

Probabilistische Bewertung der Zuverlässigkeit von Flussdeichen unter  
hydraulischen und geotechnischen Gesichtspunkten

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften

des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Rainer Weißmann

aus Heidelberg

Tag der mündlichen Prüfung: 02.06.2014

Referenten:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Franz Nestmann

Prof. Dr.-Ing. habil. Josef Brauns

Dr.-Ing. habil. Alexander Scheuermann

Karlsruhe (2014)



## Kurzfassung

Deiche entlang von Fließgewässern haben vornehmlich die Aufgabe, im Falle eines Einstaus während eines Hochwasserereignisses das Hinterland vor Überschwemmung zu schützen. In der Regel entsprechen die über Jahrhunderte gewachsenen Deiche (sogenannte Altdeiche) nicht den zwischenzeitlich vorliegenden Anforderungen der Regelwerke, deren Annahmen für die deterministische Bemessung auf der sicheren Seite liegen. Vor diesem Hintergrund ist eine Aussage über den tatsächlich vorhandenen Schutz durch Altdeiche vor Hochwasser nur schwer möglich.

Diese Lücken werden mit dem vorliegenden Modell für die probabilistische Bewertung des Gesamtsystems aus Deich und Untergrund geschlossen. Zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit eines Gesamtsystems aus Deich und Untergrund ist die umfassende Betrachtung aller betroffenen Teilsysteme erforderlich, die zu diesem Versagen beitragen können. Neben dem Wasserstand als maßgebliche Einwirkung werden alle relevanten Widerstände des Deichkörpers sowie des Deichuntergrundes gegen hydraulische und geotechnische Versagensformen untersucht.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird zunächst die deterministische Vorgehensweise zur Bemessung von Flussdeichen gemäß dem Stand der Technik erläutert (Nachweise zur Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Erosionssicherheit). Hiervon werden die Standsicherheitsnachweise aufgegriffen und in das probabilistische Bewertungskonzept überführt. Die Zusammenhänge der Versagensszenarien werden in einem Fehlerbaum visualisiert. Der so entwickelte *Fehlerbaum für Flussdeiche* wird anschließend erweitert, um einzelne Versagensabläufe in dem entwickelten probabilistischen Modell realitätsnäher abzubilden.

Der erweiterte Fehlerbaum für Flussdeiche umfasst unter anderem die im Folgenden erläuterten Neuerungen:

- Die Versagensmechanismen *Verlust der Sicherheit gegen Aufschwimmen* sowie die nachfolgende *Rückschreitende Erosion (Piping)* werden um den Versagensmechanismus *Sackungen im Deichkörper* erweitert. Hieraus ergibt sich eine Reduzierung der Wahrscheinlichkeit für *Deichversagen*.

- Für drei *Böschungsbruch*-Versagensmechanismen wurde als Vorbedingung der Mechanismus der *instationären Durchfeuchtung des Deichkörpers* neu eingeführt. Hierfür wird ein iteratives Verfahren entwickelt, um zu prüfen, ob sich in Abhängigkeit der Charakteristik der Hochwasserwelle ein stationärer Durchströmungszustand im Deichkörper einstellen kann. Hierbei können der strukturelle Aufbau des Deichkörpers, seine Materialeigenschaften sowie eine mögliche Vorfeuchte im Deichkörper berücksichtigt werden. Lediglich für den Fall, dass die Sickerlinie noch während des Hochwasserereignisses (Einstau des Deiches) den landseitigen Böschungfußpunkt erreicht, ist der Ansatz der stationären Durchströmung für den darauf folgenden Böschungsbruch-Mechanismus gerechtfertigt. Die Berücksichtigung der instationären Durchfeuchtung als Vorbedingung für die Ermittlung von Versagenswahrscheinlichkeiten hat eine u. U. signifikante Reduzierung der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit zur Folge.

Die praktische Anwendung der probabilistischen Bewertung wird an einem Beispieldeich, der den Gegebenheiten von Flussdeichen im Niederrheingebiet angepasst ist, vorgeführt und diskutiert. Der Einfluss der Neu- und Weiterentwicklungen des Fehlerbaumes für Flussdeiche auf das Deichversagen wird umfassend und auf mehreren Ebenen dargestellt:

- Die Neuentwicklung und das Hinzufügen von Versagensmechanismen zur realistischeren Abbildung von Versagensprozessen: Versagensmechanismen *Sackungen im Deichkörper* sowie *Instationäre Durchfeuchtung des Deichkörpers*.
- Der Einfluss von weiterentwickelten Versagensmechanismen, die auf der Grundlage genauerer Kenntnisse Versagensprozesse präziser abbilden können: Vergleich des Versagensmechanismus *Piping (nach Lane)* und des Versagensmechanismus *Piping (nach Weijers & Sellmeijer)*.
- Einfluss von verbesserten Informationen über einzelne Parameter. Die hieraus resultierende verringerte Unsicherheit, die einem Parameter zuzuordnen ist, wird durch einen verringerten Variationskoeffizienten abgebildet. Dessen Einfluss wird beispielhaft für den Parameter der *hydraulischen Durchlässigkeit des Deichmaterials* aufgezeigt.

Insgesamt ist mit dem entwickelten und vorgestellten probabilistischen Modell eine realitätsnähere und aussagekräftigere Bewertung der Zuverlässigkeit von Flussdeichen möglich.

## Abstract

Dikes along watercourses have primarily the task to protect the hinterland against flooding in the case of reservoir inundation during a flood event. Dikes that have evolved over centuries (so-called ancient dikes) are generally not in accordance with the rules and standards, which meanwhile have been developed, and whose deterministic design criteria are chosen to be on the safe side. Against this background, it is difficult to make a statement about the actually existing degree of protection ancient dikes provide against flooding.

The present model for the probabilistic assessment of the overall system consisting of dikes and underground closes these gaps. To determine the failure probability of a complete system composed of dike body and subsoil, it is necessary to comprehensively consider all affected subsystems that potentially can contribute to failure. In addition to the water level as the leading influence, also the dike body's and the dike subsoil's resistance to hydraulic and geotechnical failure modes are examined.

First, the deterministic approach for the design of river dikes according to the current state-of-the-art is explained. Based hereon, the stability proofs are picked up and transferred to the probabilistic evaluation concept. The interrelationships of the failure scenarios are visualized in a fault tree. The developed fault tree for river dikes is then extended in order to realistically reproduce individual failure processes in the developed framework of the probabilistic model.

The extended fault tree for river dikes comprises amongst others the following improvements to dike failure which are comprehensively illustrated on multiple levels:

- The failure mechanisms loss of safety against heave and subsequent retrograde erosion (piping) are extended by the additional failure mechanism settling in the dike body. This results in a reduced probability for dike failure.
- For three failure mechanisms of slope rupture, as a prerequisite, the new developed failure mechanism of transient seepage of the dike body was introduced. For this purpose, an iterative procedure is developed to check – as a function of the characteristics of the flood hydrograph – whether a steady-state flow can arise in the dike body. Here, the structural design of the dike body, its material

properties and also possible antecedent soil moisture in the dike body can be taken into account. Only for the case that the seepage line already in the course of the flood event reaches the landside point of slope toe, the approach of the steady-state flow for the subsequent failure mechanism of slope rupture is justified. Considering transient seepage as prerequisite for the assessment of failure probabilities leads to a potentially significant reduction of the overall failure probability.

The practical application of the probabilistic assessment is demonstrated and discussed for an example dike, which is adapted to the conditions of river dikes in the Lower Rhine area. The influence of improvements and new developments to dike failure are comprehensively illustrated on multiple levels:

- The new development and addition of failure mechanisms for more realistic reproduction of failure processes: failure mechanisms settling in the dike body as well as transient seepage of the dike body.
- The impact of advanced failure mechanisms, which – based on the more accurate knowledge of failure processes – can reproduce failure processes more precisely: comparison of the failure mechanism piping (according to Lane) and the failure mechanism piping (according to Weijers & Sellmeijer).
- Impact of improved information about individual parameters. The resulting reduced uncertainty, which is to be assigned to a parameter, is reproduced by a reduced coefficient of variation. The influence of the latter is exemplarily illustrated for the parameter of hydraulic permeability of the dike material.

Overall, the proposed probabilistic model enables for a more realistic and more meaningful assessment of the reliability of river dikes.





*Der Damm zerreißt, das Feld erbraust,*

*Die Fluten spülen, die Fläche saust.*

*[...]*

*Der Damm zerschmilzt, das Feld erbraust,*

*Die Fluten wühlen, die Fläche saust.*

*[...]*

*Der Damm verschwand, ein Meer erbraust's*

*Den kleinen Hügel im Kreis umsaust's*

*[...]*

*Kein Damm, kein Feld! Nur hier und dort*

*Bezeichnet ein Baum, ein Turm den Ort.*

*Johann Wolfgang von Goethe*

*Auszüge aus Johanna Sebus (Mai 1809)*



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Problemstellung und eigene Vorgehensweise.....</b>	<b>5</b>
2.1	Problemstellung .....	5
2.2	Vorgehensweise für die probabilistische Bewertung .....	6
<b>3</b>	<b>Deterministische Bemessung und Risikomanagement .....</b>	<b>11</b>
3.1	Deterministische Bemessungsverfahren .....	11
3.2	Risikobetrachtung .....	14
3.3	Eignung von probabilistischen Methoden.....	15
3.4	Monte-Carlo-Simulation .....	20
<b>4</b>	<b>Beschreibung von Unsicherheiten.....</b>	<b>23</b>
4.1	Charakterisierung von Unsicherheiten.....	23
4.2	Modellunsicherheit .....	24
4.3	Unsicherheiten infolge räumlicher Variabilität .....	27
4.4	Unsicherheiten bei geometrischen Parametern .....	28
4.5	Korrelation von Parametern .....	30
<b>5</b>	<b>Parameter.....</b>	<b>33</b>
5.1	Zeitlich veränderliche Parameter (Wasserstand und Wind).....	33

5.2	Räumlich veränderliche Parameter.....	37
5.2.1	Allgemeines.....	37
5.2.2	Im Modell verwendete Parameter .....	39
5.3	Invariante Parameter.....	41
5.4	Einfluss von Klimaveränderung.....	42
<b>6</b>	<b>Der Fehlerbaum und seine Umsetzung im Modell.....</b>	<b>45</b>
6.1	Allgemeines zur Fehlerbaumanalyse .....	45
6.2	Fehlerbaum für Flussdeiche.....	49
6.3	Umsetzung des Fehlerbaumes im Modell.....	51
<b>7</b>	<b>Versagensmechanismen .....</b>	<b>55</b>
7.1	Hinführung und Überblick.....	55
7.2	Überströmen der Deichkrone .....	56
7.3	Verlust der Sicherheit gegen Aufschwimmen .....	58
7.4	Rückschreitende Erosion (Piping) .....	60
7.5	Sackungen im Deichkörper .....	65
7.5.1	Herleitung und Definition des Sackungsfaktors.....	65
7.5.2	Übertragung des Mechanismus Sackungen im Deichkörper auf das Modell.....	68
7.5.3	Empfehlungen zur Verwendung des Sackungsfaktors.....	70
7.6	Instationäre Durchfeuchtung des Deichkörpers .....	72
7.6.1	Bisherige Betrachtungsweise.....	72

7.6.2	Der Vorgang der instationären Durchfeuchtung.....	73
7.6.3	Analytische Lösung für die instationäre Durchfeuchtung.....	74
7.6.4	Eingangsgrößen für das erweiterte analytische Modell .....	77
7.6.5	Anpassung des erweiterten analytischen Modells .....	80
7.7	Böschungsbruch .....	84
7.7.1	Allgemeines .....	84
7.7.2	Böschungsbruch mit Gleitfuge durch den landseitigen Böschungsfuß....	86
7.7.3	Böschungsbruch mit tiefliegender Gleitfuge (Böschungsgrundbruch) ....	88
7.7.4	Böschungsgrundbruch mit reduzierten Scherparametern.....	89
7.8	Deichverteidigungsmaßnahmen und menschliches Versagen .....	90
7.8.1	Technische Vorsorgemaßnahmen im Hochwasserfall .....	90
7.8.2	Monitoring und menschliches Versagen.....	92
7.8.3	Folgerungen für das entwickelte Modell .....	96
7.9	Weitere Versagensmechanismen.....	96
<b>8</b>	<b>Anwendung der probabilistischen Bewertung an einem Beispieldeich</b>	<b>99</b>
8.1	Einführung und Beschreibung des Beispieldeiches .....	99
8.1.1	Einführung .....	99
8.1.2	Beschreibung des Beispieldeiches.....	100
8.2	Deichversagen in der Ausgangssituation .....	104
8.3	Einfluss der Streubreite von Parametern am Beispiel des Parameters hydraulische Durchlässigkeit des Deiches.....	107

8.4	Einfluss der statistischen Abhängigkeit von Parametern am Beispiel des Parameters hydraulische Durchlässigkeit des Deichuntergrundes .....	110
8.4.1	Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit .....	110
8.4.2	Vorgabe der hydraulischen Durchlässigkeit im Modell .....	112
8.4.3	Einfluss der statistischen Abhängigkeit des Parameters hydraulische Durchlässigkeit des Deichuntergrundes .....	113
8.5	Einfluss der Berechnungsmethode für den Mechanismus Piping in Abhängigkeit der Datengrundlage .....	118
8.6	Einfluss des Mechanismus Sackungen im Deichkörper auf das Deichversagen .....	121
8.6.1	Ziel der Untersuchungen .....	121
8.6.2	Beschreibung der untersuchten Szenarien .....	121
8.6.3	Betrachtung ohne den Mechanismus Sackungen im Deichkörper mit unterschiedlichen Berechnungsmethoden für Piping .....	122
8.7	Einfluss des Mechanismus instationäre Durchfeuchtung .....	123
8.8	Ergebnis der Untersuchungen .....	124
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>129</b>
9.1	Fazit .....	129
9.2	Hinweise für die Anwendung des Modells .....	132
9.3	Ausblick zum Rechenmodell .....	133
9.4	Ausblick zu den Versagensmechanismen .....	136
9.4.1	Erweiterung der Mechanismen Überströmen und Sackung .....	136
9.4.2	Entwicklungen zu den Böschungsbruch-Mechanismen .....	137

9.4.3	Möglichkeiten bei der Ermittlung der instationären Durchfeuchtung..	138
9.4.4	Verlust der Sicherheit gegen Hydraulischen Grundbruch .....	140
9.4.5	Wellenüberschlag.....	141
9.4.6	Deichverteidigungsmaßnahmen und weitere Einflussgrößen .....	141
9.4.7	Ausblick auf einen erweiterten Fehlerbaum.....	142
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>143</b>
<b>11</b>	<b>Bildverzeichnis.....</b>	<b>157</b>
<b>12</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>161</b>



# Symbolverzeichnis

## Kleinbuchstaben, lateinisch

$b$	[m]	Durchfeuchtete Strecke der Deichaufstandsstrecke vom wasserseitigen Böschungsfuß aus
$b_D$	[m]	Deichlagerbreite
$b_{Lam}$	[m]	Breite einer Lamelle (Böschungsstandsicherheit)
$b_{Pipe}$	[m]	Breite der Erosionsröhre (Pipe)
$b_V$	[m]	Vorlandbreite
$c$	[kN/m <sup>2</sup> ]	Kohäsion in der Gleitfuge einer Lamelle
$c_B$		Koeffizient nach <i>Bligh</i>
$c_L$		Koeffizient nach <i>Lane</i>
$c_S$		Funktionsterm nach <i>Weijers &amp; Sellmeijer</i>
$c_V$		Variationskoeffizient
$d_{70}$	[mm]	Korndurchmesser bei 70% Massenanteil der Korngrößenverteilung
$d_D$	[m]	Mächtigkeit der gering durchlässigen Deckschicht
$d_w$	[mm]	Wirksamer Korndurchmesser
$f_{kor}$	[-]	Korrekturfaktor instationäre Durchfeuchtung

$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
$h_A$	[m]	Mächtigkeit des Aquifers
$h_{fS}$	[m]	Mächtigkeit der Feinsandschicht
$h_{krit,WS}$	[m]	Kritische Potentialdifferenz für <i>Piping</i> nach <i>Weijers &amp; Sellmeijer</i>
$h_s$	[m]	Ortshöhe der Sickerlinie über der Gleitfuge
$h_u$	[m]	Potentialhöhe (Böschungsstandsicherheit)
$h_{\ddot{u}b}$	[m]	Überlagerungshöhe (Mächtigkeit von Deckschicht und Deichhöhe)
$k_f$	[m/s]	Hydraulische Durchlässigkeit
$l_S$	[m]	Sickerweglänge aus Deichlagerbreite $b_D$ und ggf. Vorlandbreite $b_V$
$m$		Modellunsicherheitsfaktoren
$m_{add}$		Modellunsicherheitsfaktor mit additivem Ansatz
$m_L$	[-]	Neigung der landseitigen Böschung
$m_{mult}$		Modellunsicherheitsfaktor mit multiplikativem Ansatz
$m_W$	[-]	Neigung der wasserseitigen Böschung
$n$	[-]	Porenanteil des Aquifers
$n_a$	[-]	Lufterfüllter Porenraum
$n_{exp}$		Anzahl an Versuchen
$n_{ges}$		Gesamtanzahl an Versuchen
$p_{red}$	[m/100m]	Relativer Druckabbau

$r$	[m]	Radius des Gleitkreises
$s$	[m]	Sackung der Deichkrone
$t$	[s]	Zeitdauer
$t_{auf}$	[h]	Dauer des Aufstaus während eines Hochwasserereignisses
$t_D$	[h]	Dauer der Durchfeuchtung entlang Deichaufstandsstrecke
$t_{kor}$	[h]	Korrigierte Durchfeuchtungsdauer
$u$	[kN/m <sup>2</sup> ]	Porenwasserdruck auf die Gleitfuge einer Lamelle
$v_{auf}$	[cm/h]	Aufstaugeschwindigkeit
$x^*$	[m]	Mittlere Fließstrecke
$x_{calc}$		Berechnete Werte
$y_{mess}$		Gemessene Werte

### Großbuchstaben, lateinisch

$A$		Ereignis A
$B$		Ereignis B
$C_K$		Koeffizient bei der Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit aus der Korngrößenverteilung
$GOK_{Land}$	[mNN]	Geländeoberkante des landseitigen Deichfußes
$H_K$	[mNN]	Kronenhöhe des Deiches
$H_L$	[mNN]	Wasserstandshöhe auf der Landseite

$H_w$	[mNN]	Wasserstandshöhe auf der Wasserseite
$M_h$	[Nm]	Haltendes Moment (Böschungsstandsicherheit)
$M_s$	[Nm]	Moment von nicht in $G$ enthaltenen Einwirkungen um den Mittelpunkt des Gleitkreises
$M_t$	[Nm]	Treibendes Moment (Böschungsstandsicherheit)
$P$		Wahrscheinlichkeit
$P_f$		Versagenswahrscheinlichkeit
$P_{\ddot{u}}$		Überschreitungswahrscheinlichkeit
$R$		Widerstand
$S$		Einwirkung
$S_r$	[-]	Sättigungsgrad
$U$	[-]	Ungleichförmigkeitszahl der Korngrößenverteilung
$Z$		Ergebnis der Grenzzustandsgleichung

### Buchstaben, griechisch

$\alpha_s$		Funktionsterm nach <i>Weijers &amp; Sellmeijer</i>
$\gamma_D$	[kN/m <sup>3</sup> ]	Feuchtwichte der gering durchlässigen Deckschicht
$\gamma_w$	[kN/m <sup>3</sup> ]	Wichte des Wassers
$\Delta t$	[s]	Zeitintervall
$\zeta$	[-]	Sackungsfaktor

$\eta$	$[-]$	Schleppkraftkoeffizient
$\vartheta$	$[^\circ]$	Winkel der Tangente einer Lamelle gegen die Horizontale
$\theta$	$[^\circ]$	Rollwiderstandswinkel der Sandkörner im Aquifer
$\kappa$	$[\text{m}^2]$	Spezifische Permeabilität des Aquifers
$\kappa_{SZ}$	$[-]$	Faktor <i>Schnitter &amp; Zeller</i>
$\mu$		Mittelwert
$\mu_{m,add}$		Mittelwert des Modellunsicherheitsfaktors mit additivem Ansatz
$\mu_{m,mult}$		Mittelwert des Modellunsicherheitsfaktors mit multiplikativem Ansatz
$\mu_w$	$[\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m})]$	Dynamische Viskosität von Wasser
$\nu_w$	$[\text{m}^2/\text{s}]$	Kinematische Viskosität von Wasser
$\rho_w$	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	Dichte von Wasser
$\rho'_s$	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	Korndichte unter Auftrieb
$\sigma$		Standardabweichung
$\sigma_m$		Standardabweichung des Modellunsicherheitsfaktors
$\varphi$	$[^\circ]$	Reibungswinkel
$\psi_m$	$[\text{m WS}]$	Matrixpotential des Deichbaustoffes

## Abkürzungen

BauHW	Bauzeitlicher Bemessungshochwasserstand
BHQ	Bemessungshochwasserabfluss
BHW	Bemessungshochwasserstand
DVW	Deichverteidigungsweg
TDR	Time Domain Reflectometry

# 1 Einleitung

Betrachtet man Flusslandschaften in den vom Menschen kultivierten Gebieten, findet man auf der ganzen Welt Deiche entlang von Fließgewässern. Diese Flussdeiche haben vornehmlich die Aufgabe, im Falle eines Einstaus während eines Hochwasserereignisses das Hinterland vor Überschwemmung zu schützen. In Deutschland sind große Teile der Deichstrecken an Flüssen über Jahrhunderte „gewachsen“, indem nach einem Deichbruch oder nach einem Überströmen des Deiches infolge eines Hochwasserereignisses ggf. ihr Querschnitt verstärkt und die Deichkrone erhöht wurde. Ein maßgebender Anteil dieser sogenannten Altdeiche entspricht jedoch nicht den zwischenzeitlich vorliegenden Erkenntnissen und den Anforderungen der Regelwerke zum Schutz vor Hochwasser.

Dessen ungeachtet versagen Altdeiche nicht zwangsläufig bei einem Hochwasserereignis. Sie beinhalten Sicherheitsreserven, die häufig nicht quantifiziert werden können. Diese Sicherheitsreserven resultieren einerseits aus der Streuung von Kennwerten, z. B. des Deichmaterials, und andererseits aus den i. d. R. konservativen Annahmen für die Bemessung. In der deterministischen Bemessungspraxis werden die Parameter für den maßgebenden *Bemessungslastfall* zugrunde gelegt. Hierbei sind die Bemessungswerte so auf der sicheren Seite zu wählen, dass der aus der Bemessung resultierende Deichquerschnitt bei Beaufschlagung mit den Belastungen des geforderten Sicherheitsniveaus, z. B. einem extremen Hochwasserereignis, sicher standhalten kann. Darüber hinaus werden bei dieser Bemessungspraxis manche positiv wirkenden Kräfte auf die Standsicherheit wie z. B. Saugspannungen vernachlässigt und können aufgrund vereinfachter Annahmen bei der Bemessung nicht berücksichtigt werden.

Vor diesem Hintergrund ist eine Aussage über den tatsächlich vorhandenen Schutz von Altdeichen vor Hochwasser nur schwer möglich. Die Streuung von Kennwerten kann theoretisch ebenso zu dem umgekehrten Fall führen, dass ein nach den Bemessungsregeln errichteter Deich den in situ auftretenden Einwirkungen nicht standhalten kann, wenn z. B. der tatsächlich auftretende Wasserstand über den des Bemessungshochwassers steigt.

Auf dem weiten Gebiet der Bodenmechanik tragen neue Erkenntnisse dazu bei, Mechanismen und Zusammenhänge im Boden immer besser zu verstehen. Insbesondere komplexe Strömungs- und Transportvorgänge im Boden können dank immer größerer Rechenleistung mit numerischen Modellen abgebildet werden.

Das Ziel des hier vorgestellten Modells zur probabilistischen Bewertung ist es,

- die Streuung von Eingangsparametern zu erfassen,
- die Abhängigkeiten unterschiedlicher Versagensarten einzubeziehen,
- komplexere Zusammenhänge von bodenmechanischen Prozessen genauer abzubilden und nicht zuletzt
- die Versagenswahrscheinlichkeit eines Deiches zu ermitteln.

Für die Bewertung bestehender Altdeiche und ihrer Ertüchtigungserfordernisse wird hiermit ein Werkzeug zur Sicherheits- und Schwäche-Analyse bereitgestellt.

Darüber hinaus steht im Rahmen der Planung von Deichneubauten und Deichertüchtigungen ein Werkzeug zur Bewertung der Zuverlässigkeit im Hinblick auf denkbare Versagensmechanismen zur Verfügung. Hierbei können insbesondere Erfordernisse und Wirkungen von Änderungen am Planungskonzept unter qualitativer Berücksichtigung von Parameterstreuungen bewertet werden.

Die hier entwickelte probabilistische Bewertung kann neben der deterministischen Bemessung folgenden Zugewinn liefern:

- Die Unsicherheiten der Eingangsparameter (Parameterstreuung) werden rechnerisch erfasst und
- der relative Anteil der einzelnen Versagensmechanismen am Deichversagen wird quantitativ aufgezeigt.

Vor allem in jüngster Vergangenheit gewinnen Aussagen über das mit einer Maßnahme zur Gewährleistung des Hochwasserschutzes verbundene Risiko zunehmend an Interesse und an Bedeutung. Unter einer Maßnahme kann beispielsweise die Sanierung bzw. Ertüchtigung einer (Alt-)Deichstrecke verstanden werden. Das Risiko, das sich aus der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadensereignisses (der Versagenswahrscheinlichkeit) und dem Schadenspotential zusammensetzt, kann in einer Risikoanalyse ermittelt werden. Die Weiterverarbeitung dieser Information in Risk-Assessment-Verfahren liefert Hinweise zur Bewertung des Restrisikos und kann helfen, geeignete Maßnahmen zur Risikominimierung zu finden.

Einen wesentlichen Baustein in dem Verfahren der Risikoanalyse stellt die Ermittlung von Versagenswahrscheinlichkeiten dar. Bezogen auf Flussdeiche wird bisher hauptsächlich das Versagen durch Überströmen ermittelt, z. B. bei MERZ & GOCHT (2003), MERZ (2006); hierauf basieren auch Hochwassergefahrenkarten sowie Hochwasserrisikomanagementkarten, wie sie die RICHTLINIE 2007/60/EG (2007) vorschreibt. Weitere maßgebende Versagensmechanismen, z. B. unter Einbeziehung geotechnischer Gegebenheiten, bleiben jedoch häufig unberücksichtigt. Zur Bestimmung der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit eines Systems ist die umfassende Betrachtung aller Teilsysteme notwendig, die zu dem Versagen beitragen können. Neben dem Wasserstand als maßgebende Einwirkung sind die Widerstände des Deichkörpers sowie des Deichuntergrundes gegen unterschiedliche geotechnische Versagensformen zu untersuchen. Daher sind für die Bestimmung von Versagenswahrscheinlichkeiten bei Flussdeichen hydraulische ebenso wie geotechnische Gegebenheiten zu berücksichtigen.



## 2 Problemstellung und eigene Vorgehensweise

### 2.1 Problemstellung

Hochwasserereignisse der jüngsten Vergangenheit richten zunehmend größere Schäden an. Dies hängt zum einen mit der offensichtlichen Häufung der Ereignisse als auch mit der Akkumulation von Werten in potentiellen Überschwemmungsgebieten zusammen. Der hieraus folgenden zunehmenden Sensibilisierung für die Gefahren aus Hochwasserereignissen wurde mit dem Erscheinen einer eigenen Norm für Flussdeiche Rechnung getragen. In DIN 19712:1997-11 werden Flussdeiche definiert als *Dämme aus Erd- und Baustoffen an Fließgewässern zum Schutz des Hinterlandes gegen Hochwasser, die im Gegensatz zu Stauhaltungsdämmen nur bei Hochwasser beansprucht werden*. Die Norm schafft einheitliche Grundlagen für Neubau, Sanierung, Unterhaltung, Überwachung und Verteidigung von Flussdeichen und steht inzwischen in einer an die harmonisierte europäische Normung angepassten Version zur Verfügung. In DIN 19712:2013-01 wird der Begriff Deich definiert als *in der Regel zeitweilig eingestauter Damm an Fließgewässern zum Schutz des Hinterlandes gegen Hochwasser, der meist aus Erdbaustoffen (Bodenmaterial) besteht*.

Bei der in den Normen vorgesehenen Bemessung der Standsicherheit von Deichböschungen wird im Allgemeinen aus Gründen der Vereinfachung des Rechenganges ein stationärer Durchströmungszustand des Deichkörpers zugrunde gelegt, so dass die Sickerwasserlinie aus der landseitigen Böschung austreten kann. Bei dieser Vorgehensweise bleibt die Auswirkung eines allmählichen Einstaus des Deiches ebenso unberücksichtigt wie die hieraus resultierende Abhängigkeit der Deichdurchfeuchtung von der Zeit sowie von der Einstauhöhe. Ebenso können Informationen über den inneren Wasserhaushalt des Deiches vor dem Einstauereignis nicht verarbeitet werden. Insgesamt resultiert aus dem deterministischen Verfahren – unter den angesetzten Einwirkungen – zur Bestimmung der Standsicherheit der Deichböschung ein Bemessungsergebnis auf der sicheren Seite, allerdings lassen sich die enthaltenen Sicherheitsreserven im Detail nicht quantifizieren. Darüber hinaus bleiben Unsicherheiten auf der Einwirkungsseite unberücksichtigt.

Diese Defizite können probabilistische Methoden ausgleichen. Hierbei werden Unsicherheiten berücksichtigt, die sich beispielsweise aus der räumlichen Variation von geotechnischen Parametern ergeben können. Neben den Eingangsparametern (auf der Einwirkungs- sowie auf der Widerstandsseite) sind ebenso die der Bemessung zugrunde liegenden Modelle mit Unsicherheiten behaftet, so dass das Gesamtergebnis zur Standsicherheit als unsichere Aussage zu verstehen ist. Durch Anwendung von probabilistischen Methoden kann der Grad der Unsicherheit, der nichts anderes als eine Wahrscheinlichkeit darstellt, quantifiziert werden.

Sofern diese Wahrscheinlichkeit einen zeitlichen Bezug aufweist, kann sie als Versagenswahrscheinlichkeit interpretiert werden. Der zeitliche Bezug ergibt sich hierbei aus der Dimension der Eingangsgröße. Beispielsweise wird dem Eingangsparameter des Wasserstandes eine zeitliche Abhängigkeit zugeordnet durch die Betrachtung der jährlichen höchsten Wasserstände. Hieraus folgt für die Versagenswahrscheinlichkeit die Dimension [Anzahl Versagensfälle/Jahr].

## 2.2 Vorgehensweise für die probabilistische Bewertung

Das wesentliche Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines probabilistischen Modells, mit dem sowohl hydraulische und geotechnische Gesichtspunkte – und hierbei insbesondere die räumliche Streuung von Parametern – als auch die zeitliche Abhängigkeit von Eingangsgrößen erfasst und berücksichtigt werden können.

Mit dem im Folgenden entwickelten Modell lassen sich unterschiedliche Fragestellungen bearbeiten:

- Zur Bewertung bestehender Altdeiche wird ein Sicherheits- und Schwäche-Analyse-Werkzeug bereitgestellt, um ggf. Ertüchtigungserfordernisse abzuleiten.
- Im Rahmen der Planung von Deichneubauten sowie von Deichertüchtigungsmaßnahmen wird die Analyse und Beurteilung der Zuverlässigkeit bzw. Zuverlässigkeitsverteilung im Hinblick auf denkbare Versagensmoden ermöglicht. Hierbei können vor allem Erfordernisse und Wirkungen von Änderungen am Planungskonzept unter qualitativer Berücksichtigung der Parameterstreuungen bewertet werden.
- Nicht zuletzt wird eine Perspektive für die Weiterentwicklung der integrierten probabilistischen Bewertung unter (zukünftig) weiterer Zuziehung von Versagensmoden und deren algorithmischen Beschreibung eröffnet.

Neben dem Aufbau und den Eigenschaften des Deichkörpers selbst hat die Beschaffenheit des Deichuntergrundes erheblichen Einfluss auf Versagensformen von Flussdeichen. Der Deichuntergrund ist daher in die Ermittlung des Deichversagens einzubeziehen.

Zunächst wird hierzu in Kapitel 3 die Bemessung von Flussdeichen nach den Regeln der Technik analysiert und vorgestellt. Anschließend wird in die eingangs erwähnte Thematik der Risikobetrachtungen bei Flussdeichen eingeführt und mögliche Ausgestaltungen werden aufgezeigt. Darüber hinaus wird ausführlich erörtert, inwieweit probabilistische Methoden geeignet sind, um Aussagen zu Versagenswahrscheinlichkeiten des umfassenden Systems aus Deich und Untergrund zu treffen. Die Monte-Carlo-Simulation erweist sich als geeignete Methode, um ein probabilistisches Bewertungsmodell für Flussdeiche zu erstellen.

Wesentliches Element der probabilistischen Bewertung ist die Berücksichtigung von Unsicherheiten. Daher werden zunächst in Kapitel 4 verschiedene Arten von Unsicherheiten benannt, und es wird erläutert, in welcher Form sie bei der Modellierung aufgenommen bzw. berücksichtigt werden können. Im Einzelnen werden die Modellunsicherheit sowie die Unsicherheiten der Parameter betrachtet. Abschließend wird auf die Korrelation von Parametern entlang einer Deichstrecke eingegangen.

Daran anknüpfend widmet sich das folgende Kapitel 5 ausführlich den Eingangsparametern, die für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell verwendet werden. Hierbei wird zwischen Parametern unterschieden, die eine zeitliche Abhängigkeit besitzen, und solchen, die einer räumlichen Streuung unterworfen sind. Neben dem Umgang mit invarianten Parametern wird auch auf den Einfluss der Klimaveränderung und den daraus resultierenden Auswirkungen auf die verwendeten Parameter eingegangen.

Die Zusammenhänge des Gesamtsystems aus Deich und Untergrund werden in Kapitel 6 mittels einer Fehlerbaumanalyse untersucht. Daher wird allgemein in die Methodik der Fehlerbaumanalyse eingeführt und der Fehlerbaum für Flussdeiche als Grundlage für das probabilistische Modell abgeleitet.

Anschließend werden in Kapitel 7 die einzelnen Versagensmechanismen des Fehlerbaumes eingehend diskutiert und die Verknüpfungen der Versagensmechanismen erläutert. Hierzu gehören das *Überströmen der Deichkrone* sowie der Versagensablauf bestehend aus den Mechanismen *Aufschwimmen der landseitigen Deckschicht*, *Rück-*

*schreitende Erosion* sowie *Sackungen im Deichkörper mit anschließendem Überströmen*. Der bereits bekannte Zusammenhang zwischen landseitigem Aufschwimmen der gering durchlässigen Deckschicht und nachfolgender Ausbildung einer Erosionsröhre muss alleine betrachtet noch kein Versagen eines Flussdeiches bedeuten. Ergänzend wird diese Versagenskette um den Mechanismus der Sackung des Deichkörpers erweitert. Besonders aufgrund der hiermit verbundenen Deformation des Deichkörpers ist ein Versagen des Deiches durch Überströmen denkbar, selbst wenn die Wasserspiegelhöhe unterhalb des ursprünglichen Niveaus der Deichkrone ansteht.

Für ein Versagen der landseitigen Böschung sind mehrere Versagensarten denkbar und in den Fehlerbaum integriert. Die berücksichtigten Mechanismen eines Böschungsversagens sind davon abhängig, ob sich ein kritischer Durchströmungszustand während des Hochwasserereignisses einstellen kann. Daher wird als ein Teil der probabilistischen Bewertung ein Versagensmechanismus neu entwickelt und vorgestellt, mit dem die zeitabhängige Ausbreitung der Feuchtefront im Deichkörper während eines Hochwasserereignisses abgebildet werden kann. Neben der Deichgeometrie und den bodenphysikalischen Eigenschaften des Deichbaumaterials sowie des Deichuntergrundes werden ebenso hydraulische Anfangs- und Randbedingungen betrachtet. Die hierfür verwendeten Grenzzustandsgleichungen werden hergeleitet und die Versagensmechanismen ausführlich diskutiert. Die Motivation für die Betrachtung der instationären Durchfeuchtung ist die Abbildung der hydraulischen Vorbedingungen für ein Versagen der landseitigen Böschung. Bisher wird bei der deterministischen Vorgehensweise für die Untersuchung der Böschungsstandsicherheit von Deichen von einem stationären Durchströmungszustand ausgegangen, was eine Vereinfachung darstellt, die weit auf der sicheren Seite liegen kann. Bei der Betrachtung der zugehörigen Versagenswahrscheinlichkeiten lässt sich unter Berücksichtigung der instationären Durchfeuchtung ein signifikant niedrigeres Versagensrisiko des Deiches bei Hochwasser ableiten (siehe auch Abschnitt 8.7).

Neben den genannten Versagensmechanismen wird auf den Einfluss von Deichverteidigungsmaßnahmen eingegangen und auf den Einfluss menschlichen Versagens.

Die Vorgehensweise der entwickelten probabilistischen Bewertung wird anhand eines Beispieldeiches mit homogenem Aufbau in Kapitel 8 konkretisiert und der Einfluss einzelner Parameter und Mechanismen auf das Gesamtergebnis dargestellt. Das zahlenmäßige Ergebnis der probabilistischen Bewertung wird in einem abschließenden Schritt einer wichtenden Beurteilung zugeführt.

Abschließend werden in Kapitel 9 die Ergebnisse zusammengefasst, die mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modell erzielt werden. Die hier vorgestellten Erweiterungen stellen eine konsequente Fortentwicklung der probabilistischen Bewertung dar, die zu einer realistischeren Betrachtung der Versagensprozesse im Hochwasserfall sowie der hieraus resultierenden Wahrscheinlichkeit eines Deichversagens führt. Darüber hinaus werden Möglichkeiten für die weitere Entwicklung der probabilistischen Bewertung für Flussdeiche aufgezeigt.



## 3 Deterministische Bemessung und Risikomanagement

### 3.1 Deterministische Bemessungsverfahren

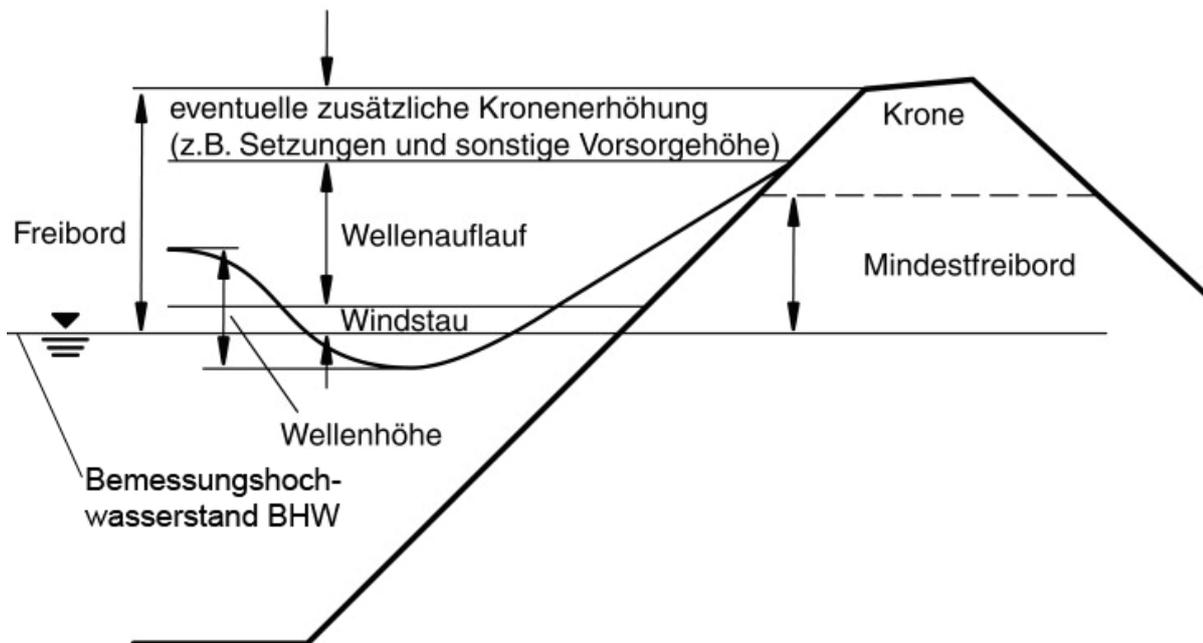
Grundlage für die Bemessung von Flussdeichen ist die Kenntnis des Bemessungshochwasserstandes (BHW). Dieser ist nach DIN 19712:1997-11 definiert als der höchste Wasserstand, *der sich beim Bemessungshochwasser in einem betrachteten Querschnitt einstellt*. In der neuen DIN 19712:2013-01 ist der Bemessungshochwasserstand festgelegt als *der für die Bemessung und Gestaltung der Hochwasserschutzanlage maßgebende Wasserstand als Grundlage für die Festlegung der Bauwerkshöhe und des Freibords sowie für die Klassifizierung und die geotechnischen und bautechnischen Nachweise der Hochwasserschutzanlage*.

