen. Im Ergebnis präsentiert diese Arbeit mehrheitlich plausible, stochastische Eigenschaften der Porenzahl, der Trocken- und Sättigungswichte, des inneren Reibungswinkels und der gesättigten Durchlässigkeit. Die dafür entwickelte Methodik zur indirekten Bestimmung von Ungewissheiten in Bodenkenngrößen ist bei Verfügbarkeit adäquater Transformationsmodelle grundsätzlich auf weitere Bodenparameter übertragbar.

Anschließend wird für den risikobasierten Planungsansatz eine zweite Methodik entwickelt, welche die Identifikation von geometrischen und materialtechnischen Steuerungsvariablen der Versagenswahrscheinlichkeit über analytische Zuverlässigkeitsanalysen ermöglicht. Diese wird unter Verwendung der stochastischen Ergebnisse in einem analytischen Modell der landseitigen Böschungstabilität implementiert. Infolgedessen zeigt sich, dass sich die landseitige Böschungsneigung, der Erwartungswert des inneren Reibungswinkels, dessen Variationskoeffizient und der Erwartungswert der Porosität als aussichtsreiche Steuerungsgrößen der Böschungstabilität erweisen.

Im Weiteren werden die gewonnenen Erkenntnisse verwendet, um die Versagenswahrscheinlichkeit mit monetär bewerteten, direkt-tangiblen Konsequenzen zum Risiko zu kombinieren. Anschließend entwickelt Kapitel 4 ein zunächst für die Anwendung auf homogene Flussdeiche vorgesehenes Optimierungsverfahren. Dieses ist in der Lage, sich einem Optimum der Zuverlässigkeits- und der Risikokosten numerisch zu nähern und so eine risikooptimierte Lösung herbeizuführen. Für den in dieser Arbeit als Referenz verwendeten, homogenen Flussdeich werden so die Risiko- und Zuverlässigkeitskosten für Schadenspotentiale bis 100 Mio.  $\frac{\text{EUR}}{\text{m}}$  optimiert.

Den Paradigmenwechsel vom Hochwasserschutz zum probabilistischen Hochwasserrisikomanagement begleitend empfiehlt die Arbeit das ganzheitliche Abwägen bei der Auswahl und Ausgestaltung einzelner HWRM-Maßnahmen aus der Gesamtheit aller denkbaren Maßnahmenoptionen. Dies hat zum Ziel, ein Optimum im HWRM für das jeweilige Flussgebiet zu erreichen. Für den Fall, dass Flussdeiche das Ergebnis dieses Abwägungsprozesses sind, leistet sie dafür einen in die bodenmechanische Ebene (Mikroebene), die geostatische Ebene (Mesoebene) und volkswirtschaftlich für das HWRM (Makroebene) dreigeteilten, methodischen Beitrag.

In Summe gelingt es mit dieser Arbeit, einen vorrangig für homogene Flussdeiche geeigneten, potentiell jedoch auf weitere, technische Maßnahmen des HWRM übertragbaren, risikobasierten Planungsansatz zu entwickeln. Dabei ergänzen die entwickelten Methodiken und quantitativen Ergebnissen die bislang rein qualitativen Empfehlungen des geltenden Regelwerks zur Steuerung des HWR und leisten somit einen Beitrag

- zur volkswirtschaftlich orientierten Flussdeichkonfiguration,
- zur lokalen, risikobasierten Planung und
- zu einem ganzheitlichen HWRM.

Zur Fortführung dieser Arbeit und um die Praxis des HWRM weiter zu einem ganzheitlichen Ansatz zu führen, bedarf es der Validierung der vorgestellten und der Bestimmung zusätzlicher bodenmechanischer Verteilungen. Dies sollte vorzugsweise durch die direkte Auswertung von bemessungsrelevan-

ter Kenngrößen erfolgen. Eine derartige Datengrundlage ermöglicht die Anwendung der entwickelten Methodik auf z. B. bestehende und gegliederte Deiche.

Darüber hinaus sollten weitere HWRM-Maßnahmen in den wissenschaftlichen Fokus rücken. Hierfür eignen sich sowohl bauliche (z. B. Hochwasserschutzmauern, temporärer Hochwasserschutz) als auch nicht-bauliche Maßnahmen (z. B. Flächenrückhalt, Bauvorschriften). Bei all ihren Aktivitäten sollte die HWR-Forschung das übergeordnete Ziel verfolgen Werkzeuge zur Abstimmung und zur risikobasierten Planung von HWRM-Maßnahmen für ganze Flussgebiete zu entwickeln. Denn nur ein vorausschauendes und ganzheitliches Handeln wird das HWR nachhaltig und zum Wohle aller gering halten.



## Literaturverzeichnis

Abtahi, M. (2018): *Auswertung von Deichbrüchen und Standsicherheitsuntersuchung repräsentativer Querschnitte mittels probabilistischer Ansätze*, Diplomarbeit, TU Dresden

Akhter, F.; Mazzoleni, M. & Brandimarte, L. (2021): *Analysis of 220 Years of Floodplain Population Dynamics in the US at Different Spatial Scales*, *Water* 13(2), 141, doi:10.3390/w1302014

Albert, A. (Hrsg.) (2014): *Bautabellen für Ingenieure: Mit Berechnungshinweisen und Beispielen*, Bundesanzeiger Verlag

Ameratunga, J.; Sivakugan, N. & Das, B. M. (2016): *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering, Developments in Geotechnical Engineering*, Springer India

Ang, A. H. & Tang, W. H. (1984): *Probability concepts in engineering planning and design*, Wiley

Ang, A. H.-S. & Tang, W. H. (2006). *Probability concepts in engineering planning and design* (2<sup>nd</sup> ed.). Wiley

- Arbeitsausschuss Ufereinfassungen; Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (2012): *Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“: Häfen und Wasserstrassen - EAU 2012*, Wilhelm Ernst & Sohn
- Arbeitskreis KLIWA (2021): *Klimawandel in Süddeutschland: Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen*, Klimamonitoring im Rahmen der Kooperation KLIWA
- Assis, A. P. (2020): *Risk management for geotechnical structures: consolidating theory into practice*, *Soils and Rocks*, 43(3), 311–336.  
<https://doi.org/10.28927/SR.433311>
- Augner, D. (2014). *Laborversuche an Bodenproben: Ermittlung von Bodenkenngrößen*, In: Bundesanstalt für Wasserbau, 65. *Deutsche Brunnenbauertage*, BAW-Baugrundkolloquium, Symposium im Rahmen der Tagung von Bundesanstalt für Wasserbau, Rostrup / Bad Zwischenahn
- Bachmann, D; Huber, N. P.; Johann, G. & Schüttrumpf, H. (2013): *Fragility curves in operational dike reliability assessment*, *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 7(1), 49–60, <https://doi.org/10.1080/17499518.2013.767664>
- Bachmann, D. (2012): *Beitrag zur Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Bewertung und Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen*, Dissertation, RWTH Aachen, Aachen.
- Bachmann, D. (Hrsg.). (2021, 19. Oktober): *ProMaIDes Documentation*, <https://promaides.myjetbrains.com/youtrack/articles/PMID-A-7/General>
- Bachmann, D., Huber, N. P. & Köngeter, J. (2007): *Multikriterielle Entscheidungsunterstützung zur Erstellung von Hochwasserrisikomanagementplänen*, In: H.-B. Horlacher & D. Carstensen (Hrsg.), *Dresdner wasserbauliche Mitteilungen*: Bd. 35, S. 85–94
- Bachmann, D., Kosh Bin Ghomash, S. & Schotten, R. (2021): *Neue Entwicklungen in der Hochwasserrisikoanalyse: Niederschlagsgeneratoren und kritische Infrastrukturen*, *WasserWirtschaft*, 111(11), 32–38.
- Bachmann, D.; Schneppe, F.; Jennings, S.; Huber, N. P.; Schüttrumpf, H. (2011): *Zuverlässigkeitsbezogene Analyse der Emscherdeiche zur Erweiterung*

- des D<sup>3</sup>-HOWIS-Systems: Emscher, Fluss-km 0,0 bis 19,7*, RWTH Aachen, Aachen.
- Baecher, G. B. & Christian, J. T. (2003): *Reliability and statistics in geotechnical engineering*; Wiley
- Bear, J. (2007): *Hydraulics of groundwater* (unabridged slightly corr. republ. of the work New York; McGraw-Hill, 1979), Dover Publications.  
<http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0667/2006050786-d.html>
- Bender, J. (2015): *Zur Ermittlung von hydrologischen Bemessungsgrößen an Flussmündungen mit Verfahren der multivariaten Statistik*, Dissertation, Deutsche Nationalbibliothek
- Benson, C. H. (1993): *Probability Distributions for Hydraulic Conductivity of Compacted Soil Liners*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 119(3), 471–486.
- Blum, U. (2001): *Risiko aus volkswirtschaftlicher Sicht*, In: W. Gleißner & G. Meier (Hrsg.), *Wertorientiertes Risiko-Management für Industrie und Handel: Methoden, Fallbeispiele, Checklisten*, (S. 409–424). Gabler Verlag
- Bold, S. & Pfeiffer, E. (2004): *Analyse und Management des Hochwasserrisikos im Emschergebiet*, In: H. Martin (Hrsg.), *Wasserbauliche Mitteilungen: Heft 27*, S. 191–206, Dresden
- Bottema, M.; Vonk, B.; Janssen, H. & van Waveren, H. (2019): *Mitigating drought risk for levees*, In: 11<sup>th</sup> ICOLD European Club Symposium
- Bramer, M. (2019): *Herausforderungen und Möglichkeiten der neuen hydrologischen Messnetze*, *WasserWirtschaft*, 109(7-8), 36–39.
- Brown, O. L. I. (1951): *The Clausius-Clapeyron equation*, *Journal of Chemical Education*, 28(8), 428, <https://doi.org/10.1021/ed028p428>
- Büttner, U.; Fichtner, T. ; Köhler, U. ; Mudra, C. & Wolf, E. (2019): *Hydraulische Modellierung - Brauchen wir noch Durchflussmessungen?*, *WasserWirtschaft*, 109(7-8), 32–35.
- Calle, E. O. F. (Hrsg.). (1996).: *Characteristic values of geotechnical parameters*, Lecture notes PAO Seminar on "Soft Soil Engineering", Delft

- Caquot, A. & Kérisel, J. (1967): *Grundlagen der Bodenmechanik*, Springer
- CIRIA (2013): *The International Levee Handbook*, CIRIA
- Clark, R. (2007): *Impacts of Climate Change on Precipitation*, In: J. Schanze (Hrsg.): *Flood Risk Management Research: From extreme events to citizens involvement*, S. 19–26, Eigenverlag
- Cramer, E. & Kamps, U. (2017): *Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik: Eine Einführung für Studierende der Informatik, der Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften*, Springer Spektrum
- CUR (1990): *Probabilistic design of flood defences*, CUR report TAW, Band 141
- Davidenkoff, R. (1957): *Durchsickerung durch Deiche und Erddämme (I)*, In: *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau* 8, Band 8, S. 70–84, Karlsruhe
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. (2012): *Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten*, DWA M 552, DWA
- Deutscher Bundestag. (2021, 7. Januar): *Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Daniela Wagner, Christian Kühn (Tübingen), Stefan Schmidt, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Drucksache 19/23814. Flächenverbrauch in Deutschland*, Berlin.
- DIN (2010): *DIN 1055-2 Einwirkungen auf Tragwerke: Teil 2: Bodenkenngrößen*, Berlin, Wien, Zürich. Beuth Verlag GmbH
- DIN (2013): *DIN 19712 Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern*, Berlin, Wien, Zürich, Beuth Verlag GmbH
- DIN (2020a): *DIN EN ISO 14688-2 Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen (ISO 14688-2:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14688-2:2018*; Berlin, Beuth Verlag GmbH
- DIN (2020b): *DIN EN ISO 17892-12 Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 12: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen (ISO 17892-12:2018); Deutsche Fassung EN ISO 17892-12:2018*, Berlin, Beuth Verlag GmbH

- DIN (2021): *E DIN 4084 Baugrund: Geländebruchberechnung*, Berlin, Wien, Zürich, Beuth Verlag GmbH
- Drews, N. (2017): *Investigation of the dike failure near Breitenhagen (Saale River) during the flood in June 2013*, Projektarbeit, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden
- Duden. (2021, 21. Januar): *Risiko*,  
<https://www.duden.de/rechtschreibung/Risiko>
- DWA (2011): *Merkblatt DWA-M 507-1: Deiche an Fließgewässern. Teil 1: Planung, Bau und Betrieb*, DWA M 507-1, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V.
- DWA. (2022): *Merkblatt DWA-M 520 - Probabilistische Methoden im Wasserbau*, unveröffentlichter Entwurf des Gelbdrucks, DWA M 520, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V.
- Eckle-Kohler, J. & Kohler, M. (2017): *Eine Einführung in die Statistik und ihre Anwendungen*, Springer Spektrum,  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-54094-7>
- Ehlers, P. & Winkel, R. (1950): *Bau, Unterhaltung und Verteidigung der Flusssdeiche*, Wilhelm Ernst & Sohn
- Engel, J. (2002): *Verfahren zur Festlegung von Kennwerten für bodenmechanische Nachweise*, Technische Universität Dresden
- Engel, J. (2014): *Geotechnik*, In: A. Albert (Hrsg.): *Bautabellen für Ingenieure: Mit Berechnungshinweisen und Beispielen*, Bundesanzeiger Verlag
- Engel, J. & Lauer, C. (2017): *Einführung in die Boden- und Felsmechanik: Grundlagen und Berechnungen*, Lehrbücher des Bauingenieurwesens. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag
- Engels, H. (1923): *Handbuch des Wasserbaus: Für das Studium und die Praxis*, Verlag von Wilhelm Engelmann
- Erb, C. (1965): *Die Sickerströmung in Erdstaudämmen geringer Höhe*, Dissertation, Institut für Wasserwirtschaft und landwirtschaftlichen Wasserbau der TH Hannover