Das Bemessungshochwasser resultiert aus dem Bemessungshochwasserabfluss, der in der Regel aufgrund von Abfluss-, Wasserstands- oder Niederschlagsbeobachtungen und unter Berücksichtigung ihrer Statistik festgelegt wird. Über diesen Zusammenhang kann dem BHW eine Auftretens- oder Überschreitungswahrscheinlichkeit, die sogenannte Jährlichkeit, zugeordnet werden. Dies bedeutet, dass der Wasserstand im statistischen Mittel ein Mal innerhalb dieses Wiederkehrintervalls überschritten wird.

Für die hydraulische Berechnung des BHW sind nach DIN 19712:2013-01 u. a. folgende Gesichtspunkte zu beachten:

- Erfassung der maßgebenden Abflussquerschnitte,
- Querneigung in Flusskrümmungen,
- Einflüsse des instationären Abflusses,
- Rückstau,
- Einfluss von Eis,
- Bewuchs im Abflussquerschnitt sowie
- stehende Wellen.

Die Kronenhöhe eines Deiches wird durch den BHW zuzüglich des Freibordes festgelegt. Hierin sind Windstau (und gegebenenfalls Eisstau), Wellenauflauf und weitere Zuschläge enthalten (siehe Bild 3.1).



**Bild 3.1:** Zusammensetzung des Freibordes nach DIN 19712:2013-01

Die für die Bemessung von Flussdeichen relevanten Nachweise werden in den einschlägigen Regelwerken (z. B. DIN 19712:2013-01, DWA 2011, BAW 2011, etc.) behandelt. Nach DWA 2011 lassen sich hydraulische und geotechnische Nachweise unterscheiden.

Zu den hydraulischen Nachweisen zählen u. a.

- die Bemessung des Freibordes,
- die Berücksichtigung von Auswirkungen der Durchströmung,
- die Berücksichtigung von Wasserdruckwirkungen im Untergrund,
- die Dimensionierung von Dräns und Dränleitungen zur sicheren Abführung des Drängewassers im Deichhinterland sowie
- die Absicherung gegen Oberflächenerosion im Bereich der wasserseitigen Böschung aufgrund des vorbeifließenden Wassers.

Die geotechnischen Nachweise setzen sich zusammen aus Nachweisen zur Standsicherheit, Nachweisen zur Sicherheit gegenüber innerer Erosion sowie Nachweisen zur Gebrauchstauglichkeit.

Die Standsicherheitsnachweise umfassen Nachweise

- der allgemeinen Standsicherheit der land- und wasserseitigen Böschung gegen Böschungsbruch und Böschungsgrundbruch,
- gegen Abschieben des Deichkörpers,
- der lokalen Standsicherheit im Bereich der land- und wasserseitigen Böschung,
- der lokalen Standsicherheit am Böschungsfuß (Spreizsicherheit),
- der Aufbruchsicherheit bzw. der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch sowie
- der Standsicherheit von Böschungsdichtungen bei Wasserdruck vom Deichkörper her (z. B. infolge schnell absinkenden Wasserspiegels).

Zu den Nachweisen zur Sicherheit gegenüber innerer Erosion zählen Nachweise

- zur Kontakterosion (mechanische Filterwirksamkeit),
- zur Fugenerosion,
- zum Erosionsgrundbruch sowie
- zur Suffosionsstabilität.

Die Nachweise zur Gebrauchstauglichkeit beinhalten Betrachtungen

- zu Setzungen,
- zum Zeitsetzungsverhalten sowie gegebenenfalls
- zur Verträglichkeit von Verformungen und zu Rissbildungen.

Für die deterministische Bemessung ist dem BHW eine Jährlichkeit zugeordnet. Dieses Wiederkehrintervall kann jedoch nicht für einen Vergleich mit einer Versagenswahrscheinlichkeit herangezogen werden. Die der deterministischen Bemessung zugrunde liegenden Parameter werden ohne stochastische Kennwerte wie Verteilungstyp, statistische Momente und Varianz verwendet. Die Berücksichtigung von weniger wahrscheinlichen Lastfallkombinationen und ihre Gewichtung erfolgt bei der deterministischen Bemessung ggf. mit Kombinationsbeiwerten. Das auf diese Art und Weise erhaltene Sicherheitsmaß stellt daher keine Betrachtung einer Versagenswahrscheinlichkeit dar [DARBRE 2000].

## 3.2 Risikobetrachtung

Zur weitergehenden Verwendung in Risikoanalysen werden Aussagen zur Versagenswahrscheinlichkeit benötigt, die man mit deterministischen Verfahren naturgemäß nicht erhalten kann. Für die Ermittlung von Versagenswahrscheinlichkeiten stehen in Abhängigkeit der verfügbaren Informationen zu Belastungen sowie zum Systemverhalten unterschiedliche Verfahren zur Verfügung [HUBER 2008]:

- *Schätzverfahren* erfordern ausreichende Fachkenntnis (*Expertenwissen*) zur Beurteilung und Interpretation des Gesamtsystems, können jedoch bei geringer Information zu spezifischen Daten angewendet werden. Die Wahrscheinlichkeit kann qualitativ oder quantitativ angegeben werden. Hierbei können die Ergebnisse maßgeblich von subjektiven Erfahrungen beeinflusst werden. Darüber hinaus werden Ereignisse mit sehr geringen bzw. sehr hohen Eintretenswahrscheinlichkeiten tendenziell unterschätzt bzw. überschätzt [VICK & STEWART, 1996]: Ereignisse mit geringer Eintretenswahrscheinlichkeit werden seltener angenommen, als sie tatsächlich zu erwarten sind. Insgesamt ist die Qualität der Ergebnisse nach den Schätzverfahren mit Vorbehalten zu sehen.
- *Versagensstatistische Verfahren* basieren auf der statistischen Auswertung des Verhaltens ähnlicher Bauwerke. In der Regel ergibt sich lediglich eine geringe Stichprobengröße bei Bauwerken mit vergleichbaren Randbedingungen, so dass die Übertragbarkeit von Statistiken nur eingeschränkt möglich ist. Neben den Eigenschaften der Bauwerke sind auch Eigenschaften des Untergrundes sowie der Einwirkungsgrößen einzubeziehen, was jedoch häufig unberücksichtigt bleibt. Für die Bestimmung von Ereignissen mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten ist die Berücksichtigung möglichst langer Zeitreihen notwendig. Häufig liegen hierüber lediglich geringe bzw. unzureichende Informationen vor, die das Ergebnis überproportional beeinflussen können. Rückschlüsse zur Versagenswahrscheinlichkeit sind daher mit größerer Unsicherheit versehen.
- Bei der *Probabilistischen Modellierung* werden physikalische Zusammenhänge in eine mathematische Form überführt. Hiermit wird die Quantifizierung von Unsicherheiten möglich. Die Schwierigkeiten liegen hierbei in der zutreffenden Beschreibung von Versagensabläufen sowie in der Bestimmung der Eingangsdaten für das Modell. Die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit erfolgt aufgrund der den Eingangsparametern zugeordneten Unsicherheiten.

Bei den ersten beiden Verfahren ergeben sich die Versagenswahrscheinlichkeiten aus der Betrachtung der zu einem Versagen führenden physikalischen Abläufe bzw. des

Gesamtsystems. Für weitergehende Erläuterungen zu den nicht-modellbasierten Verfahren sei hier auf Literatur für probabilistische Verfahren allgemein verwiesen, z. B. ANG & TANG (1975). Hingegen wird bei der probabilistischen Modellierung die Unsicherheit des Systems in die Quantifizierung der Eingangsdaten für das Modell verlagert. Das Verfahren der probabilistischen Modellierung wird im Folgenden detailliert erläutert.

Für die probabilistische Modellierung stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Diese lassen sich nach PLATE (1993) entsprechend der Abbildungsgüte der abzubildenden Unsicherheiten in *Level* (Stufen) unterteilen:

- Level I fasst die Gruppe der semi-probabilistischen Methoden zusammen, die inzwischen teilweise Eingang in die Normung gefunden haben, z. B. in DIN 1055-100:2001-03 sowie in DIN EN 1997-1:2009-09.
- Zu den Level II-Methoden zählen die Zuverlässigkeitsmethoden 1. Ordnung wie z. B. FORM, FOSM. Nähere Erläuterungen zu diesen Verfahren finden sich auch bei SCHNEIDER (1996).
- Die Level III-Methoden werden auch als *exakte Verfahren* bezeichnet, da hier die Kennwerte mit ihrer Verteilungsfunktion umfassend beschrieben werden. Ein weit verbreitetes Verfahren ist die *Monte-Carlo-Simulation*, auf die im weiteren Verlauf noch genauer eingegangen wird (siehe Abschnitt 3.4). Zu den exakten Verfahren werden auch die numerischen Verfahren gezählt, wie z. B. die Riemann-Integration.

Zunächst ist die prinzipielle Eignung der Anwendung von probabilistischen Methoden für Untersuchungen zu Versagenswahrscheinlichkeiten von Flussdeichen zu klären.

### 3.3 Eignung von probabilistischen Methoden

Bereits in den 1960er Jahren wurden Methoden zur Ermittlung der Zuverlässigkeit technischer Produkte entwickelt. Vor allem in der Luft- und Raumfahrttechnik, später auch in der Kernenergietechnik, wurden Methoden für die Modellierung großtechnischer Systeme entwickelt. Die erste umfassende Risikoanalyse untersuchte das Risiko aus dem Betrieb von Kernkraftwerken in den USA. Die sogenannte Rasmussen-Studie wurde 1975 vorgestellt [WASH-1400 1975]. Zunächst beschränkten sich Risiko- bzw. Sicherheitsanalysen auf abgegrenzte technische Systeme. Im weiteren Verlauf wurden die Methoden dieser Analysen auch in andere Bereiche

übertragen, wie z. B. im Gesundheitswesen zur Bewertung des Gesundheitsrisikos durch die Exposition mit gefährlichen Stoffen. Inzwischen bleiben Risikoanalysen nicht auf die Ursachen, von denen das Risiko ausgeht, beschränkt, sondern schließen auch potenziell gefährdete Elemente (Menschen, Sachwerte, Umwelt) mit ein.

BAECHER & CHRISTIAN (2003) weisen ausdrücklich darauf hin, dass die Analysemethoden nicht ausschließlich auf rein mechanische Systeme zu beschränken sind und berichten von Risikoanalysen bei Staudämmen von PARR & CULLEN (1988), VICK & BROMWELL (1989) sowie BURY & KREUZER (1985), BURY & KREUZER (1986). 1988 hatte IDEL ein umfangreiches probabilistisches Werkzeug zur Bewertung der Standsicherheit von Staudämmen in Bezug auf geohydraulische, geotechnische sowie felsmechanische Versagensmechanismen vorgestellt. Unter anderem werden in den Niederlanden probabilistische Methoden seit längerer Zeit für Deiche angewandt, siehe z. B. CUR (1990), RIZA (2001), SILVA ET AL. (2006), und haben dort inzwischen Eingang in das Regelwerk gefunden. Darüber hinaus gibt es neuere Untersuchungen zur probabilistischen Bewertung von Seedeichen, z. B. von KORTENHAUS (2003), sowie von Staudämmen, z. B. von HUBER (2008).

Die in den 1980er Jahren entwickelte deutsche Norm zur Fehlerbaumanalyse DIN 25424:1981-09 ist bis heute unverändert gültig. Zur Anwendung und Gültigkeit von Fehlerbaumanalysen wird dort ausgesagt, dass das Verfahren *für alle Systeme verwendet werden kann*. Als System wird hierbei die *Zusammenfassung von technisch-organisatorischen Mitteln zur autonomen Erfüllung eines Aufgabenkomplexes* bezeichnet. Von dieser Definition ausgehend ist die Anwendung von probabilistischen Methoden auf die Risikoanalyse von Deichen möglich.

DARBRE (2000) weist darauf hin, dass im Gegensatz zu technischen Systemen aus den Bereichen der Raumfahrt oder Kernenergie bei Deichen und Dämmen der Einfluss der natürlichen Elemente bei weitem überwiegt. Insbesondere in dem für Risikoanalysen interessierenden Bereich mit sehr seltenem Auftreten lassen sich die natürlichen Elemente, wie z. B. Wind und Niederschlag, aufgrund der größeren Variabilität schwieriger beschreiben und ihr Verhalten entsprechend ungenauer vorhersagen. Dementsprechend sind die Ergebnisse von Risikoanalysen vorrangig zur Abschätzung des Versagensrisikos geeignet und insbesondere im Hinblick auf den Vergleich von Szenarien innerhalb eines Modells entwickelt. Im Umkehrschluss folgt hieraus, dass aus unterschiedlichen Modellen zur gleichen Fragestellung abweichende Aussagen beispielsweise zur Versagenswahrscheinlichkeit folgen können. Die Einordnung dieser Versagenswahrscheinlichkeiten in den Kontext sollte dann jedoch zum selben Ergebnis führen.

Eine weitere Herausforderung sehen CYGANIEWICZ & SMART (2000) bei der Anwendung von Risikoanalysen auf Deiche und Dämme in der Ein- sowie Abgrenzung von Versagensabläufen. Dahinter verbirgt sich die Schwierigkeit, die in der Natur ablaufenden Prozesse zu analysieren und in einzelne Teilschritte zu zerlegen, um sie einer mathematischen Beschreibung zugänglich machen zu können.

Hierfür untersuchen CYGANIEWICZ & SMART (2000) Auswirkungen unterschiedlicher Detailstufen für Risikoanalysen bei Staudämmen und kommen zu folgendem Ergebnis:

- Bei zu geringer Detailstufe ist womöglich nicht klar erkennbar, welche Ursache maßgebend zum Risiko beiträgt.
- Zu viele Details führen zu Unübersichtlichkeit und erschweren die Handhabung des Systems, so dass wesentliche Erkenntnisse verborgen bleiben können.

BAECHER & CHRISTIAN (2003) führen an, dass vor allem exakt definierte Systeme, bei denen die beteiligten Komponenten sowie deren Wechselbeziehungen untereinander genau spezifiziert sind, für eine Fehlerbaumanalyse geeignet sind. Zur Abbildung von Parametervariationen im Raum (wie beispielsweise bei Bodenparametern) seien solche Analysen weniger gut geeignet. Insbesondere sind sie eher ungeeignet für Systeme, deren Zustände nicht mit der Booleschen Algebra beschrieben werden können, sondern mehrere unterschiedliche Zustandsformen annehmen können.

Hieraus folgend wird in dem entwickelten Modell die räumliche Streuung der Parameter unabhängig von einer Raumrichtung betrachtet. Im Kapitel 5 wird umfassend auf die Modellierung der Bodenparameter eingegangen und wie die räumliche Variabilität bei den Berechnungen berücksichtigt wird.

Trotz der mit ihrer Erstellung verbundenen Schwierigkeiten formulieren CYGANIEWICZ & SMART (2000) den Nutzen von Risikoanalysen für Stauanlagen:

- Bei der Kommunikation der Risiken stellen Risikoanalysen die Grundlage für Vergleiche sowohl zwischen verschiedenen Bauwerken als auch von verschiedenen Zuständen eines Bauwerkes dar.
- Design, Konstruktion sowie Verhalten von Stauanlagen können mit Risikoanalysen ergründet und überprüft werden und hieraus können Schlüsse zu Schwachstellen gezogen werden.

- Mit Risikoanalysen können die Stellen, die auf den gesamten Prozess bezogen die größte Unsicherheit darstellen, aufgedeckt werden.
- Aufgrund einer Risikoanalyse können Maßnahmen beurteilt sowie verglichen werden. Die zur Verfügung stehenden Mittel können dann zielgerichtet eingesetzt werden.

Dartüber hinaus lassen sich für das hier vorgestellte probabilistische Modell die folgenden Eigenschaften benennen:

- In dem Modell können Abhängigkeiten von Versagensmechanismen untereinander berücksichtigt werden. Die Abbildung solcher Abhängigkeiten kann großen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben, wie an einem Beispiel in Abschnitt 8.7 aufgezeigt wird.
- Die probabilistische Bewertung erlaubt in dem hier vorgestellten Modell die gesamtheitliche Betrachtung von Flussdeichen. Das Ergebnis (die *Gesamtversagenswahrscheinlichkeit = Deichversagen*) stellt eine zusammenfassende Bewertung dar, in die unterschiedliche Gesichtspunkte einfließen können. Im Gegensatz dazu wird bei der deterministischen Betrachtung jeder Versagensmechanismus für sich alleine betrachtet, und eine zusammenfassende Beurteilung ist nur schwer möglich.

Für die Anwendung der probabilistischen Methode werden somit die nachstehenden Anforderungen gestellt:

- Das Ergebnis der probabilistischen Bewertung kann nur so gut sein wie seine Eingangsdaten! An die Eingangsdaten für eine probabilistische Bewertung werden erhöhte Anforderungen gestellt. Statt eines charakteristischen Wertes wie bei der deterministischen Betrachtung ist die Angabe zu den stochastischen Kenngrößen eines Parameters notwendig. Hierzu gehören Angaben zum Verteilungstyp, dem Mittelwert sowie der Standardabweichung bzw. dem Variationskoeffizienten der Verteilung. Die Bestimmung dieser Kennwerte kann mit erheblichem Mehraufwand verbunden sein, z. B. durch die Analyse langjähriger Messreihen oder die statistische Auswertung umfangreicherer Versuchsprogramme bzw. Datensätze.
- Die jeweiligen Versagensmechanismen sind Modelle für einen möglichen Ablauf eines realen Versagens. Modelle können die Wirklichkeit jedoch nur mehr oder weniger zutreffend beschreiben, so dass die Modelle mit einer inhärenten Unsicherheit behaftet sind. Die exakte Quantifizierung dieser Modellunsicherheit ist jedoch häufig nicht möglich. Nähere Angaben zum Umgang mit der Modellunsicherheit finden sich in Abschnitt 4.2.

Unter Berücksichtigung der genannten Vorteile und Einschränkungen ergeben sich zwei Anwendungsfelder, für die die probabilistische Bewertung von Flussdeichen geeignet erscheint:

- Bei umfangreicheren Bauvorhaben, die einen größeren Teil der Bevölkerung direkt oder indirekt betreffen (wie z. B. die Sanierung bzw. Umlegung mit Neubau einer Deichstrecke), wird die Information über das Vorhaben sowie die Kommunikation mit der Öffentlichkeit zunehmend wichtiger. Um Fehldeutungen zu vermeiden, ist eine verständliche und nachvollziehbare Argumentation notwendig. Im öffentlichen Interesse steht insbesondere bei Flussdeichen die Schutzwirkung des Deiches. Hierfür kann die Beurteilung auf Grundlage von Wahrscheinlichkeiten Hilfe leisten. Gegenüber der eher abstrakten Angabe eines Sicherheitsniveaus, meist ausgedrückt durch einen Sicherheitsfaktor, kann die Angabe einer Versagenswahrscheinlichkeit (z. B. durchschnittlich ein Versagensfall in 150 Jahren) häufig besser erfasst werden.
- Entlang von Fließgewässern in Deutschland existieren noch große Strecken von Altdeichen, die den heutigen Bemessungsregeln nicht entsprechen. Um eine Aussage über die Schutzwirkung der Altdeiche treffen zu können, bietet die probabilistische Bewertung ein hilfreiches Werkzeug. Insbesondere für die weitere Verarbeitung der Daten bei der Bewertung des Risikos ist die Ermittlung von Versagenswahrscheinlichkeiten notwendig.

Im Rahmen der probabilistischen Bewertung bedarf es der Interpretation und Diskussion der Ergebnisse. Aufgrund der bisher aufgezeigten Fragestellungen, Lösungsmöglichkeiten sowie der Anwendungsfelder stellt die probabilistische Vorgehensweise ein unverzichtbares Werkzeug im Rahmen von Risikobetrachtungen dar. Allerdings kann bei der abschließenden Bewertung der zahlenmäßigen Ergebnisse auch einer probabilistischen Analyse auf eine ingenieurmäßige Wichtung der einzelnen Werte unter Zuziehung von Erfahrungskennntnissen nicht verzichtet werden.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass Risikoanalysen eine nützliche sowie notwendige Ergänzung der klassischen deterministischen Methoden darstellen [DARBRE 2000].

### 3.4 Monte-Carlo-Simulation

Inzwischen stehen etliche Verfahren zur Ermittlung von Versagenswahrscheinlichkeiten zur Verfügung, wozu auch die erschwingliche Rechenkapazität moderner Computer maßgeblich beigetragen hat. Einen ausführlichen Überblick über mögliche Verfahren zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit geben u. a. OUMERACI ET AL. (2001). Hierbei unterscheidet man Verfahren, mit denen die statistischen Momente  $k$ -ter Ordnung der Einwirkungs- sowie der Widerstandsseite bestimmt bzw. approximiert werden können, von den Verfahren, mit denen eine exakte Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit möglich ist.

Bei den Approximationsverfahren kann die Versagenswahrscheinlichkeit aus den statistischen Momenten berechnet werden. Hierfür ist die Kenntnis der zugrunde liegenden statistischen Verteilungen notwendig, die jedoch lediglich für analytische Verfahren hergeleitet werden können. In den übrigen Fällen kann die Zielgröße mit einer Normal- bzw. Lognormalverteilung angenähert werden, wobei eine nicht quantifizierbare Unsicherheit verbleibt.

Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Verfahren basiert auf der Monte-Carlo-Methode, weshalb an dieser Stelle näher darauf eingegangen werden soll. Die Monte-Carlo-Methode zählt zu den sogenannten exakten Verfahren (siehe Abschnitt 3.2), mit denen Versagenswahrscheinlichkeiten direkt ermittelt werden können. Neben der hohen Genauigkeit des Ergebnisses sind weitere Vorteile der Monte-Carlo-Methode der vergleichsweise geringe Aufwand für die Modellerstellung sowie die Möglichkeit, Nichtlinearitäten oder Unstetigkeiten in den statistischen Verteilungen abbilden zu können. Neben den in der Geotechnik üblichen Verteilungstypen der Normal- bzw. Lognormalverteilung kommen insbesondere für die Einwirkungsgrößen weitere Verteilungstypen in Betracht, die in einer Monte-Carlo-Simulation problemlos implementiert werden können.

Die Grundidee der Monte-Carlo-Simulation besteht darin, eine große Anzahl an Versuchen zu simulieren. Die Versagenswahrscheinlichkeit (englisch: *probability of failure*)  $P_f = P(Z < 0)$  ergibt sich nach dem frequentistischen Ansatz aus dem Verhältnis der Anzahl der Versuche mit dem Ergebnis *Versagen*  $n_{exp}(Z < 0)$  zur Gesamtanzahl der Versuche  $n_{ges}$ :

$$P_f = P(Z < 0) = \frac{n_{exp}(Z < 0)}{n_{ges}} \quad (3.1)$$

Hieraus folgt, dass mit größerer Anzahl durchgeführter Versuche die Aussage über die Versagenswahrscheinlichkeit an Zuverlässigkeit gewinnt. Umgekehrt ausgedrückt ist für die zuverlässige Bestimmung sehr kleiner Versagenswahrscheinlichkeiten eine entsprechend große Anzahl an Versuchen nötig.

Die verbleibende Unsicherheit wird durch den Variationskoeffizient  $c_V$  der Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  ausgedrückt und hängt wie folgt mit der Anzahl der Versuche  $n_{ges}$  zusammen:

$$c_V(P_f) = \sqrt{\frac{1 - P_f}{n_{ges} \cdot P_f}} \quad (3.2)$$

Hierbei ist die Aussage zur Versagenswahrscheinlichkeit für die bekannte Verteilung der Zielgröße von der Anzahl der Eingangsparameter unabhängig [ANG & TANG 1984, MORGAN & HENRION 1990].

Grundlage der Monte-Carlo-Simulation ist die exakte Abbildung der Parameter entsprechend ihrer stochastischen Kenngrößen. Hierfür werden gleichverteilte Zufallszahlen zwischen 0 und 1 generiert, anschließend wird mit der Transformationsfunktion ein Parameterwert bestimmt. Aufgrund der Vielzahl der verwendeten Parameter und der großen Anzahl notwendiger Berechnungen werden hohe Anforderungen an den Zufallszahlengenerator gestellt, um Wiederholungen oder Muster in den generierten Parameterwerten auszuschließen. Unter anderem muss die Sequenz bis zur ersten Wiederholung einer Zufallszahl ausreichend groß sein (PRESS ET AL. 1992, CODDINGTON 1994). In der hier beschriebenen Anwendung kommt ein Zufallszahlengenerator mit dem *subtract-with-borrow Algorithmus* von MARSAGLIA & ZAMAN (1991) zum Einsatz, der sich theoretisch nach  $2^{1492}$  generierten Werten wiederholt. Der Algorithmus bietet somit eine ausreichend große Periodenlänge der Zufallszahlenreihe, auch für eine große Anzahl von Rechendurchläufen.



## 4 Beschreibung von Unsicherheiten

### 4.1 Charakterisierung von Unsicherheiten

Die Parameter, die zur Bewertung von Flussdeichen verwendet werden, unterliegen Unsicherheiten, so dass exaktere Werte hierfür praktisch nicht existieren. Somit ist nachvollziehbar, weshalb auch das Ergebnis einer Bewertung mit Unsicherheiten behaftet sein muss. Diese Unsicherheit eines Bewertungsergebnisses kann mit probabilistischen Methoden bestimmt werden, so dass hieraus eine Information über die Schutzwirkung (oder im Umkehrschluss über die Schwachstellen) eines Flussdeiches abgeleitet werden kann.

Unsicherheiten rühren sowohl von zeitlich sowie räumlich veränderlichen Prozessen als auch von Beschreibungen zugrunde liegender Prozesse mit Modellen. Üblicherweise werden Unsicherheiten in der Literatur nach zwei Arten unterschieden. BAECHER & CHRISTIAN (2003) haben die in der Literatur verwendete Terminologie wie folgt zusammengefasst:

- Unter der *aleatorischen Unsicherheit* (von lateinisch aleator = (Würfel-)Spieler) versteht man die zeitliche oder räumliche Schwankung, also die Zufälligkeit physikalischer Eigenschaften einer betrachteten Größe. Sie wird auch als *zufällige, externe, objektive, oder natürlich bedingte Unsicherheit* bezeichnet.
- Ursache für die *epistemische Unsicherheit* (von griechisch epistémé = Wissen, Wissenschaft) ist ein Defizit an Wissen und Information als auch an Verständnis. Hierzu zählt ebenso die Unsicherheit, die auf der Abbildung der Wirklichkeit mit Modellen basiert<sup>1</sup>. Sie wird auch als *funktionale, interne oder subjektive Unsicherheit* bzw. als *Unwissenheit* bezeichnet.

---

<sup>1</sup> In anderen Unterteilungen werden modellbasierte Unsicherheiten als weitere Klasse der Unsicherheiten gezählt, z. B. bei HARTFORD & BAECHER (2004). Hierunter ist die Unsicherheit zu verstehen, dass ein Modell niemals die genaue Abbildung eines natürlichen Prozesses darstellt.

Im Folgenden wird die von HACKING (1975) eingeführte Bezeichnung der aleatorischen sowie epistemischen Unsicherheit verwendet. Nach PHOON & KULHAWY (1999) werden Unsicherheiten, die im Zusammenhang mit der Messwerterfassung oder der Beprobung stehen, aufgrund ihres Beitrages zur Streuung der Messgrößen zu den aleatorischen Unsicherheiten gezählt.

PLATE (1992) stellt fest, dass aleatorische Unsicherheit bei allen natürlichen Prozessen auftritt und niemals durch einen gesteigerten Beobachtungsaufwand in einem deterministischen Modell vollständig erfasst werden kann. Dem gegenüber ist die epistemische Unsicherheit prinzipiell reduzierbar [CULLEN & FREY, 1999]. Zum Beispiel kann sich die Unsicherheit von Aussagen verschiedener Experten zu einem Zeitpunkt oder eines Experten zu verschiedenen Zeitpunkten aufgrund unterschiedlichen Wissens über ein betrachtetes System unterscheiden.

Um die den jeweiligen Parametern zugeordnete Unsicherheit der Berechnung von Versagenswahrscheinlichkeiten zugänglich zu machen, bedarf es der Angabe von stochastischen Kenngrößen. Deren Ermittlung stellt jedoch einen umfangreichen Themenkomplex dar, weshalb an dieser Stelle auf ausführlichere Literatur verwiesen wird, z. B. CARDOSO & FERNANDES (2001), BAECHEER & CHRISTIAN (2003). Die Grundlagen im Hinblick auf Methodik sowie Umfang für geotechnische Untersuchungen werden u. a. in DIN EN 1997-2:2010-10 sowie in DIN 4020:2010-12 behandelt.

In dem hier vorgestellten Modell werden die Parameterunsicherheiten durch die stochastische Variation der Parameter berücksichtigt. Die hierfür erforderlichen Kenngrößen (Typ der Verteilungsfunktion, Mittelwert sowie Variationskoeffizient) werden für die jeweiligen Parameter in Kapitel 8 näher erläutert.

Im Folgenden wird zunächst auf die Unsicherheit der Modellerstellung eingegangen (Abschnitt 4.2), bevor im Weiteren die Unsicherheiten sowie die Korrelation der Parameter genauer erläutert werden (Abschnitte 4.3 bis 4.5).

## 4.2 Modellunsicherheit

Die für die probabilistische Bewertung verwendeten Versagensmechanismen stellen Modelle dar, um beobachtete Versagensabläufe möglichst präzise mathematisch zu beschreiben und eine Auswertung vornehmen zu können. Das jeweilige Modell kann die Zusammenhänge der Parameter auf Grundlage von physikalischen Zusammenhängen oder empirischen Beziehungen wiedergeben. In den seltensten Fällen handelt

es sich jedoch um eine exakte Darstellung der Naturphänomene. Aus der vereinfachenden Beschreibung von Naturphänomenen hinsichtlich ihrer räumlichen sowie zeitlichen Auflösung resultiert die Modellunsicherheit. Die Modellunsicherheiten können beide Seiten, die Einwirkungs- sowie die Widerstandsseite, von Grenzzustandsgleichungen (siehe auch Kapitel 7) beeinflussen, sind jedoch oftmals nur unzureichend quantifizierbar (HUBER 2008).

Die Modellunsicherheit kann allgemein über Modellunsicherheitsfaktoren  $m$  berücksichtigt werden; sie geben den Unterschied zwischen der Modellvorhersage und dem tatsächlichen Ergebnis der abgebildeten physikalischen Zusammenhänge an. Für die Ermittlung der Unsicherheitsfaktoren und die Berücksichtigung der Korrekturgröße diskutiert KORTENHAUS (2003) drei Möglichkeiten in Abhängigkeit der gemessenen Werte  $y_{mess}$  sowie der in dem Modell berechneten Werte  $f(x_{calc})$ :

- *Multiplikativer Ansatz*: Mit größer werdenden Eingangsparametern steigt die Abweichung des Modells:

$$m_{mult} = \frac{y_{mess}}{f(x_{calc})} \quad (4.1)$$

Der Mittelwert des Modellunsicherheitsfaktors beträgt für den multiplikativen Ansatz  $\mu_{m,mult} = 1,0$ .

- *Additiver Ansatz*: Die Abweichung der gemessenen Daten ist unabhängig von der Größe der modellierten Daten:

$$m_{add} = y_{mess} - f(x_{calc}) \quad (4.2)$$

Der Mittelwert des Modellunsicherheitsfaktors beträgt für den additiven Ansatz  $\mu_{m,add} = 0,0$ .

- *Kombinationsansatz*: Er stellt eine Kombination der beiden oberen Ansätze dar. Hierbei wird das Steigungsmaß durch den multiplikativen Ansatz und der Ordinatenschnittpunkt durch den additiven Ansatz bestimmt.

Die Größen der Unsicherheitsfaktoren sind bisher nur für sehr wenige Versagensmechanismen bestimmt. Für viele Modelle fehlen ausreichende Datenmengen oder Angaben im Schrifttum, um die Unsicherheitsfaktoren zu bestimmen.

KORTENHAUS (2003) nimmt daher Schätzungen für die Unsicherheitsfaktoren vor. Hierfür verwendet er ausschließlich den multiplikativen Ansatz und legt die Standardabweichung der unbekanntenen Unsicherheitsfaktoren zu  $\sigma_m = 0,2$  fest. Eine größere Streuung der Modellergebnisse würde bedeuten, dass das jeweilige Modell zu

ungenau arbeitet und zu verbessern wäre. Ferner untersucht KORTENHAUS (2003) die Auswirkungen der eingeführten Modellunsicherheit und gelangt zu dem Schluss, dass bei den meisten der untersuchten Versagensmechanismen die Einführung der Modellunsicherheit keinen oder lediglich einen sehr geringen Einfluss auf die Versagenswahrscheinlichkeit hat.

HUBER (2008) beschränkt die Einführung von Modellunsicherheitsfaktoren auf empirische sowie semi-empirische Kriterien. Die Einführung von Unsicherheitsfaktoren bei rein analytischen Modellen impliziert, dass den exakten physikalischen Beschreibungen nicht vertraut werden kann, was einen Widerspruch darstellt. Bei der probabilistischen Modellbildung ist bereits die Unsicherheitsaussage impliziert, so dass hier ein zusätzlicher Parameter zur Berücksichtigung der Unsicherheit entfällt.

MÖLLMANN (2009) definiert in seinem Modell *PC-River* den Unsicherheitsfaktor als den resultierenden Fehler der numerischen Simulationen. Er behandelt die Unsicherheit der meisten Modelle nach dem multiplikativen Ansatz und erhält hierfür Standardabweichungen bis zu  $\sigma_m = 0,5$ .

Die obige Zusammenstellung über den Umgang mit der Modellunsicherheit in der Literatur zeigt auf, dass sich bisher keine einheitliche Vorgehensweise in Bezug auf Erdbauwerke etabliert hat. Als eine Folge hiervon wird in der vorliegenden Arbeit auf die Berücksichtigung von Modellunsicherheitsfaktoren verzichtet, nämlich aus folgenden Gründen:

- Für viele Modelle liegen unzureichende Daten vor, um die Modellunsicherheit zu bestimmen. Hierunter ist die unzureichende Menge an Daten sowie die unzureichende Qualität zur Auswertung der Daten zu verstehen.
- Die einfache Abschätzung der Modellunsicherheitsfaktoren ist selbst wiederum mit einer Unsicherheit behaftet. Die Unsicherheitsfaktoren sind daher in großem Maße das Ergebnis einer subjektiven Entscheidungsfindung.
- Insgesamt zeigt sich bei den oben zitierten Arbeiten, dass der Einfluss der Modellunsicherheit eher gering ist und von anderen Effekten überlagert werden kann.

Als Fazit hiervon wird in dieser Arbeit das Augenmerk vermehrt auf den Einfluss der Unsicherheiten der Parameter gelegt (siehe Kapitel 5).

### 4.3 Unsicherheiten infolge räumlicher Variabilität

Natürlich gewachsene Böden können insbesondere in vertikaler Richtung einer stärkeren räumlichen Variabilität unterliegen. Als Beispiel seien hier fluviatile Sedimente genannt, die i. d. R. im Untergrund von Deichstrecken anstehen. Aufgrund ihrer Genese können ihre geotechnischen Parameter in vertikaler Richtung stark variieren und zugleich in horizontaler Richtung lediglich vergleichsweise geringe Schwankungen aufweisen.

Der Aufbau des Untergrundes beeinflusst das Verhalten des zu betrachtenden Gesamtsystems Deich. Der natürlich gewachsene Untergrund mit heterogenen Sedimenten und einer i. d. R. gering durchlässigen Deckschicht bildet einen wesentlichen Bestandteil des im Hochwasserfall beanspruchten Komplexes aus Deich und Untergrund [ERB 1972]. Zum genaueren Aufbau des Untergrundes liegen im Allgemeinen wesentlich weniger Informationen vor als über den Deichkörper. Sofern keine anthropogenen Eingriffe in den Untergrund vorliegen, kann häufig über eine gewisse Strecke von einheitlichen Verhältnissen des Untergrundes hinsichtlich der Schichtung sowie der bodenmechanischen Eigenschaften ausgegangen werden. Bei der Beurteilung des Untergrundes dürfen jedoch ggf. vorhandene Anomalien, wie beispielsweise überbaute Erosionsrinnen, ehemalige Deichbruchbereiche (Woyen) oder verlandete Mäander, nicht außer Acht gelassen werden. Hier kann insbesondere das geohydraulische Verhalten maßgeblich von dem Verhalten der übrigen Deichstrecke abweichen [SCHNEIDER ET AL. 1997]. Daher sind Angaben für Parameter des Untergrundes prinzipiell mit einer Unsicherheit in Abhängigkeit der räumlichen Ausdehnung versehen.

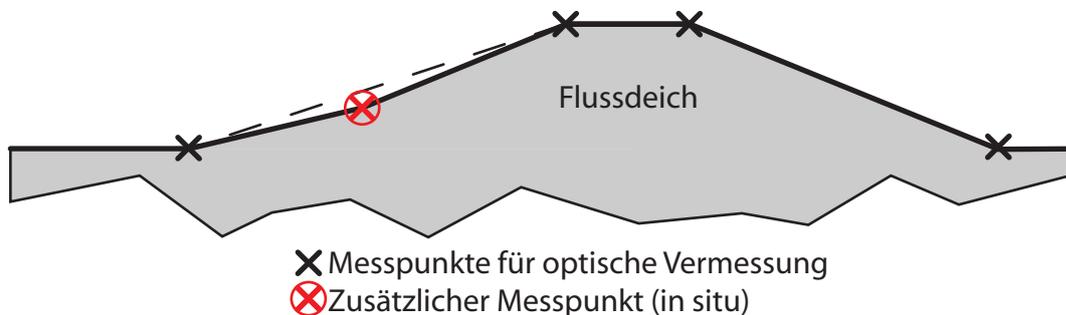
In neueren Modellen für die Herleitung eines geologischen Baugrundmodells wird die Fortpflanzung der Unsicherheiten von Baugrunddaten bis zur geologischen Modellbildung auf der Grundlage geostatistischer Methoden untersucht [SCHÖNHARDT 2005]. Hieraus kann ein dreidimensionales geologisches Modell mit abschätzbaren Unsicherheiten abgeleitet werden. Neben den geotechnischen Parametern kann somit auch dem Baugrundmodell eine Unsicherheit zugewiesen werden, die für probabilistische Nachweise verwendet werden kann. Bei dem hier vorgestellten probabilistischen Bewertungsmodell wird für die Angabe der Schichtmächtigkeiten im Untergrund des Deiches eine räumliche Streuung berücksichtigt. Die Unsicherheiten zur Angabe der Mächtigkeiten der gering durchlässigen Deckschicht sowie des rolligen Aquifers inklusive der oberen Feinsandschicht im Aquifer werden mit einer Normalverteilung abgebildet.

#### 4.4 Unsicherheiten bei geometrischen Parametern

Die Unsicherheit, mit denen geometrische Parameter jeweils behaftet sind, kann unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Dementsprechend werden die geometrischen Parameter z. T. als invariante Parameter behandelt (siehe Abschnitt 5.3) sowie z. T. als Parameter, die einer räumlichen Variation unterliegen (siehe Abschnitt 5.2). Der Grund hierfür liegt in dem unterschiedlichen Informationsgehalt, den die jeweilige geometrische Angabe beinhaltet.

Zur Verdeutlichung werden im Folgenden Informationen zur Geometrie eines Deiches mit den Angaben zur Schichtmächtigkeit im Untergrund verglichen. In beiden Fällen werden Daten zur Geometrie der Struktur des zu untersuchenden Komplexes aus Deich und Untergrund erhoben. Die Informationen liegen zwangsläufig lediglich an einzelnen Punkten in Form von Koordinaten im Raum vor.

Zur Deichgeometrie wird davon ausgegangen, dass die Daten durch eine optische Vermessung aufgenommen werden, z. B. die Punkte der Böschungsschulter sowie am jeweiligen Deichfuß (siehe Bild 4.1, schwarze Kreuze). Die Punkte können linear miteinander verbunden werden, um ein vollständiges Bild des Deiches im Querschnitt zu erhalten. Die auf diese Art und Weise erhaltene Information zur Deichgeometrie ist lediglich mit geringen Unsicherheiten behaftet. Sollte sich während der Vermessung herausstellen, dass die lineare Verbindung der Messpunkte zu einem abweichenden Bild des tatsächlichen Querschnittes führen würde, kann mit geringem Aufwand durch zusätzliche Messpunkte der Informationsgehalt nachträglich erhöht werden und durch die größere Informationsdichte die Unsicherheit der Deichgeometrie weiter verringert werden (siehe Bild 4.1).