- Europäische Gemeinschaft (6. November 2007): *Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates: über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (EG-Richtlinie 2007/60/EG)*, Brüssel, Amtsblatt der Europäischen Union.
- Expertise Network for Flood Protection. (2017): *Fundamentals of flood protection*, Ministry of Infrastructure and the Environment and the Expertise Network for Flood Protection.
- Fischer, K.; Barnardo-Viljoen, C. & Faber, M. H. (2012): *Deriving target reliabilities from the LQI*, LQI Symposium in Lyngby, Denmark
- Flikweert, J. & Simm, J. (2008): *Improving performance targets for flood defence assets*, Journal of Flood Risk Management, 1(4), 201–212.  
<https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2008.00021.x>
- Fuchs, S.; Ziesche, M. & Nillert, P. (2017): *Empirische Verfahren zur Ableitung verschiedener Porositätsarten aus Durchlässigkeitsbeiwert und Ungleichkörnigkeitszahl – ein Überblick*, Grundwasser, 22(2), 83–101.  
<https://doi.org/10.1007/s00767-017-0355-2>
- Fülgraff, G. (1993): *Die Bedeutung des Risikobegriffs im gesundheitlichen Umweltschutz*, In: H.-H. Abholz & M. Arnold (Hrsg.): *Kritische Medizin im Argument: Bd. 20. Die Regulierung der Gesundheit*, Argument-Verlag
- GeolDG (2020): *Gesetz zur staatlichen geologischen Landesaufnahme sowie zur Übermittlung, Sicherung und öffentlichen Bereitstellung geologischer Daten und zur Zurverfügungstellung geologischer Daten zur Erfüllung öffentlicher Aufgaben*, BGBl. I S. 1387.
- GGU Gesellschaft für Grundbau und Umwelttechnik (2013): *Saaledaich bei Breitenhagen*, Osterwedding
- Gill, P. E.; Murray, W. & Wright, M. H. (1981): *Practical Optimization*, Academic Press
- Hartung, J.; Elpelt, B. & Klösener, K.-H. (2009): *Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*, Oldenbourg
- Haselsteiner, R. (2007): *Hochwasserschutzdeiche an Fließgewässern und ihre Durchsickerung*, Dissertation, Technische Universität München

- Haselsteiner, R. (2017): *Die Alterung von Deichen und Dämmen - Theoretische Grundlagen, Wissenschaft und Praxis*, Workshop „Einfluss der Alterung von Erdbauwerken auf die Nachweisführung von Deichen und Dämmen
- Hawkes, P. J.; Gonzalez-Marco, D.; Sánchez-Arcilla, A. & Prinos, P. (2008): *Best practice for the estimation of extremes: A review*, Journal of Hydraulic Research, 46(sup2), 324–332.  
<https://doi.org/10.1080/00221686.2008.9521965>
- Hedderich, J. & Sachs, L. (2020): *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R*, Springer Spektrum.
- Heris, M. K. (2015): *Binary Genetic Algorithm in MATLAB - Part B - Practical Genetic Algorithms Series*, Yarpiz,  
<https://www.youtube.com/watch?v=pW39nKyYIN4>
- Heyer, T. (2011): *Zuverlässigkeitsbewertung von Flussdeichen nach dem Verfahren der logistischen Regression*, In: Dresdner wasserbauliche Mitteilungen - Band 46, Dresden
- Hoffmann- La Roche Aktiengesellschaft (2003): *Roche-Lexikon Medizin*, Urban & Fischer
- Horlacher, H.-B. & Carstensen, D. (Hrsg.). (2007): *Fünf Jahre nach der Flut: Hochwasserschutzkonzepte - Planung, Berechnung, Realisierung*, Dresdner wasserbauliche Mitteilungen – Band 35, Dresden
- Huber, N. P. (2011): *Probabilistische Modellierung von Versagensprozessen bei Staudämmen*, In: Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule - Band 155, Aachen
- IKSE (2004): *Dokumentation des Hochwassers vom August 2002 im Einzugsgebiet der Elbe*, Magdeburg
- IKSO (1999): *Odereinzugsgebiet: Das Hochwasser 1997*, Breslau
- IPCC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Vereinigtes Königreich

- IPCC (2022): *Climate Change 2022 Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Schweiz
- ISSMGE-TC304 (Hrsg.) (2021a): *304dB TC304 Databases*,  
<http://140.112.12.21/issmge/tc304.htm>
- ISSMGE-TC304 (Hrsg.) (2021b): *State-of-the-art review of inherent variability and uncertainty in geotechnical properties and models*, International Committee TC304 'Engineering Practice of Risk Assessment and Management'
- Jamalinia, E.; Vardon, P. & Steele-Dunne, S. (2020): *Use of displacement as a proxy for dike safety*, Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 382, 481–485,  
<https://doi.org/10.5194/piahs-382-481-2020>
- Jänke, S. (2000): *Zusammendrückbarkeit und Scherfestigkeit von Erdstoffen in Abhängigkeit einfacher Kennwerte*, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts: Heft Nr. 77
- Jonkman, S. N. (2005): *Global Perspectives on Loss of Human Life Caused by Floods*, Natural Hazards, 34(2), 151–175.  
<https://doi.org/10.1007/s11069-004-8891-3>
- Jonkman, S. N.; Vrijling, J. K. & Vrouwenvelder, A. C. W. M. (2008): *Methods for the estimation of loss of life due to floods: a literature review and a proposal for a new method*, Natural Hazards, 46(3), 353–389,  
<https://doi.org/10.1007/s11069-008-9227-5>
- Jung, T. (2003): *Der Risikobegriff in Wissenschaft und Gesellschaft*, Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz, 46(7), 542–548. <https://doi.org/10.1007/s00103-003-0636-z>
- Jüpner, R. (2018): *Hochwasserrisikomanagement 2030 - ein Ausblick*, In: S. Heimerl (Hrsg.): *Vorsorgender und nachsorgender Hochwasserschutz: Ausgewählte Beiträge aus der Fachzeitschrift WasserWirtschaft*, Springer Vieweg
- Kempf, E.; Lüderssen, K. & Volk, K. (2011): *Ökonomie versus Recht im Finanzmarkt?* Institute for law and finance series, De Gruyter.



- Kempfert, H.-G. & Raithel, M. (2007): *Bodenmechanik und Grundbau*, BBB Bauwerk-Basis-Bibliothek, Bauwerk
- Kézdi, A. (1969): *Handbuch der Bodenmechanik*, Verlag für Bauwesen
- Knieling, J.; Kretschmann, N. & Zimmermann, T. (2013): *Regionalplanerische Festlegungen zur Anpassung an den Klimawandel*, Neopolis working papers: Bd. 14. HafenCity Univ. <http://edoc.sub.uni-hamburg.de/hcu/volltexte/2014/130/>
- Koch, M. (2003): *Ingenieurhydrologie I*, Skriptum Universität Kassel
- Kolymbas, D. (2016): *Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau*, Springer Vieweg
- Kool, J. J.; Kanning, W.; Jommi, C. & Jonkman, S. N. (2020): *A Bayesian hindcasting method of levee failures applied to the Breitenhagen slope failure*, Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 1–18, <https://doi.org/10.1080/17499518.2020.1815213>
- Kool, J.; Kanning, W.; Heyer, T.; Jommi, C. & Jonkman, S. N. (2019): *Forensic Analysis of Levee Failures: The Breitenhagen Case*, International Journal of Geoengineering Case Histories, 5(2), 71–92
- Kortenhaus, A. (2003): *Probabilistische Methoden für Nordseedeiche*, Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
- Kunz, E. (2021): *GeoValML: Das interoperable Austauschformat für boden- und felsmechanische Kennwerte, Aufbau und Betrieb einer geotechnischen Kennwertdatenbank*, Karlsruhe
- Kuzmanić, T. & Mikoš, M. (2020): *Quartz Sand Use in Hydraulic and Sanitary Engineering*, Acta hydrotechnica (33/58), 13–28, <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2020.02>
- Lacasse, S. & Nadim, F. (1996): *Uncertainties in characterizing soil properties*, Uncertainty in the Geologic Environment, 49–75
- Lacasse, S. & Nadim, F. (2007): *Probabilistic geotechnical analyses for offshore facilities*, Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered

- Systems and Geohazards, 1(1), 21–42,  
<https://doi.org/10.1080/17499510701204224>
- Lacasse, S.; Nadim, F.; Rahim, A. & Guttormsen, T. R. (2007): *Statistical Description of Characteristic Soil Properties*, In: Offshore Technology Conference, Offshore Technology Conference,  
<https://doi.org/10.4043/19117-MS>
- Lang, H.-J.; Huder, J.; Amann, P. & Puzrin, A. M. (2011): *Bodenmechanik und Grundbau - Das Verhalten von Böden und Fels und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Länsivaara, T.; Phoon, K. K. & Ching, J. (2021): *What is a characteristic value for soils?* Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 1–26,  
<https://doi.org/10.1080/17499518.2021.1975301>
- LAWA (2014): *Nationales Hochwasserschutzprogramm: Kriterien und Bewertungsmaßstäbe für die Identifikation und Priorisierung von wirksamen Maßnahmen sowie ein Vorschlag für die Liste der prioritären Maßnahmen zur Verbesserung des präventiven Hochwasserschutzes*, Heidelberg
- Lee, I. K.; White, W. & Ingles, O. G. (1983): *Geotechnical Engineering*, Pitman
- Lendering, K.; Schweckendiek, T. & Kok, M. (2018): *Quantifying the failure probability of a canal levee*, Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 15,  
<https://doi.org/10.1080/17499518.2018.1426865>
- LfU (2005): *Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes: Leitfaden*, Karlsruhe
- LfULG (2015): *Ereignisanalyse Hochwasser Juni 2013*, Dresden
- Löfman, M. & Korkiala-Tanttu, L. (2019): *Variability and Typical Value Distributions of Compressibility Properties of Fine-Grained Sediments in Finland*, In: J. Ching, D.-Q. Li & Z. Li (Hrsg.): *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR)*, S. 182–187, Research Publishing Singapore.

- López Acosta, N. P.; Carillo Tutivén, J. R.; Barba Galdámez, D. F.; Jaimes Téllez, M. Á. & Zwanenburg, C. (2019): *Obtaining fragility curves on levees subjected to flooding*, In: H. Sigursteinsson (Hrsg.): *Geotechnical engineering - foundation of the future: Proceedings of the XVII European conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, The Icelandic Geotechnical Society, Reykjavik
- Ludy, J. & Kondolf, G. M. (2012): *Flood risk perception in lands "protected" by 100-year levees*, *Natural Hazards*, 61(2), 829–842, <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0072-6>
- Lumb, P. (1974): *Application of statistics in soil mechanics*, In: *Soil Mechanics: New Horizons* (S. 221–239), Newnes-Butterworth
- Magnan, J.-P. (2000): *Cours de Mécanique des Sols et des Roches*, Skriptum, Ecole Nationale des Points et Chaussées, Paris
- de Marsily, G. (1993): *Quantitative hydrogeology: Groundwater hydrology for engineers*, Academic Press
- Matthess, G. & Ubell, K. (1983): *Allgemeine Hydrogeologie, Grundwasserhaushalt*, In: G. Matthess (Hrsg.): *Lehrbuch der Hydrogeologie*, Band 1, Borntraeger
- Merz, B. (2006): *Hochwasserrisiken: Grenzen und Möglichkeiten der Risikoabschätzung: mit 33 Tabellen*, Schweizerbart
- Merz, B. & Bittner, R. (Hrsg.). (2011): *Management von Hochwasserrisiken: Mit Beiträgen aus den RIMAX-Forschungsprojekten*, Schweizerbart.
- Mogami, J. & Yoshikoshi, H. (1968): *On the Angle of Internal Friction of Coarse Materials*, In: *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Budapest Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, S. 190-196, Budapest
- Möllmann, A. F. D. (2009): *Probabilistische Untersuchung von Hochwasserschutzdeichen mit analytischen Verfahren und der Finite-Elemente-Methode*, Dissertation, Universität Stuttgart
- Morgenschweis, G. (2022): *Brauchen wir im Zeitalter der Digitalisierung noch Durchflussmessungen?* *WasserWirtschaft*, 112(1), 10–13

- Mudersbach, C. (2017): *Ein Bemessungsansatz für wasserwirtschaftliche Infrastruktur bei instationären Bedingungen*, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 61(2)  
[https://doi.org/10.5675/HYWA\\_2017,2\\_1](https://doi.org/10.5675/HYWA_2017,2_1)
- Mudersbach, C. (Hrsg.). (2021): *Tagungsband: mit Kurzfassungen zum 3. Bochumer Hydrometrie-Kolloquium*, Bochum
- MULE (2021): *Hochwasserschutzkonzeption: Stand der Umsetzung bis 2020 – Abschlussbericht*, Magdeburg
- Müller, U. (2010): *Hochwasserrisikomanagement: Theorie und Praxis*, Vieweg + Teubner
- Müller, U. (2022, 30. Juni): *Hochwasser 2002, 2010, 2013 und 2021 in Sachsen: Haben wir gelernt?* In: LfULG & DWA: DWA HochwasserTag Spezial, online
- Münster, S. (12. August 2015): *Nünchritz-West steckt im Dilemma*, Sächsische Zeitung
- Naumann, T.; Golz, S. & Schinke, R. (2015): *Parametrisierte synthetische Schadensfunktionen zur Abschätzung hochwasserinduzierter Gebäudeschäden*, WasserWirtschaft, 105(9)
- Öttl, M. A. (2022, 31. März): *Transient seepage in dikes for reliability calculation*, 1<sup>st</sup> International ProMalDes User Meeting, Magdeburg.
- Özer, I. E.; Rikkert, S. J. H.; van Leijen, F. J.; Jonkman, S. N. & Hanssen, R. F. (2019): *Sub-seasonal Levee Deformation Observed Using Satellite Radar Interferometry to Enhance Flood Protection*, Scientific Reports, 9(1), 2646  
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-39474-x>
- Özer, I. E.; van Damme, M. & Jonkman, S. N. (2020): *Towards an International Levee Performance Database (ILPD) and Its Use for Macro-Scale Analysis of Levee Breaches and Failures*, Water, 12(1), 119  
<https://doi.org/10.3390/w12010119>
- Papadakis, I.; Großklags, F.; Siekmann, M.; Freistühler, E.; Saldin, C. & Pohl, F. (2019): *Messdatenmanagementsysteme für ein integrales urbanes Wassermanagement*, WasserWirtschaft, 109(7-8), 60–63

- Papageorgiou, M.; Leibold, M. & Buss, M. (2012): *Optimierung: Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung*, Springer Berlin Heidelberg, <https://doi.org/10.1007/978-3-540-34013-3>
- Patt, H. & Jüpner, R. (2020): *Hochwasser-Handbuch: Auswirkungen und Schutz*, Springer Vieweg
- Phoon, K.-K. & Kulhawy, F. H. (1999): *Characterization of Geotechnical Variability*, Canadian Geotechnical Journal, 36(4), 612–624
- Plate, E. J. (1993): *Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure: Mit 59 Tabellen*, Ernst & Sohn
- Pohl, R. (2017): *Hydraulische Bemessungsaufgaben an Hochwasserschutzanlagen*, KW Korrespondenz Wasserwirtschaft (10), 584–591
- Proske, D. (Hrsg.) (2021): *Einsturzhäufigkeit von Bauwerken*, Springer Fachmedien Wiesbaden, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-35198-4>
- Reuter, U. (2006): *Analyse und Prognose von Zeitreihen mit Fuzzy-Daten zur Prädiktion von Strukturantworten*, Dissertation. Technische Universität Dresden
- Roubos, A. A.; Steenbergen, R. D.J.M.; Schweckendiek, T. & Jonkman, S. N. (2018): *Risk-based target reliability indices for quay walls*, Structural Safety, 75, 89–109, <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2018.06.005>
- Sackmann, A. (2001): *Schwachstellengenese an Erddämmen als Resultat sedimentär/diagenetischer Alterungsprozesse: - Ursachenforschung und Möglichkeiten der zerstörungsfreien Erkundung*, Dissertation, Bayerische Julius-Maximilians-Universität Würzburg
- Saddawi, N. (2015): *A Practical Introduction to Genetic Algorithms*, <https://www.youtube.com/playlist?list=PLea0WJq13cnARQILcbHUPINYLy1IOSmjH>
- Sánchez-Arcilla, A.; Gonzalez-Marco, D. & Prinos, P. (2007): *Extreme Meteorological Events - Hazard Assessment*, In: J. Schanze (Hrsg.): *Flood Risk Management Research: From extreme events to citizens involvement*, (S. 11–18), Eigenverlag

- Schanze, J. (Hrsg.) (2015): *Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft: Band 12 - Veränderung und Management der Risiken extremer Hochwasserereignisse in großen Flussgebieten: Am Beispiel der Elbe*, Schweizerbart
- Scheffer, F.; Schachtschabel, P.; Blume, H.-P.; Brümmer, G. W.; Horn, R., Kandeler, E.; Kögel-Knabner, I.; Kretzschmar, R.; Stahr, K.; Thiele-Bruhn, S.; Welp, G. & Wilke, B.-M. (2010): *Lehrbuch der Bodenkunde*, Spektrum Akademischer Verlag
- Schmalz, B. (2011): *Grundwasser Modul 269: Grundwasserströmung*, Universität Kiel
- Schmidt, M. (2000): *Hochwasser und Hochwasserschutz in Deutschland vor 1850: Eine Auswertung alter Quellen und Karten*, Oldenbourg
- Schneider, J. & Schlatter, H. P. (1996): *Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen: Grundwissen für Ingenieure*, B.G. Teubner, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich
- Schotten, R. (2022, 31. März): *Modelling Critical Infrastructures for Flood Risk Management: The CIN Module*, 1<sup>st</sup> International ProMaIDes User Meeting, Magdeburg.
- Schultze, E. (1975): *Some aspects concerning the application of statistics and probability to foundation structures*, In: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference of Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering (S. 457-494).
- Schüttrumpf, H. (2017): *Risikoanalysen für Flussdeiche*, KW Korrespondenz Wasserwirtschaft, 10(10), 592–595.
- Schwiersch, N., Dumke, B. & Stamm, J. (2021): *Probabilistic determination of the phreatic line in river levees under steady-state conditions and its effect on the stability statement*, In: B. Castanier, M. Cepin, D. Bigaud & C. Berenguer (Hrsg.): Proceedings of the 31th European Safety and Reliability Conference, Research Publishing Singapore.
- Schwiersch, N.; Heyer, T. & Stamm, J. (2022): *Enriching flood risk analyses with distributions of soil mechanical parameters through the statistical analysis of*

- classification experiments*, Journal of Flood Risk Management, 15(2), <https://doi.org/10.1111/jfr3.12791>
- Schwiersch, N. & Stamm, J. (2022): *Geometric and material variability of the probability of landward slope failure for homogeneous river levees*, Sustainability, 14(5), <https://doi.org/10.3390/su14052833>
- Schwiteilo, E. & Herle, I. (2017): *Vergleichsstudie zur Kompressibilität und zu den Scherparametern von Ton aus Ödometer- und Rahmenscherversuchen*, geotechnik, 40(3), 204–217
- Serra-Llobet, A.; Tourment, R., Montané, A. & Buffin-Belanger, T. (2022): *Managing residual flood risk behind levees: Comparing USA France, and Quebec (Canada)*, Journal of Flood Risk Management, 15(2) <https://doi.org/10.1111/jfr3.12785>
- Simmer, K. (1980): *Grundbau*, Teubner
- Spaethe, G. (1992): *Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen*, Springer
- Staatskanzlei, S. (2022): B-Plan Nr. 78 „Wohngebiet An der Siegfried-Rädel-Straße“ | Beteiligungsportal Stadt Pirna, <https://www.buergerbeteiligung.sachsen.de/portal/pirna/beteiligung/themen/1020293>
- Stamm, J. & Graw, K.-U. (Hrsg.) (2021): *Wasserbau zwischen Hochwasser und Wassermangel - Dresdner Wasserbaukolloquium 2021*, Dresdner wasserbauliche Mitteilungen, Band 65, Selbstverlag der Technischen Universität Dresden
- Statistisches Bundesamt (2022): *Flächennutzung: Jährliche Zunahme einzelner Nutzungsarten*, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/Tabelle/anstieg-suv.html>
- Sykora, M.; Holicky, M.; Jung, K. & Diamantidis, D. (2017): *Target reliability for railway civil engineering structures*, In: M. Čepin & R. Briš (Hrsg.): *Safety and Reliability – Theory and Applications*, S. 499, CRC Press, <https://doi.org/10.1201/9781315210469-428>

- Syswertda, G. (1989): *Uniform Crossover in Genetic Algorithms*, In: J. D. Schaffer (Hrsg.): *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Tadesse, Y. B. & Fröhle, P. (2020): *Modelling of Flood Inundation due to Levee Breaches: Sensitivity of Flood Inundation against Breach Process Parameters*, *Water*, 12(12), 3566, <https://doi.org/10.3390/w12123566>
- Tamáskovics, N. (2013): *Rechnerische Stabilitätsnachweise für verflüssigungsfährdete Altkippen des Braunkohlenbergbaus*, 13. Altbergbau-Kolloquium, TU Bergakademie Freiberg
- Tan, T. S., Phoon, K. K.; Hight, D. W. & Leroueil, S. (Hrsg.) (2006): *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, Singapore, CRC Press
- Tang, K. S.; Man, K. F.; Kwong, S. & He, Q. (1996): *Genetic Algorithms and their Applications*, *IEEE Signal Processing Magazine* (November), 22–37
- Tedla, M. G.; Cho, Y. & Jun, K. (2021): *Flood Mapping from Dam Break Due to Peak Inflow: A Coupled Rainfall–Runoff and Hydraulic Models Approach*, *Hydrology*, 8(2), 89, <https://doi.org/10.3390/hydrology8020089>
- Teferra, A. (1974): *Beziehungen zwischen Reibungswinkel, Lagerungsdichte und Sondierwiderständen nichtbindiger Böden mit verschiedener Kornverteilung*, Dissertation, Technische Hochschule Aachen
- Terzaghi, K. & Jelinek, R. (1954): *Theoretische Bodenmechanik*, Springer
- Terzaghi, K. & Peck, R. (1961): *Die Bodenmechanik in der Baupraxis*, Springer
- TU Delft (2016): *SAFELevee project*, <https://www.tudelft.nl/citg/over-faculteit/afdelingen/hydraulic-engineering/sections/hydraulic-structures-and-flood-risk/research/safelevee-project/>
- Türke, H. (1999): *Statik im Erdbau*, John Wiley & Sons
- Umweltbundesamt (2011): *Themenblatt: Anpassung an Klimatrends und Extremwetter: Hochwasserschutz*, Dessau



- Uzielli, M.; Lacasse, S.; Nadim, F. & Phoon, K. (2006): *Soil variability analysis for geotechnical practice*, In: T. S. Tan, K. K. Phoon, D. W. Hight & S. Leroueil (Hrsg.): *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, Two Volume Set: Proceedings of the Second International Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, Singapore, CRC Press
- Verruyt, A. (1982): *Theory of groundwater flow*, Macmillan
- Viero, D. P.; D'Alpaos, A.; Carniello, L. & Defina, A. (2013): *Mathematical modeling of flooding due to river bank failure*, *Advances in Water Resources*, 59, 82–94, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.05.011>
- Vismann, U. (Hrsg.) (2018): *Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln*, Springer Vieweg
- Weißmann, R. (2014): *Probabilistische Bewertung der Zuverlässigkeit von Flussdeichen unter hydraulischen und geotechnischen Gesichtspunkten*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie
- Wewer, M.; Aguilar-López, J. P.; Kok, M. & Bogaard, T. (2021): *A transient backward erosion piping model based on laminar flow transport equations*, *Computers and Geotechnics*, 132, 103992. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103992>
- Winston, P. H. (2010): *Lecture 13: Learning: Genetic Algorithms*, MIT Massachusetts Institute of Technology, <https://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-034-artificial-intelligence-fall-2010/lecture-videos/lecture-13-learning-genetic-algorithms/>
- Winter, S. (4. August 2003): *Hochwasser-Profiteure: Die Flut als Geldsegen*, *Der Spiegel*
- Witt, K. J. (Hrsg.) (2017): *Grundbau-Taschenbuch: Teil 1: Geotechnische Grundlagen*, Ernst & Sohn
- Zesch, R.; Saucke, U. & Bieberstein, A. (2007): *Probabilistische Bemessung von Flussdeichen*, *Hochwasserschutz und Katastrophenmanagement* (6), S. 41–46.