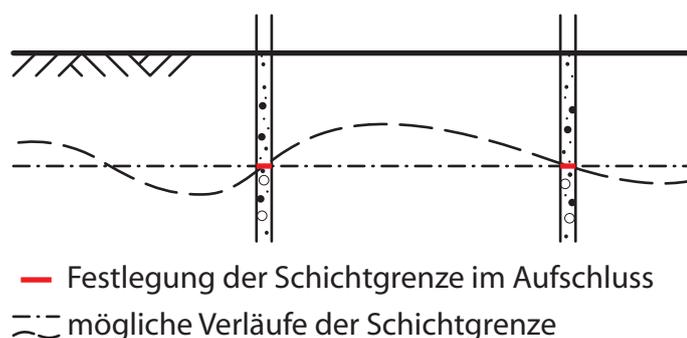
**Bild 4.1:** Deichprofil mit vorab festgelegten Messpunkten (schwarz) und mit zusätzlichem Messpunkt (rot) bei Abweichung vom Soll-Profil

Um Informationen über den Untergrundaufbau zu erhalten, sind geotechnische Erkundungsmaßnahmen durchzuführen. Hierfür stehen verschiedene Verfahren zur

Auswahl. Gegenüber geophysikalischen Verfahren sowie indirekten Aufschlüssen bieten direkte Aufschlussverfahren nach DIN EN ISO 22475-1:2007-01 den größten Informationsgehalt über den Untergrund. Weiterer Vorteil der direkten Aufschlüsse bietet darüber hinaus die Möglichkeit zur Gewinnung von Proben, um geotechnische Parameter des Untergrundes im Labor bestimmen zu können.

Mögliche Unsicherheiten bestehen beim Transfer von Informationen des direkten Aufschlusses auf den Schichtverlauf. Beispielsweise verkörpern Aufschlussbohrungen eine Informationsquelle mit hoher Auflösung in vertikaler Richtung, in horizontale Richtung stellen sie jedoch lediglich einzelne Stichproben dar [SAUCKE 2004]. Der tatsächliche horizontale Verlauf der Schichten im Untergrund lässt sich nur mit größerer Unsicherheit abschätzen; eine größere Anzahl an Aufschlüssen kann die Informationsdichte erhöhen und somit die Unsicherheit bezüglich des Schichtverlaufes reduzieren.

Selbst wenn die geringe Verfälschung der Messergebnisse aufgrund des gewählten Aufschlussverfahrens (z. B. durch Auflockerung der Bodenprobe oder ein Verschmieren der Schichtgrenzen) außer Acht gelassen werden kann, hängt die Festlegung der Schichtgrenzen doch zu einem Teil von der subjektiven Einschätzung und der Erfahrung des Geologen vor Ort ab. Die Lage von Schichtgrenzen in Aufschlussprotokollen sowie der hieraus abgeleitete Verlauf in Schnittzeichnungen ist daher stets mit Unsicherheiten behaftet (siehe Bild 4.2).



**Bild 4.2:** Informationen aus zwei Bodenaufschlüssen mit möglichem Schichtverlauf zwischen den Aufschlussstellen (schematisch)

Dies liegt z. T. auch daran, dass die Wahl der Aufschlussstellen vorab und meist mehr oder weniger willkürlich erfolgt. Selbst weitere nachträglich durchgeführte Bodenaufschlüsse können weniger zusätzliche Information enthalten als eine gezielt angeordnete zusätzliche Messstelle (siehe Beispiel oben in Bild 4.1), wo mit einer Erhöhung der Anzahl der Messpunkte Abweichungen von der linearen Verbindung zweier Messpunkte gezielt erfasst werden können.

Hieraus folgt die für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell angewendete differenzierte Vorgehensweise im Hinblick auf die Berücksichtigung von Unsicherheiten bei geometrischen Parametern von Deich und Untergrund: Den geometrischen Parametern des Deiches wird eine geringe Unsicherheit zugewiesen, so dass diese als invariante Parameter verwendet werden können. Den geometrischen Parametern des Deichuntergrundes (Schichtmächtigkeiten) wird eine größere Unsicherheit zugeordnet, so dass diese Parameter im Rahmen der probabilistischen Bewertung variiert werden.

## 4.5 Korrelation von Parametern

Deiche an Fließgewässern sind i. d. R. lang gestreckte Linienbauwerke und können in Längsrichtung eine erhebliche Ausdehnung aufweisen. Hierbei können die Parameter des Untergrundes bzw. des Deichkörpers innerhalb der Deichstrecke variieren. Betrachtet man zwei nebeneinander liegende Schnitte durch den Deich mit Untergrund, können die Eigenschaften der Parameter in Abhängigkeit der Entfernung der beiden Beobachtungsstellen mehr oder weniger variieren: Bei der Betrachtung zweier Querschnitte in geringerem Abstand werden die Parameter eine geringere Streuung aufweisen, als in größerem räumlichen Abstand voneinander.

Das Maß, ab welchem Abstand von zwei betrachteten Querschnitten keine Korrelation mehr zwischen zwei Punkten nachweisbar ist, wird als Korrelationslänge bezeichnet [FENTON & GRIFFITHS 1993]. Für die Ermittlung der Korrelationslänge existieren zahlreiche Korrelationsfunktionen. In Bezug auf die geotechnischen Parameter von Flussdeichen bleibt festzustellen, dass die Korrelationslänge der Parameter

- abhängig vom Material im Deich sowie im Untergrund,
- unterschiedlich für jeden der Bodenparameter,
- abhängig von der betrachteten Raumrichtung (horizontal/vertikal) sowie
- aufwändig (hinsichtlich der Gewinnung einer ausreichenden Anzahl von Stichproben sowie aufgrund der notwendigen umfangreichen Berechnungen) zu bestimmen ist.

In der Literatur finden sich viele Angaben zu Korrelationsmodellen von geotechnischen Parametern, die sich dabei vorwiegend auf normalverteilte bzw. log-normalverteilte Zufallsgrößen beziehen, Untersuchungen hierzu liefern z. B. CUR (1990), FENTON & VANMARCKE (1991), PHOON & KULHAWY (1999).

Jedoch sind nicht zu allen Parametern, die in dem hier beschriebenen Modell zur Bestimmung von Versagenswahrscheinlichkeiten verwendet werden, Angaben zur Korrelationslänge zu finden. Darüber hinaus stellt die Bestimmung der Korrelationslänge von einzelnen Parametern einen eigenen umfangreichen Themenkomplex dar. Da nicht zu allen verwendeten Parametern entsprechende Korrelationsmodelle vorliegen, wird die Berücksichtigung einer Korrelationslänge in das hier behandelte Modell nicht explizit eingeführt.

Zusammenfassend wird in Anlehnung an HALL ET AL. (2003) und CUR (1990) empfohlen, den Abschnitt einer zu untersuchenden Deichstrecke auf eine maximale Länge von 300 bis 500 m zu begrenzen. Auf diese Weise können Korrelationseffekte zwischen den Abschnitten minimiert werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Aussage zu der an einem Querschnitt ermittelten Versagenswahrscheinlichkeit Gültigkeit für einen Abschnitt von ca. 300 bis 500 m besitzen kann. Um letztendlich zu einer Aussage über die Versagenswahrscheinlichkeit eines Deichabschnitts (Deichringes) zu gelangen, sind hierfür Untersuchungen an Deichquerschnitten erforderlich, die nicht mehr als 300 bis 500 m weit auseinander liegen sollten.



## 5 Parameter

### 5.1 Zeitlich veränderliche Parameter (Wasserstand und Wind)

Die Angabe der Versagenswahrscheinlichkeit erfolgt in der Einheit [Anzahl Ereignisse pro Zeitintervall] bzw. dessen Reziprokwert [ein Ereignis pro Wiederkehrintervall]. Bei einem statistischen Wiederkehrintervall mit der Einheit [Jahre] spricht man von der *Jährlichkeit*. Beispielsweise hat ein Hochwasserereignis mit der *Jährlichkeit* 100 a eine Überschreitungswahrscheinlichkeit  $P_{\ddot{u}} = 0,01$ . Hiermit ist die Versagenswahrscheinlichkeit mit einem zeitlichen Bezug verbunden. Üblicherweise wird als Zeithorizont ein Jahr verwendet, so dass die Versagenswahrscheinlichkeit als Anzahl der Versagensfälle pro Jahr ausgedrückt werden kann.

Der Zeitbezug der Versagenswahrscheinlichkeit leitet sich aus der Verwendung des jährlichen Hochwasserstandes ab. Die Herleitung der Funktion des jährlichen Hochwasserstandes in Abhängigkeit des Hochwasserabflusses ist nicht Gegenstand dieser Arbeit, da hierfür umfangreiche Untersuchungen und Modellierungen notwendig sind. Unter anderem fließen bei der Bestimmung der Wasserspiegellagen in Abhängigkeit des Abflusses die Geländetopographie sowie Gewässertopographie in die hydrodynamische Modellierung ein. Zum allgemeinen Verständnis werden im Folgenden die Schritte zur Gewinnung der Beziehung zwischen Hochwasserstand und Wiederkehrintervall kurz dargelegt:

Aus der – bestenfalls kontinuierlichen, andernfalls stündlichen oder täglichen – Aufzeichnung des Wasserstandes (oder des Abflusses) an einem Pegel ergibt sich die zugehörige Wasserstandsganglinie [DIN 4049-1:1992-12], bei der der Wasserstand über der fortlaufenden Zeitachse aufgetragen wird. Die Ganglinie ist in äquidistante Zeitschritte (üblicherweise ein Jahr) zu unterteilen, für die jeweils der maximale Wasserstand ermittelt werden kann (Jahresserie). Hieraus ergeben sich genauso Eintrittswahrscheinlichkeiten von niedrigen Wasserständen bzw. von Wasserständen, bei denen die Deiche nicht eingestaut werden und die nicht unter den Begriff *Hochwasser* fallen.

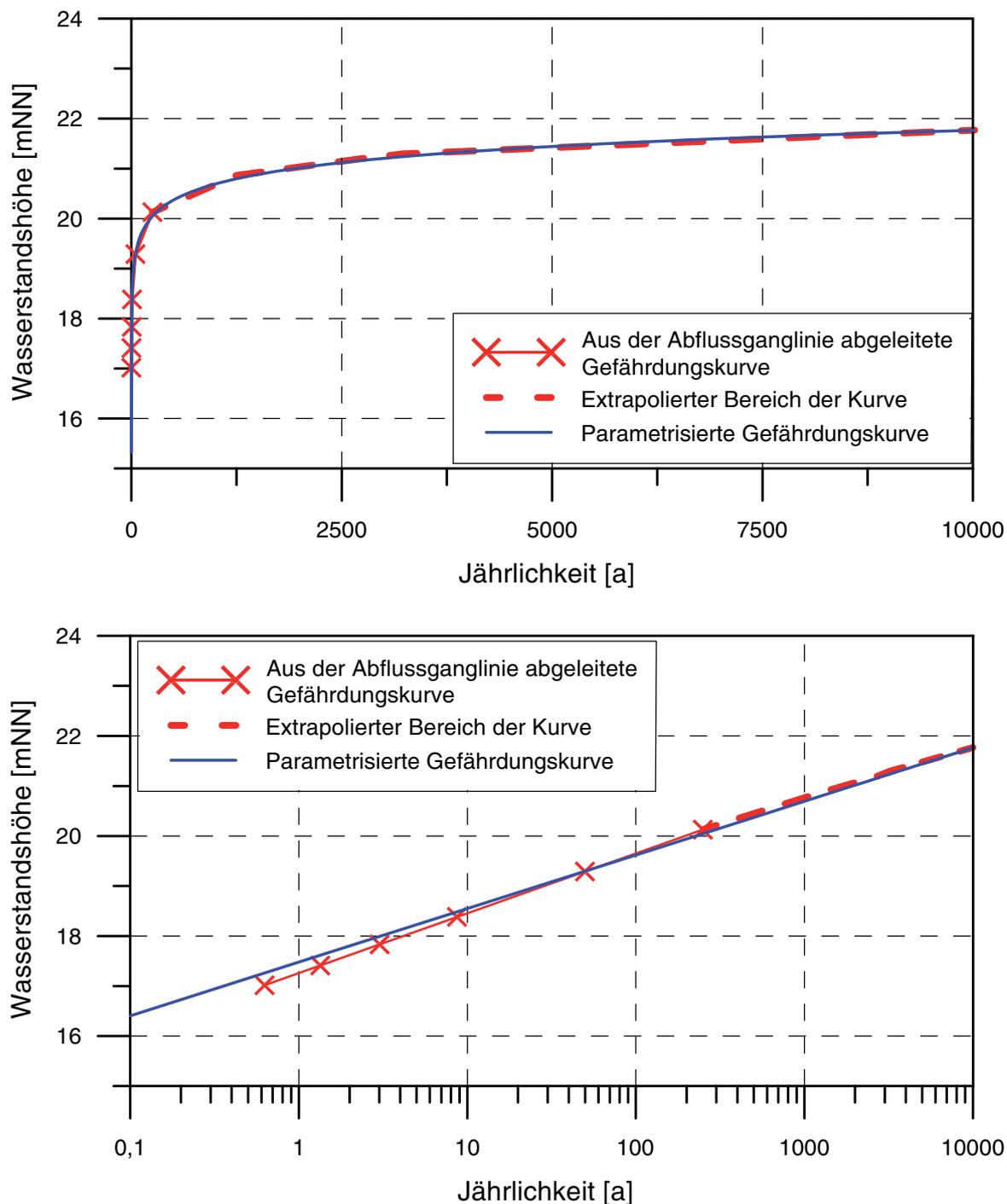
Die so gewonnenen Daten sind hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit und Verwertbarkeit zu überprüfen, als Stichpunkte seien hier beispielhaft die Konsistenz- und Homogenitätsanalyse genannt sowie die Prüfung auf Unabhängigkeit. Nach DVWK (1999A) wird für eine belastbare statistische Aussage eine Beobachtungszeitspanne von mindestens 20 Jahren gefordert. Werden die maximalen jährlichen Wasserstände über ihrer Häufigkeit aufgetragen, erhält man die Häufigkeitsverteilung der maximalen jährlichen Wasserstände. Durch Summation der Häufigkeiten ergibt sich die Summenhäufigkeit. Aus ihrer grafischen Darstellung, der Verteilungsfunktion, lässt sich der Zusammenhang zwischen Wasserstand und zugehörigem Wiederkehrintervall (Überschreitung des Wasserstandes ein Mal pro Wiederkehrintervall) ablesen. Dieser Zusammenhang wird in der Literatur auch als *Gefährdungskurve* oder *Hazardfunktion* (engl. hazard curve) bezeichnet [MERZ 2006]. Plate weist mehrfach darauf hin, dass aus der Angabe der Jährlichkeit des Wasserstandes nicht auf eine Versagenswahrscheinlichkeit geschlossen werden kann [PLATE 1986, PLATE 1992, PLATE & DUCKSTEIN 1987]. Die Ermittlung der Gefährdungskurve ist mit großer Sorgfalt zu betreiben, da sich ihre Unsicherheiten auf die zu ermittelnde Versagenswahrscheinlichkeit auswirken.

Für die weitere Verwendung im Rahmen der probabilistischen Bewertung ist es hilfreich, die Gefährdungskurve zu parametrisieren. Hierfür sind viele Funktionstypen gebräuchlich. Zur Veranschaulichung wird in Bild 5.1 die Gefährdungskurve für den Hochwasserstand und die im Rechenmodell verwendete parametrisierte Funktion dargestellt.

In dem hier behandelten probabilistischen Modell steht der Parameter Wasserstand  $H_W$  auf der Einwirkungsseite und hat die Einheit [mNN]<sup>2</sup>. Der Hochwasserstand findet Eingang in allen Versagensmechanismen, so dass alle Mechanismen zumindest über die Zeitabhängigkeit miteinander verknüpft sind.

---

<sup>2</sup> Wie oben dargelegt, handelt es sich genau genommen um die Einheit *Hochwasserstand pro Jahr*. Der zeitliche Bezug spiegelt sich in der Einheit der Versagenswahrscheinlichkeit wider. Um die übrigen Grenzzustandsgleichungen einheitentreu zu halten, wird im Weiteren auf die Angabe des zeitlichen Bezuges der Größe *Hochwasserstand* verzichtet.



**Bild 5.1:** Beispiel einer Gefährdungskurve für den Wasserstand mit parametrisierter Funktion (hier: zweiparametrische Exponentialverteilung); mit linearer Darstellung der Jährlichkeit (oben) sowie mit logarithmischer Darstellung (unten)

Zur Beschreibung des Versagensmechanismus der *instationären Durchfeuchtung* werden die Aufstau- sowie die Einstaudauer eines Hochwasserereignisses benötigt (siehe auch Abschnitt 7.6.4). Definitionsgemäß beginnt die Aufstauhase ab dem Zeitpunkt, sobald der wasserseitige Deichfuß eingestaut wird; sie ist durch einen monoton steigenden Wasserstand gekennzeichnet. Während der Einstauhase bleibt

die Wasserspiegelhöhe mehr oder weniger konstant. Die beiden Parameter hängen eng mit dem Parameter Hochwasserstand zusammen. Gemeinsam charakterisieren sie den Verlauf eines Hochwasserereignisses. In dem hier beschriebenen Modell ist es auch möglich, einen genaueren Verlauf des Hochwasserereignisses abzubilden, wenn entsprechende Daten vorliegen oder generiert werden können. Zur Abschätzung des Einflusses der instationären Durchfeuchtung reicht die Annahme eines linear steigenden Wasserstandes mit konstanter Aufstaugeschwindigkeit.

Eine andere Zeitabhängigkeit besitzt der Einfluss des Windes auf die Wellenhöhe sowie auf den Windstau. Der über das Wasser streichende Wind führt zur Wellenbildung an der Wasseroberfläche. Die auf den Deich auflaufenden und schlimmstenfalls den Deich überschlagenden Wellen können sowohl zur beschleunigten Durchfeuchtung des Deichkörpers als auch zur Erosion der Deichböschungen (wasser- und landseitig) beitragen. Voraussetzung für die Bildung relevanter Wellenhöhen sind eine entsprechende Streichlänge sowie Windgeschwindigkeit. Die Berücksichtigung des Einflusses von windinduzierten Wellen kommt ursprünglich aus der Bemessung von Seedeichen und ist ebenso bei Stauanlagen zu berücksichtigen [DIN 19700-10: 2004-07]. Häufig werden hierfür die Modelle von BRETSCHNEIDER (1954) oder *Krylow II* (erläutert in DVWK 1997) verwendet. MÖLLMANN (2009) setzt dieses Modell auch bei Flussdeichen ein.

Grundlegende Unterschiede zur Anwendung bei Flussdeichen im Gegensatz zu Seedeichen oder Talsperren ist einerseits die deutlich kleinere Wasserfläche und die damit einhergehende geringere Streichlänge sowie andererseits Richtung und Größe der Strömung des (Fließ-)gewässers. Aus der kleineren Wasserfläche folgt eine geringere Streichlänge, die die Höhe der windinduzierten Wellen beeinflusst. Um den Einfluss von windinduzierten Wellen auf Flussdeiche vollständig zu erfassen, ist eine Überlagerung mit der Fließrichtung und -geschwindigkeit des Wassers nötig. Die bekannten Modelle für Wellenauflauf gehen von der kritischsten Windrichtung senkrecht zum Deich aus, was bezogen auf Flussdeiche eine konservative Annahme darstellt. Speziell im Vergleich zu Seedeichen ist bei Flussdeichen von deutlich geringeren Windgeschwindigkeiten auszugehen, da der Wind über Land aufgrund der sehr viel größeren Rauigkeit gegenüber einer Wasseroberfläche schneller an Energie verliert.

Zudem basieren die zur Verfügung stehenden Ansätze meist auf Beobachtungen an stehenden Gewässern und sind daher lediglich für sehr geringe Fließgeschwindigkeiten gültig (DVWK 1997, POHL 2001). Nach DWA (2011) sowie DIN 19712:2013-01 kann die Bestimmung der Windstau- sowie der Wellenhöhen bei schneller strömenden

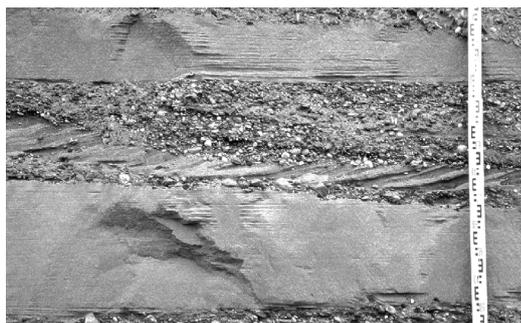
Fließgewässern vorläufig näherungsweise mit den Ansätzen für stehende Binnengewässer abgeschätzt werden.

Für die Berücksichtigung des Wellenaufbaus sowie des Windstaus bei Flussdeichen steht kein umfassendes Modell zur Verfügung. Daher wird auf die Berücksichtigung des windinduzierten Wellenaufbaus und Windstaus sowie möglicher hieraus folgender Versagensmechanismen, wie z. B. der beschleunigten Durchfeuchtung oder der Erosion der landseitigen Böschung, für den *Fehlerbaum für Flussdeiche* in dem hier vorgestellten Modell verzichtet.

## 5.2 Räumlich veränderliche Parameter

### 5.2.1 Allgemeines

Neben den zeitlich variablen Parametern wird zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit auch eine Reihe geotechnischer Parameter verwendet, die i. d. R. einer räumlichen Streuung unterliegen. Hierbei kann sich die Variabilität der geotechnischen Parameter in Richtung der drei Raumachsen unterscheiden (siehe auch Abschnitt 4.3). Vor allem in natürlich gewachsenem Boden mit geschichtetem Bodenaufbau wie bei fluviatilen Sedimenten im Deichuntergrund ist anzunehmen, dass sich die Variabilitäten der einzelnen Parameter in vertikaler Richtung sowie in horizontaler Richtung deutlich unterscheiden können. In horizontaler Richtung ist mit großflächigeren homogenen Strukturen zu rechnen, wohingegen in vertikaler Richtung stärkere Schwankungen der geotechnischen Parameter auftreten können. Zur Veranschaulichung dient Bild 5.2, in dem der typische horizontal geschichtete Aufbau fluviatiler Sedimente in einem senkrechten Aufschluss dargestellt ist. Im gezeigten Ausschnitt wechseln sich enggestufte Sande mit Kieslagen ab, wobei die Schichtgrenzen jeweils scharf abgegrenzt sind.



**Bild 5.2:** Typischer „horizontaler Schichtaufbau“ fluviatiler Sedimente [HEINZ 2001]

Eine Differenzierung in Richtung der beiden horizontalen Raumachsen ist für Parameter des Deichuntergrundes i. d. R. nicht erforderlich. Aufgrund häufigerer Verlagerungen des Flussbettes in der Vergangenheit sind hier voraussichtlich keine signifikant unterschiedlichen Ablagerungen in Längs- bzw. Querrichtung des Fließgewässers zu erwarten.

Der in Bild 5.2 gezeigte Schichtaufbau kann im hier diskutierten Bewertungsmodell über die Eingabe mehrerer Schichten abgebildet werden. Ggf. lohnt sich bei häufigeren kleinräumigen Schichtwechsellern die Ermittlung von *verschmierten Parametern*, wenn nicht ausgeschlossen werden kann, dass verschiedene Zonen miteinander schichtweise verbunden sein können.

Bei geotechnischen Parametern des Deichkörpers sind unterschiedliche Variabilitäten der horizontalen Raumrichtungen äußerst gering anzusehen. Insbesondere bei Deichneubauten mit moderner Fertigungs- sowie Einbautechnik und entsprechender Qualitätsüberwachung kann von einer insgesamt sehr geringen Variabilität innerhalb eines Erdstoffes ausgegangen werden. Darüber hinaus werden bei modernen Baumaschinen relevante Parameter im Rahmen der Qualitätssicherung automatisch und meist kontinuierlich aufgezeichnet werden können. Anhand einer Analyse solcher Daten – beispielsweise zu Parametern der Verdichtung – lassen sich ggf. Unregelmäßigkeiten bereits während des Baufortschritts erkennen und vermeiden.

Bei Altdeichen liegen zumeist keine ausreichenden Informationen über Aufbau und Struktur des Deichkörpers vor. Es wird angenommen, dass auch die Altdeiche als linienhafte Bauwerke mit größerer Längserstreckung errichtet wurden sowie mit vergleichbarem Material und Einbautechniken errichtet wurden. Daher wird auch für Altdeiche eine geringe räumliche Variabilität unterstellt.

In dem hier vorgestellten Bewertungskonzept für Flussdeiche wird für die geotechnischen Parameter keine Variabilität in Abhängigkeit der Raumrichtung angenommen. Vielmehr bezieht sich der zu den probabilistisch verteilten Parametern angegebene Variationskoeffizient (siehe Kapitel 8) jeweils auf den gesamten Bereich des Erdstoffes, unabhängig von einer Raumrichtung. Zur Charakterisierung der Unsicherheit der geotechnischen Parameter werden jeweils der Verteilungstyp, der Mittelwert sowie der Variationskoeffizient angegeben. Im Allgemeinen versteht man unter dem Variationskoeffizienten  $c_v$  das Verhältnis der Standardabweichung  $\sigma$  zum Mittelwert  $\mu$ :

$$c_v = \frac{\sigma}{\mu} \quad (5.1)$$

Der Variationskoeffizient ist dimensionslos. Er ist ein relatives Maß der Standardabweichung und liefert den Grad der Unsicherheit der jeweiligen Parameter.

### 5.2.2 Im Modell verwendete Parameter

Im Folgenden werden die räumlich veränderlichen Parameter mit ihren im Modell verwendeten statistischen Eigenschaften vorgestellt. Die Werte der jeweiligen Parameter sind an die Verhältnisse im Bereich des Niederrheins angepasst, die Mittelwerte der verwendeten Parameter werden in Kapitel 8 beschrieben. Die Variationskoeffizienten wurden jeweils nach umfangreichen Literaturstudien ermittelt, siehe z. B. BAECHER & CHRISTIAN (2003), CUR (1990), FENTON & VANMARCKE (1991), KORTENHAUS & OUMERACI (2002), PHOON & KULHAWY (1999), VROUWENVELDER & STEENBERGEN (2003), WITT & BRAUNS (1984).

Wie bereits in Abschnitt 4.3 dargelegt, werden die veränderlichen geometrischen Parameter (jeweils die *Mächtigkeit* der gering durchlässigen Deckschicht, von körnigen Ablagerungen sowie des Aquifers) als lognormal- oder normalverteilt angenommen. Für die *Mächtigkeit der gering durchlässigen Deckschicht* geben KÄRCHER ET AL. (1997) für den Bereich der Deiche am nördlichen Oberrhein Werte zwischen 0,5 m bis 6,0 m an mit einer mittleren Mächtigkeit von etwa 1,5 m. Für Deiche im Bereich des Niederrheins kann die gering durchlässige Deckschicht erfahrungsgemäß auch größere Mächtigkeiten aufweisen (SILVA ET AL. 2006).

Für die *Wichten* von gering durchlässiger Deckschicht und Deich wird jeweils für den feuchten Zustand sowie unter Auftrieb eine Normalverteilung zugrunde gelegt und der zugehörige Variationskoeffizient mit  $c_V = 0,05$  angegeben. Die Korndichte von Sand zeigt im Allgemeinen lediglich eine sehr geringe Streuung, so dass für die normalverteilte Korndichte des sandigen Aquifers der Variationskoeffizient  $c_V = 0,01$  verwendet wird.

Hingegen lässt sich die *hydraulische Durchlässigkeit* eines Materials lediglich mit größerer Unsicherheit bestimmen, insbesondere die Durchlässigkeit des natürlich gewachsenen Bodens im ungestörten Zustand. Die Herausforderungen bei der Bestimmung der Durchlässigkeit werden noch eingehend im Abschnitt 8.4.3 behandelt. Insgesamt wird die lognormalverteilte hydraulische Durchlässigkeit des Deichmaterials sowie des Aquifers mit einem Variationskoeffizienten von  $c_V = 0,5$  berücksichtigt. Teilweise finden sich in der Literatur noch deutlich größere Angaben

für die Schwankungsbreite der Durchlässigkeit, DE GROOT (2001) berichtet von Variationskoeffizienten für Sand und Klei von mehr als 200 %.

In der Studie von KÄRCHER ET AL. (1997) wurde eingehend der *Druckabbau des hydraulischen Potentials* im Deichuntergrund untersucht. Gemessen und ausgewertet wurden hierfür mehrere Hochwasserereignisse, die im Bereich des nördlichen Oberrheins auftraten. In Abhängigkeit des Hochwasserabflusses sowie des Deichuntergrundes wurden für den Druckabbau im Untergrund an zwei verschiedenen Messstellen Werte von 0,3 bis 0,6  $\text{m}/_{100\text{m}}$  sowie von 2,5 bis 3,5  $\text{m}/_{100\text{m}}$  gemessen. Die unterschiedlichen Ergebnisse werden hierbei unter anderem auf den Einfluss der Vorsättigung im Untergrund zurückgeführt. In dem hier entwickelten Bewertungsmodell wird der lognormalverteilte Druckabbau mit 0,3  $\text{m}/_{100\text{m}}$  und einem Variationskoeffizienten von  $c_V = 0,3$  berücksichtigt, wie es auch in DWA (2011) empfohlen wird.

Für die statistische Verteilung der *Scherparameter* finden sich viele Untersuchungen in der Literatur, eine umfangreiche Zusammenstellung von Referenzen findet sich bei HUBER (2008). Üblicherweise wird hierfür eine Normalverteilung zugrunde gelegt. Für bindigeres Material wurden häufig größere Variationskoeffizienten der Scherparameter ermittelt. Der Variationskoeffizient des Reibungswinkels liegt in der Literatur nach der Zusammenstellung bei HUBER (2008) zwischen 0,02 und 1,0 (überwiegend zwischen 0,05 und 0,2) und der Variationskoeffizient der Kohäsion wird dort mit einer Bandbreite von 0,12 bis 0,85 (überwiegend zwischen 0,25 und 0,5) angegeben. Daher wird für den *Reibungswinkel* des Deichmaterials ein Variationskoeffizient  $c_V = 0,12$  berücksichtigt und für die gering durchlässige Deckschicht ein Variationskoeffizient  $c_V = 0,18$ . Analog dazu wird für die *Kohäsion* des Deichmaterials ein Variationskoeffizient  $c_V = 0,3$  angenommen und für die gering durchlässige Deckschicht ein Variationskoeffizient  $c_V = 0,4$ .

Die *Fraktilwerte der Sieblinie* werden üblicherweise mit einer Lognormalverteilung abgebildet, z. B. bei VROUWENFELDER & STEENBERGEN (2003) sowie bei WITT & BRAUNS (1984). Für den 70 %-Fraktilwert des Sandes im Aquifer *d70* wird ein Variationskoeffizient  $c_V = 0,23$  angenommen. Die der Kornverteilung zugehörige *Ungleichförmigkeitszahl* wird normalverteilt und mit einem Variationskoeffizient  $c_V = 0,15$  bestimmt.

Den Angaben für den *Schleppkraftkoeffizienten* sowie für den *Bettungswinkel* liegen Untersuchungen aus TAW (1999), VAN LOON (2001) sowie VROUWENFELDER & STEENBERGEN (2003) zugrunde. Hieraus wird für den Schleppkraftkoeffizienten

sowie für den Bettungswinkel eine Lognormalverteilung jeweils mit einem Variationskoeffizienten  $c_V = 0,1$  entnommen.

Der *Porenanteil des Aquifers* wird mit einer Normalverteilung abgebildet und einem vergleichsweise kleinen Variationskoeffizienten  $c_V = 0,01$ .

Die Parameter mit Einfluss auf den Vorgang der instationären Durchfeuchtung des Deiches, der *luftgefüllte Porenraum*  $n_a$  sowie das *Matrixpotential*  $\psi_m$ , werden mit einer Normalverteilung abgeschätzt. Der Variationskoeffizient des luftgefüllten Porenraumes beträgt  $c_V = 0,05$ , für das Matrixpotential wird  $c_V = 0,1$  angenommen. Das Matrixpotential umfasst alle Kräfte, mit denen Wasser von der Bodenmatrix festgehalten werden kann. Es ist umso größer, je feinkörniger ein Boden strukturiert ist [SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010].

Für den *Sackungsfaktor*, der ausführlicher in Abschnitt 7.5 hergeleitet wird, liegen bisher nur wenige Erfahrungswerte vor. Ein Sackungsfaktor  $\zeta < 0$  ist gleich zu setzen mit einer Erhöhung der Deichkrone und macht daher physikalisch keinen Sinn, weshalb für die statistische Verteilung des empirischen Faktors eine Lognormalverteilung mit einem Variationskoeffizienten  $c_V = 0,1$  angenommen wird.

Die hier erläuterten Parameter werden zusammen mit den übrigen im Modell verwendeten Parametern im Abschnitt 8.1 tabellarisch zusammengestellt.

### 5.3 Invariante Parameter

Neben den Parametern, die einer zeitlichen bzw. räumlichen Variabilität unterliegen, gehen in das Berechnungsmodell auch deterministische Parameter ein, deren Werte nicht variiert werden (siehe Kapitel 8). Dies betrifft im Wesentlichen die geometrischen Parameter des Deiches wie

- die Kronenhöhe,
- die landseitige sowie
- die wasserseitige Böschungsneigung,
- die Deichlagerbreite,
- die Vorlandbreite sowie
- die Geländeoberkante der Landseite.

Es ist davon auszugehen, dass die Geometrie des Deiches bekannt ist, sei es durch eine Vermessung vor Ort oder bei der Planung von neuen Deichen. In beiden Fällen sind mögliche Abweichungen zu der tatsächlichen Ausführung bzw. Messfehler als so gering einzustufen, dass ihre Berücksichtigung keinen Mehrwert für das Modell liefert.

Daneben werden auch Parameter als invariant angenommen, deren Eigenschaften von anderen Einflüssen abhängig sind, die für das Berechnungsmodell nicht von entscheidendem Einfluss sind. Z. B. werden die verwendeten Stoffparameter des Wassers (Dichte, dynamische Viskosität sowie hieraus folgend die kinematische Viskosität) u. a. von der Temperatur des Wassers beeinflusst. Im Berechnungsmodell werden jeweils die Parameter verwendet, die einer Temperatur des Wassers von 10 ° C entsprechen.

## 5.4 Einfluss von Klimaveränderung

Derzeit ist in den Medien häufig vom Klimawandel die Rede, insbesondere im Zusammenhang mit meteorologischen Extremereignissen. Hierbei ist unter dem Begriff Klima die Gesamtheit aller an einem Ort möglichen Wetterzustände einschließlich ihrer typischen Aufeinanderfolge sowie ihrer tages- und jahreszeitlichen Schwankungen zu verstehen. Aus dieser Definition wird ersichtlich, dass sich der Begriff Klima auf einen längeren Zeitraum erstreckt; zur Feststellung des Klimawandels werden Daten von bedeutend längeren Zeitreihen benötigt. Dessen ungeachtet lässt sich eine Häufung von meteorologischen Extremereignissen bemerken [RAUBER ET AL. 2005; ENDLICHER & GERSTENGARBE 2007, IPCC 2007].

Insbesondere Hochwasserereignisse treten als Folge von extremen Niederschlagsereignissen in den Fokus der Klimaveränderung<sup>3</sup>. Vor diesem Hintergrund hat die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) gemeinsam mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) eine Studie herausgegeben, in der die Auswirkungen der Klimaveränderung auf die Wasserwirtschaft in Süddeutschland untersucht werden. Vorrangig widmet sich die

---

<sup>3</sup> Darüber hinaus können anthropogene Eingriffe die Abflusscharakteristik eines Flusses erheblich verändern. Als Beispiel seien hier direkte Maßnahmen wie Flussbegradigung oder Flächenversiegelung genannt neben indirekten Faktoren wie dem verminderten Wasserrückhaltevermögen der Wälder infolge Waldsterbens.

KLIWA-Studie [LUBW/LFU 2006] den Aussagen zur Hochwasserproblematik. Um Auswirkungen des Klimawandels beim Hochwasserschutz berücksichtigen zu können, werden sogenannte *Klimaänderungsfaktoren* vorgestellt. Die Flussgebiete in Baden-Württemberg werden in 5 Zonen eingeteilt. In Abhängigkeit der Jährlichkeit des Bemessungsereignisses ist der Abflusswert mit dem Klimaänderungsfaktor zu multiplizieren. Für ein Jahrhundertereignis liegen die Klimaänderungsfaktoren zwischen 1,15 und 1,25; ab einer Jährlichkeit  $> 1000$  ist der Faktor gleich 1,0.

Hiermit steht ein Instrument zur Verfügung, um Prognosen für die Entwicklung eines Wasserhaushaltsmodells in Abhängigkeit der Klimaveränderung in die Bewertungspraxis einfließen zu lassen. Die Berücksichtigung von Klimaänderungsfaktoren setzt auf den Zusammenhang von Abfluss und Jährlichkeit auf und kann ebenso bei der probabilistischen Analyse berücksichtigt werden.



## 6 Der Fehlerbaum und seine Umsetzung im Modell

### 6.1 Allgemeines zur Fehlerbaumanalyse

Zur Identifizierung und zur Analyse von Gefährdungen komplexer Systeme steht eine Vielzahl verschiedener Methoden zur Verfügung. Hierbei ist das Ziel der Gefahrenanalyse, durch die systematische Untersuchung eines Systems die jeweils relevanten Versagensmechanismen zu erkennen und hieraus die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls des Gesamtsystems zu bestimmen. Als Versagensmechanismus wird zunächst jede mögliche Gefährdung bzw. Kombinationen unterschiedlicher Gefährdungen verstanden, die zu einem unerwünschten Ereignis führen. Besondere Schwierigkeiten bereitet die Verarbeitung von bisher nicht aufgetretenen oder nicht wahrgenommenen Versagensmechanismen, für die (noch) keine Beschreibung, auch keine mathematische Beschreibung in Form einer Grenzzustandsgleichung, und keine Erfahrungen – sogenanntes Expertenwissen – vorliegen.

Für die Anwendung von Methoden zur Gefahrenanalyse sind profunde Kenntnisse über die Zusammenhänge innerhalb des Systems sowie über die einzelnen Elemente nötig. Zur Entwicklung der Zusammenhänge von Versagensmechanismen wurde in der vorliegenden Arbeit die Fehlerbaumanalyse angewendet. Ihre Vorteile liegen auf der Hand:

- Die übersichtliche grafische Darstellung in einer Baumstruktur ermöglicht, auch mit wenig Fachwissen die Zusammenhänge und Ursachen eines Fehlers zu erfassen.
- Mögliche Ausfallursachen und deren Zusammenwirken mit anderen Faktoren lassen sich mit der Fehlerbaumanalyse identifizieren.
- Durch Umsetzung in ein mathematisches Modell lassen sich Ausfall- bzw. Versagenswahrscheinlichkeiten berechnen.
- Mit vergleichsweise geringem Aufwand lassen sich Varianten eines Szenarios vergleichen.

Dem stehen die folgenden Nachteile der Methode gegenüber:

- Die Vollständigkeit des Fehlerbaumes ist keine Voraussetzung zur Anwendung, so dass auch entscheidende Mechanismen vergessen werden können.
- Bei komplexeren Systemen kann die Übersichtlichkeit des Fehlerbaumes verloren gehen.

Im Folgenden wird die Methode der Fehlerbaumanalyse näher vorgestellt und auf Flussdeiche angewendet.

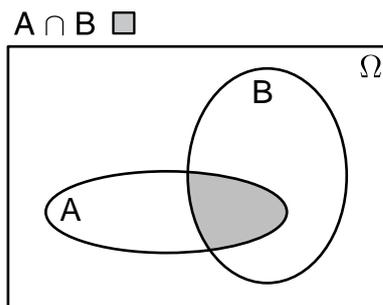
Die Fehlerbaumanalyse ist eine deduktive Methode, bei der ausgehend von dem Fehlerbaumausgang mögliche Versagensabläufe abgebildet werden. Entsprechend DIN 25424-1:1981-09 (Fehlerbaumanalyse) wird der Ausgang der Systemanalyse auch *unerwünschtes Ereignis* oder *TOP-Ereignis* genannt, in der europäischen Norm DIN EN 61025:2007-08 (Fehlzustandsbaumanalyse) wird das Ereignis als *Hauptergebnis* bezeichnet. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die Nomenklatur der DIN 25424 angewendet. Ausgehend von dem TOP-Ereignis werden alle denkbaren Versagensabläufe in einzelne Versagensmechanismen zerlegt und gegebenenfalls miteinander kombiniert; die Schachtelungstiefe ist hierbei im Prinzip unbegrenzt. Für die Verknüpfung der einzelnen Versagensmechanismen stehen die logischen Operatoren der Booleschen Algebra zur Verfügung.