Zhou, Y.; Zhang, D. & Huang, H. (2019): *Constructing a Multivariate Distribution of Clay Parameters Based on the Shanghai Database*, In: J. Ching, D.-Q. Li & Z. Li (Hrsg.): *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR)*, S. 200-205. Research Publishing Singapore

Zilch, K.; Diederichs, C. J.; Katzenbach, R. & Beckmann, K. J. (Hrsg.) (2013): *Geotechnik*, Springer Berlin Heidelberg

## **Anhänge**

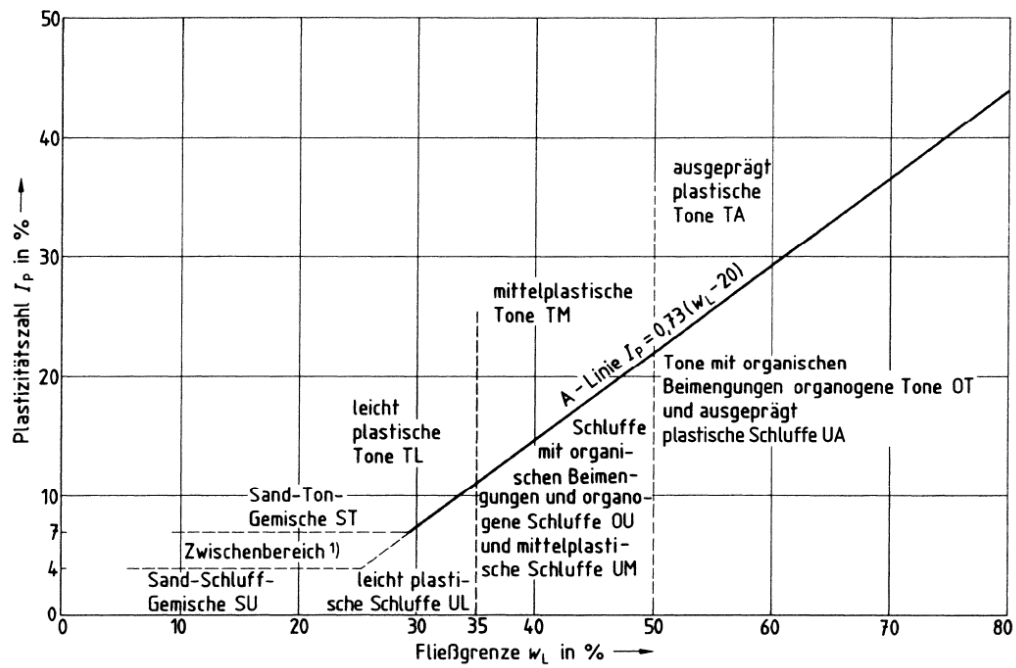
## Anhang 1: Risikodefinitionen ausgewählter Fachgebiete

Fach- gebiet	Definition	Quelle
Sprachlich	Möglicher negativer Ausgang bei einer Unternehmung, mit dem Nachteile, Verlust, Schäden verbunden sind; mit einem Vorhaben, Unternehmen o. Ä. verbundenes Wagnis	Duden (2021)
Volkswirtschaftlich	[Unsicherheit, die] durch entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilung beschrieben werden kann, die entweder objektiv vorliegen oder subjektiv abgeschätzt werden können.	Blum (2001)
Ökonomisch	„Unsicherheit“ im ökonomischen Sinn bezeichnet. Lässt sich diese Unsicherheit hingegen durch Wahrscheinlichkeiten spezifizieren, so wird im ökonomischen Sinn von „Risiko“ gesprochen. <b>Eine „Unsicherheit“ hat im Vergleich zum „Risiko“ den Nachteil, dass sie nicht konkret mit Wahrscheinlichkeiten beziffert werden kann.</b> Im Risikofall kann der Anleger dagegen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung die Eintrittswahrscheinlichkeiten für bestimmte zukünftige Renditen ableiten. Risiko wird folglich in Form vollständiger Wahrscheinlichkeitsverteilungen „gemessen“.	Kempf et al. (2011)
Gesundheitswesen	Gesundheitsrisiko bezeichnet die statistische Häufigkeit, mit der - bezogen auf eine Population - unter Einwirkung eines schädigenden Umwelteinflusses ein bestimmtes Krankheitsbild auftritt.	Hoffmann- La Roche Aktiengesellschaft (2003)
Gesundheitlicher Umweltschutz	Wahrscheinlichkeit, mit der ein Teil einer Bevölkerung, die einem schädigenden Umweltfaktor ausgesetzt war, eine Beeinträchtigung oder Erkrankung erleidet.	Fülgraff (1993)

---

<b>Fachgebiet</b>	<b>Definition</b>	<b>Quelle</b>
Natur- wissen- schaft und Technik	Risiko ist eine zweidimensionale Größe, d. h., es beschreibt das Ausmaß eines möglichen Schadens und die Wahrscheinlichkeit seines Eintretens. Risiko = Eintrittswahrscheinlichkeit · Schaden	Bachmann et al. (2007), Jung (2003)
Recht	Beim Risiko geht es also um die Möglichkeit oder umgekehrt um die Nichtausschließbarkeit eines Schadens. Damit erfasst der rechtliche Risikobegriff auch die Bereiche der Unsicherheit, Ungewissheit und des Nichtwissens über alle Faktoren und Wirkzusammenhänge.	Jung (2003)

---

**Anhang 2: Bodenklassifikationsschemata**

**Abbildung A 1: Plastizitätsdiagramm zur Klassifizierung feinkörniger Böden**



**Tabelle A 2: Terminologische Äquivalenzzuordnung zwischen deutscher (DIN 4022), der US-amerikanischer (USCS) und internationaler Bodenbenennung (ASTM D2487)**

Kurzbeschreibung <sup>1</sup>	DIN 4022	USCS	ASTM D2487
Kies, gleichkörnig	GE	GP <sup>2</sup> , GW	
Kies, sandig, mit wenig Feinkorn	GW, GI	GP <sup>3</sup> , GW	
Kies,sandig, tonig, schluffig, Feinkorn sprengt nicht das Korngerüst	GU, GT	GM, GC	
Kies-Sand-Feinkorngemisch Sprengung des Korngerüsts	GU*, GT*		
Sand, gleichkörnig	SE	SP <sup>2</sup> , SW	
Sand, gut abgestuft	SW, SI	SP <sup>3</sup> , SW	
Sand, kiesig			
Sand mit Feinkorn, keine Sprengung des Korngerüsts	SU, ST	SM, SC	
Sand mit Feinkorn, Sprengung des Korngerüsts	SU*, ST*		
Schluff, gering plastisch	UL	ML	
Schluff, mittel- und ausgeprägt plas- tisch	UM, UA	MH	
Ton, gering plastisch	TL	CL	
Ton, mittelplastisch	TM	CH	
Ton, ausgeprägt plastisch	TA		

<sup>1</sup> nach Albert (2014)

<sup>2</sup> berücksichtigt GE ( $C_u < 4$ ) oder SE ( $C_u < 4$ ),

<sup>3</sup> berücksichtigt GE ( $4 \leq C_u < 6$ ) oder SE ( $4 \leq C_u < 6$ )



**Anhang 3: Datensätze**

<b>Anzahl der Datensätze zu analysierten Kornfraktionen für Bodengruppen nach DIN 18196</b>													
Bodengruppe	d <sub>10</sub>	d <sub>15</sub>	d <sub>20</sub>	d <sub>30</sub>	d <sub>40</sub>	d <sub>50</sub>	d <sub>60</sub>	d <sub>70</sub>	d <sub>80</sub>	d <sub>85</sub>	d <sub>90</sub>	d <sub>100</sub>	d <sub>mh</sub>
GE	264	214	-	264	-	264	264	-	183	207	-	-	214
GW, GI	1373	1164	-	1373	-	1374	1373	-	1029	1063	-	-	1164
GU, GT	271	-	-	333	-	333	333	-	-	-	-	-	-
GU*, GT*	73	-	-	156	-	158	158	-	-	-	-	-	-
SE	11051	9888	-	11051	-	11051	11051	-	8053	9885	-	-	-
SW, SI	28	11	-	28	-	28	28	-	9	11	-	-	11
SU, ST	398	-	-	548	-	551	548	-	-	-	-	-	-
SU*, ST*	477	-	-	1165	-	1185	1185	-	-	-	-	-	-
UL	87	91	1	103	3	69	91	3	3	91	67	91	91
UM, UA	21	45	-	108	-	127	128	-	92	104	-	-	104
TL	130	264	5	677	7	705	705	7	380	467	7	7	468
TM	40	86	1	525	6	683	685	7	410	511	7	7	512
TA	14	17	-	160	-	571	596	-	395	510	-	-	510

### Anhang 4: Verteilungen der Kornfraktionen und Wassergehalte

Boden- gruppe	Kornfraktion/ Wassergehalt	Anzahl Datensätze	Verteilung	EW [mm]	$\sqrt{\text{Var}}$ [mm]
GE	d <sub>10</sub>	264	Lognormal	1,30	1,16
	d <sub>15</sub>	214	Weibull	6,96	1,00
	d <sub>30</sub>	264	Weibull	10,86	1,10
	d <sub>50</sub>	264	Weibull	14,18	1,19
	d <sub>60</sub>	264	Weibull	16,14	1,24
	d <sub>80</sub>	183	Lognormal	2,71	0,80
	d <sub>85</sub>	207	Lognormal	2,77	0,79
	d <sub>mh</sub>	214	Lognormal	1,18	1,02
GW, GI	d <sub>10</sub>	1373	Lognormal	-0,87	0,70
	d <sub>15</sub>	1164	Lognormal	-0,39	0,82
	d <sub>30</sub>	1373	Lognormal	1,01	0,74
	d <sub>50</sub>	1374	Lognormal	2,07	0,67
	d <sub>60</sub>	1373	Lognormal	2,43	0,61
	d <sub>80</sub>	1029	Lognormal	3,00	0,47
	d <sub>85</sub>	1063	Lognormal	3,11	0,46
	d <sub>mh</sub>	1164	Lognormal	-0,08	0,68
	w	1	-	-	-
GU, GT	d <sub>10</sub>	271	Lognormal	-2,24	0,73
	d <sub>30</sub>	333	Lognormal	-0,02	0,87
	d <sub>50</sub>	333	Lognormal	1,45	0,87
	d <sub>60</sub>	333	Lognormal	2,10	0,71
GU*, GT*	d <sub>10</sub>	73	Weibull	0,02	2,02
	d <sub>30</sub>	156	Weibull	0,39	0,93
	d <sub>50</sub>	158	Lognormal	0,77	1,02
	d <sub>60</sub>	158	Lognormal	1,77	0,79

Boden- gruppe	Kornfraktion/ Wassergehalt	Anzahl Datensätze	Verteilung	EW [mm]	$\sqrt{\text{Var}}$ [mm]
SE	d <sub>10</sub>	11051	Lognormal	-1,79	0,43
	d <sub>15</sub>	9888	Lognormal	-1,65	0,44
	d <sub>30</sub>	11051	Lognormal	-1,41	0,44
	d <sub>50</sub>	11051	Lognormal	-1,24	0,49
	d <sub>60</sub>	11051	Lognormal	-1,15	0,54
	d <sub>80</sub>	8053	Lognormal	-0,90	0,78
	d <sub>85</sub>	9885	Lognormal	-0,79	0,88
	w	193	Lognormal	-1,91	0,73
SW, SI	d <sub>10</sub>	28	Weibull	0,20	4,11
	d <sub>15</sub>	11	Weibull	0,26	2,62
	d <sub>30</sub>	28	Weibull	0,54	2,88
	d <sub>50</sub>	28	Lognormal	-0,13	0,30
	d <sub>60</sub>	28	Lognormal	0,25	0,29
	d <sub>80</sub>	9	Weibull	3,32	1,83
	d <sub>85</sub>	11	Weibull	3,79	1,50
	d <sub>mh</sub>	11	Weibull	0,49	3,25
SU, ST	d <sub>10</sub>	398	Weibull	0,11	2,05
	d <sub>30</sub>	548	Weibull	0,29	2,27
	d <sub>50</sub>	551	Weibull	0,48	1,86
	d <sub>60</sub>	548	Lognormal	-0,80	0,72
SU*, ST*	d <sub>10</sub>	477	Lognormal	-4,42	0,58
	d <sub>30</sub>	1165	Lognormal	-2,47	0,62
	d <sub>50</sub>	1185	Lognormal	-1,53	0,56
	d <sub>60</sub>	1185	Lognormal	-1,20	0,67

Boden- gruppe	Kornfraktion/ Wassergehalt	Anzahl Datensätze	Verteilung	EW [mm]	$\sqrt{\text{Var}}$ [mm]
UL	d <sub>10</sub>	87	Weibull	0,01	1,60
	d <sub>15</sub>	91	Lognormal	-4,56	0,57
	d <sub>20</sub>	1			
	d <sub>30</sub>	103	Lognormal	-3,85	0,39
	d <sub>40</sub>	3			
	d <sub>50</sub>	103	Lognormal	-3,40	0,35
	d <sub>60</sub>	103	Lognormal	-3,19	0,46
	d <sub>70</sub>	3			
	d <sub>80</sub>	69	Lognormal	-2,79	0,57
	d <sub>85</sub>	91	Lognormal	-2,63	0,59
	d <sub>90</sub>	3			
	d <sub>mh</sub>	91	Weibull	0,01	2,71
	w	67	Weibull	0,24	6,48
	w <sub>L</sub>	91	Lognormal	-1,42	0,06
	w <sub>P</sub>	91	Weibull	0,31	12,95
	UM, UA	d <sub>10</sub>	21	Weibull	0,00
d <sub>15</sub>		45	Weibull	0,01	1,42
d <sub>30</sub>		108	Weibull	0,01	1,27
d <sub>50</sub>		127	Lognormal	-4,22	0,97
d <sub>60</sub>		128	Weibull	0,04	1,10
d <sub>80</sub>		92	Lognormal	-2,96	1,06
d <sub>85</sub>		104	Lognormal	-2,65	1,03
d <sub>mh</sub>		104	Lognormal	-5,62	0,60
w		80	Weibull	0,26	3,15
w <sub>L</sub>		104	Lognormal	-1,30	0,07
w <sub>P</sub>		104	Weibull	0,44	10,50

Boden- gruppe	Kornfraktion/ Wassergehalt	Anzahl Datensätze	Verteilung	EW [mm]	$\sqrt{\text{Var}}$ [mm]
TL	d <sub>10</sub>	130	Lognormal	-5,56	0,70
	d <sub>15</sub>	264	Lognormal	-5,62	0,67
	d <sub>20</sub>	5	Weibull	0,01	2,72
	d <sub>30</sub>	677	Lognormal	-4,51	0,72
	d <sub>40</sub>	7	Weibull	0,03	6,02
	d <sub>50</sub>	705	Lognormal	-3,45	0,78
	d <sub>60</sub>	705	Lognormal	-3,00	0,89
	d <sub>70</sub>	7	Weibull	0,12	1,13
	d <sub>80</sub>	380	Lognormal	-2,08	1,35
	d <sub>85</sub>	467	Lognormal	-1,77	1,37
	d <sub>90</sub>	7	Weibull	0,42	0,71
	d <sub>100</sub>	7	Lognormal	1,78	0,79
	d <sub>mh</sub>	468	Lognormal	-5,43	0,41
	w	396	Weibull	0,21	4,12
	w <sub>L</sub>	465	Lognormal	-1,72	0,16
w <sub>P</sub>	465	Weibull	0,31	11,42	
TM	d <sub>10</sub>	40	Weibull	0,01	1,59
	d <sub>15</sub>	86	Lognormal	-5,87	0,51
	d <sub>20</sub>	1			
	d <sub>30</sub>	525	Lognormal	-5,20	0,78
	d <sub>40</sub>	6	Weibull	0,02	2,06
	d <sub>50</sub>	683	Lognormal	-4,01	1,07
	d <sub>60</sub>	685	Lognormal	-3,38	1,25
	d <sub>70</sub>	7	Weibull	0,10	1,42
	d <sub>80</sub>	410	Lognormal	-2,33	1,61
	d <sub>85</sub>	511	Lognormal	-2,09	1,54
	d <sub>90</sub>	7	Weibull	0,49	0,73
	d <sub>100</sub>	7	Lognormal	1,39	1,20
	d <sub>mh</sub>	512	Lognormal	-5,84	0,42
	w	396	Lognormal	-1,56	0,27
	w <sub>L</sub>	511	Weibull	0,23	8,70
w <sub>P</sub>	512	Lognormal	-0,88	0,10	

Boden- gruppe	Kornfraktion/ Wassergehalt	Anzahl Datensätze	Verteilung	EW [mm]	$\sqrt{\text{Var}}$ [mm]
TA	d <sub>10</sub>	14	Weibull	0,01	1,55
	d <sub>15</sub>	17	Weibull	0,01	1,53
	d <sub>30</sub>	160	Lognormal	-5,51	0,85
	d <sub>50</sub>	571	Lognormal	-4,90	0,92
	d <sub>60</sub>	596	Lognormal	-4,26	1,05
	d <sub>80</sub>	395	Lognormal	-3,27	1,05
	d <sub>85</sub>	510	Lognormal	-3,06	1,01
	d <sub>mh</sub>	510	Lognormal	-6,27	0,40
	w	274	Lognormal	-1,25	0,34
	w <sub>L</sub>	511	Lognormal	-1,38	0,16
	w <sub>P</sub>	511	Lognormal	-0,48	0,20

## Anhang 5: Variabilität bodenmechanischer Kenngrößen

**Tabelle A 3: Erfahrungswerte der gesättigten Durchlässigkeit (nach Marsily, 1993)**

Lockergestein	$k_f$ [m/s]	
	von	bis
Grobkies	$10^{-2}$	$10^{-1}$
Sand und Kies	$10^{-5}$	$10^{-2}$
Feinsand, Schluff, Löß	$10^{-9}$	$10^{-5}$
Ton, Tonschiefer, Geschiebemergel	$10^{-13}$	$10^{-9}$

**Tabelle A 4: Erfahrungswerte der Korndichte einzelner Gesteinsarten**

Bodenbeschreibung	Korndichte [g/cm <sup>3</sup> ]	
	von	bis
Quarkorn, nicht bindige Böden <sup>1</sup>	2,65	
Bindige Böden <sup>1</sup>	2,70	
Sand (Quarz) <sup>2</sup>	2,65	
Ton <sup>2</sup>	2,70	2,80
Schluff <sup>2</sup>	2,68	2,70
Torf <sup>2</sup>	1,50	1,80
Basalt <sup>2</sup>	3,00	3,15
Tonschiefer <sup>2</sup>	2,80	2,90
Kalkstein <sup>2</sup>	2,70	2,90
Sandstein <sup>2</sup>	2,64	2,72

<sup>1</sup> Augner (2014) und Kempfert und Raithel (2007)

<sup>2</sup> Vorlesung „Geotechnik“ von Prof. Katzenbach TU Darmstadt

**Tabelle A 5: Typische Variationskoeffizienten (VarK) und Verteilungen (Vert.) von Bodeneigenschaften (Auszug aus Uzielli et al., 2006)**

Bodeneigenschaft	Bodentyp	Verteilung	VarK in [%]
Ausrollgrenze	Ton	Normal	3 - 20
Wichte unter Auftrieb	Alle Böden	Normal	1 - 8
Innerer Reibungswinkel	Sand	Normal	2 - 5
Porenzahl, Porosität	Alle Böden	Normal	7 - 30

**Tabelle A 6: Empfohlene Verteilungen (prozentual) zu Wassergehalten, der Porenzahl und dem Koeffizienten der vertikalen Konsolidierung; Ergebnisse von Corotis et al. (1975), (entnommen aus Uzielli et al., 2006)**

Verteilungstyp	Normal	Lognormal	Andere
w	67	33	-
w <sub>L</sub>	67	33	-
w <sub>P</sub>	-	100	-
e	67	-	33
c <sub>v</sub>	67	33	-

**Tabelle A 7: Empfohlene Wahrscheinlichkeitsverteilungen ausgewählter Bodenkenngrößen; nach Lacasse und Nadim (1996)**

Bodenkenngröße	Boden	Verteilung
Spitzendruckwiderstand	Sand	LN
	Ton	N/LN
Undrainierte Scherfestigkeit	Ton (Triaxialversuch)	LN
	Ton (Rahmenscherversuch)	LN
	Toniger Schluff	N
Normierte, undrainierte Scherfestigkeit	Ton	N/LN
Fließgrenze	Ton	N



Bodenkenngröße	Boden	Verteilung
Wichte unter Auftrieb	Alle Böden	N
Innerer Reibungswinkel	Sand	N
Porenzahl, Porosität	Alle Böden	N
Überkonsolidierungs-grad	Ton	N/LN

**Tabelle A 8: Dokumentierter Verteilungstyp und Erfahrungsintervalle zum Erwartungswert und der Standardabweichung von der Bodengewichte**

Boden- gruppe	Vertei- lungstyp <sup>4</sup>	Erwartungswert <sup>1, 2, 3</sup> in [kN/m <sup>3</sup> ]		Standardabweichung <sup>4, 5, 6</sup> in [kN/m <sup>3</sup> ]	
		von	bis	von	bis
GE		16,0	19,0		1,7
GW, GI		16,5	23,0		2,0
GU, GT		17,0	24,0		2,1
GU*, GT*		16,5	22,5		2,0
SE		16,0	19,0		1,7
SW, SI		16,5	21,0		1,9
SU, ST	Normalver- teilung	16,0	22,5	0,0	1,9
SU*, ST*		16,5	21,5		1,9
UL		17,5	21,0		1,9
UM, UA		16,5	20,0		1,8
TL		19,0	22,0		2,0
TM		18,0	21,0		2,0
TA		16,5	20,0		1,8

<sup>1</sup> DIN (2010), <sup>2</sup> Engel (2014), <sup>3</sup> Arbeitsausschuss Ufereinfassungen et al. (2012)

<sup>4</sup> Lee et al. (1983), <sup>5</sup> Lacasse und Nadim (1996) <sup>6</sup> Lumb (1974)

**Tabelle A 9: Dokumentierter Verteilungstyp und Erfahrungsintervalle zum Erwartungswert und der Standardabweichung vom Reibungswinkels**

Boden- gruppe	Vertei- lungstyp <sup>5</sup>	Erwartungswert <sup>1, 2, 3, 4</sup> in [°]		Standardabwei- chung <sup>5, 6, 7, 8, 9</sup> in [°]	
		von	bis	von	bis
GE		30	42		
GW, GI		30	45		
GU, GT	-	30	43	-	-
GU*, GT*		28	40		
SE		30	40	0,7	5,3
SW, SI	Normalver- teilung	30	41	0,7	5,3
SU, ST		30	40	0,7	17,5
SU*, ST*		25	40	0,6	16,3
UL		27,5	35		
UM, UA	-	22,5	33	-	-
TL	Normal-,	22,5	35	1,3	15,1
TM	Lognormal-	17,5	30	1,2	13,6
TA	verteilung	15	27	1,1	12,1

<sup>1</sup> DIN (2010), <sup>2</sup> Engel (2014) <sup>3</sup> Arbeitsausschuss Ufereinfassungen et al. (2012)

<sup>4</sup> Türke (1999), <sup>5</sup> Lee et al. (1983), <sup>6</sup> Lacasse und Nadim (1996), <sup>7</sup> Lumb (1974),

<sup>8</sup> CUR (1990), <sup>9</sup> Phoon und Kulkhawy (1999)

**Tabelle A 10: Dokumentierter Verteilungstyp und Erfahrungsintervalle zum Erwartungswert und der Standardabweichung von der Kohäsion**

Boden- gruppe	Vertei- lungstyp <sup>5</sup>	Erwartungswert <sup>1, 2, 3, 4</sup> in [kN/m <sup>2</sup> ]		Standardabwei- chung <sup>5, 6, 7, 8</sup> in [kN/m <sup>2</sup> ]	
		von	bis	von	bis
GE		-	-	-	-
GW, GI					
GU, GT		0	7	0	1,015
GU*, GT*		5	15	0	2,9
SE		-	-	-	-
SW, SI	Normal-, Lognormal- verteilung				
SU, ST		0	7	0,75	0,9
SU*, ST*		7	25	2,325	2,79
UL		0	10	0	1,624
UM, UA		0	20	0	2,436
TL		0	35	3,12	7,8
TM		5	45	4	10
TA		5	60	4,62	11,55

<sup>1</sup> DIN (2010), <sup>2</sup> Engel (2014) <sup>3</sup> Arbeitsausschuss Ufereinfassungen et al. (2012)

<sup>4</sup> Türke (1999), <sup>5</sup> Lee et al. (1983), <sup>6</sup> Lacasse und Nadim (1996), <sup>7</sup> Lumb (1974),

<sup>8</sup> Kortenhaus (2003)

**Tabelle A 11: Dokumentierter Verteilungstyp und Erfahrungsintervalle zum Erwartungswert und der Standardabweichung von der Porosität**

Boden- gruppe	Vertei- lungstyp <sup>5</sup>	Erwartungswert <sup>1,2,3,4</sup> in [kN/m <sup>3</sup> ]		Standardabweichung <sup>5,6,7</sup> in [kN/m <sup>3</sup> ]	
		von	bis	von	bis
GE	Normalver- teilung	0,21	0,38	0,02	0,13
GW, GI		0,21	0,38	0,02	0,13
GU, GT		0,21	0,38	0,02	0,13
GU*, GT*		0,21	0,38	0,02	0,13
SE		0,22	0,53	0,03	0,17
SW, SI		0,22	0,53	0,03	0,17
SU, ST		0,25	0,50	0,03	0,17
SU*, ST*		0,25	0,50	0,03	0,17
UL		0,34	0,61	0,04	0,21
UM, UA		0,34	0,61	0,04	0,21
TL		0,25	0,68	0,04	0,21
TM		0,25	0,68	0,04	0,21
TA		0,25	0,68	0,04	0,21

<sup>1</sup> Simmer (1980), <sup>2</sup> Magnan (2000), <sup>3</sup> Schmalz (2011), <sup>4</sup> Koch (2003), <sup>5</sup> Lee et al. (1983), <sup>6</sup> Lacasse und Nadim (1996) <sup>7</sup> Lumb (1974)

**Tabelle A 12: Dokumentierter Verteilungstyp und Erfahrungsintervalle zum Erwartungswert und der Standardabweichung vom Wassergehalt**

Boden- gruppe	Vertei- lungstyp <sup>5</sup>	Erwartungswert <sup>1,2,3,4</sup> in [kN/m <sup>3</sup> ]		Standardabweichung <sup>3,4,6</sup> in [kN/m <sup>3</sup> ]	
		von	bis	von	bis
		GE			
GW, GI		-	-	0,01	0,13
GU, GT					
GU*, GT*					
SE					
SW, SI	Gammaver- teilung	0,02	0,32	0,01	0,13
SU, ST					
SU*, ST*					
UL		0,16	0,21	0,02	0,3
UM, UA					
TL					
TM		0,2	0,6	0,02	0,25
TA					

<sup>1</sup> Magnan (2000), <sup>2</sup> Simmer (1980), <sup>3</sup> Kortenhaus (2003), <sup>4</sup> Phoon und Kulkhawy (1999), <sup>5</sup> Lee et al. (1983), <sup>6</sup> Türke (1999)

## Anhang 6: Stochastische Eigenschaften von Böden (Literatur)

Boden- gruppe	ErfW <sup>1</sup>		ErfW <sup>2</sup>		ErfW <sup>3</sup>		VarK <sup>4</sup>		VarK <sup>5</sup>		VarK <sup>6</sup>		Vertei- lungstyp <sup>4</sup>
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	
GE	16	18	16	19	16	18							
GW, GI	16,5	19,5	21	23	16,5	21							
GU, GT	-	-	21	24	17	21							
GU*, GT*	-	-	20	22,5	16,5	19,5							
SE	16	18	16	19	16	18							
SW, SI	16,5	19,5	18	21	16,5	21							
SU, ST	-	-	19	22,5	16	18	0,01	0,1	0	0,1	0,05	0,1	Normal
SU*, ST*	-	-	18	21,5	16,5	19,5							
UL	17,5	19,5	17,5	21	17,5	19,5							
UM, UA	16,5	19,5	17	20	16,5	19,5							
TL	19	21	19	22	19	21							
TM	18,5	20,5	18	21	18,5	20,5							
TA	17,5	19,5	16,5	20	17,5	19,5							

Quellen: <sup>1</sup> DIN (2010), <sup>2</sup> Albert (2014), <sup>3</sup> EAU (2012), <sup>4</sup> Lee et al. (1983), <sup>5</sup> Lacasse & Nadim (1996), <sup>6</sup> Lumb, (974)

**Stochastische Eigenschaften des Reibungswinkels: Erfahrungswerte (ErfW) in [°], Variationskoeffizienten (VarK) in [-] und Verteilungstyp**