Die Anordnung der Versagensmechanismen unterliegt einfachen und eindeutigen Regeln, so dass eine klare Struktur von Ereignisketten erkennbar ist, die zu dem unerwünschten Ereignis führen können. Einzelne Versagensabläufe sind klar abgegrenzt, so dass Schwachstellen innerhalb der Abläufe erkannt werden können. Jedoch können beim Erstellen von Fehlerbäumen Kombinationen von Ereignissen unentdeckt bleiben, mit der Folge, dass die Beschreibung des Gesamt-Systems ggf. unvollständig sein kann.

In dem nachfolgend erläuterten *Fehlerbaum für Flussdeiche* werden *UND-* sowie *ODER-*Verknüpfungen verwendet. Die Anwendung und Bedeutung dieser Verknüpfungen wird zunächst näher erläutert:

- *UND-Verknüpfung:* Für die Schnittmenge zweier stochastisch unabhängiger Ereignisse A und B des Grundraumes  $\Omega$  gilt:

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) \quad (6.1)$$



**Bild 6.1:** Durchschnittsmenge zweier Ereignisse

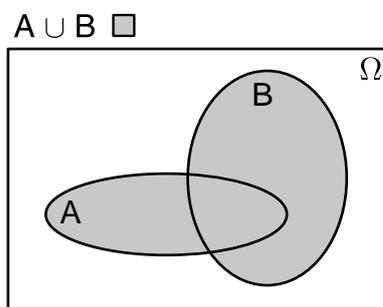
Auf die *UND*-Verknüpfung im Fehlerbaum bezogen folgt hieraus, dass alle einfließenden Ereignisse eintreten müssen, um das Folgeereignis auszulösen. Man spricht daher von einem Parallel-System. Die Wahrscheinlichkeit  $P_f$  für das Eintreten des Folgeereignisses (= Versagenswahrscheinlichkeit) von  $n$  stochastisch unabhängigen, durch eine *UND*-Verknüpfung verbundenen Ereignissen bestimmt sich daher zu:

$$P_f = \prod_{i=1}^n P_i \tag{6.2}$$

Das Hinzufügen weiterer Ereignisse zu einer *UND*-Verknüpfung entspricht der Aufgliederung bzw. Verfeinerung eines Versagensmechanismus. Hierdurch verringert sich die Eintrittswahrscheinlichkeit für das Folgeereignis. Sie kann somit niemals größer sein, als die Versagenswahrscheinlichkeit des zuverlässigsten Einganges.

- *ODER*-Verknüpfung: Liegt das Ergebnis in der Vereinigungsmenge der zwei stochastisch unabhängigen Ereignisse  $A$  und  $B$  aus dem Grundraum  $\Omega$ , dann gilt:

$$P(A \cup B) = P(A + B) \tag{6.3}$$



**Bild 6.2:** Vereinigungsmenge zweier Ereignisse

Wie in einem Reihensystem genügt das Eintreten eines der eingehenden Ereignisse, um das Folgeereignis auszulösen. Die Wahrscheinlichkeit  $P_f$  für das Eintreten des Folgeereignisses von  $n$  stochastisch unabhängigen, durch eine *ODER*-Verknüpfung verbundenen Ereignissen ist gegeben durch:

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (6.4)$$

Durch das Hinzufügen von Ereignissen zu einer *ODER*-Verknüpfung kommen weitere mögliche auslösende Ereignisse hinzu, so dass sich die Eintrittswahrscheinlichkeit des Folgeereignisses erhöht, sie ist folglich immer größer als diejenige des unzuverlässigsten Einganges.

KORTENHAUS (2003) hat Ober- bzw. Untergrenzen der Versagenswahrscheinlichkeit nach Art der Verknüpfung und ihrer Abhängigkeit in einer Tabelle zusammengestellt:

**Tabelle 6.1:** Rechenregeln für die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit nach KORTENHAUS (2003)

	<i>UND</i> -Verknüpfung	<i>ODER</i> -Verknüpfung
<b>Maximaler Grenzwert</b>	$P_f = \min(P_i)$	$P_f = \sum_{i=1}^n (P_i)$
<b>Vollkommene Abhängigkeit</b>	$P_f = \min(P_i)$	$P_f = \max(P_i)$
<b>Vollkommene Unabhängigkeit</b>	$P_f = \prod_{i=1}^n P_i$	$P_f = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)$
<b>Minimaler Grenzwert</b>	$P_f = 0$	$P_f = \max(P_i)$

*Vollkommene Abhängigkeit* der Versagensmechanismen bedeutet, dass sobald ein Versagensmechanismus eintritt, auch alle anderen zu dieser Verknüpfung gehörenden Mechanismen eintreten [MERZ 2006]. Hingegen sind bei *vollkommener Unabhängigkeit* der Mechanismen ihre Versagenswahrscheinlichkeiten losgelöst vom Eintreten anderer Versagensmechanismen zu betrachten.

Bei dem in Abschnitt 6.2 näher erläuterten *Fehlerbaum für Flussdeiche* werden die durch eine *UND*-Verknüpfung verbundenen Versagensmechanismen als voneinander abhängig betrachtet. Zu begründen ist dies damit, dass hier der Parameter *Wasserstand* in allen Versagensmechanismen verwendet wird. Hierüber sind die Versagensmechanismen miteinander verbunden (*gekoppelt*) und können nicht als vollkommen unabhängig voneinander betrachtet werden. Darüber hinaus sind einzelne Versagensmechanismen über weitere geometrische Parameter gekoppelt und können auch aus diesem Grund nicht als unabhängig betrachtet werden.

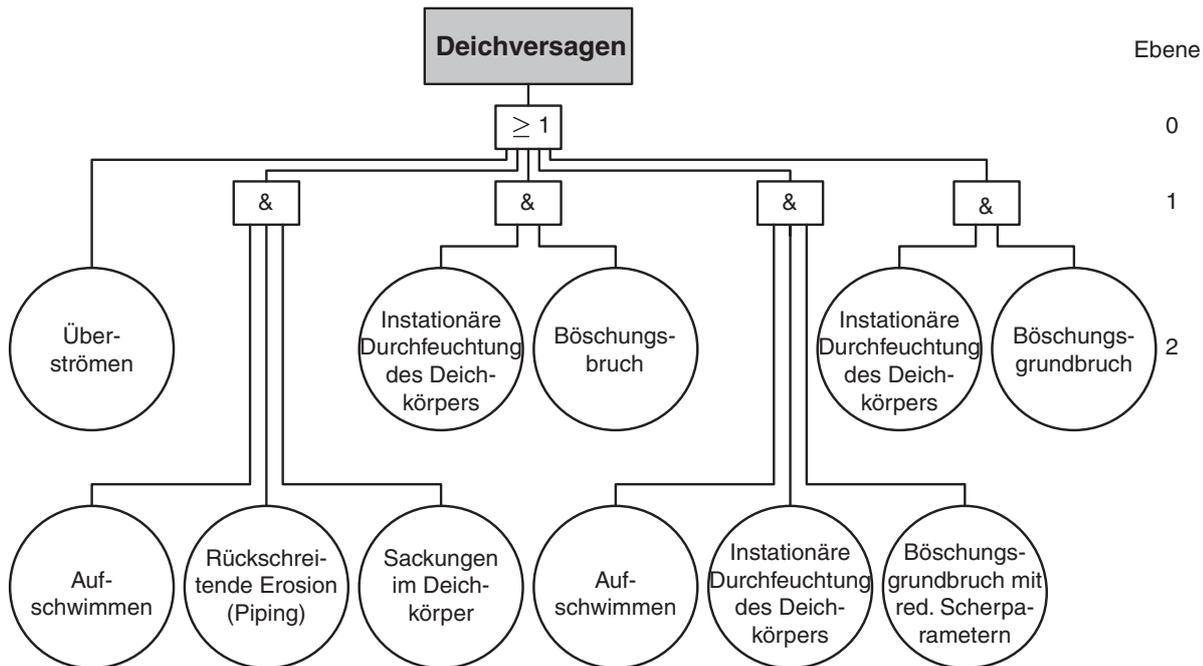
Für die programmtechnische Umsetzung zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit voneinander abhängiger Mechanismen werden nur diejenigen Datensätze der Monte-Carlo-Simulation zur Prüfung des nachgeschalteten Mechanismus übernommen, die bei dem vorangegangenen Mechanismus zu einem Versagen geführt haben. Alle Datensätze, die bei einem vorangegangenen Mechanismus zu keinem Versagen geführt haben, werden bei den weiteren durch *UND* verknüpften Mechanismen außer Acht gelassen, die ansonsten bei vollkommen unabhängigen Mechanismen hinzugezogen werden. Hierbei spielt die Reihenfolge, in der die Mechanismen durchlaufen werden, für das Ergebnis keine Rolle. Nachdem die Versagensmechanismen durchlaufen wurden, kann aus der Anzahl der Datensätze, die zu einem Versagen geführt haben, die Versagenswahrscheinlichkeit für die durch *UND* verknüpften Mechanismen abgeleitet werden. Auf die durch *ODER* verknüpften Mechanismen hat diese Kopplung keinen Einfluss; hier werden jeweils alle Datensätze auf Versagen geprüft.

## 6.2 Fehlerbaum für Flussdeiche

Der Fehlerbaum ist nach DIN 25424-1:1981-09 definiert als die *graphische Darstellung der logischen Zusammenhänge zwischen Fehlerbaumeingängen, die zu einem vorgegebenen unerwünschten Ereignis führen*, wie sie nach der Fehlerbaumanalyse ermittelt wurde (siehe Abschnitt 6.1). Das vorgegebene TOP-Ereignis (Versagensfall) teilt sich entsprechend möglicher Versagensmechanismen in mehrere Äste (Versagensarten) auf bis hin zu den sogenannten Initialereignissen, die nicht weiter untergliedert werden. Auf diese Art und Weise lassen sich mit Fehlerbäumen komplexe Zusammenhänge sowie die Verknüpfungen der Mechanismen anschaulich grafisch darstellen.

Jeder Fehlerbaum hat genau ein TOP-Ereignis. Nach DIN 25424-1 sind die Ausfallarten direkt unterhalb des TOP-Ereignisses durch eine *ODER*-Verknüpfung miteinander verbunden. Darunter sind weitere Verknüpfungen möglich; die zugehörigen Versagensmechanismen einer Verknüpfung stehen jeweils nebeneinander.

In Bild 6.3 ist der *Fehlerbaum für Flussdeiche* dargestellt, der im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und im Folgenden erläutert wird.



**Bild 6.3:** Fehlerbaum für Flussdeiche nach DIN 25424-2, reduziert auf drei Ereignisebenen

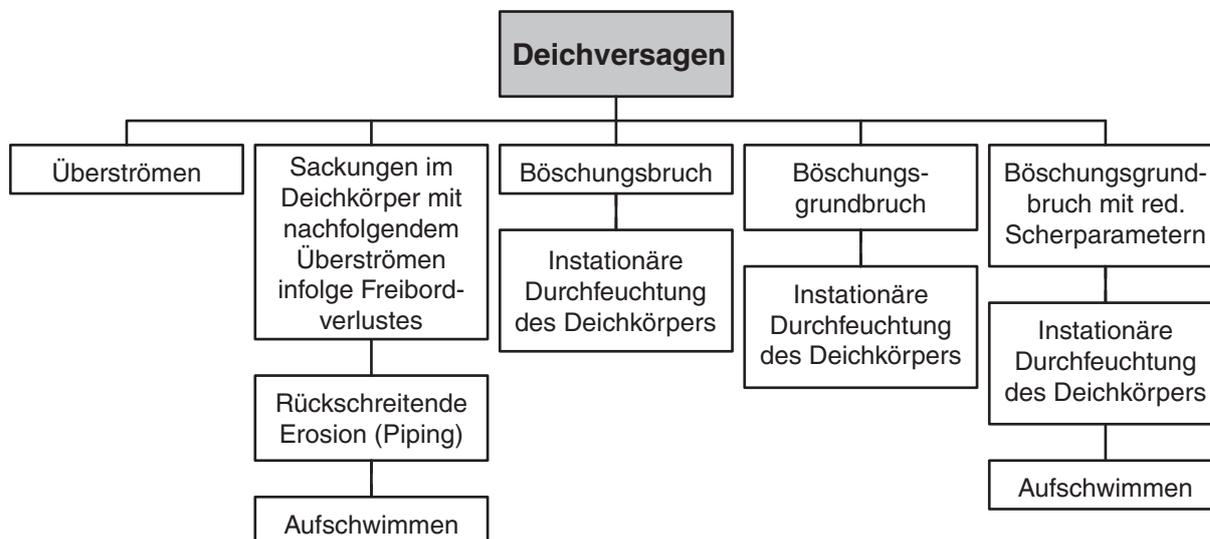
In dem in Bild 6.3 dargestellten *Fehlerbaum für Flussdeiche* werden lediglich *UND*- sowie *ODER*-Verknüpfungen verwendet. Jeder Fehlerbaum lässt sich nach DIN 25424-2 auf drei Ereignisebenen reduzieren, so dass Ebene

- 0 eine *ODER*-Verknüpfung,
- 1 nur *UND*-Verknüpfungen und
- 2 nur Initialereignisse enthält.

Der Anwendungsbereich von DIN 25424 erstreckt sich auf Systeme aller Art und beinhaltet auch die Möglichkeit, zeitliche Abhängigkeiten sowie z. B. Deichverteidigung einzubeziehen. Diese Optionen werden im *Fehlerbaum für Flussdeiche* bisher nicht genutzt. Daher erscheint die Darstellung des Fehlerbaumes nach den Vorgaben der DIN unzweckmäßig und soll im Folgenden einfacher strukturiert werden:

- Durch eine *ODER*-Verknüpfung sind die Versagensmechanismen miteinander verbunden, die eine direkte horizontale Verbindung aufweisen.
- Eine *UND*-Verknüpfung wird durch die vertikale Verbindung von untereinander angeordneten Versagensmechanismen angezeigt.

Mit diesen Vereinfachungen ergibt sich der *Fehlerbaum für Flussdeiche*, wie er in Bild 6.4 dargestellt ist.



**Bild 6.4:** Fehlerbaum für Flussdeiche

Eine ausführliche Diskussion der im *Fehlerbaum für Flussdeiche* verwendeten Versagensmechanismen sowie der zugehörigen Grenzzustandsgleichungen erfolgt in Kapitel 7.

### 6.3 Umsetzung des Fehlerbaumes im Modell

Der Algorithmus zur Berechnung des *Fehlerbaumes für Flussdeiche* wurde mit MATLAB umgesetzt. Diese Programmiersprache eignet sich besonders für die Lösung von Matrixgleichungen. Hiermit ist es möglich, in einem Rechendurchlauf die Grenzzustandsgleichungen der jeweiligen Versagensmechanismen parallel zu lösen, so dass die erforderliche große Anzahl von Rechendurchläufen (siehe Abschnitt 3.4) sehr effizient bearbeitet werden kann. Darüber hinaus bietet MATLAB umfangreiche und einfach zu bedienende Werkzeuge für die grafische Darstellung, die insbesondere während der Programmier- und Testphase zur Prüfung und Verifizierung des Codes verwendet wurden.

Der Programmcode gliedert sich in mehrere Dateien:

- Die Parameterdatei,
- das eigentliche Hauptprogramm,
- je eine Routine für jeden Versagensmechanismus sowie
- die Ergebnisdatei.

In der Parameterdatei werden alle für die Berechnung erforderlichen Parameter definiert. Jeder Parameter wird beschrieben durch

- die Bezeichnung,
- sein Formelzeichen,
- seine Maßeinheit,
- den Typ der statistischen Verteilung sowie
- den Erwartungswert mit zugehörigem Variationskoeffizienten sowie ggf. Bereichsgrenzen.

Hierbei sind die Bezeichnung, das Formelzeichen sowie die Maßeinheit vorgegeben und nicht zu verändern. Für die statistische Verteilung kann zwischen den Werten *Normalverteilung*, *Exponentialverteilung*, *Lognormalverteilung* sowie *deterministisch* (wenn der Parameter nicht variiert werden soll) ausgewählt werden. Die Angabe von Bereichsgrenzen kann die Simulation von Parameterwerten verhindern, die physikalisch nicht möglich sind und das Ergebnis verfälschen können, wie z. B. ein negativer Reibungswinkel. Ergeben sich aus der Simulation Parameterwerte, die außerhalb der definierten Bereichsgrenzen liegen, wird für diesen Parameter so häufig ein anderer Wert erzeugt, bis der Wert innerhalb der Bereichsgrenzen liegt.

Mit dem Aufrufen des Hauptprogramms werden die Werte aus der Parameterdatei sowie die Anzahl der Rechendurchläufe eingelesen. Aus den statistischen Kennwerten werden die Zufallswerte der Parameter für die Monte-Carlo-Simulation erzeugt und jeweils an die Routinen der Versagensmechanismen übergeben. Darüber hinaus werden im Hauptprogramm weitere Randbedingungen festgelegt:

- Für den Mechanismus *Rückschreitende Erosion* kann für die Berechnung zwischen dem Verfahren nach *Lane* sowie nach *Weijers & Sellmeijer* gewählt werden (siehe Abschnitt 7.4).
- Für die hydraulische Durchlässigkeit des Deichuntergrundes kann festgelegt werden, ob der Parameterwert bereits vorliegt und *direkt angegeben* wird, oder ob

der Wert aus der Korngrößenverteilung nach *Kozeny/Carman* abgeschätzt werden soll (siehe Abschnitt 8.4).

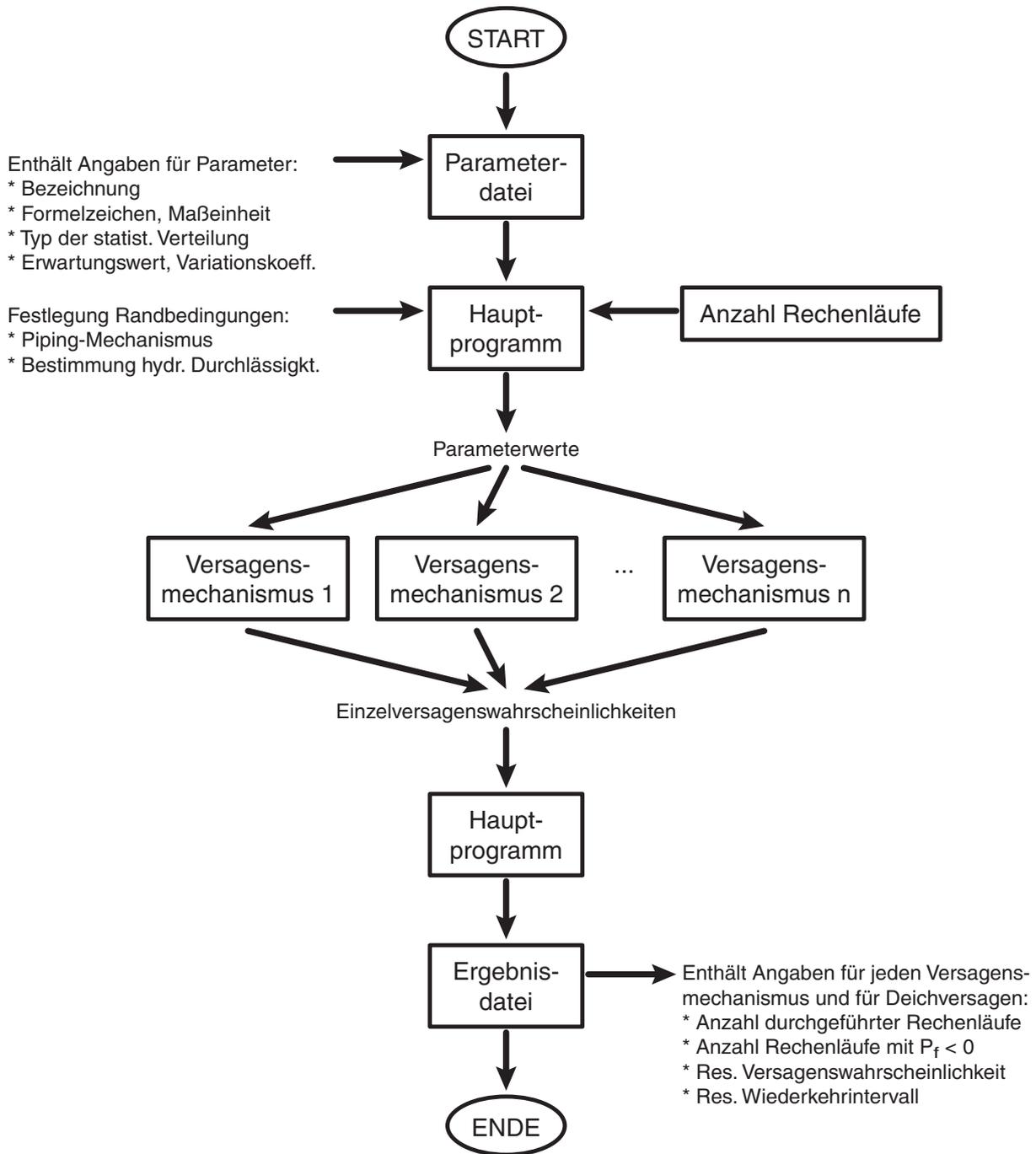
Im Hauptprogramm sind die Struktur des Fehlerbaumes sowie die Art der Verknüpfung der einzelnen Versagensmechanismen hinterlegt. Über die Zuordnung von Vorgänger sowie Nachfolger zu jedem Versagensmechanismus ist die Position innerhalb des Fehlerbaumes definiert. Durch den modularen Aufbau lassen sich hier weitere Versagensmechanismen flexibel einfügen oder umordnen, ohne dass tiefgreifendere Programmierkenntnisse erforderlich sind.

Der Algorithmus der einzelnen Versagensmechanismen ist jeweils in eine separate Datei ausgelagert. Mit den vom Hauptprogramm zur Verfügung gestellten Parametersätzen wird die Versagenswahrscheinlichkeit ermittelt und diese abschließend wieder an das Hauptprogramm übergeben.

Im Hauptprogramm wird aus den Versagenswahrscheinlichkeiten der Mechanismen die Versagenswahrscheinlichkeit für Deichversagen entsprechend den Verknüpfungen im Fehlerbaum (siehe Abschnitt 6.1) berechnet. Neben dem Deichversagen werden die einzelnen Rechenschritte abschließend in der Ergebnisdatei mit zusätzlichen Informationen ausgegeben:

- Anzahl der durchgeführten Rechendurchläufe
- Anzahl der Rechendurchläufe mit dem Ergebnis  $Z < 0$
- Resultierende Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  sowie Wiederkehrintervall

Der beschriebene Ablauf zur Bestimmung von Versagenswahrscheinlichkeiten ist in dem Programmablaufdiagramm in Bild 6.5 dargestellt.



**Bild 6.5:** Programmablaufdiagramm zur Bestimmung von Versagenswahrscheinlichkeiten für den Fehlerbaum für Flussdeiche

## 7 Versagensmechanismen

### 7.1 Hinführung und Überblick

In diesem Kapitel werden die einzelnen Versagensmechanismen, die bereits im *Fehlerbaum für Flussdeiche* (siehe Abschnitt 6.2) benannt wurden, näher erläutert und ihre Zusammenhänge herausgearbeitet. Zunächst wird hierfür die allgemeine Vorgehensweise dargestellt.

In einer Grenzzustandsgleichung werden für jeden Versagensmechanismus die *Einwirkungen*  $S$  den *Widerständen*  $R$  gegenübergestellt. In allgemeiner Form lautet die Grenzzustandsgleichung:

$$Z = R - S \quad (7.1)$$

Hierbei gibt die Größe  $Z$  darüber Auskunft, ob für den betreffenden Mechanismus der Versagensfall eintritt oder nicht. Der Versagensfall tritt für  $Z < 0$  ein, wenn die Einwirkungen größer werden als die Widerstände. Der Gleichgewichtszustand  $Z = 0$  wird auch als *Grenzzustand der Zuverlässigkeit* bezeichnet.

Aufgrund der stochastischen Verteilung der Eingangsparameter sind sowohl die Größe  $R$  als auch die Größe  $S$  Zufallsvariablen. Daher ist auch die Ergebnisgröße  $Z$  als Zufallsgröße zu verstehen.

Nachfolgend werden die Versagensmechanismen im Einzelnen ausführlich dargestellt, wobei auch die Struktur des in dieser Arbeit entwickelten Fehlerbaumes (siehe Bild 6.4) näher erläutert wird. Besonderes Augenmerk bei der Entwicklung des Fehlerbaumes wurde auf die Berücksichtigung geotechnischer Gegebenheiten gelegt. Außer den geomechanischen Kennwerten des Deichkörpers fließen Informationen über den Deichuntergrund in die Berechnung ein, um die Auswirkungen des Zusammenhangs von Deichkörper und Deichuntergrund erfassen zu können (Abschnitt 7.5).

Darüber hinaus können bei der Bestimmung von Versagenswahrscheinlichkeiten neben dem Wasserstand des Fließgewässers auch hydrologische und meteorologische

Vorereignisse über die Anpassung der Bedingungen der Feuchteverteilung im Deichkörper berücksichtigt werden (Abschnitt 7.6). Dies kann maßgebenden Einfluss auf den Verlauf unterschiedlicher Böschungsbruch- sowie Böschungsgrundbruch-Mechanismen haben, die in diesem Zusammenhang im Modell untersucht werden (Abschnitt 7.7).

## 7.2 Überströmen der Deichkrone

Das *Überströmen der Deichkrone* ist die am häufigsten beobachtete Versagensursache, wie u. a. aus einer Untersuchung zu den Ursachen von Deichbrüchen an der Elbe von HORLACHER ET AL. (2005)<sup>4</sup> hervorgeht. Dies mag der Tatsache geschuldet sein, dass sich dieser Versagensursache durch den allmählich steigenden Wasserstand lange im Voraus ankündigt und beobachten lässt. Zum anderen ist das Eintreten des Überströmens i. d. R. eindeutig und offensichtlich zu erkennen, im Gegensatz beispielsweise zu im Untergrund ablaufenden Erosionsprozessen. Sobald die ersten Wasserübertritte über die Deichkrone eintreten, kann u. U. noch genügend Zeit bleiben, um Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Solche Maßnahmen, wie beispielsweise das Aufhohen der Deichkrone mit Sandsäcken, bleiben im *Fehlerbaum für Flussdeiche* zunächst unberücksichtigt (siehe hierzu auch Abschnitt 7.8).

Steigt der Wasserstand im Fluss über das Niveau der Deichkrone, fließt Wasser über die Deichkrone sowie die landseitige Böschung. Im weiteren Verlauf sind für die Wirkung des überströmenden Wassers verschiedene Szenarien denkbar:

- Das über die Deichkrone strömende Wasser richtet keinen Schaden an, der die Standsicherheit des Deiches bedroht. Wenn das Überströmen nicht zu lange anhält und die Überströmhöhen ausreichend gering sind, kommt es günstigenfalls zu keinen oder nur geringen Schäden am Deich oder im Deichhinterland.
- Auch wenn das über die Deichkrone strömende Wasser noch keine gravierenden Schäden am Deich anrichtet, kann es bei länger anhaltendem Überströmen der Deichkrone zu Überflutungen und Schäden im Deichhinterland kommen.
- Aufgrund des überströmenden Wassers kommt es zu Erosion an der landseitigen Böschung des Deiches. Insbesondere bei länger anhaltendem Überströmen sowie

---

<sup>4</sup> HORLACHER ET AL. (2005) haben die Ursachen von Deichbrüchen an Elbe und Mulde während des Hochwassers 2002 analysiert. Der Hochwasserscheitel lag hierbei oberhalb des BHW.

größeren Überströmhöhen kann die Erosion fortschreiten und zur Breschenbildung im Deich führen. Ist die Entwicklung so weit fortgeschritten, lässt sich diese i. d. R. nicht mehr aufhalten, und es kommt zum Totalverlust des Deiches im betroffenen Bereich. NIEMEYER (2007) berichtet, dass die Breschenbreite hierbei bis zu mehrere hundert Meter betragen kann.

- Aus der Literatur sind Fälle bekannt, bei denen Deichbrüche infolge Überströmens von der Landseite zur Wasserseite stattgefunden haben, z. B. nach einem Deichbruch oberstrom [HORLACHER ET AL. 2005]. Voraussetzung für ein solches Szenario ist in jedem Fall ein vorangegangener Deichbruch im gleichen Polder, weshalb der Fall Überströmen von der Landseite zur Wasserseite im Fehlerbaum für Flussdeiche nicht berücksichtigt wird.

Maßgebende Parameter zur Beschreibung des Erosionsvorganges haben u. a. FÄH (1997) sowie KAST & BIEBERSTEIN (1997) zusammengetragen. Einen Ansatz zur Beschreibung des Erosionsvorganges der landseitigen Böschung – insbesondere bei Seedeichen – und der nachfolgenden Entwicklung der Breschenbildung liefern OUMERACI ET AL. (1999). Darüber hinaus wird in der Literatur zwischen verschiedenen Phasen der Breschenbildung unterschieden. TINNEY & HSU (1961) berichten von zwei Phasen, CHINNARASRI ET AL. (2003) benennen vier Phasen und VISSER (1998) sowie MORRIS (2005) unterscheiden fünf Phasen beim Vorgang der Breschenbildung. Bei allen Beschreibungen gleicht sich der Ablauf der ersten Phase: Die Bildung und Aufweitung einer initialen Erosionsrinne durch überströmendes Wasser. PICKERT ET AL. (2011) konnten bei eigenen Untersuchungen zum Vorgang der Breschenbildung an kohäsionslosem Material zeigen, dass der weitere Fortschritt der Breschenbildung u. a. von der Feuchteverteilung im Deichkörper beeinflusst werden kann. Es existiert jedoch kein umfassendes Modell, mit dem sich die Breschenentwicklung zuverlässig bestimmen lässt.

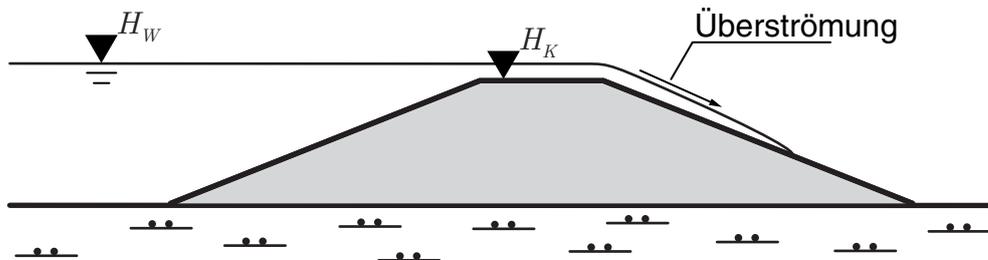
Für die Versagensursache *Überströmen der Deichkrone* wird im *Fehlerbaum für Flussdeiche* daher lediglich betrachtet, ob es infolge des Wasserstandes zu einem Überströmvorgang des Deiches kommen kann. Für den weiteren Verlauf wird dann angenommen, dass sich infolge des Überströmens der Deichkrone eine initiale Erosionsrinne ausbildet, die zum Ausgangspunkt für den weiteren Vorgang der Breschenbildung wird. Hierfür wird der Wasserstand im Fluss mit der Deichkronenhöhe verglichen. Diesem Versagensmechanismus liegt die vereinfachende Annahme zugrunde, dass ein höherer Flusswasserstand  $H_W$  als die Deichkrone  $H_K$  sofort zum Versagen des Deiches führt, was so z. B. bei CUR (1990) und TAW (2000) angewendet wird. Die zugehörige Grenzzustandsgleichung lautet dann:

$$Z = H_K - H_W \quad (7.2)$$

Hierin bedeuten (vgl. hierzu Bild 7.1):

$H_K$  = Kronenhöhe des Deiches [mNN]

$H_W$  = Wasserstandshöhe auf der Wasserseite [mNN]



**Bild 7.1:** Definitionsskizze zur Versagensursache *Überströmen der Deichkrone*

### 7.3 Verlust der Sicherheit gegen Aufschwimmen

Zum überwiegenden Teil der Fälle werden in Flusstälern die stärker durchlässigen Sedimente von einer gering durchlässigen Deckschicht überlagert. Im Hochwasserfall ist davon auszugehen, dass die durchlässigen Sedimentschichten mit dem Fluss hydraulisch verbunden sind, z. B. aufgrund von Fehlstellen in der gering durchlässigen Deckschicht im Deichvorland oder aufgrund des hydraulischen Anschlusses des Aquifers an Vorfluter. Daher wirkt ein erhöhter Porenwasserdruck im Deichhinterland an der Untergrenze der gering durchlässigen Deckschicht. Der *Verlust der Sicherheit gegen Aufschwimmen*<sup>5</sup> tritt ein, sobald die hydrostatische Wasserdruckkraft größer wird als das Eigengewicht der gering durchlässigen Bodenschicht. Aufgrund der nach oben gerichteten Auftriebskraft wird der Boden der gering durchlässigen Deckschicht quasi „gewichtlos“. Als kritischste Stelle wird hierfür der landseitige Deichfußpunkt betrachtet. Falls Schwachstellen (mit geringerer Mächtigkeit) der gering durchlässigen Deckschicht im Deichhinterland bekannt sind, sollte an solchen Stellen zusätzlich die Sicherheitsbetrachtung durchgeführt werden.

<sup>5</sup> Seit DIN 1054:2003-01 wird der Standsicherheitsnachweis als *Nachweis der Sicherheit gegen Aufschwimmen* bezeichnet. Diese Nomenklatur wird im Eurocode 7 (DIN EN 1997-1:2009-09) mit dem Nationalen Anhang DIN EN 1997-1/NA:2010-12 sowie den ergänzenden Regelungen DIN 1054:2010-12 fortgeführt. In DIN 19712:1997-11 wird der Nachweis als *Nachweis der Auftriebssicherheit* bezeichnet. Diese Bezeichnung wird auch in der überarbeiteten DIN 19712:2013-01 verwendet.

Als einwirkende Größe ist die Auftriebskraft an der Untergrenze der gering durchlässigen Deckschicht anzusetzen. KÄRCHER ET AL. (1997) haben umfangreiche Messreihen über einen Zeitraum von 15 Jahren an unterschiedlichen Standorten von Deichen des nördlichen Oberrheins durchgeführt. Sie berichten über horizontale Druckgradienten von 0,3 % bis 7 %, was einem Druckabbau von 0,3 m bis 7 m Wassersäule auf eine Länge von 100 m Sickerstrecke entspricht. Nach DWA (2011) darf zur Bestimmung der hydrostatischen Wasserdruckkraft ein Abbau des hydraulischen Potentials von etwa 0,3 m auf 100 m Sickerstrecke angesetzt werden. Für die Länge des Sickerweges ist zumindest die Breite des Deichauflagers in Ansatz zu bringen. Bei genauerer Kenntnis über den Zustand des Deichvorlandes bzw. des Deichhinterlandes kann der Sickerweg entsprechend verlängert werden.

Als Widerstand wird die Gewichtskraft der feuchten, gering durchlässigen Deckschicht in Ansatz gebracht. Die hieraus resultierende Grenzzustandsgleichung lautet in Anlehnung an DWA (2011):

$$Z = \gamma_{Ds} \cdot d_{Ds} - \gamma_W \cdot \left( H_W - p_{red} \cdot \frac{l_s}{100} - (GOK_{Land} - d_{Ds}) \right) \quad (7.3)$$

mit:

$\gamma_{Ds}$  = Feuchtwichte der gering durchlässigen Deckschicht [kN/m<sup>3</sup>]

$d_{Ds}$  = Mächtigkeit der gering durchlässigen Deckschicht [m]

$\gamma_W$  = Wichte von Wasser [kN/m<sup>3</sup>]

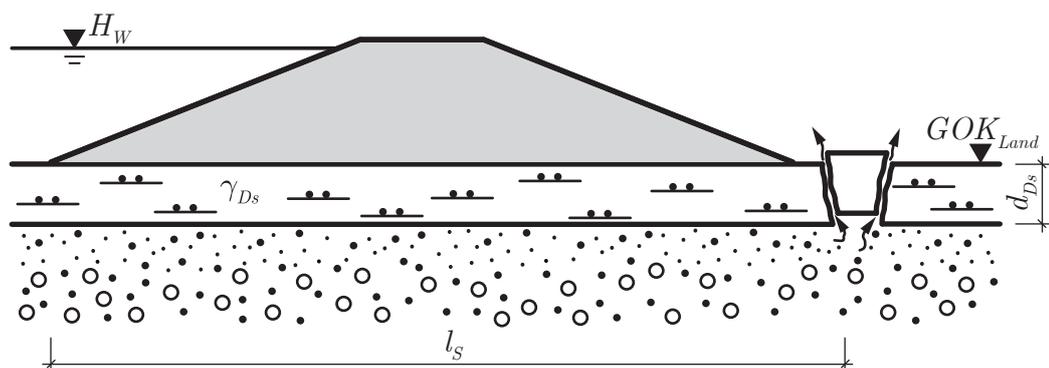
$H_W$  = Wasserstandshöhe auf der Wasserseite [mNN]

$p_{red}$  = Druckabbau [m/100m]

$l_s$  = Sickerweglänge aus Deichlagerbreite und ggf. Vorlandbreite [m]

$GOK_{Land}$  = Geländeoberkante des landseitigen Deichfußes [mNN]

Die Verwendung der einzelnen Parameter wird in der folgenden Prinzipskizze in Bild 7.2 verdeutlicht.



**Bild 7.2:** Prinzipskizze zum Verlust der Sicherheit gegen Aufschwimmen

Die Annahme der Feuchtwichte  $\gamma_{Ds}$  für die gering durchlässige Deckschicht liegt gegenüber der Sättigungswichte auf der sicheren Seite. Diese Annahme ist damit zu rechtfertigen, dass für die Deckschicht aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeit selbst bei lang anhaltendem Einstau nicht mit einer Aufsättigung zu rechnen ist. Ebenso können ausgedehnte Niederschlagsereignisse, die womöglich mit einem lang anhaltenden Einstau einhergehen, den Vorgang der Durchfeuchtung unter Umständen beschleunigen, führen jedoch voraussichtlich nicht zur Aufsättigung, die die Verwendung der Sättigungswichte rechtfertigen würde.

Im Falle des *Verlustes der Sicherheit gegen Aufschwimmen* kommt es zu einem Anheben der Bodenschicht, und es bilden sich infolgedessen Risse in der Deckschicht. Entlang dieser Wasserwegigkeiten kann sich der hydraulische Überdruck entspannen, was durch austretendes Wasser im Deichhinterland beobachtet werden kann.

In der alten DIN 1054:2005-01 war für alle Bodenarten bei einer vertikalen Durchströmung von unten nach oben sowohl der Nachweis gegen Aufschwimmen als auch gegen hydraulischen Grundbruch gefordert. Bei Flussdeichen betrifft das den Fall, wenn keine gering durchlässige Deckschicht mit ausreichend geringer hydraulischer Durchlässigkeit vorhanden ist und der Potentialabbau im Untergrund stattfindet. Hier ist die Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch nach EAU (2004) sinngemäß nachzuweisen. Entsprechend den aktuellen Baugrund-Normen DIN 1054:2010-12 sowie DIN EN 1997-1:2009-09 mit DIN EN 1997-1/NA:2010-12 ist der Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch nicht mehr erforderlich, wenn bei homogenen, gering durchlässigen Bodenschichten ein Austrag von einzelnen Bodenpartikeln durch eine ausreichend hohe Kohäsion verhindert wird [SCHUPPENER 2010].

In dem hier entwickelten Modell wird von dem Vorhandensein einer gering durchlässigen Deckschicht ausgegangen und der Mechanismus des hydraulischen Grundbruches daher nicht untersucht. Weitergehende Ausführungen hierzu finden sich im Abschnitt 9.4.4.