Boden- gruppe	ErfW <sup>1</sup>		ErfW <sup>2</sup>		ErfW <sup>3</sup>		ErfW <sup>4</sup>		VarK <sup>5</sup>		VarK <sup>6</sup>		VarK <sup>7</sup>		VarK <sup>8</sup>		VarK <sup>9</sup>		Vertei- lungstyp <sup>5</sup>	
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis		
GE	30	35	34	42					-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GW, GI			35	45					-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GU, GT	-	-	35	43			37,5	42,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GU*, GT*	-	-	28	35					-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SE	30	35	32	40	30	40														
SW, SI			33	41												0,1				
SU, ST	-	-	32	40					0,05	0,15	0,02	0,05	0,05	0,15	0,05	0,14	0,05	0,14	Normal	
SU*, ST*	-	-	25	32			30	35								0,05	0,50			
UL	27,5	28	35	32,5	27,5	32,5			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UM, UA	22,5	25	33	30	25	30		30												
TL	22,5	28	35	30	25	30														
TM	17,5	25	30	27,5	22,5	27,5	20	27,5	0,12	0,56	0,05	0,3	-	-	0,2	0,03	0,56	0,56	Normal	
TA	15	17	27	25	20	25														

Quellen: <sup>1</sup> DIN (2010), <sup>2</sup> Albert (2014), <sup>3</sup> EAU (2012), <sup>4</sup> Türke (1999), <sup>5</sup> Lee et al. (1983), <sup>6</sup> Lacasse & Nadim (1996), <sup>7</sup> Lumb (1974), <sup>8</sup> CUR (1990), <sup>9</sup> Phoon & Kulhawy

**Stochastische Eigenschaften der Kohäsion: Erfahrungswerte (Erfw) in [°], Variationskoeffizienten (VarK) in [-] und Verteilungstyp**

Boden- gruppe	Erfw <sup>1</sup>		Erfw <sup>2</sup>		Erfw <sup>3</sup>		Erfw <sup>4</sup>		VarK <sup>5</sup>		VarK <sup>6</sup>		VarK <sup>7</sup>		Vertei- lungstyp <sup>5</sup>
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	
GE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
GW, GI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
GU, GT	-	-	0	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
GU*, GT*	-	-	5	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
SE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
SW, SI	-	-	-	-	-	-	-	-	0,25	0,3	-	-	-	-	
SU, ST	-	-	0	7	-	-	0	5	-	-	-	-	0,29	Normal	
SU*, ST*	-	-	7	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
UL	0	5	5	10	0	10	-	-	-	-	-	-	-		
UM, UA	0	10	7	20	-	-	5	10	-	-	-	-	-		
TL	0	10	10	35	0	15	-	-	-	-	-	-	-		
TM	5	15	15	45	5	20	15	40	0,2	0,5	0,2	0,5	0,5		
TA			20	60	5	25	-	-	-	-	-	-	-		

Quellen: <sup>1</sup> DIN (2010), <sup>2</sup> Albert (2014), <sup>3</sup> EAU (2012), <sup>4</sup> Türke (1999), <sup>5</sup> Lee et al. (1983), <sup>6</sup> Lumb (1974), <sup>7</sup> Kortzenhaus (2003)



**Stochastische Eigenschaften der Porosität: Erfahrungswerte (ErfW) in [-], Variationskoeffizienten (VarK) in [-] und Verteilungstyp**

Boden- gruppe	ErfW <sup>1</sup>		ErfW <sup>2</sup>		ErfW <sup>3</sup>		ErfW <sup>4</sup>		VarK <sup>5</sup>		VarK <sup>6</sup>		VarK <sup>7</sup>		Vertei- lungstyp <sup>5</sup>
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	
GE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
GW, GI	0,25	0,35	-	-	0,21	0,38	0,2	0,5							
GU, GT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
GU*, GT*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
SE					0,22	0,53	0,2	0,5							
SW, SI															
SU, ST	0,25	0,5	0,3	0,46					0,13	0,42	0,07	0,3	0,15	0,3	Normal
SU*, ST*					0,31	0,44	0,35	0,5							
UL	-	-	-	-											
UM, UA	-	-	-	-	0,34	0,61	0,35	0,5							
TL															
TM	0,25	0,5	0,38	0,55	0,34	0,68	0,33	0,6							
TA															

Quellen: <sup>1</sup> Simmer (1980), <sup>2</sup> Magnan (2000), <sup>3</sup> Schmalz (2011), <sup>4</sup> Koch (2003), <sup>5</sup> Lee et al. (1983), <sup>6</sup> Lacasse & Nadim (1996), <sup>7</sup> Lumb (1974)

Stochastische Eigenschaften des Wassergehalts: Erfahrungswerte (ErFW) in [-], Variationskoeffizienten (VarK) in [-] und Verteilungstyp															
Boden- gruppe	ErFW <sup>1</sup>		ErFW <sup>2</sup>		ErFW <sup>3</sup>		ErFW <sup>4</sup>		VarK <sup>5</sup>		VarK <sup>3</sup>		VarK <sup>4</sup>		Vertei- lungstyp <sup>6</sup>
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	
GE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GW, GI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GU, GT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GU*, GT*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SW, SI	0,16	0,32	0,02	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SU, ST	-	-	-	-	-	-	-	-	0,06	0,63	-	-	-	-	Gamma
SU*, ST*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,06	0,12	-	-	-
UM, UA	-	-	-	-	0,16	0,21	-	1	-	-	-	-	-	-	-
TL	-	-	-	-	-	-	0,13	-	-	-	-	-	0,08	0,3	-
TM	0,22	0,45	0,2	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Quellen: <sup>1</sup> Magnan (2000), <sup>2</sup> Simmer (1980), <sup>3</sup> Kortzenhaus (2003), <sup>4</sup> Phoon & Kulkhaway (1999), <sup>5</sup> Türke (1999), <sup>6</sup> Lee et al. (1983)

## Anhang 7: Haushaltsmittel für Wasserwirtschaftsverwaltung & HW-Schutz (2017-2022) in Mio. EUR

Bundesland	Haushaltsjahr					
	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Sachsen	33,9 <sup>1</sup>	31,6	31,0 <sup>2</sup>	30,0	39,0 <sup>3</sup>	47,2
Niedersachsen	93,0 <sup>4</sup>	88,0	86,0	87,0	87,0	91,6 <sup>5</sup>
Sachsen-Anhalt	9,3 <sup>6</sup>	8,8	12,9 <sup>7</sup>	16,5 <sup>8</sup>	11,8	- <sup>9</sup>
Brandenburg	12,3 <sup>10</sup>	12,3 <sup>11</sup>	18,3 <sup>12</sup>	18,3 <sup>13</sup>	22,12 <sup>14</sup>	21,8 <sup>15</sup>
Bayern	150,0 <sup>16</sup>	150,0	150,0 <sup>17</sup>	150,0	200,0 <sup>18</sup>	200,0 <sup>19</sup>

<sup>1</sup> Sächsisches Förderprofil 2017/2018 zum Sächsischen Staatshaushaltsplan, Tabelle 9, Unterförderbereich 0704 Wasserwirtschaft und Hochwasserschutz

<sup>2</sup> Sächsisches Förderprofil 2019/2020 zum Sächsischen Staatshaushaltsplan, Tabelle 9, Unterförderbereich 0704 Wasserwirtschaft und Hochwasserschutz

<sup>3</sup> Sächsisches Förderprofil 2021/2022 zum Sächsischen Staatshaushaltsplan, Tabelle 9, Unterförderbereich 0704 Wasserwirtschaft und Hochwasserschutz

<sup>4</sup> Mittelfristige Finanzplanung 2017-2021, 21. Februar 2017, Seite 46, Wasserwirtschaft, insb. Küsten- und Hochwasserschutz sowie Fließgewässerentwicklung

<sup>5</sup> Mittelfristige Finanzplanung 2017-2021, 6. Juli 2020, Seite 37, Wasserwirtschaft einschl. Hochwasserschutz

<sup>6</sup> Haushaltsplan für die Haushaltsjahre 2017 und 2018, Einzelplan 15 Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie – Bereich Umwelt und Energie-, Seite 67, Nationales Hochwasserschutzprogramm

<sup>7</sup> Haushaltsplan für das Haushaltsjahr 2019, Einzelplan 15 Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie – Bereich Umwelt und Energie-, Seite 63, Nationales Hochwasserschutzprogramm

<sup>8</sup> Haushaltsplan für die Haushaltsjahre 2020 und 2021, Einzelplan 15 Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie – Bereich Umwelt und Energie-, Seite 67, Nationales Hochwasserschutzprogramm

<sup>9</sup> Stand 27.02.2022 noch kein Haushaltsplan für das Jahr 2022 veröffentlicht

<sup>10</sup> Haushaltsplan 2017/2018, Einzelplan 10, Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft, Land Brandenburg, Seite 10, Deich- und Wasserbau, Hochwasserschutz

<sup>11</sup> Haushaltsplan 2017/2018, Einzelplan 10, Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft, Land Brandenburg, Seite 12, Deich- und Wasserbau, Hochwasserschutz

<sup>12</sup> Haushaltsplan 2019/2020, Einzelplan 10, Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft, Land Brandenburg, Seite 9, Deich- und Wasserbau, Hochwasserschutz

<sup>13</sup> Haushaltsplan 2019/2020, Einzelplan 10, Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft, Land Brandenburg, Seite 11, Deich- und Wasserbau, Hochwasserschutz

<sup>14</sup> Haushaltsplan 2021, Einzelplan 10, Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz, Land Brandenburg, Seite 10, Deich- und Wasserbau, Hochwasserschutz

<sup>15</sup> Haushaltsplan 2022, Einzelplan 10, Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz, Land Brandenburg, Seite 10, Deich- und Wasserbau, Hochwasserschutz

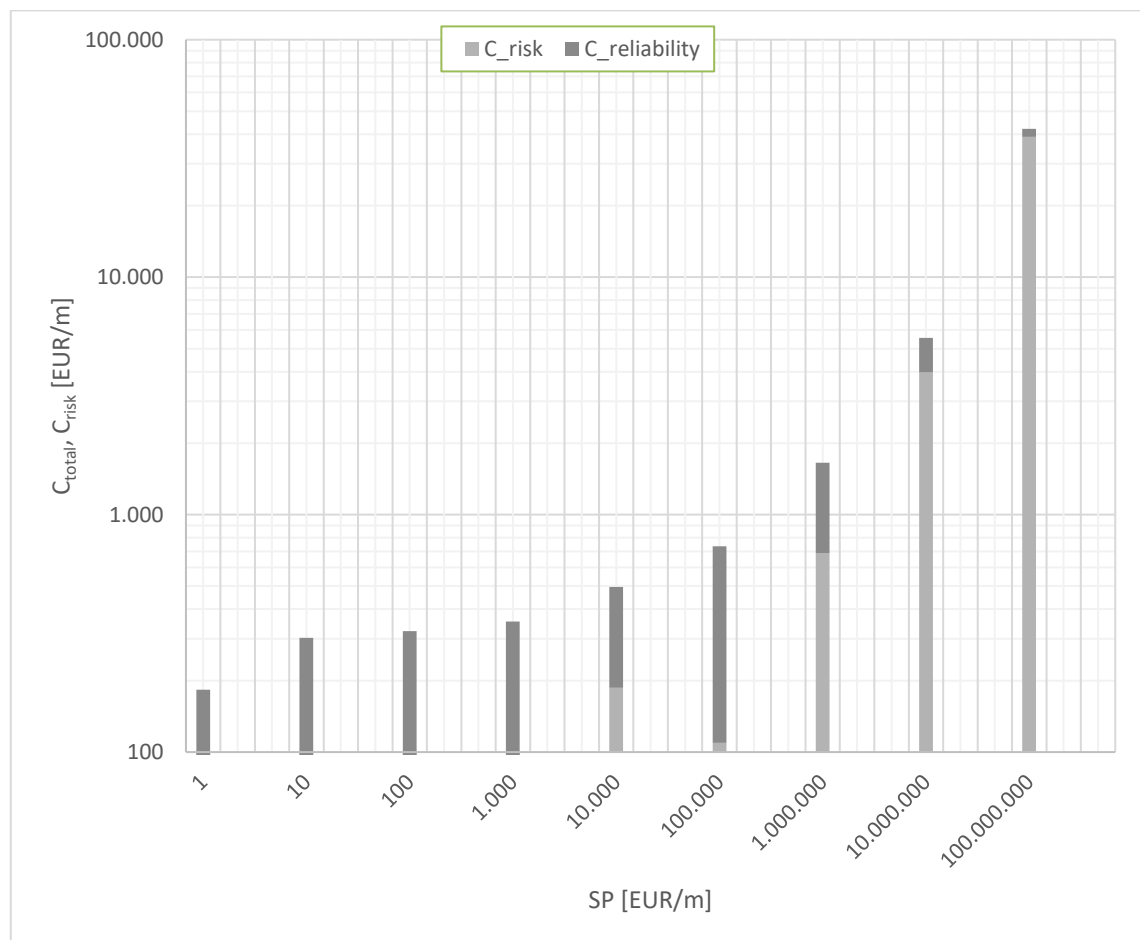
<sup>16</sup> Haushaltsplan 2017/2018, Freistaat Bayern, Einzelplan 12, Seite 223

<sup>17</sup> Haushaltsplan 2019/2020, Freistaat Bayern, Einzelplan 12, Seite 233

<sup>18</sup> Haushaltsplan 2021, Freistaat Bayern, Einzelplan 12, Seite 233

<sup>19</sup> Haushaltsplan 2022 (Entwurf), Freistaat Bayern, Einzelplan 12, Seite 245