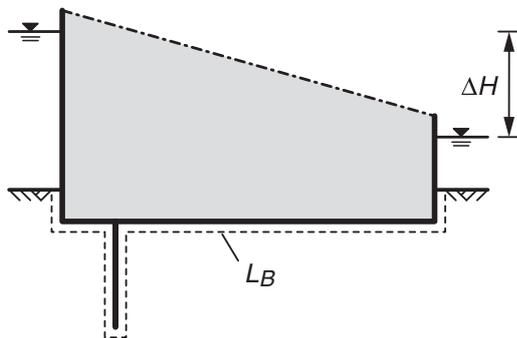
## 7.4 Rückschreitende Erosion (Piping)

Beim *Verlust der Sicherheit gegen Aufschwimmen* (vgl. Abschnitt 7.3) entstehen in der gering durchlässigen Deckschicht Wasserwegigkeiten. Aufgrund des hydraulischen Gefälles zwischen der eingestauten Wasserseite des Deiches und der Landseite strömt

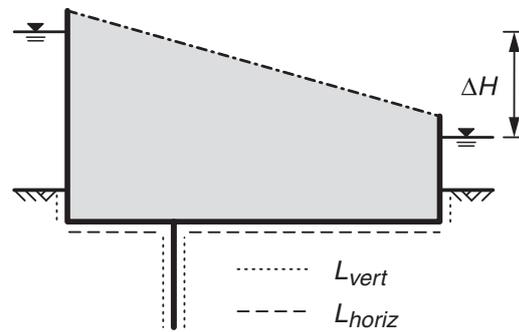
Wasser durch die gering durchlässige Deckschicht und tritt auf der Landseite des Deiches aus. Das durch die Risse strömende Wasser kann zunächst in der Deckschicht feines Material erodieren, so dass der Durchflussquerschnitt vergrößert wird. Die Erosion im Boden kann sich fortsetzen und Material aus den stärker durchlässigen Sedimenten austragen, so dass womöglich eine Röhre unterhalb der gering durchlässigen Deckschicht entsteht. Der Prozess der Röhrenbildung wird als *Rückschreitende Erosion* bezeichnet, aus der internationalen Literatur ist hierfür auch im Deutschen der Begriff *Piping* gebräuchlich. Kann sich der röhrenförmige Erosionskanal bis zur Wasserseite fortsetzen, kommt es zu einem hydraulischen Kurzschluss und es stellt sich eine freie Durchströmung mit großem Erosionspotential ein. Der Abschluss dieses gesamten Prozesses wird als *Erosionsgrundbruch* bezeichnet.

Verringert sich das hydraulische Potential bevor es zum Erosionsgrundbruch kommt, kann der Erosionsvorgang zum Erliegen kommen. Eine Verringerung des hydraulischen Potentials kann auf der Wasserseite z. B. durch einen fallenden Hochwasserstand verursacht werden, oder auf der Landseite z. B. durch den Bau von Quellkaden (Umwallung) als Maßnahme der Deichverteidigung (siehe hierzu auch Abschnitt 7.8). Hierbei wird nach Entdecken des Wasseraustritts mit Materialaustrag mittels Umschließung der Austritts-Stelle mit Sandsäcken versucht, durch den Aufstau des Wassers den hydraulischen Gradienten zu verringern (siehe Bild 7.16 in Abschnitt 7.8). Bei einer wiederholten hydraulischen Belastung kann der zu einem früheren Zeitpunkt gestoppte Erosionsvorgang reaktiviert werden, und Schwächezonen können sich fortentwickeln.

Zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts stellten *Bligh (1910)* sowie *Lane (1934)* eine Methode vor, um die Gefahr der konzentrierten Unterströmung eines Bauwerkes zu bestimmen, beschrieben u. a. in DAVIDENKOFF (1970). Aufgrund von Untersuchungen bzw. Analysen an zerstörten sowie an nicht zerstörten Sperrbauwerken geben beide jeweils einen Sickerwegquotienten in Abhängigkeit des durchsickerten Erdstoffes an, um diesen – multipliziert mit der Sickerweglänge – mit dem vorhandenen hydraulischen Potential zu vergleichen. *Lane* griff den Vorschlag von *Bligh* auf und erweiterte ihn um den Gedanken, dass je nach Richtung der Sickerströmung im Untergrund die mehr als  $45^\circ$  zur Horizontalen geneigten Strecken dreifach so wirksam sind wie die horizontalen. Die Vorgehensweise von *Bligh* sowie *Lane* und die von ihnen ermittelten Quotienten sind in Bild 7.3 zusammengefasst:

Vorgehensweise nach *Bligh*

$$L_B = c_B \cdot \Delta H \quad (7.4)$$

Vorgehensweise nach *Lane*

$$L_L = L_{vert} + \frac{L_{horiz}}{3} \geq c_L \cdot \Delta H \quad (7.5)$$

<i>Bodenart (Bligh)</i>	$c_B$ [-]
Feiner Schlick	18
Feiner schlickartiger Sand	15
Grober Sand	12
Mischungen von Sand, Kies und Geröll	9 – 5

<i>Bodenart (Lane)</i>	$c_L$ [-]
Sehr feiner Sand oder Schlick	8,5
Feiner Sand	7,0
Mittelsand	6,0
Grobsand	5,0
Feiner Kies	4,0
Mittelkies	3,5
Grobkies mit Steinen	3,0
Geröll mit Kies und Steinen	2,5
Ton weich	3,0
Ton mittelweich	2,0
Ton hart	1,8
Ton sehr hart	1,6

**Bild 7.3:** Nachweis zur Unterspülung nach den Vorgehensweisen von *Bligh* (linke Seite) sowie *Lane* (rechte Seite), Prinzipskizzen nach SAUCKE (2004)

Diese Vorgehensweise, insbesondere diejenige von *Lane*, der die Richtung der Sickerströmung berücksichtigt, eignet sich für eine Abschätzung der Erosionsgefahr im Deichlager. Hierbei werden die Breite des Deichlagers sowie die Vorlandbreite zur Sickerweglänge addiert. Zunächst werden lediglich horizontale Anteile der Sickerweglänge betrachtet. Die Grenzzustandsgleichung für das Verfahren nach *Lane* wird abgeleitet aus Gleichung (7.5) und lautet:

$$Z = \frac{1}{3}l_S - c_{Lane} \cdot (H_W - H_L) \quad (7.6)$$

Hierin bedeuten:

- $l_S$  = Sickerweglänge aus Deichlagerbreite und ggf. Vorlandbreite [m]
- $c_{Lane}$  = Koeffizient nach Lane (siehe Bild 7.3)
- $H_W$  = Wasserstandshöhe auf der Wasserseite [mNN]
- $H_L$  = Wasserstand auf der Landseite (entspricht nach dem Versagen der Sicherheit gegen Aufschwimmen i. d. R. der Geländeoberfläche)

Die Eigenschaften des erosionsgefährdeten Bodens werden bei den Verfahren von *Bligh* und *Lane* jeweils nur sehr grob mittels eines Beiwertes abgebildet. Daher suchte SELLMETJER (1988) ein mathematisches Modell, um die Stabilität des Bodens gegen Erosion eingehender zu berücksichtigen. MÜLLER-KIRCHENBAUER (1978) hatte zuvor beobachtet, dass die Entwicklung der Erosionsröhre maßgeblich durch die Potentialdifferenz gesteuert wird. Mit einer schrittweisen Erhöhung der Potentialdifferenz kommt es zu einem Fortschreiten der Erosionsröhren. Der Erosionsvorgang kann sich jedoch wieder beruhigen, wenn die Potentialdifferenz nicht weiter steigt. Erst ab einer bestimmten Potentialdifferenz lässt sich das Fortschreiten der Erosion im Untergrund nicht weiter aufhalten.

SELLMEIJER (1988) formulierte auf Grundlage umfangreicher Labor- und großmaßstäblicher Feldversuche eine mathematische Beschreibung für die Länge der Erosionsröhre in Abhängigkeit der Potentialdifferenz. In seiner mathematischen Beschreibung berücksichtigte SELLMETJER (1988)

- die Sickerströmung zur Erosionsröhre,
- die Strömung in der Erosionsröhre sowie
- die Stabilität des Erdstoffes gegen Erosion.

WEIJERS & SELLMETJER (1993) leiteten hieraus eine kritische Potentialdifferenz  $h_{krit,WS}$  ab, bei der sich die Erosionsröhre bis zur Wasserseite fortsetzt und es infolgedessen zu einem Erosionsgrundbruch kommt. Wird die kritische Potentialdifferenz nicht erreicht, kann der Erosionsvorgang während eines Hochwasserereignisses auch wieder zum Erliegen kommen, wie großmaßstäbliche Versuche von WEIJERS & SELLMETJER (1993) zeigen. Bei einem späteren Hochwasserereignis kann sich der Erosionsprozess dann fortsetzen.

Das Modell von *Weijers & Sellmeijer* setzt genauere Kenntnisse über den Deichuntergrund voraus. Unterhalb der gering durchlässigen Deckschicht wird eine

durchlässigere Schicht von Fein- bis Mittelsanden angenommen, aus der Material ausgetragen werden kann. Für zunehmend größeres Material ergab sich eine zunehmend geringere Übereinstimmung des Modells mit den o. g. Versuchen, so dass die rechnerisch ermittelte Potentialdifferenz auf der unsicheren Seite liegt und folglich die Widerstandsseite in der zugehörigen Grenzzustandsgleichung (7.7) überschätzt wird.

Die erforderlichen umfangreichen Informationen über den Deichuntergrund können den Einsatz des Modells von *Weijers & Sellmeijer* erschweren. Im Eintretensfall der Rückschreitenden Erosion, die häufig an der Bildung der charakteristischen Auswurftrichter zu erkennen ist, kann mit einfachen Mitteln eine Materialprobe des erosionsgefährdeten Bodens gewonnen werden, indem das Material des Auswurftrichters beprobt wird.

Die Grenzzustandsgleichung für das Verfahren nach *Weijers & Sellmeijer* lautet (vgl. hierzu auch Bild 7.4):

$$Z = h_{krit,WS} - \Delta H \quad (7.7)$$

mit:

$$h_{krit,WS} = \alpha_S \cdot c_S \cdot \frac{\rho'_S}{\rho_W} \cdot \tan(\theta) \cdot [0,68 - 0,1 \cdot \ln(c_S)] \cdot l_S \quad (7.8)$$

$$\alpha_S = \left( \frac{h_A}{l_S} \right) \left( \frac{h_A}{l_S} \right)^{0,28} - 1 \quad (7.9)$$

$$c_S = \eta \cdot d70 \left( \frac{1}{\kappa \cdot l_S} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7.10)$$

$$\kappa = \frac{\nu}{g} \cdot k_f \quad (7.11)$$

$$\Delta H = H_W - H_L \quad (7.12)$$

Hierin bedeuten:

$h_A$  = Mächtigkeit des Aquifers [m]

$l_S$  = Sickerweglänge aus Deichaufstandsstrecke und ggf. Vorlandbreite [m]

$\rho'_S$  = Korndichte unter Auftrieb ( $\approx 1650$ ) [kg/m<sup>3</sup>]

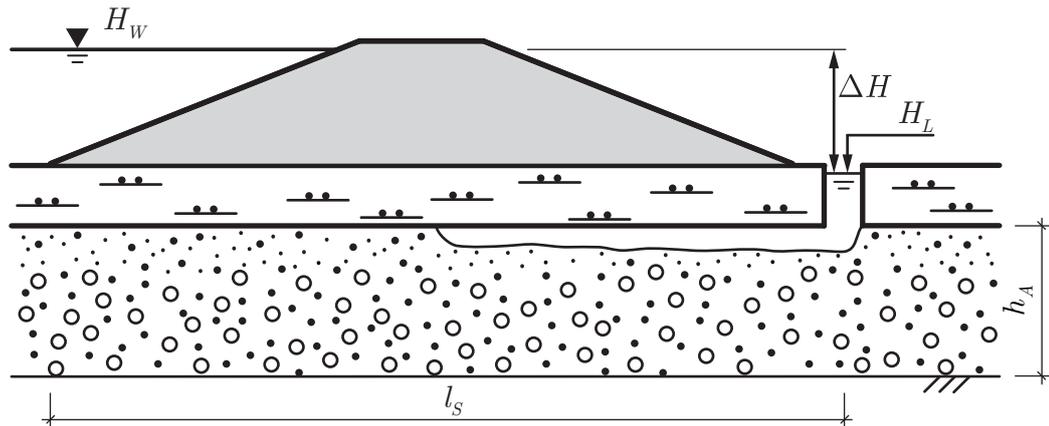
$\rho_W$  = Dichte von Wasser [kg/m<sup>3</sup>]

$\kappa$  = Spezifische Permeabilität des Aquifers [m<sup>2</sup>]

$\nu$  = Kinematische Viskosität von Wasser ( $\approx 1,31 \cdot 10^{-6}$  bei 10 ° C) [m<sup>2</sup>/s]

- $k_f$  = Hydraulische Durchlässigkeit des Aquifers [m/s]  
 $\theta$  = Rollwiderstandswinkel der Sandkörner im Aquifer ( $\approx 41$ ) [°]  
 $\eta$  = Schleppkraftkoeffizient ( $\approx 0,25$ ) [-]  
 $d_{70}$  = Korndurchmesser bei 70% Massenanteil der Korngrößenverteilung [mm]

Die Bedeutung der geometrischen Parameter geht aus der Prinzipskizze in Bild 7.4 hervor.



**Bild 7.4:** Prinzipskizze zum Versagensmechanismus *Rückschreitende Erosion (Piping)*

Eine übersichtliche Zusammenstellung verschiedener Formen von Erosion und zugehöriger Kriterien zum Nachweis der Sicherheit gegen innere Erosion findet sich bei SAUCKE (2004).

Im *Fehlerbaum für Flussdeiche* sind die beiden Verfahren nach Lane sowie nach Weijers & Sellmeijer implementiert. Bei Vorliegen von ausreichenden Informationen über den Deichuntergrund ist das Verfahren nach Weijers & Sellmeijer zu empfehlen. Ein Vergleich der beiden Berechnungsmethoden nach Lane sowie nach Weijers & Sellmeijer und die Auswirkungen auf die Versagenswahrscheinlichkeit werden in Abschnitt 8.4.3 beschrieben.

## 7.5 Sackungen im Deichkörper

### 7.5.1 Herleitung und Definition des Sackungsfaktors

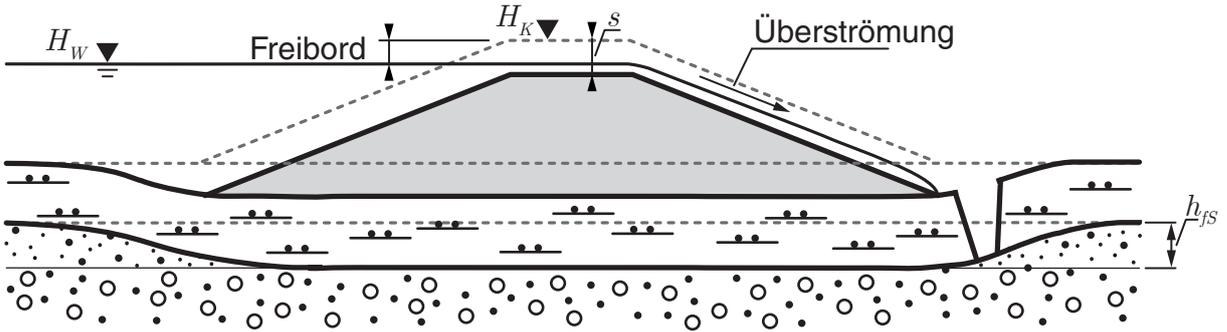
Mit dem Eintreten des in Abschnitt 7.4 beschriebenen Erosionsgrundbruches, der mit der Ausbildung einer durchgehenden Röhre von der Wasserseite zur Landseite (hydraulischer Kurzschluss) unterhalb der gering durchlässigen Deckschicht einher-

geht, ist mit großen Strömungsgeschwindigkeiten in der Erosionsröhre zu rechnen. Das durch die Röhre strömende Wasser kann aufgrund des hohen Erosionspotentials die Röhre rasch erweitern, was durch erheblichen Materialaustrag am landseitigen Austrittspunkt erkennbar wird. Mit zunehmender Aufweitung der Erosionsröhre ist damit zu rechnen, dass von den begrenzenden Rändern der Röhre Material nachbricht, das dann ebenso ausgetragen werden kann. Es ist davon auszugehen, dass die Erosionsröhre in diesem Zustand lediglich eine temporäre Standfestigkeit besitzt, die abhängig ist von der Gewölbetragswirkung des umgebenden Bodens sowie von der Erosionswirkung des durchströmenden Wassers.

Die oberhalb der Erosionsröhre liegende gering durchlässige Deckschicht kann aufgrund ihrer Kohäsion die Ausbildung größerer Erosionshöhlräume begünstigen [FOSTER & FELL 1999]. PERZLMAIER & HASELSTEINER (2006) gehen sogar davon aus, dass die Erosionsröhre „mit großer Wahrscheinlichkeit standfest“ ist und sich daher unterhalb der gering durchlässigen Deckschicht ausbilden und vergrößern kann. Kommt es schließlich zum Kollaps der Erosionsröhre, wird sich dieser Versturz im Deichkörper fortsetzen und kann an der Oberfläche zu Sackungen führen [ZESCH ET AL., 2007a]. Im Bereich der Deichkrone auftretende Sackungen können durch die Verringerung der Kronenhöhe zu einem Überströmen des Deiches führen, was im Sinne der Untersuchung zur Versagenswahrscheinlichkeit, wie in Abschnitt 7.2 erläutert, mit dem Versagen des Deiches gleichzusetzen ist.

Der Materialentzug im Untergrund sowie das Zusammenbrechen der Röhre können sich auch über mehrere Hochwasserperioden hinziehen [MÜLLER-KIRCHENBAUER 1978], bis die Verformungen des Deichuntergrundes im Deichkörper sichtbar werden. Schließlich resultieren hieraus *Sackungen des Deichkörpers*, die insbesondere im Bereich der Deichkrone auffallen.

Sackt im Hochwasserfall der Deichkörper im Bereich der Deichkrone um einen größeren Betrag als das vorhandene Freibordmaß, ist die Folge ein Überströmen der Deichkrone sowie der landseitigen Böschung, wie schematisch in Bild 7.5 dargestellt. Die Überströmung des Deichkörpers führt im *Fehlerbaum für Flussdeiche* zum Versagen des Deiches.



**Bild 7.5:** Prinzipiskizze zum Versagensmechanismus *Sackungen im Deichkörper*

Aus dieser Überlegung folgt die Grenzzustandsgleichung für den Mechanismus *Sackungen im Deichkörper*:

$$Z = (H_K - h_{fs} \cdot \zeta) - H_W \quad (7.13)$$

Hierin bedeuten:

$H_K$  = Kronenhöhe des Deiches [mNN]

$h_{fs}$  = Mächtigkeit der Feinsandschicht [m]

$\zeta$  = Sackungsfaktor [-]

$H_W$  = Wasserspiegellhöhe vor dem Deich [mNN]

Die Form der Erosionsröhre und insbesondere ihr Querschnitt sind nicht bekannt. Es ist naheliegend, dass zumindest die unterhalb der gering durchlässigen Deckschicht liegende Schicht feiner Sedimente (sog. Feinsandschicht) zum Zeitpunkt des Zusammenbruches der Erosionsröhre vollständig ausgeräumt ist. Für das Maß der Sackung  $s$ , die an der Deichkrone ankommt, wird daher ein Sackungsfaktor  $\zeta$  eingeführt, der sich auf die Mächtigkeit der Feinsandschicht  $h_{fs}$  unterhalb der gering durchlässigen Deckschicht bezieht:

$$\zeta := \frac{s}{h_{fs}} \quad (7.14)$$

Neben dem Volumen des erodierten Materials hat die Form des Sackungstrichters Einfluss auf die Größe des Sackungsfaktors. Insbesondere aus dem Tunnelbau sind hierzu zahlreiche Überlegungen bekannt, wie die Größe der Sackung an der Geländeoberfläche (entspricht hier der Deichkrone) beim Auffahren eines Hohlraumes bzw. bei dessen Verbrauch abgeschätzt werden kann. Eine Zusammenstellung verschiedener Verfahren zur Abschätzung von Sackungen findet sich u. a. bei SZÉCHY (1969).

### 7.5.2 Übertragung des Mechanismus Sackungen im Deichkörper auf das Modell

Der Anwendung des Sackungsfaktors in dem hier beschriebenen Modell liegen die folgenden geometrischen sowie geotechnischen Annahmen zugrunde:

- Es wird angenommen, dass das Material der Feinsandschicht  $h_{fs}$  innerhalb des Pipes vollständig erodiert wird.
- Der Einfachheit halber wird zunächst eine Erosionsröhre mit rechteckigem Querschnitt zugrunde gelegt, die Ergebnisse sind jedoch auf beliebige andere Querschnittsformen übertragbar.
- Als Randbedingung zur Bestimmung des Sackungsbetrages  $s$  an der Deichkrone wird Volumentreue des Erosionshohlraumes sowie der Sackungsmulde angenommen.
- Eine Auflockerung infolge der Sackung bzw. eine weitergehende Erosion des nachsackenden Materials wird zunächst nicht berücksichtigt, kann jedoch über Zu- bzw. Abschläge beim Sackungsfaktor einbezogen werden.

Für den einfachen Fall der senkrechten Bruchfuge ergibt sich dann der Sackungsfaktor zu  $\zeta = 1$ , siehe hierzu die schematische Darstellung in Bild 7.6 a). In diesem Fall entspricht das Maß der Sackung der Deichkrone gleich der Mächtigkeit der Feinsandschicht unterhalb der gering durchlässigen Deckschicht. Die Berücksichtigung der Auflockerung führt beim Bruchbild mit senkrechten Bruchfugen zu einem Sackungsfaktor  $\zeta < 1$ , wohingegen sich bei weiterer Erosion von nachsackendem Material bzw. von an die Feinsandschicht angrenzendem Boden ein Sackungsfaktor  $\zeta > 1$  einstellen kann. Der Sackungsfaktor ist hierbei unabhängig von der Form der Erosionsröhre.

Auf den Überlegungen für senkrechte Bruchfugen aufbauend wird der Einfluss geneigter Bruchfugen wie in Bild 7.6 b) aufgezeigt. Hierbei zeigt sich die Abhängigkeit des Sackungsfaktors von der Größe des Erosionshohlraumes sowie der Überlagerungshöhe  $h_{\bar{v}b}$ , die sich hier aus der Mächtigkeit der gering durchlässigen Deckschicht sowie der Deichhöhe zusammensetzt. Darüber hinaus hat der Winkel, unter dem die Bruchfugen geneigt sind, Einfluss auf die Größe der Sackungsmulde. Im Beispiel in Bild 7.6 b) wurde der Erddruckwinkel für den aktiven Erddruck angesetzt. Hieraus ergibt sich eine indirekte Abhängigkeit des Sackungsfaktors  $\zeta$  vom Reibungswinkel des überlagernden Materials:

$$\zeta = \frac{b_{Pipe}}{b_{Pipe} + 2 \cdot (h_{\ddot{u}b} + h_{fs}) \cdot \tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (7.15)$$

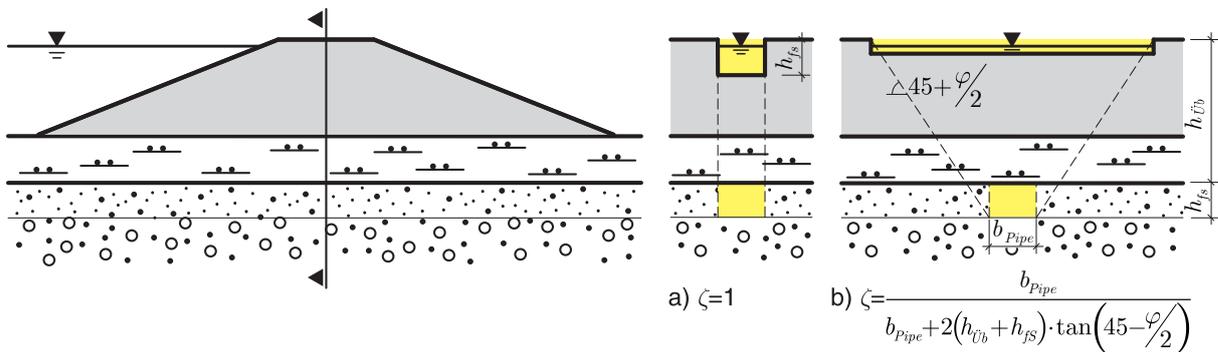
Hierin bedeuten:

$b_{Pipe}$  = Breite der Erosionsröhre (Pipe) [m]

$h_{\ddot{u}b}$  = Überlagerungshöhe (Mächtigkeit der Deckschicht + Deichhöhe) [m]

$h_{fs}$  = Mächtigkeit der Feinsandschicht [m]

$\varphi$  = Reibungswinkel des Überlagerungsmaterials [°]



**Bild 7.6:** Einfluss der Form des Sackungstrichters auf den Sackungsfaktor bei flächentreuer Verformung im Schnitt (gelb markiert): **a)** senkrechte Bruchfugen, **b)** unter dem Erddruckwinkel<sup>6</sup> geneigte Bruchfuge (schematisch)

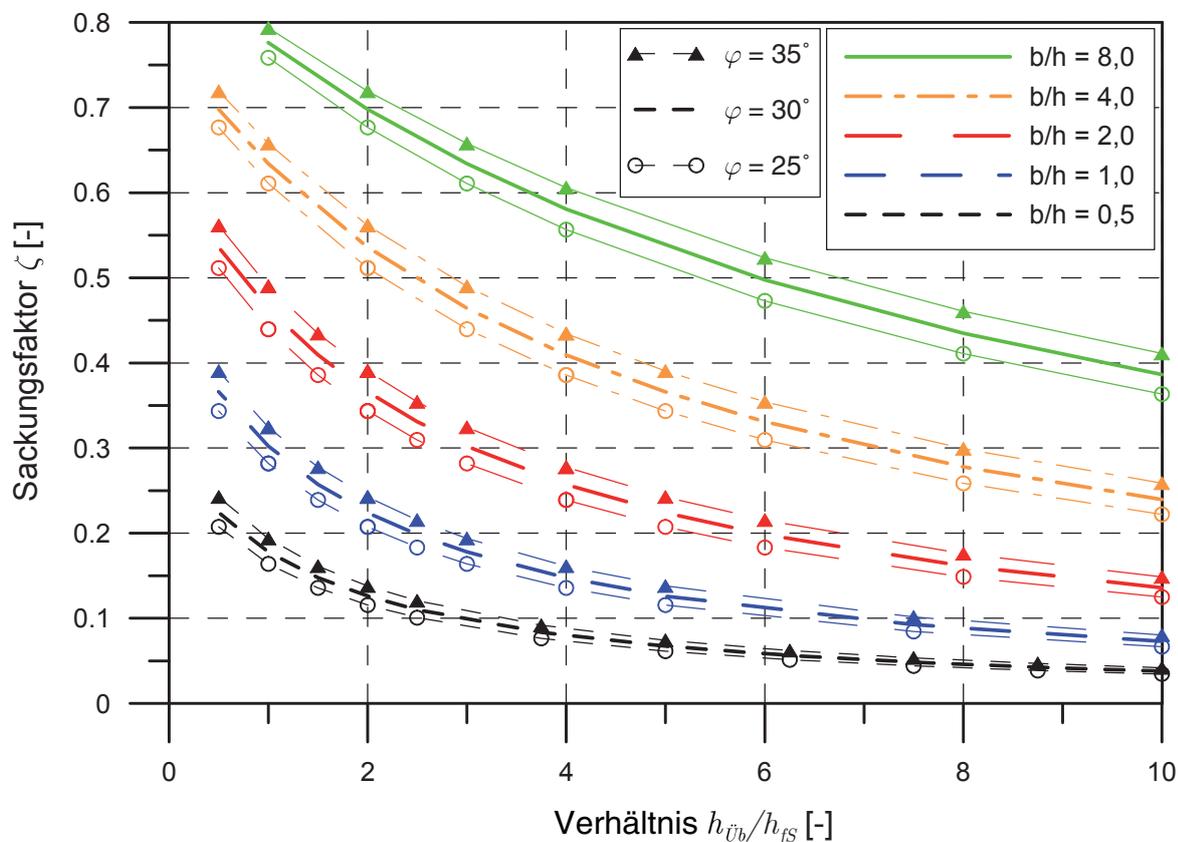
Im Diagramm in Bild 7.7 ist die Abhängigkeit des Sackungsfaktors  $\zeta$  für den Fall der geneigten Bruchfuge aus Bild 7.6 b) dargestellt. Für den überlagernden Boden wurden Reibungswinkel im Bereich von  $\varphi = 25...30...35^\circ$  angenommen. Hierfür ist auf der Abszisse das Verhältnis der Mächtigkeit des überlagernden Bodens  $h_{\ddot{u}b}$  zur Mächtigkeit der erodierten Feinsandschicht  $h_{fs}$  aufgetragen. Bei sonst gleichen Randbedingungen nimmt der Betrag der Sackung an der Deichkrone mit zunehmender Überlagerung ab, weil sich bei größerer Überlagerung der verstürzte Hohlraum auf eine größere Sackungsmulde verteilt.

Die verschiedenfarbigen Kurven im Diagramm in Bild 7.7 verdeutlichen den Einfluss der Form des Erosionshohlraumes auf den Sackungsfaktor. Bei ansonsten gleichen Randbedingungen hat ein flacherer Erosionshohlraum einen größeren Sackungsfaktor zur Folge als ein schmaler, höherer Hohlraum. Dieser zunächst nicht offensichtliche

<sup>6</sup> Nur der übersichtlicheren Darstellung wegen wurde für den Reibungswinkel der gering durchlässigen Deckschicht sowie für den Reibungswinkel des Deichmaterials der gleiche Wert angenommen.

Zusammenhang lässt sich darauf zurückführen, dass sich der Sackungsfaktor auf die Höhe des Erosionshohlraumes bezieht und hier nicht die absolute Sackung dargestellt wird. Bei einem größeren und flacheren Hohlraum sind demnach die Sackungen an der Deichkrone bezogen auf die Höhe des Erosionshohlraumes größer als bei gedrungenen Hohlraumformen.

Dartüber hinaus ist im Diagramm in Bild 7.7 der Einfluss des Reibungswinkels des überlagernden Bodens dargestellt. Die Kurvenschar deckt jeweils den Bereich des Reibungswinkels von  $\varphi = 25^\circ$  bis  $\varphi = 35^\circ$  ab. Im Vergleich zum Querschnitt der Erosionsröhre ist der Einfluss des Reibungswinkels des überlagernden Bodens gering.



**Bild 7.7:** Abhängigkeit des Sackungsfaktors  $\zeta$  von der Geometrie des Erosionshohlraumes sowie der Form des Sackungstrichters, dargestellt für Reibungswinkel des überlagernden Bodens von  $\varphi = 25^\circ$ ,  $\varphi = 30^\circ$  und  $\varphi = 35^\circ$

### 7.5.3 Empfehlungen zur Verwendung des Sackungsfaktors

Zur Entwicklung einer Erosionsröhre gibt es bereits zahlreiche Untersuchungen, u. a. von MÜLLER-KIRCHENBAUER (1978), DE WIT ET AL. (1981), KOHNO ET AL. (1987) sowie von SCHMERTMANN (2000). Bei den genannten Untersuchungen wurde die Entwicklung der Erosionsröhre unter einer festen Berandung (i. d. R. einer

Plexiglasplatte) von einem vorgegebenen Punkt aus verfolgt. Hierbei bildete sich hauptsächlich eine mäandrierende Erosionsröhre aus, von der in Abhängigkeit des untersuchten Materials weitere untergeordnete Erosionsröhren abzweigten. WEIJERS & SELLMER (1993) haben in einem großmaßstäblichen Versuch den Ausgangsort für rückschreitende Erosion nicht auf einen Punkt beschränkt, sondern vielmehr einen Schlitz über die gesamte Breite ihrer Versuchsrinne offen gelassen und auf diese Weise den Ausgangspunkt der Erosion nicht im Voraus festgelegt. Das Resultat dieser Versuchsdurchführung ist ein in horizontale Richtung weit verzweigtes System mehrerer Erosionsröhren.

Aus den o. g. Versuchsergebnissen kann abgeleitet werden, dass bei der Bildung von Erosionsröhren ein in horizontale Richtung ausgedehnter Bereich unterhalb der gering durchlässigen Deckschicht von der rückschreitenden Erosion erfasst wird. Kommt es im weiteren Verlauf zu dem hydraulischen Kurzschluss, können zunächst die Mäander der Erosionsröhre durchstoßen werden. Darüber hinaus kann Material aus dem mit Erosionsästen durchzogenen Bereich ausgetragen werden. Auf diese Weise ist vorstellbar, wie sich ein System von Erosionsröhren mit ihren Verästelungen im Falle des Erosionsgrundbruches zu einer breiteren Erosionsröhre unterhalb der gering durchlässigen Deckschicht aufweitert. Daher können vergleichsweise breite Erosionsröhren mit einem Verhältnis ihrer Breite zu ihrer Höhe  $b_{Pipe}/h_{Pipe} > 1$  entstehen.

Für die Anwendung des Sackungsfaktors  $\zeta$  wird empfohlen, das Seitenverhältnis der Erosionsröhre  $b_{Pipe}/h_{Pipe} > 1$  zu schätzen. Darüber hinaus werden Informationen zum Aufbau des Deichuntergrundes sowie des Deiches benötigt, um das Verhältnis der möglichen Überlagerungshöhe  $h_{\bar{u}_b}$  zur Mächtigkeit der Feinsandschicht  $h_{fs}$  zu bestimmen. Für die Annahme, dass sich die Bruchfugen in etwa unter dem Erddruckwinkel einstellen, kann für einen Reibungswinkel im Bereich von  $\varphi = 25...30...35^\circ$  der zugehörige Sackungsfaktor  $\zeta$  aus dem Diagramm in Bild 7.7 abgelesen werden. Für die Grenzbetrachtung bei einem (theoretischen) Reibungswinkel  $\varphi = 90^\circ$  ergibt sich nach Gleichung (7.15) der in Bild 7.6 a) dargestellte Fall mit senkrechten Bruchfugen. Solche sehr steilen, nahezu vertikalen Bruchfugen wurden bei zahlreichen Untersuchungen zur Breschenbildung an Dämmen und Deichen z. B. von BÜCKER (1998), COLEMAN ET AL. (2002), HÖEG ET AL. (2004) und MORRIS (2005) beschrieben, insbesondere bei kohäsivem Material. In diesem Sinne scheint es gerechtfertigt, den aus dem Diagramm in Bild 7.7 ermittelten Sackungsfaktor  $\zeta$  zu erhöhen, wenn die gering durchlässige Deckschicht und/oder das Deichmaterial eine Kohäsion aufweisen. Für den später diskutierten Beispieldeich (siehe Kapitel 8) wurde hieraus der Sackungsfaktor  $\zeta = 0,6$  abgeleitet.

Falls aufgrund von Aufschlussdaten belegbar ist, dass keine erosionsgefährdete Feinsandschicht unterhalb der gering durchlässigen Deckschicht ansteht, wird in Gleichung (7.13)  $h_{fs} = 0$  gesetzt. Hierdurch wird aus der Grenzzustandsgleichung des Mechanismus *Sackungen im Deichkörper* der bereits in Abschnitt 7.2 diskutierte einfache Falle der *Überströmung der Deichkrone* mit der Festlegung des Grenzzustandes nach Gleichung (7.2). In diesem Fall führt der Versagensast mit den Mechanismen *Aufschwimmen* und nachfolgender *Rückschreitender Erosion* lediglich dann zu einem Deichversagen, wenn der Hochwasserstand höher als das Niveau der Deichkrone ansteht.

## 7.6 Instationäre Durchfeuchtung des Deichkörpers

### 7.6.1 Bisherige Betrachtungsweise

Mit dem Einstau eines Deiches im Verlauf eines Hochwasserereignisses dringt allmählich Wasser von der Wasserseite her in den Deichkörper ein. Die Durchfeuchtung des Deiches ist maßgeblich von seinem Aufbau und insbesondere vom Durchlässigkeitsbeiwert des verwendeten Deichbaumaterials abhängig. Selbst zur Notsicherung auf der Wasserseite des Deiches aufgebraute Folien können die Durchfeuchtung nicht aufhalten<sup>7</sup> [BRAUNS & BIEBERSTEIN 2003, BRAUNS ET AL. 2003].

Bei der deterministischen Bemessung von Flussdeichen ist daher in den Regelwerken die Prüfung der Standsicherheit von Flussdeichen für den stationären Durchströmungszustand vorgesehen [DIN 19712:2013-01, DWA 2011]. Der zeitliche Verlauf der Durchfeuchtung sowie die Prüfung, ob sich aufgrund der Einstaudauer ein stationärer Durchströmungszustand einstellen kann, bleiben hierbei unberücksichtigt. Für eine genauere Beurteilung der Standsicherheit ist es jedoch wünschenswert, die zeitliche Entwicklung der Durchfeuchtungsfront zu kennen. Insbesondere interessiert hierbei der Zeitpunkt, an dem die Sickerlinie den landseitigen Böschungsfuß erreicht und ggf. wie sich im Folgenden die Sickerstrecke bzw. der Wasseraustrittsbereich im Bereich der landseitigen Böschung im zeitlichen Verlauf ausbildet.

---

<sup>7</sup> Lediglich im Fall von konzentrierten Strömungsbedingungen, beispielsweise in einem durchgehenden Mauwurfsgang, ist der Einsatz von Folien als Lecksegel nutzbringend.

Wie im *Fehlerbaum für Flussdeiche* (siehe Bild Bild 6.4) dargestellt, ist die Prüfung der Standsicherheit der landseitigen Böschung ausschließlich für die Fälle relevant, in denen die Sickerlinie den landseitigen Deichfuß noch während des Auf- bzw. Einstauvorganges erreicht. Für das Versagen der landseitigen Böschung während des fallenden Wasserspiegels (Abstau) wird vereinfachend angenommen, dass die Folgen ein geringeres Schadensausmaß erreichen. Dieser Fall wird in dem hier entwickelten Modell nicht berücksichtigt.

Für die Prüfung der Durchfeuchtungsdauer im Rahmen des hier vorgestellten probabilistischen Bewertungskonzeptes kommen numerische Verfahren aufgrund des zeitlichen Aufwandes für die Erstellung des numerischen Modells als auch für die Berechnung nicht in Betracht. Daher wurde ein analytisches Berechnungsverfahren entwickelt, mit dem der Verlauf der instationären Durchfeuchtung entlang der Deichbasis schnell und ohne aufwändige Vorberechnungen abgebildet werden kann. Das Verfahren kommt mit einfach zu bestimmenden Eingangsparametern aus und ist im Vergleich zu numerischen Berechnungen hinreichend genau [ZESCH ET AL. 2008]. Im Folgenden wird das entwickelte Verfahren zur Bestimmung der Durchfeuchtungszeit eines Deichkörpers näher erläutert.

### 7.6.2 Der Vorgang der instationären Durchfeuchtung

Unter dem Begriff der instationären Durchfeuchtung wird die zeitliche Ausbreitung einer Durchfeuchtungsfront z. B. infolge eines Niederschlags- bzw. Hochwasserereignisses in einem Deichkörper verstanden. Als Durchfeuchtungsfront ist hierbei die Grenze zwischen nicht durchfeuchtetem und durchfeuchtetem Boden zu verstehen, die auch als temporäre Sickerlinie bezeichnet wird. Der zeitliche Verlauf der instationären Durchfeuchtung ist von zahlreichen Faktoren abhängig, die u. a. SCHNEIDER ET AL. (1997) zusammengetragen haben:

- Charakteristik der Hochwasser-Ganglinie (mittlere Aufstaugeschwindigkeit und -dauer, sowie Einstaudauer und -höhe).
- Hydraulische Durchlässigkeit der Deichbaumaterialien.
- Struktureller Aufbau des Deichkörpers (u. a. Lagerungsdichte des Deichbaumaterials, ggf. Schichtung und Linsen im Deichkörper) sowie mögliche Defekte bzw. Unregelmäßigkeiten, z. B. infolge Wühltierbefalls und Bewuchses.
- Feuchteverteilung im Deichkörper – ggf. infolge von Niederschlagsereignissen – vor Eintritt des Hochwasserereignisses.