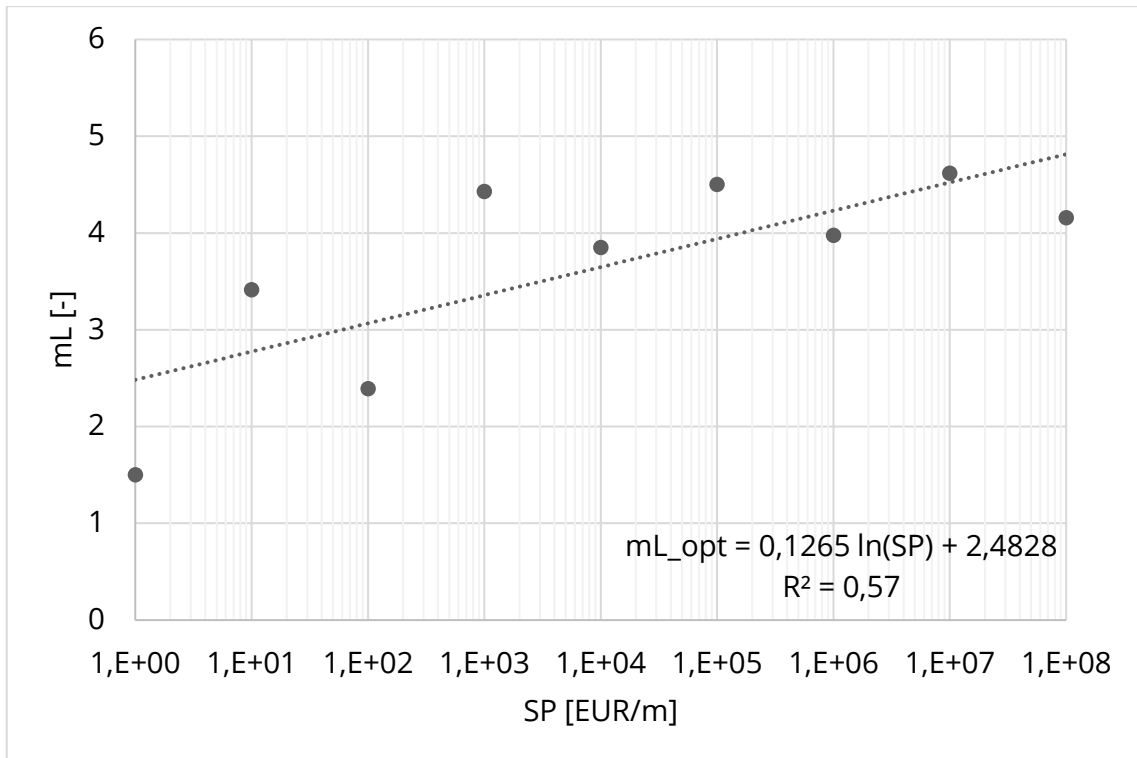
## Anhang 8: Ergänzende Auswertungen in Bezug auf risiko-optimierte Querschnittsaufteilung



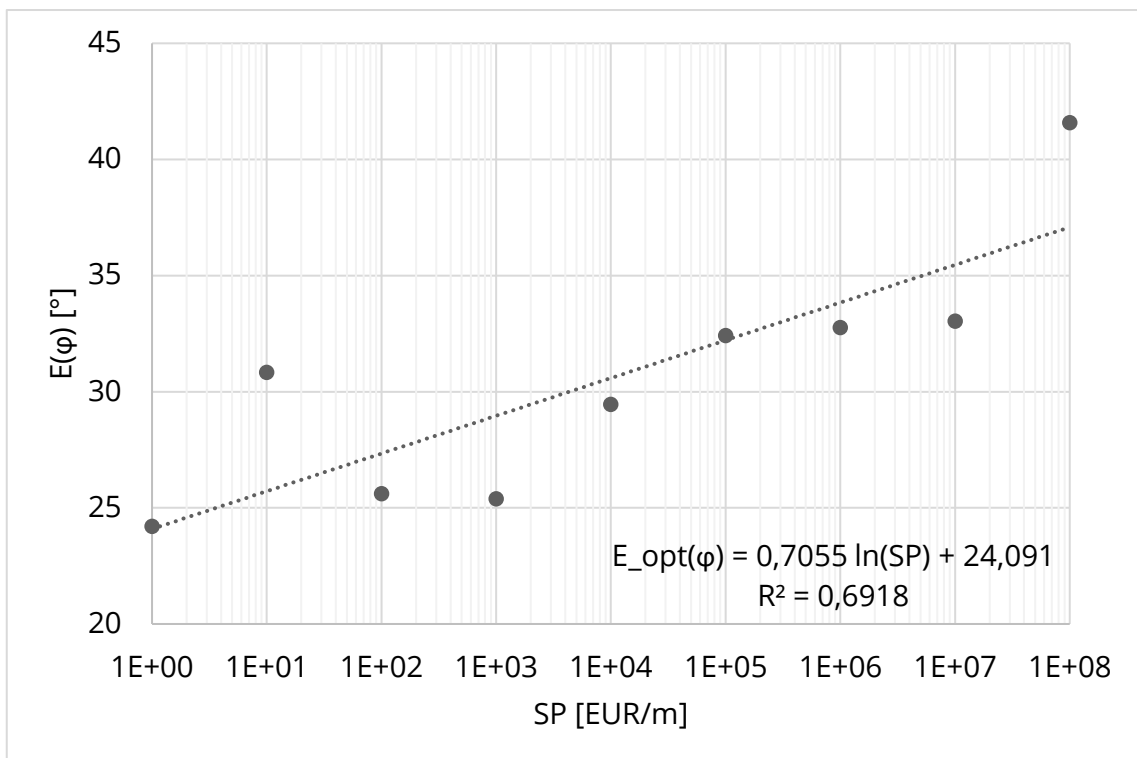
**Abbildung A 2: Absolute Kostenaufteilung in Zuverlässigkeits-  $C_{rel}$  und Risikokosten  $C_{ris}$  in Abhängigkeit ausgewählter Schadenspotentiale SP**

**Tabelle A 13: Ergebnisse der Regressionsanalyse zu den Gesamt-, Risiko und Zuverlässigkeitskosten aus Kapitel 4.3**

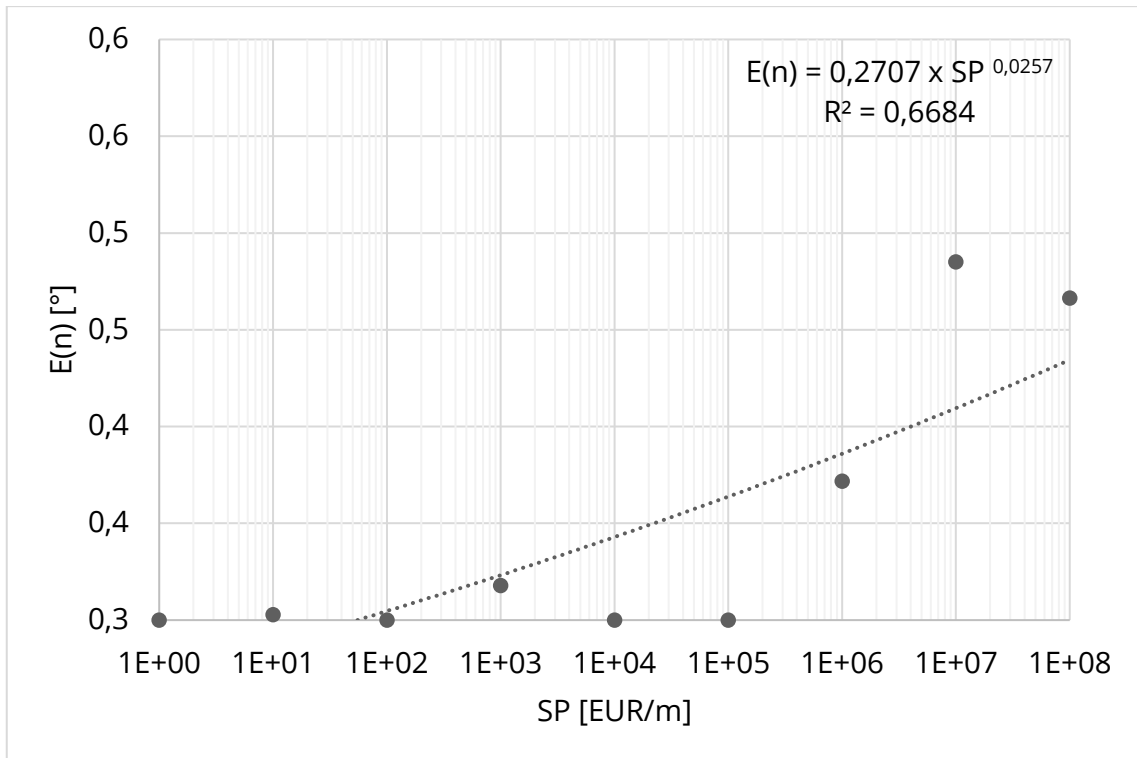
Datensatz	Regressionsmodell	Gleichung
Gesamtkosten	Polynomial	$C_{ges} = -1 \cdot 10^{-12} \cdot C^2 + 0,0005 \cdot C + 484,85$
Risikokosten	Potentiell	$C_{ris} = 0,7011 \cdot C^{0,5452}$
Zuverlässigkeitskosten	Potentiell	$C_{zuv} = 152,37 \cdot C^{0,1402}$



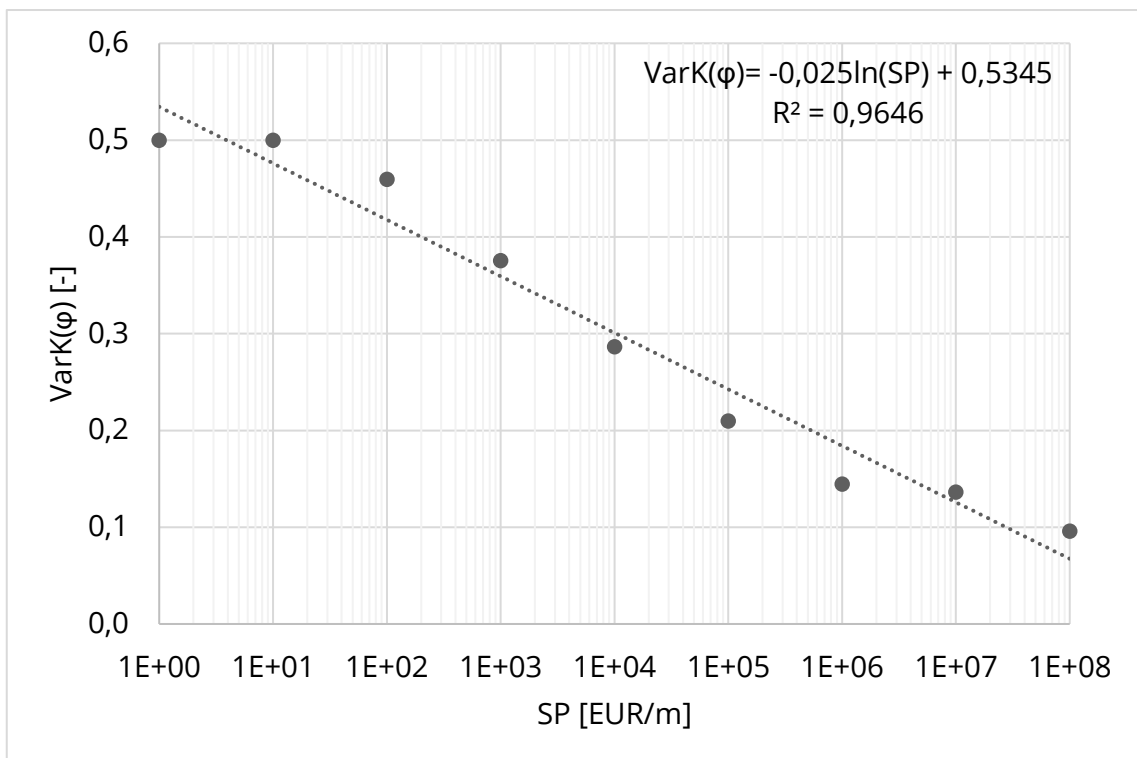
**Abbildung A 3: Optimierte, landseitige Böschungsneigung  $m_L$  für Schadenspotentiale  $SP$  zwischen  $1 \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$  und  $100 \text{ Mio.} \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$**



**Abbildung A 4: Optimierter Erwartungswert des inneren Reibungswinkels  $E(\varphi')$  für Schadenspotentiale  $SP$  zwischen  $1 \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$  und  $100 \text{ Mio.} \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$**



**Abbildung A 5:** Optimierter Erwartungswert der Porosität  $n$  für Schadenspotentiale  $SP$  zwischen  $1 \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$  und  $100 \text{ Mio.} \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$



**Abbildung A 6:** Optimierter Variationskoeffizient des inneren Reibungswinkels  $\text{VarK}(\varphi)$  für Schadenspotentiale  $SP$  zwischen  $1 \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$  und  $100 \text{ Mio.} \frac{\text{EUR}}{\text{m}}$