Den Einfluss der Feuchteverteilung im Deichkörper auf den zeitlichen Verlauf der instationären Durchfeuchtung hat SCHEUERMANN (2005) im Modell sowie mit numerischen Nachrechnungen untersucht. Um unterschiedliche Feuchteverteilungen im Deichkörper zu erzeugen, wurden Einstau- und Beregnungsversuche an einem naturmaßstäblichen Deichmodell mit einer Höhe von ca. 3,40 m durchgeführt. Währenddessen wurde die Bodenfeuchte punktuell mit Tensiometern sowie orts aufgelöst mit Flachbandkabeln als TDR-Sensoren (Spatial-TDR) quantifiziert. Die Feuchtemessungen wurden in einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten durchgeführt und ausgewertet; hieraus konnte das Voranschreiten der Durchfeuchtungsfront im Deichkörper im zeitlichen Verlauf abgeleitet werden. Zudem war es möglich, mit Druckgebern das Voranschreiten der Sickerlinie entlang der Deichbasis zu erfassen. Es wurden Untersuchungen bei unterschiedlichen hydraulischen Vorbedingungen durchgeführt und mit numerischen Simulationen verglichen. Hierbei konnte gezeigt werden, dass es mit Hilfe numerischer Simulationen möglich ist, hydraulische sowie meteorologische Randbedingungen, welche die Vorfeuchteverteilung im Deichkörper beeinflussen, abzubilden. Demnach sind numerische Verfahren prinzipiell geeignet, den Vorgang der instationären Durchfeuchtung nachzubilden [SCHEUERMANN 2005]. Zu einem vergleichbaren Ergebnis kommt HASELSTEINER (2007) bei der numerischen Nachrechnung von Einstau- sowie von Niederschlagsereignissen. Hier stand ein ca. 1,60 m hohes Deichmodell zur Verfügung, das unter anderem mit elektronischen Porenwasserdruckgebern sowie elektronischen Sättigungsgebern (EchoProbes) instrumentiert wurde. Der Einfluss auf die Feuchteverteilung im Deichkörper infolge von simulierten Niederschlagsereignissen als auch von simulierten Hochwasserwellen konnte mit dem verwendeten numerischen Modell im Vergleich zu den Messungen treffend abgebildet werden.

### 7.6.3 Analytische Lösung für die instationäre Durchfeuchtung

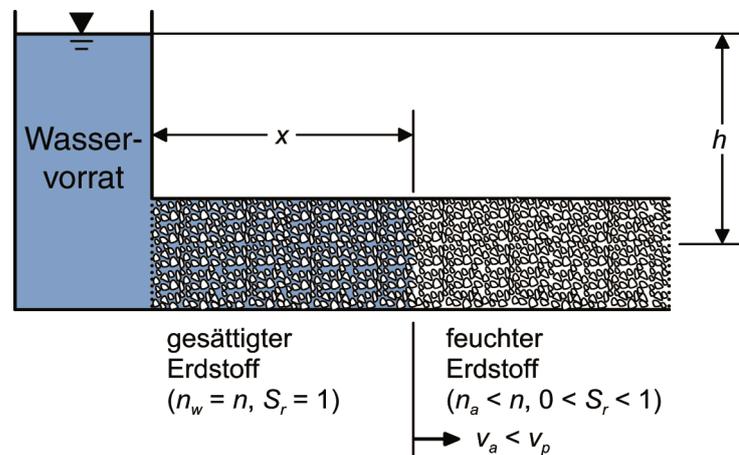
Für die Entwicklung eines Versagensmechanismus, der die instationäre Durchfeuchtung abbilden kann, wird zunächst der Vorgang im eindimensionalen Modell betrachtet. Als Antrieb für den Durchfeuchtungsvorgang dient das hydraulische Potential, mit dem ein mit einheitlichem Erdstoff gefülltes Rohr einseitig beaufschlagt wird. Dann gilt für die Zeitdauer  $t$ , die die Durchfeuchtungsfront benötigt, um die Strecke  $x$  zurück zu legen, der folgende Zusammenhang, der auch in Bild 7.8 dargestellt ist:

$$t(x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{n_a \cdot x^2}{k_f \cdot h} \quad (7.16)$$

Neben den in Bild 7.8 verwendeten Bezeichnungen bedeuten:

$n_a$  = Lufterfüllter Porenraum [-]

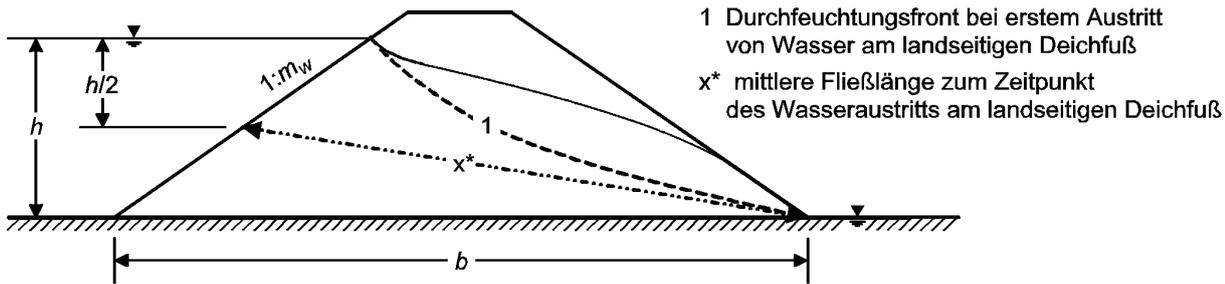
$k_f$  = Hydraulische Durchlässigkeit des gesättigten Erdstoffes [m/s]



**Bild 7.8:** Modell für die instationäre Durchfeuchtung eines mit Erdstoff gefüllten Rohres nach SCHEUERMANN (2005)

Dieser eindimensionale Ansatz wurde von BRAUNS (1999) dahingehend erweitert, dass die Dauer der instationären Durchfeuchtung eines homogenen Deiches auf gering durchlässigem Untergrund für den Fall eines plötzlichen Einstaus ermittelt werden kann. Hierfür wird die Zeitdauer der Durchfeuchtung  $t$  auf eine mittlere Fließstrecke  $x^*$  bezogen, die sich von der halben Einstauhöhe auf der wasserseitigen Böschung bis zum landseitigen Böschungsfuß erstreckt (vgl. Bild 7.9).

Durch die implizite Berücksichtigung der Neigung der wasserseitigen Böschung wird hier die Zweidimensionalität des Durchfeuchtungsvorganges einbezogen: Ein flacherer Deichquerschnitt besitzt bei gleicher Deichaufstandsstrecke  $b$  eine kürzere mittlere Fließstrecke  $x^*$  sowie eine vergrößerte Eintrittsstrecke für das Wasser entlang der wasserseitigen Böschung, woraus eine beschleunigte Durchfeuchtung resultiert. Mit der Methode von Brauns steht ein analytisches Verfahren zur Verfügung, mit dem der zeitliche Durchfeuchtungsverlauf im homogenen Deich für den Lastfall eines plötzlichen Einstaus leicht abgeschätzt werden kann.



**Bild 7.9:** Prinzipische Skizze zum Lösungsansatz nach Brauns für die instationäre Durchfeuchtung nach BRAUNS (1999)

Für die Zeitdauer der Durchfeuchtung  $t$  gilt dann nach BRAUNS (1999):

$$t(x^*) = \frac{1}{2} \cdot \frac{n_a \cdot (x^*)^2}{k_f \cdot h} \quad (7.17)$$

mit

$$x^* = \sqrt{\left(b - \frac{h}{2} m_w\right)^2 + \frac{h^2}{4}} \quad (7.18)$$

Die Annahme des plötzlichen Einstaus des Deiches liegt für reale Hochwasserereignisse – insbesondere während der Aufstauphase – sicherlich (weit) auf der sicheren Seite, wodurch die Durchfeuchtungsdauer unterschätzt wird. Für Untersuchungen zur Versagenswahrscheinlichkeit von Flussdeichen wird die eingangs formulierte Forderung zum Detaillierungsgrad der Versagensmechanismen nicht erfüllt. Um den Vorgang der Deichdurchfeuchtung realitätsnäher abzubilden, ist daher der Einfluss aus der Charakteristik der Hochwasserganglinie (Aufstau – Einstau – Abstau) zu berücksichtigen.

Der Zusammenhang für die Geschwindigkeit der Durchfeuchtungsfront aus Gleichung (7.16) wurde daher für den Lastfall des allmählichen Aufstaus des Hochwassers erweitert. Hierbei findet auch der nicht zu vernachlässigende Einfluss der Vorfeuchte des Deichmaterials auf den Vorgang der instationären Durchfeuchtung Berücksichtigung.

Mit einer iterativen Vorgehensweise ist es möglich, die Charakteristik der Hochwasserganglinie abzubilden. Hierfür wird die Ganglinie in Zeitintervalle  $\Delta t_i$  zerlegt und für jedes Zeitintervall unter Berücksichtigung der bereits durchfeuchteten mittleren Fließstrecke  $x_{i-1}^*$  des vorangegangenen Zeitintervalls die neue mittlere Fließstrecke  $x_i^*$  bestimmt. Weiterhin wird nach SCHEUERMANN (2005) das Matrixpotential  $\psi_m$  des teilgesättigten Bodens als zusätzlich zur Einstauhöhe

antreibende Größe berücksichtigt. Damit ergibt sich die mittlere Fließstrecke  $x_i^*$  zum Zeitpunkt  $t_i$  nach Gleichung (7.19) zu:

$$x_i^* = \sqrt{(x_{i-1}^*)^2 + 2 \cdot \frac{k_f}{n_a} \cdot (h_i + \psi_m) \cdot \Delta t_i} \quad (7.19)$$

Hierin bedeuten:

$x_i^*$  = Mittlere Fließstrecke zum Zeitpunkt  $t_i$  (siehe auch Bild 7.9) [m]

$\psi_m$  = Matrixpotential des Deichbaustoffes [m WS]

$\Delta t_i$  = Zeitintervall des  $i$ -ten Zeitschrittes [s]

Aus geometrischen Überlegungen folgt für die zur mittleren Fließstrecke  $x_i^*$  zugehörige durchfeuchtete Strecke  $b_i$ :

$$b_i = \sqrt{(x_i^*)^2 - \left(\frac{h_i}{2}\right)^2} + \frac{h_i}{2} \cdot m_W \quad (7.20)$$

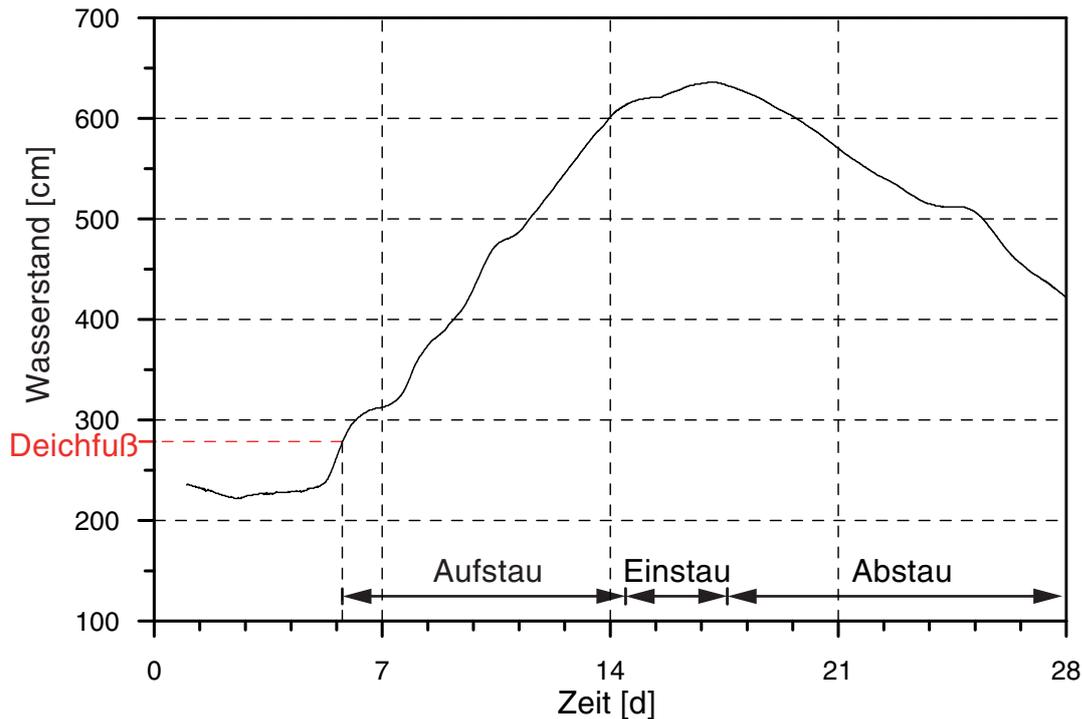
Nach dieser Vorgehensweise kann der Zeitpunkt ermittelt werden, ab dem die Durchfeuchtungsfront den landseitigen Deichfuß erreicht:  $t(b_i \geq \text{Deichaufstandsstrecke})$ . Für den Fall, dass dieser Zeitpunkt noch innerhalb des Auf- bzw. Einstauvorganges erreicht wird, ist im nächsten Schritt die Standsicherheit der landseitigen Böschung zu überprüfen. Zunächst folgen Erläuterungen zu den Eingangsgrößen für das entwickelte Modell und die Anpassung an das validierte numerische Modell.

#### 7.6.4 Eingangsgrößen für das erweiterte analytische Modell

In dem für den allmählichen Aufstau erweiterten analytischen Modell werden grundsätzlich alle Randbedingungen berücksichtigt, die auch für die numerischen Berechnungen benötigt werden. Hierzu sind zu berücksichtigen:

- Als hydraulische Randbedingung die Charakteristik der Hochwasserganglinie,
- die bodenhydraulischen Eigenschaften des Deichbaumaterials,
- die geometrischen Randbedingungen des Deichkörpers sowie
- die hydraulische Anfangsbedingung im Deichkörper vor dem Hochwasserereignis.

Im Folgenden wird im Detail erläutert, wie die genannten Randbedingungen im analytischen Modell berücksichtigt werden.



**Bild 7.10:** Typische Wasserstandsganglinie eines Hochwasserereignisses mit Unterscheidung in Aufstau-, Einstau- und Abstauphase

Die hydraulischen Randbedingungen sind die maßgebenden Eingangsgrößen für die instationäre Durchfeuchtung. Hierzu zählen der zeitliche Verlauf sowie die absolute Einstauhöhe eines Hochwasserereignisses. In Bild 7.10 ist beispielhaft eine typische Wasserstandsganglinie eines Hochwasserereignisses dargestellt, wie sie für gegebene Fließquerschnitte aus der Abflussganglinie abgeleitet werden kann. Prinzipiell ist eine Unterteilung in die Phasen Aufstau, Einstau sowie Abstau möglich, wie sie auch in Bild 7.10 eingetragen sind. Die Aufstauphase ist hierbei durch einen stetig steigenden Wasserstand gekennzeichnet. Zum Scheitel des Hochwasserereignisses hin flacht die Ganglinie ab, so dass die Einstauphase durch eine mehr oder weniger konstante Wasserspiegelhöhe gekennzeichnet ist. Während der Abstauphase fällt der Wasserstand ebenfalls stetig aber i. d. R. langsamer, als der Wasserstand während des Aufstaus angestiegen ist. Die Aufstauphase kann zwischenzeitlich durch einen Abstau unterbrochen werden, wobei die Wasserspiegelhöhe des nachfolgenden Hochwasserscheitels den vorangegangenen z. T. deutlich übertreffen kann. Hierbei spricht man von einer *doppelten Hochwasserwelle*, die sehr häufig zu standsicherheitsrelevanten Durchströmungssituationen führt und somit eine besondere Belastungssituation für Deiche darstellt [KRÄNKEL & PASSIG 1989].

In dem hier vorgestellten Modell wird für den Aufstau eine konstante Anstiegsgeschwindigkeit, d. h. ein linearer Anstieg des Wasserstandes angenommen, die Einstauphase wird mit einer konstanten Wasserspiegelhöhe abgebildet.

Die maßgebende physikalische Eigenschaft des Deichbaumaterials für die instationäre Durchfeuchtung ist die hydraulische Durchlässigkeit  $k_p$ , die in Gleichung (7.19) für den gesättigten Zustand als konstant angenommen wird. Für ungesättigte Bedingungen müsste die Durchlässigkeit an der Durchfeuchtungsfront – also in Bereichen, die durch den Durchfeuchtungsverlauf noch nicht voll gesättigt sind, – entsprechend der Saugspannungsbeziehung des Deichbaumaterials reduziert werden. Dies wird für die analytische Berechnung vernachlässigt, woraus sich auf der sicheren Seite liegend eine geringfügig schnellere Durchfeuchtung ergibt.

Die Saugspannungsbeziehung des Deichbaumaterials wird für die Definition der hydraulischen Anfangsbedingungen berücksichtigt. Sowohl das isotrop wirkende Matrixpotential des Bodens  $\psi_m$ , das an der Durchfeuchtungsfront als zusätzlich antreibende Saugkraft wirkt, als auch der luftgefüllte Porenanteil  $n_a$ , der den Sättigungszustand des Deichmaterials beschreibt, gehen in das analytische Modell ein. Beide Parameter können bodenspezifisch aus der Saugspannungsbeziehung abgeleitet werden [SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010].

Für einen vorgegebenen Wassergehalt, aus dem in Abhängigkeit der Dichte der luftgefüllte Porenanteil  $n_a$  abgeschätzt werden kann, wird über die Saugspannungsbeziehung das Matrixpotential  $\psi_m$  bestimmt. In umgekehrter Weise kann über die Definition der Feldkapazität der entsprechende Wassergehalt aus der Saugspannungsbeziehung abgeleitet werden [FREDLUND & RAHARDJO 1993 sowie SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010]. Die Feldkapazität gibt den Anteil des Wassers im Boden an, der gegen die Schwerkraft noch gehalten werden kann und liegt üblicherweise bei Matrixpotentialen  $\psi_m$  von 6,3 kPa (pF = 1,8) bis 31,6 kPa (pF = 2,5). Falls keine weiteren Informationen zu den Feuchtebedingungen eines Bodens vorliegen, kann das Matrixpotential im Bereich der Feldkapazität abgeschätzt werden.

Die geometrischen Verhältnisse werden mit der wasserseitigen Böschungsneigung  $m_w$  erfasst, die in Gleichung (7.20) für die Berechnung der Durchfeuchtungsstrecke entlang der Basis  $b$  aus der mittleren Fließstrecke  $x^*$  verwendet wird. Eine flachere Böschungsneigung führt zu einer kürzeren mittleren Fließstrecke, woraus eine beschleunigte Durchfeuchtung resultiert.

Zur Anpassung und Verifizierung des erweiterten analytischen Modells wurden zahlreiche numerische Modellierungen mit den Programmen HYDRUS und SPRING durchgeführt. Hierbei wurden die zuvor diskutierten maßgebenden Eingangsgrößen in unterschiedlichen Kombinationen und in den folgenden Wertebereichen variiert:

- Böschungsneigung (Wasser- sowie Landseite): 1:1,5; 1:2,5 und 1:3,5,
- Aufstaugeschwindigkeit: 1, 2, 5 und 15 cm/h,
- Durchlässigkeit des Deichbaumaterials:  $2 \cdot 10^{-5}$ ;  $4 \cdot 10^{-5}$ ;  $8 \cdot 10^{-5}$ ;  $1,6 \cdot 10^{-4}$ ;  $3,3 \cdot 10^{-4}$  und  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s.

Die Saugspannungsbeziehung wurde bei den Vergleichsberechnungen jeweils als konstant mit einem Matrixpotential  $\psi_m = 0,20$  m angenommen. Die Parameterkombinationen wurden so gewählt, dass ein großer Bereich der bei Flussdeichen vorhandenen Material- und Geometrieparameter abgedeckt ist und die Aussagen möglichst ohne Einschränkungen für Flussdeiche Gültigkeit besitzen.

Im Vergleich von Ergebnissen numerischer sowie analytischer Berechnungen wird deutlich, dass das analytische Modell tendenziell kürzere Durchfeuchtungszeiten liefert. Um diese ggf. weit auf der sicheren Seite liegende Abweichung des analytischen Modells zu korrigieren, wurde auf Basis der Ergebnisse der umfangreichen Parameterstudie ein Korrekturfaktor entwickelt.

### 7.6.5 Anpassung des erweiterten analytischen Modells

Die Diskrepanz zwischen den Ergebnissen der analytischen sowie der numerischen Berechnungsmethode ist auf die noch unzureichende Berücksichtigung des zweidimensionalen Strömungsverhaltens im zugrunde liegenden analytischen Modell zurück zu führen. Hierbei ist es weniger die Form der Durchfeuchtungsfront, d. h. die Annahme einer Geraden als momentane Sickerlinie im analytischen Modell, die bei der Frage nach dem zeitlichen Verlauf eine Rolle spielt. Einen wesentlich größeren Einfluss hat der Anfangszustand im noch nicht durchfeuchteten Bereich, der sich im numerischen Modell durch eine Verteilung der Zustandsgrößen Matrixpotential und Wassergehalt definiert, während im analytischen Modell hierfür lediglich ein konstanter Wert eingeht.

Das Ziel der Anpassung des erweiterten analytischen Modells war es, diese Diskrepanz durch einen allgemeingültigen Korrekturfaktor zu berücksichtigen, der unabhängig vom verwendeten Material sowie der hydraulischen Randbedingung Gültigkeit besitzt. Als Grundlage hierfür wurde eine dimensionslose Größe eingeführt, die den Geschwindigkeitsunterschied zwischen dem Aufstau des Wasserstandes und dem Voranschreiten der Durchfeuchtungsfront wiedergibt. Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse der Parameterstudie mit dem Faktor  $\kappa_{sz,i}$  in Anlehnung an

SCHNITTER & ZELLER (1957) für jeden Zeitschritt ausgewertet und die Berechnungsergebnisse angepasst.

Der resultierende Korrekturfaktor  $f_{kor,i}$  bezieht sich auf den Zeitpunkt  $t_i$ , der zu der durchfeuchteten Strecke in der Deichaufstandsstrecke  $b_i$  gehört, und setzt sich wie folgt zusammen:

$$f_{kor,i} = \left( 1,015 + 0,13 \cdot \frac{\sqrt{\kappa_{SZ,i}}}{b_i} \right)^2 \quad (7.21)$$

Hierin bedeuten:

$$\kappa_{SZ,i} = \frac{k_f}{n_a \cdot v_{auf,i}}$$

$b_i$  = Durchfeuchtete Strecke der Deichaufstandsstrecke vom wasserseitigen Böschungsfuß aus [m]

$v_{auf,i}$  = Aufstaugeschwindigkeit [cm/h]

Der Korrekturfaktor aus Gleichung (7.21) wurde aus der Beobachtung des Vorschreitens der Sickerlinie entlang der Deichbasis gewonnen. Hiermit wird der horizontale Abstand der Sickerlinie zum wasserseitigen Böschungsfuß  $b_i$  explizit in der analytischen Lösung berücksichtigt. In der Folge besitzt der Korrekturfaktor  $f_{kor}$  die Dimension [m<sup>-1</sup>] und ist gültig für Deiche mit einer Deichlagerbreite  $\geq 5$  m. Darüber hinaus wurden die zuvor erläuterten physikalischen sowie geometrischen Rand- und Anfangsbedingungen zugrunde gelegt. Für die Ermittlung der Beiwerte wurden die geometrischen sowie hydraulischen Randbedingungen in einem breiten Spektrum variiert, so dass der Korrekturfaktor Gültigkeit für die Größen aufweist, die für Deiche an Fließgewässern typischerweise in Betracht kommen.

In der Grenzzustandsgleichung (7.22) wird die nach (7.21) korrigierte Durchfeuchtungsdauer  $t_{kor}$  mit der Gesamtdauer des Aufstaus  $t_{auf}$  während eines Hochwasserereignisses verglichen:

$$Z = t_{kor}(b) - t_{auf} \quad (7.22)$$

mit:

$$t_{kor}(b) = t_D \cdot f_{kor}(b) \quad (7.23)$$

Hierin bedeuten:

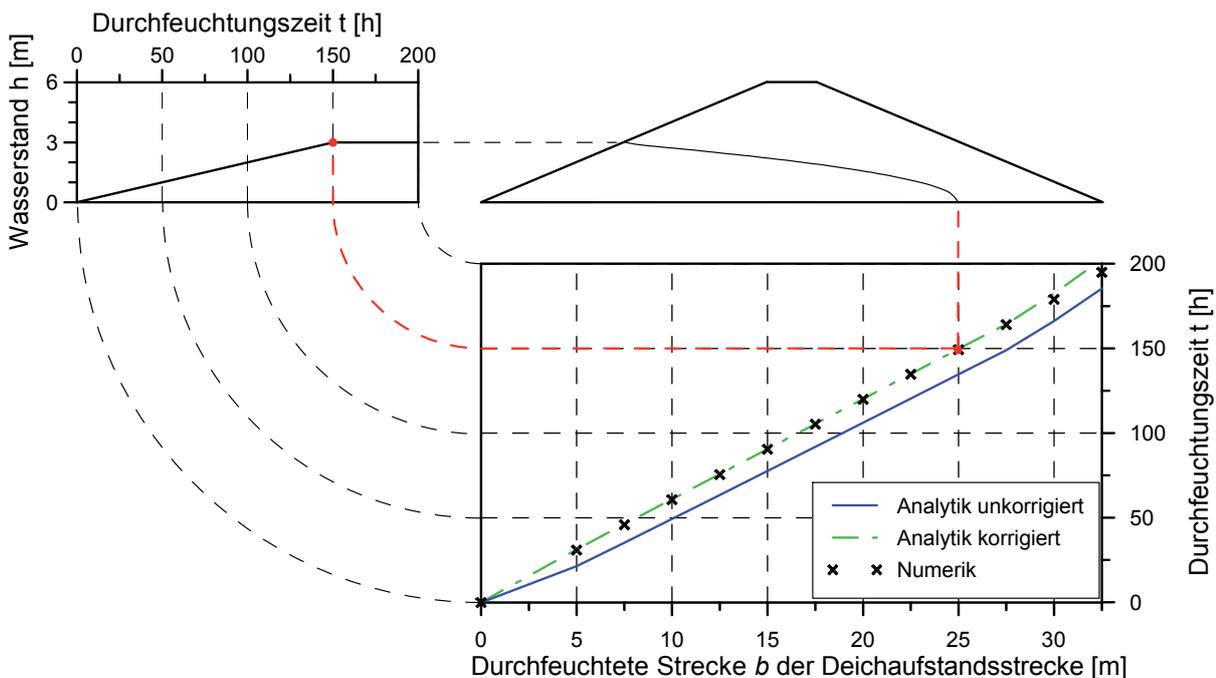
$t_{kor}(b)$  = Korrigierte Durchfeuchtungsdauer

$t_D$  = Dauer der Durchfeuchtung entlang der Deichaufstandsstrecke  
 $t_{auf}$  = Dauer des Aufstaus während eines Hochwasserereignisses

In Bild 7.11 werden die unterschiedlichen Ergebnisse einer Beispielrechnung dargestellt. Oben rechts ist die Geometrie des Deiches mit homogenem Aufbau und einer Höhe von sechs Metern sowie Böschungsneigungen an Land- sowie Wasserseite von 1:2,5 dargestellt. Die Durchlässigkeit des Deichbaumaterials beträgt  $8,5 \cdot 10^{-5}$  m/s, für die Berechnungen wurde von einem undurchlässigen Deichuntergrund ausgegangen.

Im Diagramm links daneben ist die Wasserstandsganglinie zu sehen, die als hydraulische Randbedingung vorgegeben wurde. Die Berechnung erfolgte in diesem Beispiel mit einer konstanten Aufstaugeschwindigkeit von 2 cm/h. Zum Zeitpunkt  $t = 150$  h hat der Wasserstand die Einstauhöhe  $h = 3$  m erreicht, die nachfolgend konstant gehalten wurde.

Im Diagramm rechts unten in Bild 7.11 sind die Ergebnisse der analytischen sowie der numerischen Berechnungen als zeitlicher Verlauf der Durchfeuchtung entlang der Basis des homogenen Deichkörpers eingetragen. Die auf der Abszisse dargestellte Durchfeuchtungsstrecke entspricht dabei der Aufstandsfläche des darüber dargestellten Deichquerschnitts. Die Durchfeuchtungszeit ab Einstaubeginn ist auf der Ordinate von unten nach oben aufsteigend eingetragen.



**Bild 7.11:** Zusammenhang zwischen Wasserstandsganglinie (oben links) und Ausbreitung der Durchfeuchtungsfront im homogenen Deichkörper (unten rechts); Darstellung der Ergebnisse von analytischen sowie numerischen Berechnungen

Schwierigkeiten bereitet die Definition einer äquivalenten hydraulischen Anfangsbedingung für die analytische und die numerische Berechnungsmethode. Bei der numerischen Modellierung wurde in der Basis von einem Matrixpotential von 2 kPa (entsprechend einer kapillaren Steighöhe von 20 cmWS) ausgegangen und von Gleichgewichtsbedingungen im Deichkörper. Das ist gleichbedeutend mit einem Anstieg des Matrixpotentials mit zunehmendem Abstand zur Basis um den Betrag des geodätischen Potentials. Der Wassergehalt verteilt sich in diesem Bereich entsprechend der vorgegebenen Saugspannungsbeziehung des Bodens. Bei einer solchen Randbedingung werden Wasserbewegungen aufgrund der Anfangsbedingung von vornherein ausgeschlossen.

Am Ende des Aufstauvorganges, zum Zeitpunkt  $t = 150$  h, folgt aus dem Diagramm rechts unten in Bild 7.11, dass die Durchfeuchtungsfront ca. 25 m weit in den Deichkörper eingedrungen ist. Die zugehörige Sickerlinie ist im Deichkörper idealisiert als Sickerparabel eingetragen. Die Durchfeuchtungszeit, wie sie sich aus der numerischen Berechnung ergibt, ist mit Symbolen (schwarze Kreuze) in das Diagramm rechts unten in Bild 7.11 eingetragen. Ein Vergleich der numerischen Berechnung mit dem Ergebnis der analytischen Berechnungsmethode (vgl. blaue durchgezogene Linie) anhand Gleichung (7.19) zeigt, dass der zeitliche Verlauf der Durchfeuchtungsfront zwar qualitativ treffend wiedergegeben wird, die analytisch berechnete Durchfeuchtung allerdings um einen scheinbar konstanten Betrag schneller abläuft. Bei langsamer aufgestauten Deichen mit geringerer Durchlässigkeit zeigte sich ein größerer zeitlicher Vorlauf der Durchfeuchtungsfront bei der analytischen Berechnung gegenüber den numerischen Ergebnissen. Wird der Korrekturfaktor auf das in Bild 7.11 dargestellte Beispiel angewendet, ergibt sich eine gute Übereinstimmung aus den Ergebnissen der numerischen Berechnung (schwarze Kreuze) und den korrigierten Ergebnissen der analytischen Nachrechnung (grüne strich-punktierte Linie).

Mit der Einführung des Korrekturfaktors kann der beschleunigende Effekt der analytischen Lösung gegenüber der numerischen Berechnung ausgeglichen werden [ZESCH ET AL. 2008]. Das erweiterte analytische Modell zur instationären Deichdurchfeuchtung ist für die Aufstau- sowie die Einstauphase einer Hochwasserganglinie angepasst und verifiziert [ZESCH ET AL. 2008]. Die prinzipielle Übereinstimmung der erweiterten analytischen Lösung mit zweidimensionalen numerischen Berechnungen konnte auch von anderen Autoren gezeigt werden, z. B. MÖLLMANN 2009.

## 7.7 Böschungsbruch

### 7.7.1 Allgemeines

Wird der Deichkörper über einen längeren Zeitraum eingestaut, kann sich eine stationäre Sickerlinie ausbilden. Der Austrittspunkt der stationären Sickerlinie liegt beim homogenen Deich auf der landseitigen Böschung ungefähr bei einem Drittel der Einstauhöhe [KOZENY 1931, CASAGRANDE 1937]. Der stationäre Durchströmungszustand stellt für die Betrachtung der Standsicherheit der landseitigen Böschung den ungünstigen Fall dar und wird daher in dem hier vorgestellten Modell zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit bei den verschiedenen *Böschungsbruch*-Mechanismen vorausgesetzt. Zunächst wird entsprechend dem *Fehlerbaum für Flussdeiche* (siehe Bild 6.4) mit dem in Abschnitt 7.6 erläuterten Mechanismus der *instationären Durchfeuchtung* geprüft, ob die Sickerlinie innerhalb des Einstaus während des Hochwasserereignisses den landseitigen Deichfuß erreicht. Wenn diese Bedingung im Modell erreicht ist, wird für die anschließenden Berechnungen der Böschungsstandsicherheit die Ausbildung einer stationären Sickerlinie im Deichkörper angenommen. Die Sickerlinie wird hierbei vereinfachend mit linearem Verlauf vom Niveau des Hochwasserstandes vor dem Deich bis zum Drittelpunkt der Einstauhöhe auf der landseitigen Böschung angenähert. Die Abweichungen dieser Vereinfachung gegenüber der tatsächlichen Form der Sickerparabel sind für die Betrachtung der Böschungsstandsicherheit von untergeordneter Bedeutung.

Zur Gewährleistung der Böschungsstandsicherheit von Flussdeichen sind die lokale sowie die globale Standsicherheit nachzuweisen [BAW 2011]. Hierbei kann die lokale Standsicherheit mit böschungsp parallelen Gleitflächen für nichtbindiges Material des Deichkörpers bzw. mit flach einschneidenden Gleitkreisen für bindiges Deichmaterial überprüft werden. Eine mögliche Beschreibung, wie sich der Bruchmechanismus im homogenen Deich aus rolligem Material weiter entwickeln kann, geben beispielsweise VROUWENFELDER & WUBS (1985) und VOROGUSHYN (2009). Die dort vorgestellte Methode ist nur eingeschränkt auf Deiche aus kohäsivem Material anwendbar, weshalb in dem hier vorgestellten Rechenmodell das universell anwendbare Lamellenverfahren zum Einsatz kommt.

Für die Berechnung der globalen Standsicherheit von Böschungen stehen viele verschiedene Verfahren zur Verfügung. Wichtigstes Merkmal zur Differenzierung ist jeweils die Form der Gleitfuge, beispielsweise können kreisförmig oder logarithmisch gekrümmte sowie gerade Gleitfugen unterschieden werden. DUNCAN (1996) gibt

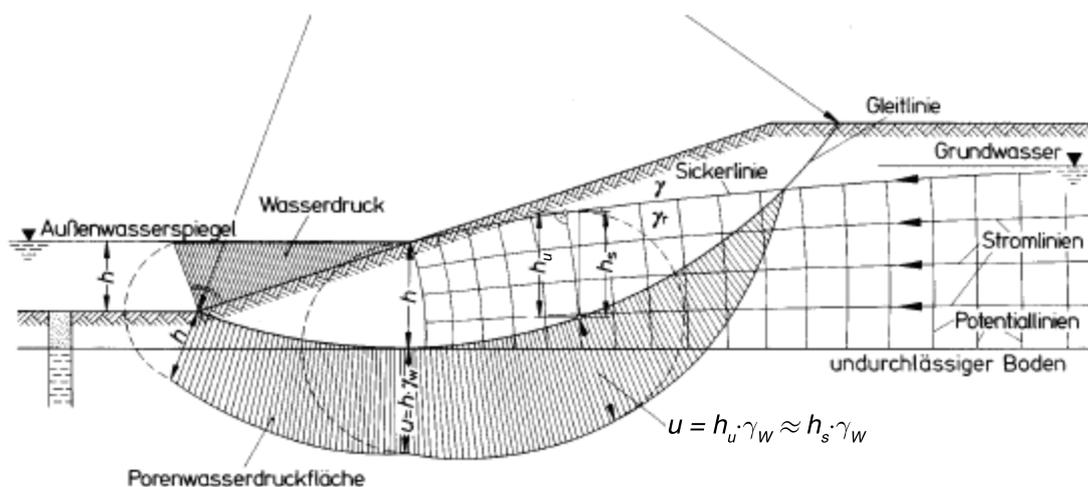
einen Überblick der verschiedenen Ansätze und schließt aus Vergleichen, dass bei gekrümmten Gleitfugen kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der errechneten Sicherheiten bei unterschiedlichen Rechenverfahren besteht. Demzufolge kann für die Berechnung der Böschungsstandsicherheit mit gekrümmten Gleitfugen ein Verfahren mit kreisförmigen Gleitfugen angewendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher das Lamellenverfahren mit kreisförmiger Gleitfuge nach KREY (1926) und BISHOP (1954) angewendet, das auch in DIN 4084:2009-01 beschrieben ist und dort zur Anwendung empfohlen wird.

Beim Lamellenverfahren nach *Krey* und *Bishop* wird der Bruchkörper in mehrere senkrechte Lamellen unterteilt, an denen jeweils die Standsicherheit nachzuweisen ist. Zur Überprüfung des Momentengleichgewichts des gesamten Bruchkörpers werden die Kräfte in vertikale sowie tangentielle Richtung an der Einzellamelle untersucht. Für die auf die Einzellamelle wirkenden Erddruck-Kräfte wird angenommen, dass sie

- in horizontale Richtung wirken und
- sich gegenseitig in ihrer Größe aufheben.

Der mit diesen Vereinfachungen verbundene statische Fehler ist jedoch gering und kann vernachlässigt werden. Wegen seiner einfachen Handhabung ist dieses Vorgehen auch international eingeführt (siehe z. B. DIN EN 1997-1:2009-09).

Zur Bestimmung des Porenwasserdruckes in der Gleitfuge wird näherungsweise die Ortshöhe  $h_s$  der Sickerlinie über der Gleitlinie angenommen statt der exakten Potentialhöhe  $h_u$ . Hiermit wird vereinfachend und auf der sicheren Seite liegend in der Lamelle eine waagrechte Strömung angenommen.



**Bild 7.12:** Skizze zur Bestimmung des Porenwasserdruckes in der Gleitfuge nach DIN 4084

In der Grenzzustandsgleichung (7.24) zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit werden haltende Momente  $M_h$  mit treibenden Momenten  $M_t$  in der Gleitfuge verglichen:

$$Z = M_h - M_t \quad (7.24)$$

mit:

$$M_h = r \cdot \sum_i \frac{(G_i - u_i \cdot b_{Lam,i}) \cdot \tan \varphi_i + c_i \cdot b_{Lam,i}}{\cos \vartheta_i + \tan \varphi_i \cdot \sin \vartheta_i} \quad (7.25)$$

$$M_t = r \cdot \sum_i G_i \cdot \sin \vartheta_i + \sum_i M_s \quad (7.26)$$

Hierin bedeuten:

- $r$  = Radius des Gleitkreises [m]
- $G_i$  = Eigengewicht einer Lamelle [kN/m]
- $u_i$  = Porenwasserdruck auf die Gleitfuge einer Lamelle [kN/m<sup>2</sup>]
- $c_i$  = Kohäsion in der Gleitfuge einer Lamelle [kN/m<sup>2</sup>]
- $b_{Lam,i}$  = Breite einer Lamelle [m]
- $\varphi_i$  = Reibungswinkel in der Gleitfuge einer Lamelle [°]
- $\vartheta_i$  = Winkel der Tangente einer Lamelle gegen die Horizontale [°]
- $M_s$  = Moment von nicht in  $G$  enthaltenen Einwirkungen um den Mittelpunkt des Gleitkreises [kNm]

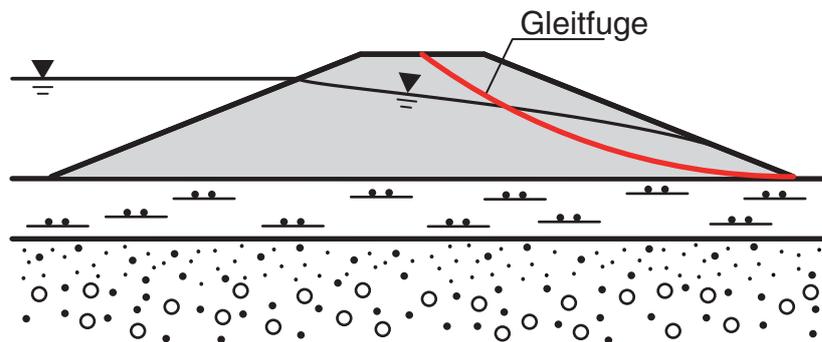
Zusätzliche Auflasten – etwa auf der Deichkrone – sollten im Hochwasserfall vermieden werden und sind daher im Gegensatz zu den gegebenen Möglichkeiten nach DIN 4084:2009-01 bisher nicht berücksichtigt. Weitere Auflasten am landseitigen Böschungsfuß bzw. im Deichhinterland wirken i. d. R. günstig auf die Standsicherheit, jedoch sollten sie, sofern sie lediglich temporären Charakter haben (z. B. Notfall-Berme), nicht in die Standsicherheitsbetrachtung einbezogen werden.

### 7.7.2 Böschungsbruch mit Gleitfuge durch den landseitigen Böschungsfuß

Zur Bestimmung der ungünstigsten Lage ist die Geometrie des Gleitkreises zu variieren. In der alten Norm DIN 4084:1981-07 wird angegeben, dass die Gleitfuge *bei Böschungen in einheitlichen Böden mit  $\varphi > 5^\circ$  durch deren Fußpunkt verläuft*. In der neueren DIN 4084:2009-01 findet sich diese Formulierung so nicht wieder, jedoch werden hier im Anhang Hinweise auf die Lage des ungünstigsten Gleitkreis-

mittelpunktes gegeben, die sich auf Gleitfugen durch den Böschungfußpunkt beziehen.