# Bisher erschienene Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Heft 1 (vergriffen)	1989	Klaus Römisch Empfehlung zur Bemessung von Hafeneinfahrten Eberhard Lattermann Bemessungsgrundlagen für Dichtungen und Deckwerke im Wasserbau
Heft 2 (vergriffen)	1990	Frank Krüger Schubspannungsverteilungen in offenen, geradlinigen Trapez- und Rechteckgerinnen Helmut Martin, Reinhard Pohl Überflutungssicherheit von Talsperren
Heft 3 (vergriffen)	1990	Reinhard Pohl Die Entwicklung der wasserbaulichen Lehre und Forschung an der Technischen Universität Dresden Reinhard Pohl Die Berechnung der auf- und überlaufvermindernden Wirkungen von Wellenumlenkern im Staudammbau
Heft 4 (vergriffen)	1991	Ellen Haufe Hydromechanische Untersuchungen von Mischungs-, Flockungs- und Sedimentationsprozessen in der Trinkwasseraufbereitung
Heft 5	1994	Wasserbaukolloquium 1993 Die Elbe - Wasserstraße und Auen
Heft 6 (vergriffen)	1995	Wasserbaukolloquium 1994 Wasserkraft und Umwelt ISBN 3-86005-154-7
Heft 7	1995	Wasserbaukolloquium 1995 Hydromechanische Beiträge zum Betrieb von Kanalnetzen ISBN 3-86005-155-5
Heft 8	1996	Detlef Aigner Hydrodynamik in Anlagen zur Wasserbehandlung ISBN 3-86005-164-4

Heft 9 (vergriffen)	1996	Wasserbaukolloquium 1996 Wellen: Prognosen - Wirkungen - Befestigungen ISBN 3-86005-165-2
Heft 10	1997	Wasserbaukolloquium 1997 Sanierung und Modernisierung von Wasserbauwerken, aktuelle Beispiele aus Deutschland, Polen, der Slowakei und Tschechien ISBN 3-86005-185-7
Heft 11 (vergriffen)	1997	Reinhard Pohl Überflutungssicherheit von Talsperren ISBN 3-86005-186-5
Heft 12 (vergriffen)	1998	Reinhard Pohl Die Geschichte des Institutes für Wasserbau an der Technischen Universität Dresden ISBN 3-86005-187-3
Heft 13	1998	Wasserbaukolloquium 1998 Hydraulische und numerische Modelle im Wasserbau, Entwicklung - Perspektiven ISBN 3-86005-201-2
Heft 14	1998	Uwe Müller Deformationsverhalten und Belastungsgrenzen des Asphaltbetons unter den Bedingungen von Staudammkerndichtungen ISBN 3-86005-213-6
Heft 15	1999	Wasserbaukolloquium 1999 Betrieb, Instandsetzung und Modernisierung von Wasserbauwerken ISBN 3-86005-223-3
Heft 16	1999	Dirk Carstensen Beanspruchungsgrößen in Fließgewässern mit geschwungener Linienführung ISBN 3-86005-236-5
Heft 17 (vergriffen)	1999	Ehrenkolloquium Prof. Martin anlässlich des 60. Geburtstages von Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Martin ISBN 3-86005-237-3



- |         |      |   |
|---------|------|---|
| Heft 18 | 2000 | Wasserbaukolloquium 2000<br>Belastung, Stabilisierung und Befestigung von Sohlen und Böschungen<br>wasserbaulicher Anlagen<br>ISBN 3-86005-243-8  |
| Heft 19 | 2001 | Seleshi B. Awulachew<br>Investigation of Water Resources Aimed at Multi-Objective<br>Development with Respect to Limited Data Situation: The Case of<br>Abaya-Chamo Basin, Ethiopia<br>ISBN 3-86005-277-2 |
| Heft 20 | 2001 | Stefan Dornack<br>Überströmbare Dämme Beitrag zur Bemessung von Deckwerken aus<br>Bruchsteinen<br>ISBN 3-86005-283-7  |
| Heft 21 | 2002 | Wasserbaukolloquium 2002<br>Innovationen in der Abwasserableitung und Abwassersteuerung<br>ISBN 3-86005-297-7   |
| Heft 22 | 2002 | Zelalem Hailu G. Chirstos<br>Optimisation of Small Hydropower Sites for Rural Electrification<br>ISBN 3-86005-304-3   |
| Heft 23 | 2002 | Ehrenkolloquium Prof. Wagner<br>Zur Emeritierung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Harold Wagner<br>ISBN 3-86005-307-8  |
| Heft 24 | 2003 | Wasserbaukolloquium 2003<br>Gewässer in der Stadt<br>ISBN 3-86005-358-2   |
| Heft 25 | 2003 | Toufik Tetah<br>Numerische Simulation des dynamischen Verhaltens von Caisson-<br>Wellenbrecher-Gründungen unter Einwirkung brechender Wellen<br>ISBN 3-86005-363-9  |
| Heft 26 | 2003 | Ehrenkolloquium Prof. Horlacher<br>Zum 60. Geburtstag von Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-B.<br>Horlacher<br>ISBN 3-86005-376-0  |

Heft 27 (vergriffen)	2004	Wasserbaukolloquium 2004 Risiken bei der Bemessung und Bewirtschaftung von Fließgewässern und Stauanlagen ISBN 3-86005-414-7
Heft 28	2004	Reinhard Pohl Historische Hochwasser aus dem Erzgebirge ISBN 3-86005-428-7
Heft 29 (vergriffen)	2005	Wasserbaukolloquium 2005 Stauanlagen am Beginn des 21. Jahrhunderts ISBN 3-86005-461-9
Heft 30	2005	Nigussie Teklie Girma Investigation on Sediment Transport Characteristics and Impacts of Human Activities on Morphological Processes of Ethiopian Rivers: Case Study of Kulfo River, Southern Ethiopia ISBN 3-86005-483-X
Heft 31	2006	Matthias Standfuß Druckwellenausbreitung in erdverlegten Rohrleitungen aus PE-HD ISBN 3-86005-495-3
Heft 32	2006	Wasserbaukolloquium 2006 Strömungssimulation im Wasserbau ISBN 3-86005-473-2
Heft 33	2006	Antje Bornschein Die Ausbreitung von Schwallwellen auf trockener Sohle unter besonderer Berücksichtigung der Wellenfront ISBN 3-86005-523-2
Heft 34	2007	Torsten Frank Hochwassersicherheit in sielbeeinflussten Gewässersystemen am Beispiel des Bongsieler Kanals ISBN 978-3-86780-019-8
Heft 35	2007	Wasserbaukolloquium 2007 Fünf Jahre nach der Flut ISBN 987-3-86005-571-7
Heft 36	2008	Aktuelle Forschungen 1993 – 2008 Zum 65. Geburtstag von Herrn Prof. Horlacher ISBN 978-3-86780-083-9

Heft 37	2009	Dirk Carstensen Eis im Wasserbau - Theorie, Erscheinungen, Bemessungsgrößen ISBN 978-3-86780-099-0
Heft 38 (vergriffen)	2009	Reinhard Pohl, Antje Bornschein, Robert Dittmann, Stefano Gilli Mehrzieloptimierung der Steuerung von Talsperren zur Minimierung von Hochwasserschäden im Unterwasser ISBN 978-3-86780-100-3
Heft 39 (vergriffen)	2009	Wasserbaukolloquium 2009 Wasserkraftnutzung im Zeichen des Klimawandels, angepasste Strategien - neue Technologien ISBN 978-3-86780-101-0
Heft 40 (vergriffen)	2010	Wasserbaukolloquium 2010 Wasserbau und Umwelt - Anforderungen, Methoden, Lösungen ISBN 978-3-86780-101-0
Heft 41	2010	Ralf Tackmann Erosion 2008 - Ein numerisches Modell zur Prognose des Bodenaustrages von kohäsiven Böden unter Berücksichtigung der Rillenerosion ISBN 978-3-86780-158-4
Heft 42	2010	Ulf Helbig Tragverhalten und Berechnung von mehrschichtigen Verbundrohren ISBN 978-3-86780-159-1
Heft 43	2010	Stefano Gilli Die Wirkung von Flussaufweitungen auf Hochwasserwellen - Parameterstudie einer Deichrückverlegung im Flussmittellauf ISBN 978-3-86780-160-7
Heft 44	2010	Negede Abate Kassa Probabilistic Safety Analysis of Dam - Methods and Applications ISBN 978-3-86780-161-4
Heft 45 (vergriffen)	2011	Wasserbaukolloquium 2011 Wasserkraft - Mehr Wirkungsgrad + Mehr Ökologie = Mehr Zukunft ISBN 978-3-86780-198-0

Heft 46	2011	Torsten Heyer Zuverlässigkeitsbewertung von Flussdeichen nach dem Verfahren der logistischen Regression ISBN 978-3-86780-197-3
Heft 47	2011	Wasserbaukolloquium 2012 Staubauwerke - Planen, Bauen, Betreiben ISBN 978-3-86780-261-1
Heft 48	2013	Wasserbaukolloquium 2013 Technischer und organisatorischer Hochwasserschutz - Bauwerke, Anforderungen, Modelle ISBN 978-3-86780-318-2
Heft 49	2013	Vinzent Sturm Simulation der Fluid-Struktur-Interaktion mit freier Oberfläche am Beispiel des Schlauchwehres unter Anwendung von Ansys/CFX ISBN 978-3-86780-348-9
Heft 50	2014	Wasserbaukolloquium 2014 Simulationsverfahren und Modelle für Wasserbau und Wasserwirtschaft ISBN 978-3-86780-349-6
Heft 51	2014	Holger Haufe Zwischenauslässe an Talsperren - Beispiele, Bemessung, Konstruktion, Nachrüstung ISBN 978-3-86780-393-9
Heft 52	2014	Pohl/Bornschein u. a. Effect of very oblique waves on wave run-up and wave overtopping ISBN 978-3-86780-392-2
Heft 53	2015	Wasserbaukolloquium 2015 Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer ISBN 978-3-86780-420-2
Heft 54	2015	Mohammed Abdallah Developing a Multi-purpose Reservoir operating Model with Uncertain Conditions: a Case of Eastern Nile Reservoirs - Sudan ISBN 978-3-86780-431-8
Heft 55	2015	Paolo Dapoz Reinigung von Abwasserkanälen mittels Niederdruckspülverfahren ISBN 978-3-86780-432-5

Heft 56	2015	JuWi-Treffen 17. JuWi-Treffen: Fachbeiträge zur Tagung (26.-28.08.2015) ISBN 978-3-86780-448-6
Heft 57	2016	Wasserbaukolloquium 2016 Gewässerentwicklung & Hochwasserrisikomanagement ISBN 978-3-86780-475-2
Heft 58	2017	Wasserbaukolloquium 2017 Bemessung im Wasserbau - Klimaanpassung, Untersuchung, Regeln, Planung, Ausführung ISBN 978-3-86780-509-4
Heft 59	2017	Roberto Tatis Muvdi A contribution to the hydro morphological assessment of running waters based on habitat dynamics. ISBN 978-3-86780-512-4
Heft 60	2018	Wasserbaukolloquium 2018 Wasserbauwerke im Bestand - Sanierung, Umbau, Ersatz-neubau und Rückbau ISBN 978-3-86780-556-8
Heft 61	2018	Lydia Schulze Development of an Application-Oriented Approach for Two-Phase Modelling in Hydraulic Engineering 978-3-86780-571-1
Heft 62	2019	Wasserbaukolloquium 2019 Komplexe Planungsaufgaben im Wasserbau und ihre Lösungen 978-3-86780-577-3
Heft 63	2020	Wasserbaukolloquium 2020 Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel 978-3-86780-627-5
Heft 64	2020	Rocco Zimmermann Einbindung von turbulenten Zustandsgrößen der Propulsionsbelastung des Bugstrahlruders in die Bemessung von Schüttsteindeckwerken an Binnenschiffahrtsstraßen 978-3-86780-649-7

- |         |      |  |
|---------|------|--|
| Heft 65 | 2021 | Wasserbaukolloquium 2021<br>Wasserbau zwischen HochWASSER UND Wassermangel<br>(Hydraulic Engineering between Floods and Water Scarcity)<br>ISBN 978-3-86780-662-6                                    |
| Heft 66 | 2021 | Bashar Ismael<br>Fluid- und Feststofftransport in Rohrsystemen und Pumpstationen<br>ISBN 978-3-86780-660-2   |
| Heft 67 | 2021 | Hellen Hammoudi<br>Modeling of Mixing in Cross Junction using Computational Fluid<br>Dynamics<br>ISBN 978-3-86780-668-8  |
| Heft 68 | 2022 | Wasserbaukolloquium 2022<br>Nachhaltigkeit im Wasserbau – Umwelt, Transport, Energie<br>(Sustainability in Hydraulic Engineering – Environment, Transportation,<br>Energy)<br>ISBN 978-3-86780-710-4 |
| Heft 69 | 2023 | Wasserbaukolloquium 2023<br>Wasserbau und Wasserwirtschaft im 'Stresstest' (Hydraulic<br>Engineering and Water Management under 'Stress Test')<br>ISBN 978-3-86780-731-9                             |
| Heft 70 | 2023 | Muhammad Adnan Khan<br>Sustainable Reservoir Management Approaches under Impacts of<br>Climate Change - A Case Study of Mangla Reservoir, Pakistan<br>ISBN 978-3-86780-750-0                         |
| Heft 71 | 2023 | Niklas Schwiersch<br>Ein risikobasierter Planungsansatz für homogene Flusssdeiche<br>ISBN 978-3-86780-751-7  |

Die Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen können bezogen werden über:

Technische Universität Dresden  
Bereich Bau und Umwelt  
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik  
01062 Dresden

Telefon: +49 351 463 34397  
Fax: +49 351 463 37120  
E-Mail: [wasserbau@tu-dresden.de](mailto:wasserbau@tu-dresden.de)

Ein großer Teil unserer Hefte ist digitalisiert und im „Hydraulic Engineering Repository – HENRY“ der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) einzusehen.

<https://henry.baw.de/>