In dem hier entwickelten Berechnungsmodell werden für homogene Deiche, die i. d. R. aus reibungsbegabtem Material aufgebaut sind, Gleitkreisgeometrien durch den Böschungfußpunkt untersucht<sup>8</sup>. Die Gleitfuge endet im Bereich der Deichkrone, wie beispielhaft in Bild 7.13 dargestellt. Der Austrittspunkt kann im Berechnungsmodell im Bereich der Deichkrone frei gewählt und variiert werden, standardmäßig wird ein Austrittspunkt in der Mitte der Deichkrone angenommen.



**Bild 7.13:** Prinzipskizze zum Böschungsbruch mit Gleitfuge durch den landseitigen Deichfußpunkt mit beispielhafter Darstellung einer möglichen Gleitfuge

Um die Geometrie der Gleitfuge eindeutig zu bestimmen, wird eine zusätzliche Angabe benötigt. Hierfür wird der Radius des Gleitkreises vorgegeben. Unter der Voraussetzung, dass die Gleitfuge durch den landseitigen Böschungfuß nicht in die gering durchlässige Deckschicht einbindet, kommen lediglich die Mittelpunkte in Betracht, die jenseits des Böschungfußes (über dem Deichhinterland) liegen. Standardmäßig wird im Berechnungsmodell der Fall angenommen, für den die Oberfläche der gering durchlässigen Deckschicht die Tangente an den Gleitkreis darstellt und der zugehörige Mittelpunkt über dem landseitigen Deichfußpunkt liegt.

In dem entwickelten Rechenmodell kann für den Mechanismus Böschungsbruch mit Gleitfuge durch den landseitigen Deichfußpunkt die Geometrie der Gleitfuge durch die Angabe des Austrittspunktes im Bereich der Deichkrone beeinflusst werden sowie durch Angabe des Radius des Gleitkreises. Hierbei ist es möglich, die Gleitfuge mit der geringsten Sicherheit automatisch zu ermitteln. Bei einer Vielzahl von

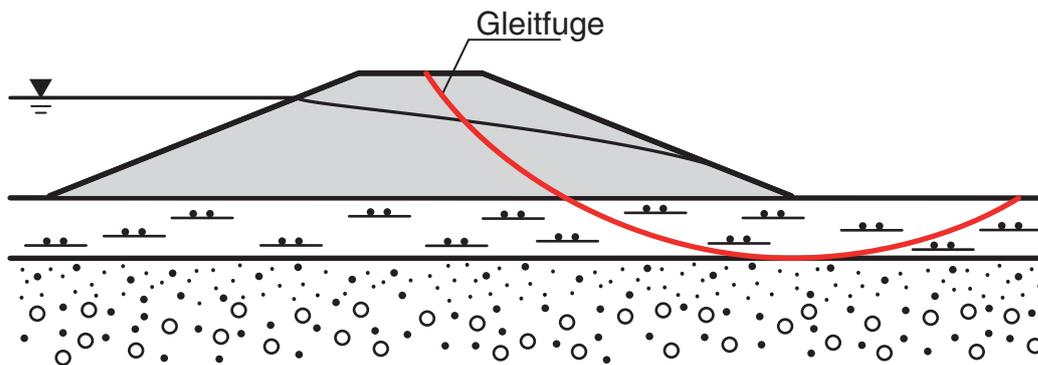
---

<sup>8</sup> Insbesondere bei Deichen mit wenig reibungsbegabtem Material im Deichuntergrund können auch Bruchmechanismen mit zusammengesetzten Bruchfiguren relevant werden. Solche Bruchmechanismen werden in dem hier entwickelten Modell jedoch nicht weiter vertieft.

Standsicherheitsuntersuchungen für homogene Deiche mit stationärem Durchströmungszustand hat sich gezeigt, dass die Streuungen um das lokale Minimum des Gleitkreismittelpunktes gering sind, so dass der verhältnismäßig hohe Rechenaufwand zur Findung des lokalen Minimums der Gleitfugengeometrie umgangen werden kann.

### 7.7.3 Böschungsbruch mit tiefliegender Gleitfuge (Böschungsgrundbruch)

Neben der Geometrie des Böschungsbruches, bei der die Gleitfuge innerhalb des Deichkörpers verläuft, wird in einem weiteren Mechanismus die Geometrie mit tiefliegender Gleitfuge untersucht. Beim *Böschungsgrundbruch* wird angenommen, dass die Gleitfuge im Bereich der Deichkrone endet und im Bereich des Böschungsfußpunktes die untere Schichtgrenze der i. d. R. gering durchlässigen Deckschicht berührt; zur Verdeutlichung dient Bild 7.14.

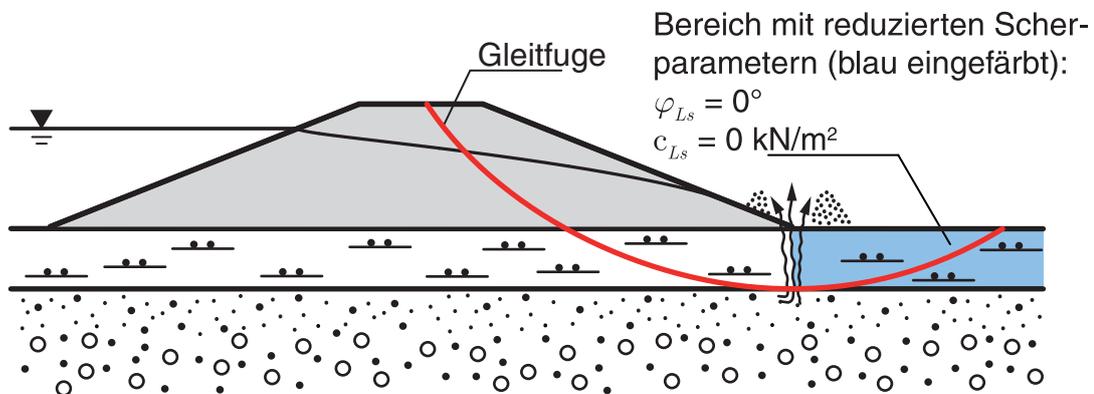


**Bild 7.14:** Prinzipskizze zum *Böschungsbruch mit tiefliegender Gleitfuge (Böschungsgrundbruch)* mit beispielhafter Darstellung einer möglichen Gleitfuge

Im Rechenmodell endet die Gleitfuge standardmäßig in der Mitte der Deichkrone, es sind jedoch auch andere Vorgaben bzw. Variationen der Gleitfugengeometrie möglich. Die Lage des Gleitkreismittelpunktes wird im Modell senkrecht über dem landseitigen Böschungsfußpunkt angenommen. Zur Ermittlung des Eigengewichtes der einzelnen Lamellen wird für den Bereich innerhalb der gering durchlässigen Deckschicht die Wichte unter Auftrieb herangezogen. Der Aquifer unterhalb der gering durchlässigen Deckschicht ist i. d. R. hydraulisch an das Fließgewässer angebunden, so dass die gering durchlässige Deckschicht bereits frühzeitig mit entsprechendem Wasserdruck beaufschlagt wird.

### 7.7.4 Böschungsgrundbruch mit reduzierten Scherparametern

Neben dem reinen *Böschungsgrundbruch* (vgl. Abschnitt 7.7.3) wird ein Szenario untersucht, bei dem es infolge des *Verlustes der Sicherheit gegen Aufschwimmen* sowie der *instationären Durchfeuchtung des Deichkörpers* zu einem Versagen der landseitigen Böschung kommt. Aufgrund des vorangegangenen *Verlustes der Sicherheit gegen Aufschwimmen* wird angenommen, dass das Bodenpaket der Deckschicht im Bereich des Deichhinterlandes durch nach oben strömendes Wasser bereits gestört ist und infolgedessen für die Gleitfuge in diesem Bereich kein Scherwiderstand des Bodens berücksichtigt wird:  $c_{Ls} = 0$ ,  $\varphi_{Ls} = 0$  (siehe hierzu Bild 7.15, eingefärbter Bereich).



**Bild 7.15:** Prinzipskizze zum *Böschungsgrundbruch mit reduzierten Scherparametern* (in der eingefärbten Fläche der gering durchlässigen Deckschicht) mit beispielhafter Darstellung einer möglichen Gleitfuge

Der Teil der Deckschicht hinter dem landseitigen Deichfußpunkt im Deichhinterland leistet folglich bei der Standsicherheitsbetrachtung der landseitigen Böschung keinen Beitrag auf der Seite der haltenden Kräfte, lediglich das Eigengewicht des Bodens wird als Auflast berücksichtigt. Insgesamt wird das Material der Deckschicht im Deichhinterland demnach wie „*schweres Wasser*“ behandelt, womit diese Annahme auf der sicheren Seite liegt.

Diese Vorgehensweise zur Überprüfung der Böschungsstandsicherheit mit tiefer Gleitfuge und reduzierten Scherparametern wird u. a. in den Niederlanden angewendet [TAW 2000], hier allerdings unabhängig von der Überprüfung der beiden o. g. Mechanismen. KÄRCHER ET AL. (2001) haben das Phänomen der verringerten Scherwiderstände in der Gleitfuge zwischen gering durchlässiger Deckschicht und darunter liegendem rolligen Aquifer bei den Deichbrüchen im Rahmen des Oderhochwassers 1997 beobachtet und verwenden einen vergleichbaren Ansatz für zusammengesetzte Bruchmechanismen.

Die Geometrie der Gleitfuge wird im Rechenmodell identisch zur Gleitfuge beim Mechanismus *Böschungsrundbruch* (siehe Abschnitt 7.7.3) gewählt. Unterschiedliche Ergebnisse für die Versagenswahrscheinlichkeit leiten sich aus der zusätzlichen Vorbedingung *Verlust der Sicherheit gegen Aufschwimmen* sowie den reduzierten Scherparametern der gering durchlässigen Deckschicht im landseitigen Bereich ab.

## 7.8 Deichverteidigungsmaßnahmen und menschliches Versagen

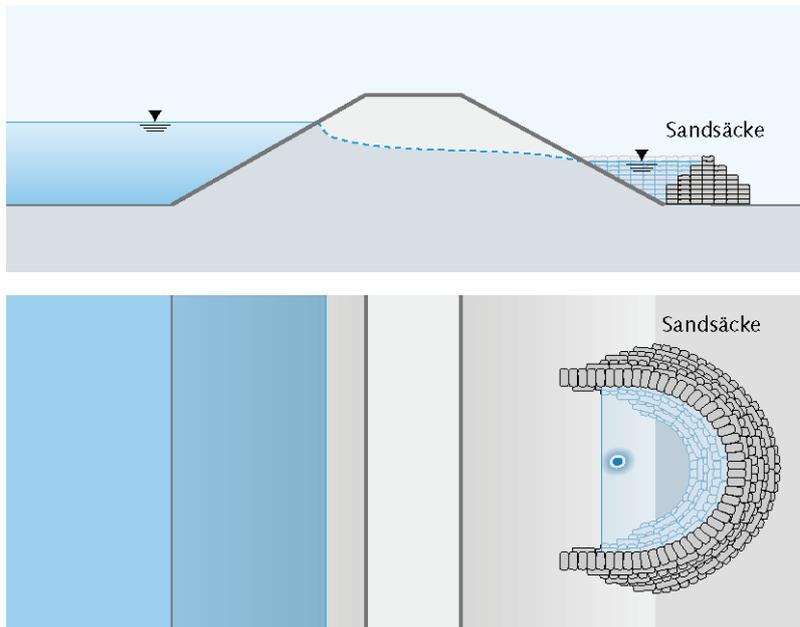
### 7.8.1 Technische Vorsorgemaßnahmen im Hochwasserfall

Bei einem Hochwasserereignis handelt es sich i. d. R. nicht um ein plötzliches Ereignis, das ohne Vorwarnung auftritt – zumindest nicht an größeren Fließgewässern. Gleichwohl bedeutet dies nicht, dass Ausmaß (Scheitelhöhe) und Ablauf (Hochwasser-Verlauf sowie Zeitpunkt des höchsten Wasserstandes) eines Hochwasserereignisses unbedingt im Voraus absehbar sind. Trotzdem bleibt häufig insbesondere im Unterlauf von Flüssen noch Gelegenheit, sich auf ein Hochwasser einzustellen. Zumindest sind in den meisten Fällen die Bewohner im Deichhinterland vor einem nahenden Hochwasser sensibilisiert und können sich bei einer entsprechenden Warnung individuell darauf einstellen.

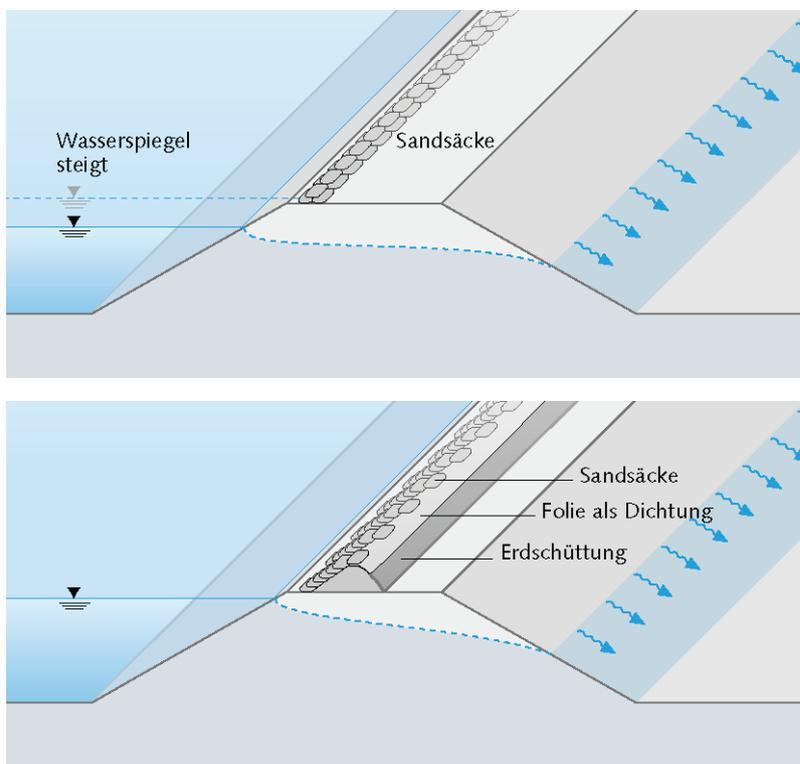
In den von Hochwasserereignissen betroffenen Regionen sind die Träger der Bau- und Unterhaltungslast (Deichverbände) für die Funktions- sowie die Betriebssicherheit der Schutzanlagen verantwortlich. Insbesondere für den Hochwasserfall sind organisatorische, materielle sowie betriebliche Vorkehrungen zu treffen [DWA 2011]. Im Eintretensfall sind erforderliche Maßnahmen in Abhängigkeit der ausgelösten Alarmstufe in den jeweiligen Alarm- und Katastrophenplänen geregelt. Beispielsweise übernehmen ab einem bestimmten Wasserstand Deichläufer (Deichwachen) die Beobachtung von Wasserstand und Deichen [LFU 2005, LFW 2003, RP DARMSTADT 2010]. Hiermit soll gewährleistet werden, dass Versagensformen, die sich ankündigen und beobachten lassen, rechtzeitig erkannt werden und ggf. Gegenmaßnahmen ergriffen werden können.

Besonderes Augenmerk ist zum einen auf den Wasserstand zu richten, um ein drohendes Überströmen der Deichkrone frühzeitig zu erkennen. Zum anderen muss im Deichhinterland auf austretendes Wasser (Qualmwasser) geachtet werden, das Erosionsprozesse im Deichuntergrund hervorrufen kann. Wirkungsvolle *Maßnahmen zur Deichverteidigung* beziehen sich beispielsweise auf den Bau von Quellkaden mit

Sandsäcken (siehe Bild 7.16) oder das Aufhöhen der Deichkrone (siehe Bild 7.17). Darüber hinaus sind weitere Sofortmaßnahmen für verschiedene Schadensfälle bekannt und z. B. in LFU (2005) und LFW (2003) erläutert.



**Bild 7.16:** Sicherung mittels Eideichung um einen Wasseraustritt: Querschnitt (oben) und Draufsicht (unten), aus LFW (2003)



**Bild 7.17:** Beispiele für Deichverteidigung durch eine Aufhöhung der Deichkrone mit Sandsäcken (oben) und Erdschüttung (unten), aus LFW (2003)

Voraussetzung, zumindest aber eine Erleichterung, für eine funktionierende Deichverteidigung ist häufig der Deichverteidigungsweg (DVW). Hierbei handelt es sich in der Regel um befestigte Wege am landseitigen Deichfuß, der idealerweise erhöht auf

einer Auflastberme errichtet wird. Der DVW soll gewährleisten, dass im Hochwasserfall und bei ggf. aufgeweichtem Boden im Deichhinterland die Zuwegung mit schwerem Gerät zu Zwecken der Deichverteidigung (z. B. dem Transport von Sandsäcken) möglich ist. Die Auflastberme bewirkt eine Verlängerung des Sickerweges im Aquifer, was sich günstig auf die Verringerung des hydraulischen Potentials auswirkt und die Gefahr des Verlustes der Sicherheit gegen Aufschwimmen verringert. Darüber hinaus kann die Auflastberme als Dränfilter am landseitigen Deichfuß ausgebildet werden, so dass das Sickerwasser, das ggf. auf der landseitigen Böschung aus dem Deichkörper austritt, in dem Filter schadlos abgeführt werden kann. KÄRCHER ET AL. (1997) weisen quantitativ nach, wie sich hierdurch die Standsicherheit der landseitigen Böschung erhöht.

### 7.8.2 Monitoring und menschliches Versagen

Voraussetzung für eine folgerichtige Entscheidung hinsichtlich der Deichverteidigung ist die Beobachtung des Ablaufes des Hochwassers sowie die Beurteilung der Situation vor Ort. Diese Kompetenz kann trotz vielfältiger Unterstützung technischer Art nur von Personal ausgefüllt werden. Doch wo sachkundige Menschen handeln, passieren Fehler, was zu Fehleinschätzungen einer Situation und infolgedessen zur nicht optimalen Deichverteidigung führen kann. Oder erste Anzeichen für Erosion werden übersehen, so dass der weitere Verlauf eines Versagens ungehindert eintreten kann. Dies gilt umso mehr, wenn keine hinreichenden Unterlagen zum Bestand der jeweiligen Deichstrecke vorliegen.

Folglich kann menschliches Handeln die Versagenswahrscheinlichkeit beeinflussen, sowohl in die eine als auch in die andere Richtung. *Menschliches Versagen* oder Bedienfehler werden in drei Kategorien unterteilt [SCHMIDT ET AL. 2008]:

- *Unterlassung*: Die gewünschte Handlung wird nicht durchgeführt.
- *Fehlverhalten*: Die gewünschte Handlung wird nicht korrekt durchgeführt.
- *Fehlleistung*: Es wird eine nicht gewünschte Handlung durchgeführt.

Bei der Deichverteidigung treten hauptsächlich die *Unterlassung* sowie das *Fehlverhalten* auf. Eine *Fehlleistung* kommt insbesondere bei der Bedienung von Bauwerken in Deichen in Betracht, die allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden (siehe hierzu Abschnitt 7.9). Für den in dieser Arbeit diskutierten homogenen Erddeich ergeben sich nur geringe Einflussmöglichkeiten menschlichen

Versagens. Der Fehler der *Unterlassung* schädigt i. d. R. den Deich nicht, sondern verhindert lediglich, dass zusätzliche Schutzmaßnahmen getroffen werden.

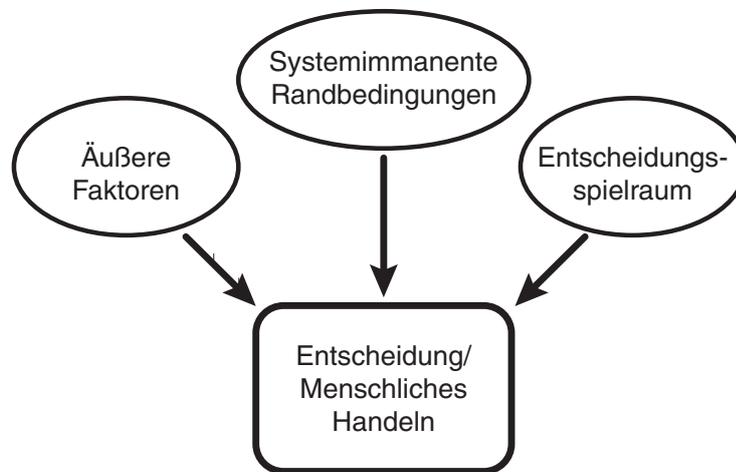
Für die Einbeziehung menschlichen Handelns und hieraus resultierender möglicher Fehler in die Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit muss die Schnittstelle scharf abgegrenzt sein. Der Faktor Mensch stellt vielmehr einen nicht weiter zerlegbaren Einfluss dar, dessen Ausfallwahrscheinlichkeit jedoch nicht messbar ist und wofür keine direkte mathematische Formulierung existiert. Möglichkeiten zur Ableitung einer quantitativen Aussage bestehen z. B. in der Annäherung über Datenbanken, die auf psychologischen Tests beruhen, über Zwischenfall-Beschreibungen oder Simulator-Trainings. Grundlage solcher Untersuchungen sind üblicherweise vorgegebene Schemata, bei denen die Abweichung vom idealen Verhalten geprüft wird. Hieraus gewonnene Erkenntnisse sind nur eingeschränkt auf das menschliche Handeln bei der Deichverteidigung übertragbar. Viele äußere Faktoren wie z. B. Sichtbehinderungen (Bewuchs, Dunkelheit, Niederschläge...) können das Ergebnis des menschlichen Handelns beeinflussen. Daneben kann aber auch der große Spielraum bei der Beurteilung zu stark unterschiedlichen Ergebnissen führen: „*Handelt es sich um Anzeichen von Erosion oder nicht? Reicht es, die Stelle weiter zu beobachten oder muss eine Meldung abgesetzt werden, um ggf. weitere Maßnahmen einzuleiten? ...*“

Um einerseits freiwillige als auch professionelle Kräfte für die Deichüberwachung zu schulen und zu trainieren sowie andererseits Informationen über Verhalten und Entscheidungsfindung bei der Deichüberwachung zu erhalten, wird in den Niederlanden die Computer-Simulation *Levee Patroller* entwickelt und erfolgreich eingesetzt [HARTEVELD 2008]. Weitere Erkenntnisse, wie menschliches Verhalten bei der Deichverteidigung zu bewerten ist, lassen sich bisher aus den Untersuchungen noch nicht ableiten [HARTEVELD ET AL. 2010].

Die Randbedingungen, die für die Bewertung und Berücksichtigung menschlichen Handelns erforderlich sind, betreffen das gesamte System der Deichverteidigung im Hochwasserfall. Für das oben angeführte Beispiel der Kontrolle der Deiche auf Anzeichen von Wasseraustritt auf der landseitigen Böschung oder von Erosionserscheinungen im Untergrund ist beispielsweise die Häufigkeit der Kontrollen relevant. Hiervon hängt ab, wie viel Reaktionszeit für das menschliche Handeln verbleibt. Zunächst einmal ist der Mensch gefordert, eine Entscheidung zu fällen und geeignete Gegenmaßnahmen einzuleiten. Diese Entscheidung wird von systemimmanenten Randbedingungen beeinflusst:

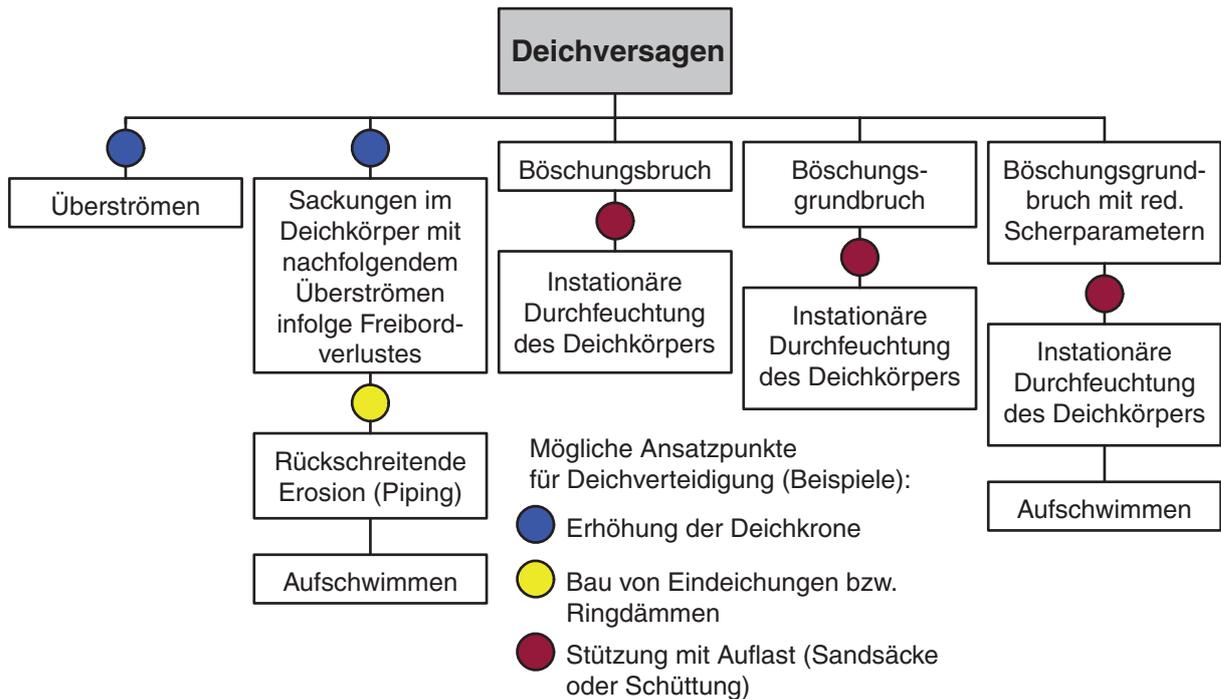
- Welche Maßnahmen können prinzipiell ergriffen werden?
- Stehen hierfür benötigte Ressourcen zur Verfügung?
- Welcher Zeitrahmen steht für Gegenmaßnahmen zur Verfügung?
- Kann die geeignete Maßnahme innerhalb dieses zeitlichen Rahmens durchgeführt werden?

Die Zusammenhänge der oben aufgezeigten unterschiedlichen Einflussfaktoren, die menschliches Handeln und eine Entscheidung im Rahmen von Deichverteidigungsmaßnahmen beeinflussen können, sind in Bild 7.18 schematisch veranschaulicht.



**Bild 7.18:** Einflussfaktoren auf menschliches Handeln im Kontext der Deichverteidigung

Eine Auswahl denkbarer Ansatzpunkte für die Berücksichtigung von menschlichen Eingriffen zur Deichverteidigung sind in Anlehnung an ZESCH ET AL. (2007b) in den *Fehlerbaum für Flussdeiche* in Bild 7.19 ergänzend eingetragen.



**Bild 7.19:** Fehlerbaum für Flussdeiche mit möglichen Ansatzpunkten für Deichverteidigungsmaßnahmen, in Anlehnung an ZESCH ET AL. (2007b)

Ein einfaches Beispiel für den Versagensast *Überströmen* soll den zusätzlichen Informationsbedarf zur Quantifizierung von menschlichen Eingriffen aufzeigen. Um das Überströmen der Deichkrone zu verhindern, ist das Aufhöhen der Deichkrone mit Sandsäcken, wie in Bild 7.17 dargestellt, eine gängige Maßnahme. Um den Erfolg dieser Maßnahme bewerten zu können, sind u. a. Kenntnisse zu folgenden Parametern notwendig:

- Auf welche Länge ist die Deichstrecke von der Überströmung bedroht?
- Um welches Maß übertrifft die prognostizierte Scheitelhöhe der Hochwasserwelle die Deichkrone? Zusammen mit der Abschätzung der betroffenen Deichstreckenlänge kann die Dimension der Maßnahme zur Aufhöhung der Deichkrone abgeschätzt werden.
- Wann ist mit dem Beginn des Überströmens zu rechnen und wann wird der Scheitel der Hochwasserwelle eintreffen? Dahinter steht die Frage, wie viel Reaktionszeit verbleibt und bis zu welchem Zeitpunkt die Aufhöhung der Deichkrone erfolgt sein muss.
- Fragen nach Anzahl vorhandener bzw. beschaffbarer Sandsäcke, Verfügbarkeit und Transportmöglichkeiten von Einsatzkräften sowie Material etc. greifen tief in die Logistik und Hierarchien des Katastrophenmanagements ein, das in solchen Fällen häufig zuständig ist.

### 7.8.3 Folgerungen für das entwickelte Modell

Anhand der aufgeworfenen Fragen soll verdeutlicht werden, welcher umfassende zusätzliche Informationsbedarf besteht, um den Einfluss von Deichverteidigungsmaßnahmen zu quantifizieren. Allerdings lassen sich die Randbedingungen nicht gänzlich quantifizieren, insbesondere verbleibt ein maßgeblicher Teil an Unsicherheit durch den Einfluss menschlichen Handelns. Darüber hinaus gibt es große regionale Unterschiede bei der Übertragung von Kompetenzen sowie bei den vorgesehenen Abläufen von Schutzmaßnahmen im Hochwasserfall. Solche Unterschiede können zu veränderten Ergebnissen führen, weshalb ihre Modellierung für den allgemein gültigen Fehlerbaum für Flussdeiche nicht sinnvoll erscheint.

Darüber hinaus ist nach den Ausführungen in Abschnitt 3.3 zu beachten, dass der Detaillierungsgrad der einzelnen Versagensäste abzustimmen ist. Hieraus folgt, dass Maßnahmen zur Deichverteidigung möglichst in allen dargestellten Ansatzpunkten einzuführen sind. Dies stellt einen erheblichen Mehraufwand sowohl für die Implementierung als auch für die Anwendung dar. Bisher wurden diese Ansätze bei der Bestimmung von Versagenswahrscheinlichkeiten nicht berücksichtigt; sie führen zum jetzigen Zeitpunkt jedoch zu weit und werden daher in dem Modell, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, nicht eingesetzt.

## 7.9 Weitere Versagensmechanismen

Neben den in den Abschnitten 7.2 bis 7.7 erläuterten sowie den im *Fehlerbaum für Flussdeiche* aufgeführten Versagensmechanismen sind weitere Versagensmechanismen für Flussdeiche denkbar.

Bisher wurden die Versagensmechanismen für einen aus Erdstoffen homogen aufgebauten Deich erläutert. Hierbei wird außer Acht gelassen, dass vielerorts Bauwerke wie z. B. Leitungen oder Schleusen in den Deichstrecken vorhanden sind, die eine besondere Gefährdung darstellen können. Insbesondere an „*verborgenen*“ Bauwerken wie z. B. (querende) Leitungen können Erosionsprozesse begünstigt werden.

FOSTER & FELL (2000) berichten, dass bei einer Untersuchung von Versagensursachen in den Fällen, in denen Leitungen vorhanden waren, das Versagen von Erdbauwerken auf die Leitungen zurückgeführt werden konnte. Häufig ist die genaue Lage oder – noch gravierender – die Existenz solcher Leitungen nicht (mehr)

ausreichend bekannt, so dass diesen Schwachstellen nicht unbedingt die nötige Aufmerksamkeit zuteil werden kann. Nicht nur deswegen sind nach den neueren Regelwerken querende Leitungen im Bereich von Deichen möglichst zu vermeiden [DWA 2011]. Neben Leitungen kann auch der Anschlussbereich von festen Berandungen an den Deich, z. B. bei Durchlassbauwerken, den Ausgangspunkt für Fugenerosion darstellen und bedarf einer besonderen Überwachung.

Nicht zuletzt können auch die Deichbauwerke wie z. B. Schleusen oder Siele an sich versagen oder Quelle für menschliches Versagen (siehe Abschnitt 7.8) sein. Um ein technisches Versagen weitgehend auszuschließen, sind daher Bauwerke in Deichen zur Steigerung ihrer Zuverlässigkeit mit redundanten Sicherheitssystemen auszurüsten [DWA 2011].

Neben den genannten Ursachen konnten HORLACHER ET AL. (2005) auch Störungen in der Deichstruktur durch biologische Ursachen wie beispielsweise Bewuchs und Wühltiere als Versagensursache von Deichen zuordnen. Darüber hinaus können auch anderweitige Fremdnutzungen, z. B. Fahrradwege, die Deichstruktur schwächen und ein Versagen im Hochwasserfall begünstigen. Insbesondere, wenn die Grasnarbe der Böschungen geschwächt wird, können solche Fehlstellen Ansatzpunkte für Erosion sein, die im weiteren Verlauf zum Versagen des Deiches führen können.

Weiterhin sind Versagensmechanismen denkbar, die auf Schädigungen der Deiche infolge außergewöhnlicher Ereignisse wie z. B. Schiffsanprall, Vandalismus oder Krieg zurückzuführen sind. Diese letztgenannten und außergewöhnlichen Ereignisse sind bisher nicht durch Modelle erfasst. Da solche Ereignisse extrem selten auftreten, werden sie für die Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit nicht berücksichtigt, zumal sie jeweils spezifische Handlungserfordernisse bedingen.

Die in diesem Kapitel angeführten Versagensmechanismen gehen weit über das Ziel hinaus, ein umfassendes Bewertungskonzept aufzuzeigen, mit dem die Bestimmung von Versagenswahrscheinlichkeiten für Flussdeiche möglich wird. Hierbei liegt zunächst die Konzentration auf der Ausarbeitung sowie Erweiterung bekannter und anerkannter Zusammenhänge. Sonderfälle wie Bauwerke in Deichen können nicht ohne Weiteres in die unter Kapitel 7 aufgeführten Versagensmechanismen eingeordnet werden. Für sonstige Versagensmechanismen infolge außergewöhnlicher Ereignisse lassen sich mit derzeitigem Kenntnisstand keine belastbaren Aussagen zu möglichen Versagensabläufen ableiten. Aufgrund des individuellen Verhaltens werden solche Ereignisse im *Fehlerbaum für Flussdeiche* nicht betrachtet.

In Tabelle 7.1 werden die Versagensmechanismen, die in dem hier vorgestellten Modell keine Berücksichtigung finden, mit einer kurzen Begründung für den Verzicht zusammengestellt. Weitergehende Hinweise zur Berücksichtigung dieser Versagensmechanismen finden sich in Abschnitt 9.4.6.

**Tabelle 7.1:** Zusammenstellung der im hier vorgestellten Modell nicht berücksichtigten Mechanismen

Nicht berücksichtigte Mechanismen	Begründung für den Verzicht
Deichverteidigung	Viele Randbedingungen mit folglich hohem Modellierungsaufwand
Zonierter Deichaufbau	
Bauwerke im Deich	
Menschliches Versagen	Nur eingeschränkt quantitative Aussagen möglich
Biologische Ursachen	Nur quantitative Aussagen möglich
Vorschädigungen	
Außergewöhnliche Ereignisse	Extrem seltenes Auftreten und im Vergleich dazu hoher Modellierungsaufwand

## 8 Anwendung der probabilistischen Bewertung an einem Beispieldeich

### 8.1 Einführung und Beschreibung des Beispieldeiches

#### 8.1.1 Einführung

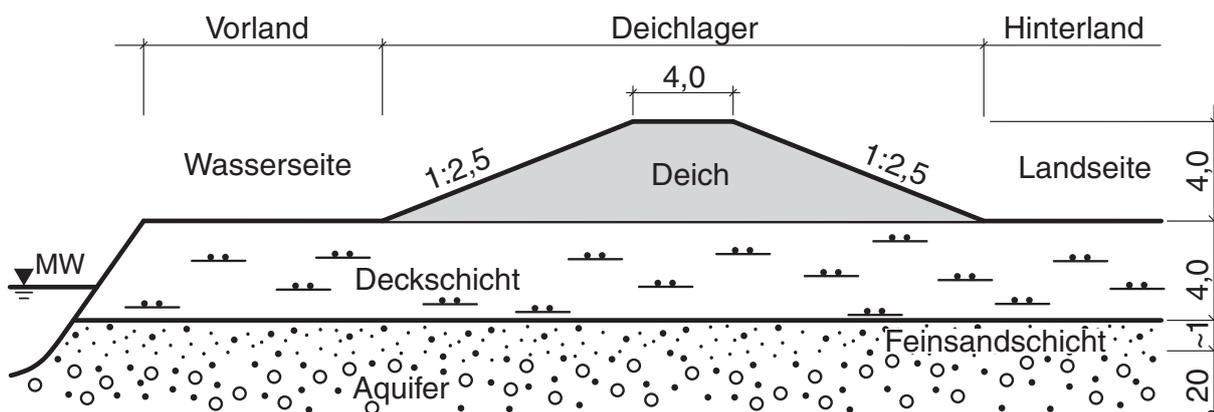
In den vorangegangenen Kapiteln wurde ein probabilistisches Rechenmodell zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit von Flussdeichen vorgestellt. In diesem Kapitel wird nun die Anwendung des entwickelten Modells erläutert. Konkret wird der Parametersatz für einen Beispieldeich vorgestellt und hiermit die probabilistische Bewertung durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen werden dargestellt und diskutiert. Im nächsten Schritt wird die Sensitivität des entwickelten Modells untersucht. Hierfür wird das Modell im Einzelnen hinsichtlich der folgenden Eigenschaften untersucht:

- Einfluss der Streubreite des Parameters *hydraulische Durchlässigkeit des Deichmaterials* (siehe Abschnitt 8.3),
- Einfluss der statistischen Abhängigkeit von Parametern am Beispiel des Parameters *hydraulische Durchlässigkeit des Deichuntergrundes* (siehe Abschnitt 8.4),
- Beeinflussung durch unterschiedliche Berechnungsmethoden für den Mechanismus *Piping* in Abhängigkeit der Datengrundlage (siehe Abschnitt 8.5),
- Einfluss des neu entwickelten Mechanismus *Sackungen im Deichkörper mit nachfolgendem Überströmen infolge Freibordverlustes* (siehe Abschnitt 8.6) sowie
- Einfluss der neu entwickelten Mechanismen der *instationären Durchfeuchtung des Deichkörpers* (siehe Abschnitt 8.7).

### 8.1.2 Beschreibung des Beispieldeiches

Bei dem im Weiteren verwendeten Beispieldeich handelt es sich um einen fiktiven Deichquerschnitt. Die für den Beispieldeich verwendeten Parameter hinsichtlich Geometrie und Materialeigenschaften sind an die Verhältnisse der Hochwasserschutzdeiche am Niederrhein angelehnt.

Der Beispieldeich besitzt eine Höhe von 4 m und auf der Wasserseite sowie auf der Landseite eine Böschungsneigung von 1:2,5. Mit einer Kronenbreite von 4 m ergibt sich eine Breite des Deichlagers von 24 m. Die gering durchlässige Deckschicht weist eine Mächtigkeit von 4 m auf und wird von einem ca. 20 m mächtigen Lockergesteins-Aquifer unterlagert. Hierbei wird eine 1 m mächtige Feinsandschicht direkt unterhalb der gering durchlässigen Deckschicht angenommen. Die Geometrie des Beispieldeiches ist in Bild 8.1 dargestellt.



**Bild 8.1:** Geometrie und Untergrundaufbau des Beispieldeiches (nicht maßstäblich)

Die geometrischen Parameter des Deiches werden als deterministische Eingangsgrößen aufgefasst. Es ist davon auszugehen, dass beim Bau des Deiches die geplanten Abmessungen eingehalten wurden, bzw. dass bei Altdeichen entsprechende Vermessungsdaten vorliegen, deren Streuung keine relevante Größenordnung annehmen.

Im Gegensatz dazu werden die Werte der Schichtmächtigkeiten im Untergrund variiert, da einerseits über den genauen Verlauf der Schichtgrenzen häufig nicht genügend Informationen vorliegen und andererseits für die Schichtmächtigkeiten aufgrund der natürlichen Variabilität eine Streuung anzunehmen ist.

Für deterministische Größen entfällt die Angabe eines Variationskoeffizienten (vgl. Abschnitt 5.3), der Mittelwert ist hier als Eingangswert zu verstehen. Die Daten für

die Geometrie des Beispieldeiches sowie für die Schichtmächtigkeiten im Untergrund werden in nachfolgender Tabelle 8.1 aufgelistet.

**Tabelle 8.1:** Geometrische Daten des Deiches

Parameter	Verteilungstyp	Einheit	Mittelwert	Variationskoeffizient
Kronenhöhe	Deterministisch	mNN	21,2	-
Böschungsneigung (Wasserseite)	Deterministisch	-	1:2,5	-
Böschungsneigung (Landseite)	Deterministisch	-	1:2,5	-
Deichlagerbreite	Deterministisch	m	24	-
Vorlandbreite	Deterministisch	m	21	-
Geländeoberkante (Landseite)	Deterministisch	mNN	17,2	-
Mächtigkeit Deckschicht	Normal	m	4	0,3
Mächtigkeit Aquifer	Normal	m	20	0,1
Mächtigkeit Feinsandschicht	Normal	m	1	0,1

Die meisten der geotechnischen Parameter werden als normalverteilt angenommen. Dies trifft sowohl auf den natürlichen Untergrund als auch auf den Deichkörper zu. Lediglich für die Parameter der Durchlässigkeit von Deich und Untergrund wird eine Lognormal-Verteilung zugrunde gelegt. Andernfalls könnten aufgrund der breiten Streuung dieser Parameter bei der Wertegenerierung im Rahmen der Monte-Carlo-Simulation Werte  $< 0$  erzeugt werden, die physikalisch nicht möglich und daher auszuschließen sind. Dadurch würde z. B. eine Normalverteilung bei Null abgeschnitten.

In Tabelle 8.2 sind die Materialparameter für den Beispieldeich mit den verwendeten Mittelwerten sowie den Variationskoeffizienten aufgelistet.

Tabelle 8.2: Materialeigenschaften des Deiches

Parameter	Verteilungstyp	Einheit	Mittelwert	Variationskoeffizient
Wichte (feucht)	Normal	kN/m <sup>3</sup>	17	0,05
Wichte (Auftrieb)	Normal	kN/m <sup>3</sup>	10	0,05
Reibungswinkel	Normal	°	22	0,12
Kohäsion	Normal	kN/m <sup>2</sup>	6	0,3
Durchlässigkeit Deich	Lognormal	m/s	8,5*10 <sup>-5</sup>	0,5
Luftporenanteil	Normal	-	0,26	0,05
Matrixpotential	Normal	m	0,2	0,1

Für die gering durchlässige Deckschicht gehen die in Tabelle 8.3 dargestellten Materialparameter in die Berechnungen zur Versagenswahrscheinlichkeit ein.

Tabelle 8.3: Materialeigenschaften der gering durchlässigen Deckschicht

Parameter	Verteilungstyp	Einheit	Mittelwert	Variationskoeffizient
Wichte (feucht)	Normal	kN/m <sup>3</sup>	19	0,05
Wichte (Auftrieb)	Normal	kN/m <sup>3</sup>	10	0,05
Reibungswinkel	Normal	°	25	0,18
Kohäsion	Normal	kN/m <sup>2</sup>	12	0,4

Für den Aquifer unterhalb der gering durchlässigen Deckschicht werden die folgenden Materialparameter angesetzt (siehe Tabelle 8.4):

Tabelle 8.4: Materialeigenschaften des Aquifers

Parameter	Verteilungstyp	Einheit	Mittelwert	Variationskoeffizient
Korndichte	Normal	kg/m <sup>3</sup>	2700	0,05
Korndurchmesser $d_{70}$	Lognormal	mm	0,155	0,23
Ungleichförmigkeit	Normal	-	1,5	0,15
Durchlässigkeit Aquifer	Lognormal	m/s	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,5
Porenanteil	Normal	-	0,41	0,01
Hydr. Druckabbau	Lognormal	m/100m	0,3	0,3
Rollwiderstandswinkel	Lognormal	°	41	0,05
Schleppkraftkoeffizient	Lognormal	-	0,25	0,1
Koeffizient nach Lane	Normal	-	6	0,15

Neben den Materialeigenschaften der jeweiligen Böden werden zusätzliche allgemeine Parameter benötigt, die in Tabelle 8.5 dargestellt sind:

Tabelle 8.5: Zusätzliche allgemeine Parameter

Parameter	Verteilungstyp	Einheit	Mittelwert	Variationskoeffizient
Wasserstandshöhe	Exponential	mNN	17,993	0,0259
Aufstaudauer	Normal	h	150	0,1
Sackungsfaktor	Lognormal	-	0,6	0,1
Dichte Wasser	Deterministisch	kg/m <sup>3</sup>	1000	-
Kinematische Viskosität	Deterministisch	m <sup>2</sup> /s	$1,31 \cdot 10^{-6}$	-
Dynamische Viskosität	Deterministisch	kg/sm	$1,31 \cdot 10^{-3}$	-

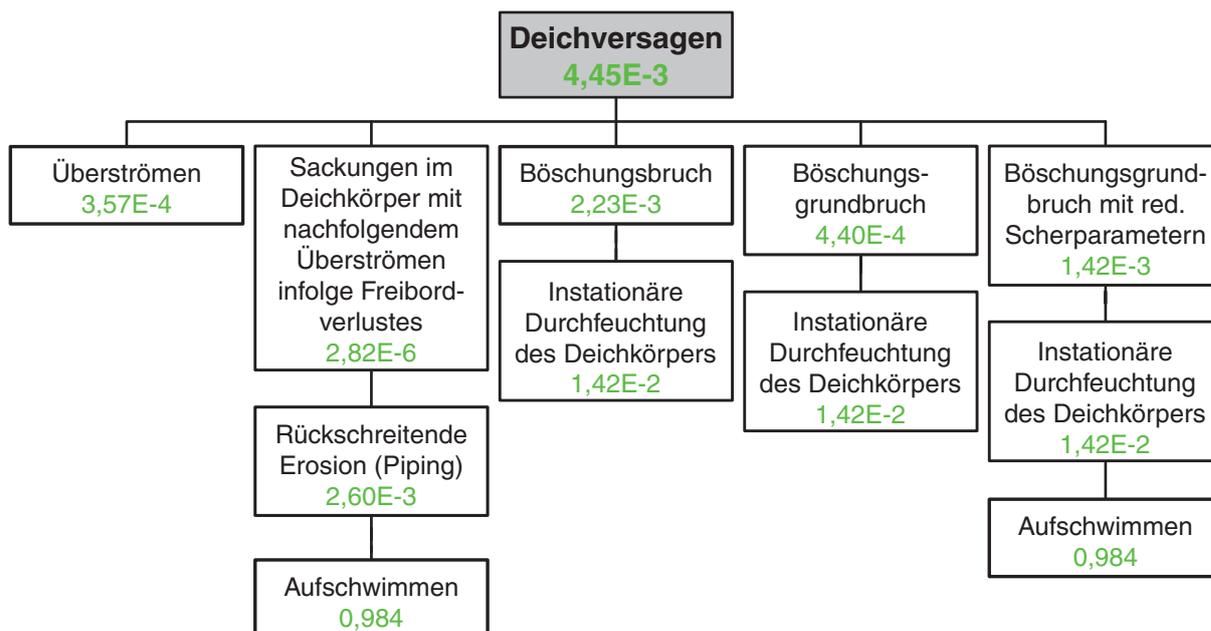
## 8.2 Deichversagen in der Ausgangssituation

An dem in Abschnitt 8.1 vorgestellten Beispieldeich werden Versagenswahrscheinlichkeiten verschiedener Szenarien ermittelt und die Ergebnisse im Folgenden diskutiert. Das Gesamtergebnis der Berechnungen ist hierbei lediglich zur Einschätzung der Größenordnung der Versagenswahrscheinlichkeit zu betrachten. Die folgenden Untersuchungen sollen den Einfluss von Veränderungen der Parameter und Mechanismen auf das Gesamtergebnis darstellen, weshalb ausdrücklich keine Absolutwerte für die Versagenswahrscheinlichkeiten angegeben werden, sondern resultierende Veränderungen vielmehr grafisch dargestellt und in der Diskussion erörtert werden.

Zunächst wird die Ausgangssituation mit den in Abschnitt 8.1 beschriebenen Parametern und den dort angegebenen stochastischen Kennwerten entsprechend dem in Abschnitt 6.3 beschriebenen Algorithmus berechnet. Mit jedem Parametersatz werden 1 Mio. Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt, um auch geringe Versagenswahrscheinlichkeiten mit hinreichender Genauigkeit angeben zu können. (Nach Gleichung (3.2) in Abschnitt 3.4 folgt z. B. für den Böschungsgrundbruch mit einer Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f = 4,4 \cdot 10^{-4}$  bei 1 Mio. Rechendurchläufen eine Unsicherheit des Ergebnisses von ca. 5 %.) Darüber hinaus gelten die folgenden Annahmen für die Berechnung:

- Bei der Bestimmung der Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten wird die Abhängigkeit der Mechanismen berücksichtigt (sogenannte *gekoppelte Betrachtung*, siehe Abschnitt 6.1).
- Die Grenzzustandsgleichung für den Mechanismus *Piping* wird nach *Weijers & Sellmeijer* verwendet (siehe Abschnitt 7.4).
- Der Parameter *Durchlässigkeit des Deichkörpers* wird direkt angegeben (siehe Abschnitt 8.4.3).

In Bild 8.2 ist der *Fehlerbaum für Flussdeiche* mit den auf dieser Grundlage ermittelten Versagenswahrscheinlichkeiten der in Kapitel 7 beschriebenen Mechanismen dargestellt. Hiermit ergibt sich eine Gesamtversagenswahrscheinlichkeit für *Deichversagen* aufgrund der oben beschriebenen Ausgangssituation von 0,004448 pro Jahr bzw. eine Jährlichkeit von 225 Jahren.

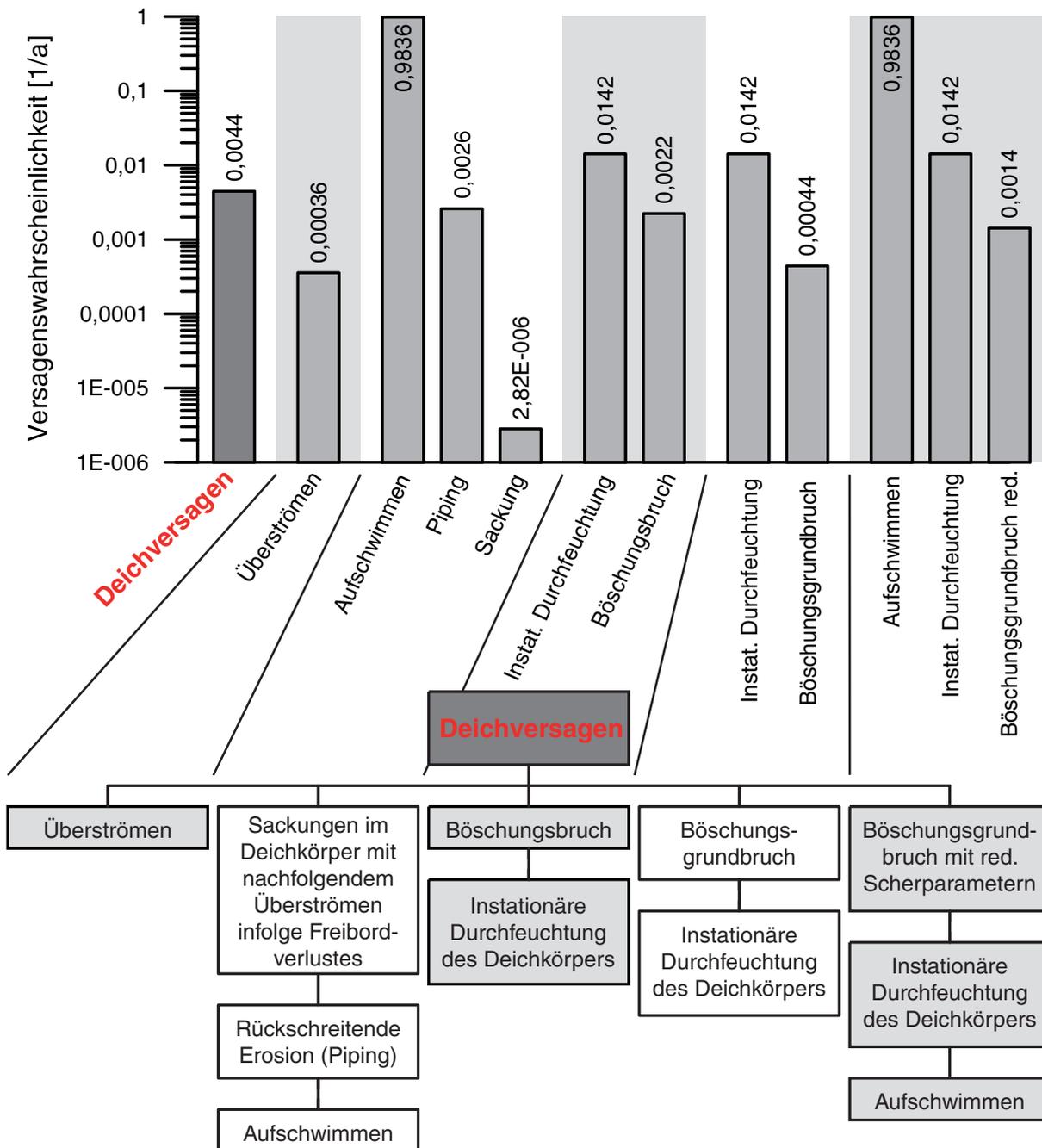


**Bild 8.2:** Fehlerbaum für Flussdeiche mit Angabe Versagenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Mechanismen für die Ausgangssituation auf der Grundlage von 1 Mio. Rechendurchläufen

Beim Vergleich der Ergebnisse für die einzelnen Mechanismen fällt auf, dass der Mechanismus *Verlust der Sicherheit gegen Aufschwimmen* die höchste Versagenswahrscheinlichkeit besitzt und diese nahezu zwei Zehnerpotenzen über dem zweithäufigsten Versagensfall *Instationäre Durchfeuchtung des Deichkörpers* liegt. Dem gegenüber steht der Mechanismus mit der mit Abstand geringsten Versagenswahrscheinlichkeit: *Sackungen im Deichkörper*, die nahezu 6 Zehnerpotenzen geringer ausfällt.

Die Versagenswahrscheinlichkeiten der drei untersuchten Böschungsversagen (*Böschungsbruch*, *Böschungsgrundbruch* sowie *Böschungsgrundbruch mit reduzierten Scherparametern*) liegen relativ nah beieinander. Darunter hat das einfache *Böschungsversagen* die größte Versagenswahrscheinlichkeit ( $2,23 \cdot 10^{-3}$ ), der *Böschungsgrundbruch* die geringste ( $1,42 \cdot 10^{-3}$ ).

Die Versagenswahrscheinlichkeiten für alle Mechanismen sind in Bild 8.3 vergleichend in einem Balkendiagramm dargestellt. Der erste dunkel eingefärbte Balken gibt die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit für die Ausgangssituation wieder. Um die Unterschiede im Betrag der Versagenswahrscheinlichkeiten kenntlich zu machen, ist die Ordinate mit logarithmischem Maßstab dargestellt.



**Bild 8.3:** Darstellung der Versagensmechanismen mit ihren Versagenswahrscheinlichkeiten für die Ausgangssituation des Beispieldeiches im Balkendiagramm mit logarithmischem Maßstab sowie der zugehörigen Äste im Fehlerbaum

Bei der Betrachtung der Versagenswahrscheinlichkeiten fällt auf, dass die Versagenswahrscheinlichkeit der *Sicherheit gegen Aufschwimmen* nahe bei eins liegt, was bedeutet, dass es rechnerisch bei nahezu jedem Hochwasserereignis im Modell zu einem Aufbruch der landseitigen Deckschicht kommt. Wie bereits oben dargestellt (Abschnitt 7.3), ist das Versagen der *Sicherheit gegen Aufschwimmen* für sich alleine betrachtet noch kein Grund für ein Versagen des gesamten Deichsystems, es kann jedoch den entscheidenden Anstoß dazu liefern. Auf der anderen Seite tritt der

Versagensfall der *Sackungen mit nachfolgendem Überströmen* im vorliegenden Fall ausgesprochen selten auf.

Sofern die Ergebnisse beispielsweise genutzt werden sollen, um über Maßnahmen zur Erhöhung der Hochwassersicherheit des dargestellten Deiches zu entscheiden, ist vorrangig das Augenmerk auf den *Verlust der Sicherheit gegen Aufschwimmen* zu legen.

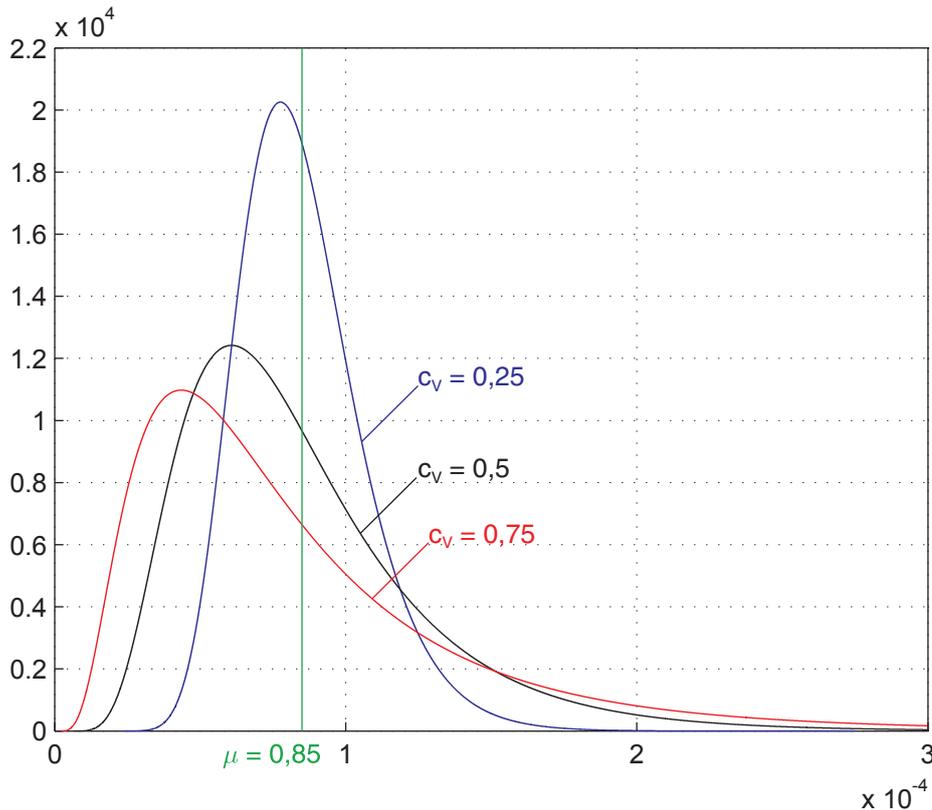
### 8.3 Einfluss der Streubreite von Parametern am Beispiel des Parameters hydraulische Durchlässigkeit des Deiches

Die Parameter, die im Rahmen der probabilistischen Bewertung variiert werden, sind durch Angabe des Mittelwertes sowie des Variationskoeffizienten mit dem zugehörigen Verteilungstyp gekennzeichnet. Hierbei dient der Variationskoeffizient als relativer Wert für Vergleiche der Unsicherheit verschiedener Parameter.

Von den verwendeten Parametern ist der hydraulischen Durchlässigkeit die größte Unsicherheit zuzuordnen (siehe Abschnitt 5.2). Sowohl für die Durchlässigkeit des Deiches als auch für die Durchlässigkeit des Untergrundes wird ein Variationskoeffizient  $c_V = 0,5$  verwendet, um die verhältnismäßig große Unsicherheit des Parameters abzubilden.

Im Folgenden soll untersucht werden, inwieweit sich die Unsicherheit des Parameters *hydraulische Durchlässigkeit des Deichmaterials* auf die Versagenswahrscheinlichkeit einzelner Mechanismen sowie auf die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Deiches auswirkt. Darüber hinaus soll geklärt werden, ob sich eine präzisere Bestimmung der Durchlässigkeit mit einer geringeren Unsicherheit im Ergebnis der Versagenswahrscheinlichkeit niederschlägt. Hierfür werden Untersuchungen für die Durchlässigkeit des Deichmaterials angestellt.

Die Durchlässigkeit des Deichmaterials wird in der oben beschriebenen Ausgangssituation mit  $k_f(\text{Deich}) = 8,5 \cdot 10^{-5}$  m/s angegeben. Für den Parameter wird eine Lognormalverteilung angenommen. Untersucht werden soll der Einfluss von Variationskoeffizienten  $c_V = 0,25$  sowie  $c_V = 0,75$ . Die zugehörigen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen sind in Bild 8.4 dargestellt.

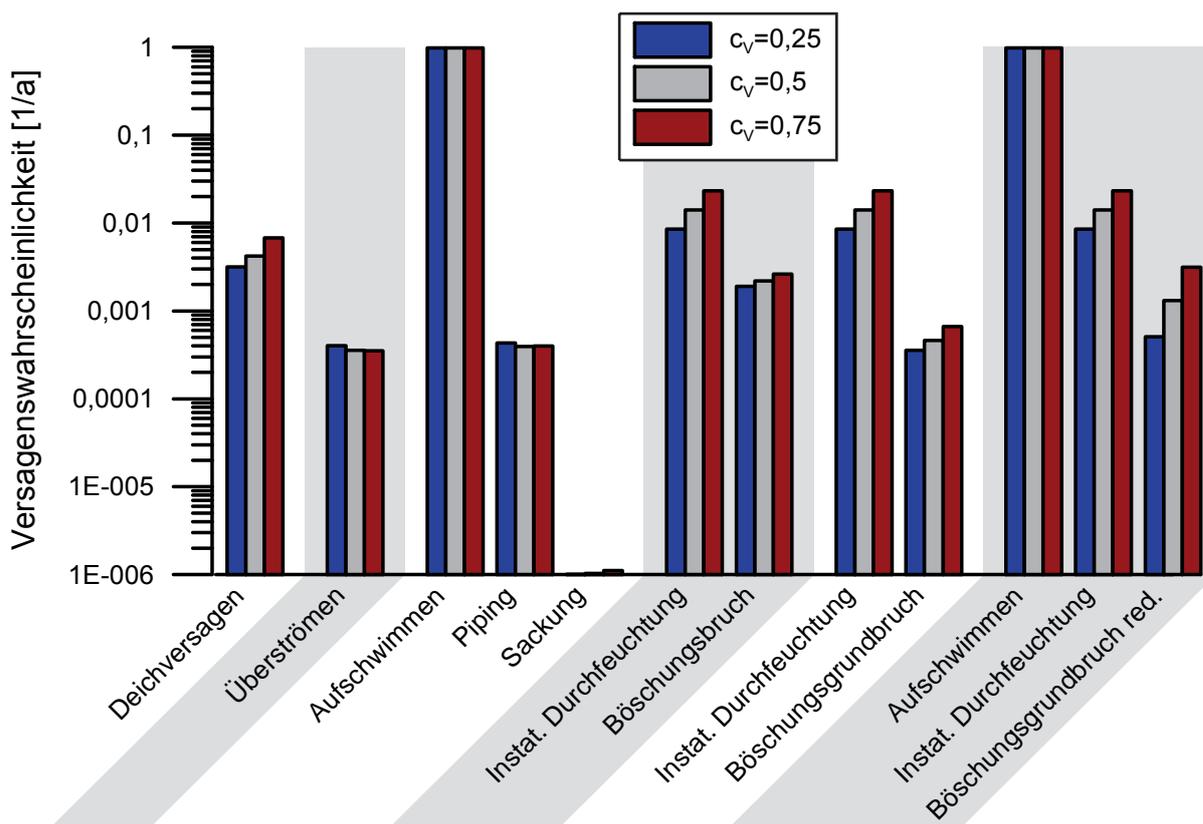


**Bild 8.4:** Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für die Durchlässigkeit des Deichmaterials: Lognormalverteilung mit Mittelwert  $\mu = 8,5e-5$  und unterschiedlichen Variationskoeffizienten  $c_V$

Die Durchlässigkeit des Deichmaterials wird ausschließlich bei der Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit des Mechanismus *instationäre Durchfeuchtung* verwendet. Eine Veränderung der Eigenschaften des Parameters Durchlässigkeit des Deichmaterials wirkt sich direkt auf den Versagensmechanismus *instationäre Durchfeuchtung* aus. Darüber hinaus können auch weitere Versagensmechanismen, die mit der *instationären Durchfeuchtung* gekoppelt sind, beeinflusst werden. Hiervon sind die Böschungsbruch-Mechanismen betroffen, wie aus dem Fehlerbaum in Bild 6.4 hervorgeht.

In Bild 8.5 sind die Ergebnisse der Berechnungen mit unterschiedlichen Variationskoeffizienten für den Parameter *hydraulische Durchlässigkeit des Deichmaterials* im Balkendiagramm dargestellt. Es werden Ergebnisse von Berechnungen mit einem Variationskoeffizient der Durchlässigkeit  $c_V = 0,25$ ,  $c_V = 0,5$  (entspricht der Ausgangssituation) sowie  $c_V = 0,75$  dargestellt. Hierbei ist der Einfluss auf den Mechanismus *instationäre Durchfeuchtung* deutlich zu erkennen: Ein größerer Variationskoeffizient bedeutet eine größere Unsicherheit und somit eine größere Streuung des Parameters Durchlässigkeit des Deichmaterials. Aus dem Balkendiagramm ist abzulesen, dass die größere Streuung zu einer höheren Versagenswahrscheinlichkeit für den Mechanismus *instationäre Durchfeuchtung* führt: Darüber

hinaus wirkt sich die Änderung des Parameters Durchlässigkeit des Deichmaterials auch auf die jeweiligen nachfolgenden Böschungsbruch-Mechanismen aus, obwohl der Parameter selbst nicht für die Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeiten der Böschungsbruch-Mechanismen verwendet wird. Aufgrund des häufigeren Versagens des Mechanismus *instationäre Durchfeuchtung* können auch die nachfolgenden Böschungsbruch-Mechanismen häufiger zu einem Versagen führen.



**Bild 8.5:** Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeiten aufgrund unterschiedlicher Variationskoeffizienten für den Parameter Durchlässigkeit des Deichmaterials, Darstellung im Balkendiagramm mit logarithmischem Maßstab

Die größere Versagenswahrscheinlichkeit einzelner Mechanismen spiegelt sich in der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Deiches wider, diese steigt ungefähr in der gleichen Größenordnung wie die Versagenswahrscheinlichkeit des einzelnen Mechanismus der *instationären Durchfeuchtung*. Hierbei ist die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Deiches bei der Berechnung mit größerer Unsicherheit des Parameters Durchlässigkeit des Deichmaterials ( $c_v = 0,75$ :  $P_f = 0,0067$ ) ungefähr doppelt so hoch wie bei der Berechnung mit geringerer Unsicherheit ( $c_v = 0,25$ :  $P_f = 0,0032$ ). Es lässt sich ableiten, dass eine geringere Unsicherheit für den Parameter *Durchlässigkeit des Deichmaterials* eine geringere Versagenswahrscheinlichkeit des Mechanismus *instationäre Durchfeuchtung* sowie eine geringere Gesamtversagenswahrscheinlichkeit zur Folge hat.

## 8.4 Einfluss der statistischen Abhängigkeit von Parametern am Beispiel des Parameters hydraulische Durchlässigkeit des Deichuntergrundes

### 8.4.1 Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit

In Abschnitt 8.3 wurde aufgezeigt, dass eine geringere Unsicherheit des Parameters *Durchlässigkeit des Deichmaterials* Auswirkungen auf die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Deiches haben kann. Daher soll im Folgenden der Frage nachgegangen werden, ob bzw. auf welchem Wege man zu präzisen Aussagen über den Parameter der Durchlässigkeit gelangen kann. Hierfür wird der Parameter *Durchlässigkeit im Deichuntergrund* diskutiert, der für den Mechanismus *Piping* relevant ist.

Zunächst ist die Frage zu klären, wie die hydraulische Durchlässigkeit  $k_f$  eines Materials bestimmt werden kann. Hierfür stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, die im Folgenden erläutert und im Hinblick auf ihre Anwendung für Flussdeiche bewertet werden.

- **Hydraulische Versuch in situ:** Mit Versuchen nach DIN 18130-2:2011-07 (ENTWURF) kann die hydraulische Durchlässigkeit des Bodens vor Ort ermittelt werden. Hierfür eignen sich in Abhängigkeit der zu erwartenden Durchlässigkeit des Bodens z. B. Pumpversuche, Absenk- und Auffüllversuche sowie Einschwingversuche. Für die Durchführung der hydraulischen Versuche ist jeweils ein verrohrtes und zur Messstelle ausgebautes Bohrloch erforderlich. Die Filterstrecke muss hierbei in die wasserführende Bodenschicht reichen. Solche Versuche sind vergleichsweise aufwändig und teuer. Für die Bestimmung der Durchlässigkeit des Deichkörpermaterials sind Versuche in situ ungeeignet, da die Durchörterung des Deichkörpers i. d. R. unerwünscht ist, um keine Wasserwegsamkeiten zu schaffen. Zudem können die überwiegend instationären Strömungsverhältnisse im Einstaufall die Messergebnisse verfälschen. Auch die Durchörterung der gering durchlässigen Deckschicht im Deichvorland sollte für die Bestimmung der Durchlässigkeit des Deichuntergrundes vermieden werden.
- Für die Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit bei Deichen bieten sich daher **Laborversuche** an. Eine Möglichkeit zur Ermittlung bieten direkte Versuche, bei denen eine Bodenprobe durchströmt und die Filtergeschwindigkeit gemessen wird, wie in DIN 18130-1:1998-05 beschrieben. Hierfür ist eine möglichst wenig gestörte Bodenprobe zu entnehmen, um das Korngefüge, das die

hydraulische Durchlässigkeit beeinflusst, nicht zu stören. Die direkten Laborversuche sind vergleichsweise zeitaufwändig.

- Alternativ können Verfahren angewendet werden, bei denen die Durchlässigkeit des Materials **anhand der Korngrößenverteilung abgeschätzt** wird. Im Vergleich zu der weit verbreiteten Abschätzung der Durchlässigkeit nach HAZEN (1893) gelingt mit der Formel von *Kozeny/Carman* (KOZENY 1927, CARMAN 1938, CARMAN 1956) eine weitaus präzisere Eingrenzung des Durchlässigkeitsbeiwertes (LOUDON 1952, CARRIER 2003). Der Vorteil dieser Methoden besteht darin, dass zur Abschätzung der Durchlässigkeit die Information über die Korngrößenverteilung ausreicht und diese durch einfache und wenig kostenaufwendige Versuche gewonnen werden kann. Allerdings sind die Schätzmethode jeweils lediglich für einen eingeschränkten Bereich der Korngrößenverteilung gültig.

Wenn die hydraulische Durchlässigkeit  $k_f$  nicht aus direkten oder indirekten Versuchen bereits bekannt ist, kann sie in dem hier vorgestellten Modell mit dem Verfahren nach *Kozeny/Carman* anhand der Korngrößenverteilung wie folgt bestimmt werden:

$$k_f = \frac{1}{C_K} \cdot \frac{n^3 \cdot \rho_W \cdot g}{(1-n)^2 \cdot \mu_W} \cdot d_w^2 \quad (8.1)$$

Hierin bedeuten:

$C_K = 270$  (nach WITTMANN 1981)

$n =$  Porenanteil des Aquifers [-]

$\rho_W =$  Dichte von Wasser [kg/m<sup>3</sup>]

$g =$  Erdbeschleunigung (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$\mu_W =$  dynamische Viskosität von Wasser ( $\approx 1,31 \cdot 10^{-3}$  kg/(s·m) bei 10 °C)

$d_w =$  wirksamer Korndurchmesser [mm]

*Kozeny/Carman* geben für den Koeffizienten  $C_K$  eine Bandbreite von  $180 \leq C_K \leq 270$  an. WITTMANN (1981) berichtet von einer gute Übereinstimmung der ermittelten Durchlässigkeiten mit gemessenen Werten für den Koeffizienten  $C_K = 270$ , der für die weiteren Berechnungen zugrunde gelegt wird.

Der wirksame Korndurchmesser  $d_w$  ist aus der Korngrößenverteilung nach Gleichung (8.2) zu bestimmen:

$$d_w = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{\Delta p_{mj}}{d_j}} \quad (8.2)$$

Hierin bedeuten:

$\Delta p_{mj}$  = Massenanteil der j-ten Kornfraktion [-]

$d_j$  = kennzeichnende Korngröße der j-ten Kornfraktion [mm]

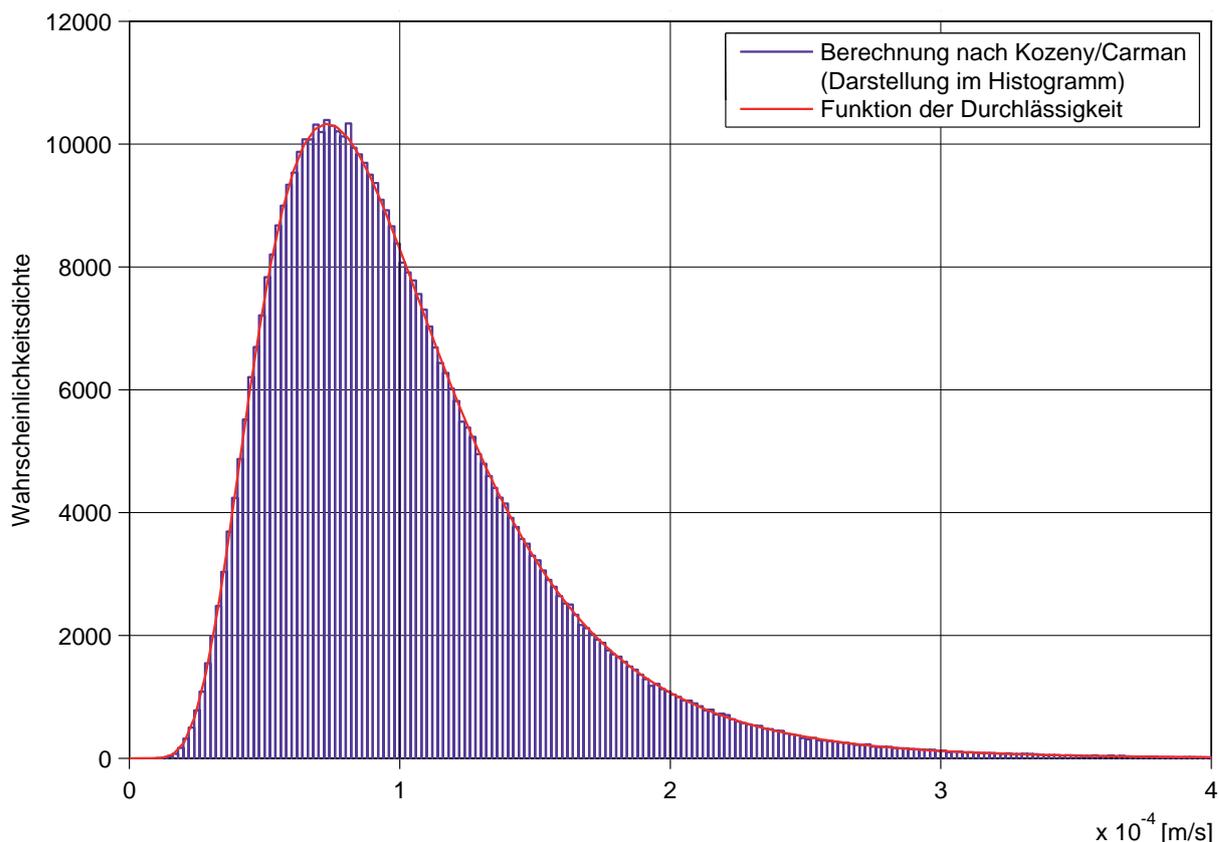
Für steile Korngrößenverteilungen mit einer Ungleichförmigkeitszahl  $U < 2$  führt die Annahme  $d_w \approx d_{50}$  zu einer ausreichenden Übereinstimmung [BRAUNS 1985].

### 8.4.2 Vorgabe der hydraulischen Durchlässigkeit im Modell

In dem vorgestellten Berechnungsmodell sind verschiedene Möglichkeiten vorgesehen, um die Durchlässigkeit des Untergrundes anzugeben. Wenn Informationen über die hydraulische Durchlässigkeit vorliegen (z. B. aus Versuchen, s. o.), kann der Parameter über den Mittelwert sowie den Variationskoeffizienten direkt angegeben werden, hierfür wird eine Lognormalverteilung zugrunde gelegt. Andernfalls kann die Durchlässigkeit im Berechnungsmodell nach *Kozeny/Carman* nach Gleichung (8.1) bestimmt werden. Hierfür wird im Modell der wirksame Korndurchmesser  $d_w$  anhand des Korndurchmessers  $d_{70}$  sowie der Ungleichförmigkeit  $U$  aus der Korngrößenverteilung abgeschätzt.

Für die hydraulische Durchlässigkeit des Untergrundes ergibt sich mit den in Abschnitt 8.1 beschriebenen Parametern und dem Verfahren nach *Kozeny/Carman* ein rechnerischer Wert von  $k_f(\text{Untergrund}) = 1 \cdot 10^{-4}$  m/s. In Bild 8.10 sind die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für den Parameter Durchlässigkeit des Untergrundes dargestellt. Das Histogramm (blaue Balken) in Bild 8.10 zeigt die Häufigkeitsverteilung bei der Ermittlung der Durchlässigkeit des Untergrundes nach *Kozeny/Carman* mit den weiter oben genannten Parametern. Darüber hinaus ist in Bild 8.10 die Funktion der Wahrscheinlichkeitsdichte als rote Kurve dargestellt, wenn die erforderlichen Größen (Mittelwert und Variationskoeffizient) direkt angegeben werden können.

Im Weiteren wird untersucht, welchen Einfluss auf die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit die unterschiedliche Ermittlung der Durchlässigkeit des Untergrundes hat. Daher wurden für den Fall, dass die Durchlässigkeit des Untergrundes direkt angegeben wird, die stochastischen Kenngrößen aus der Häufigkeitsverteilung des mit dem Modell von *Kozeny/Carman* nach Gleichung (8.1) ermittelten Parameters angepasst. Es ist ersichtlich, dass sich eine gute Übereinstimmung der beiden Funktionen für die Ermittlung der Durchlässigkeit ergibt.



**Bild 8.6:** Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung für den Parameter Durchlässigkeit im Untergrund anhand vorgegebener Parameter (direkte Bestimmung der Durchlässigkeit): rote Kurve sowie nach Berechnung mit *Kozeny/Carman* (Bestimmung der Durchlässigkeit anhand der Korngrößenverteilung): blaues Histogramm

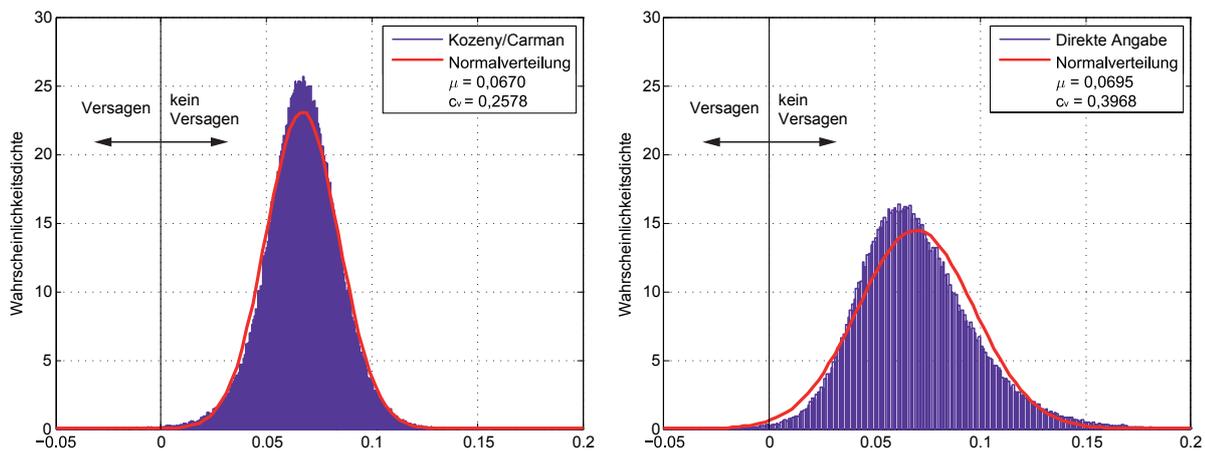
Im obigen Beispiel (siehe Bild 8.6) ergab die Verteilung des Korndurchmessers  $d_{70}$  mit einem Variationskoeffizienten von  $c_v(d_{70}) = 0,23$  eine resultierende Verteilung der Durchlässigkeit mit einem Variationskoeffizienten von  $c_v(k_f) = 0,5$ . Es ist verständlich, dass bei der Abschätzung der Durchlässigkeit nach *Kozeny/Carman* die Unsicherheit des Parameters Durchlässigkeit größer ist als die Unsicherheit der Eingangsparameter aus der Korngrößenverteilung. Eine Verringerung der Unsicherheit des Parameters Durchlässigkeit kann u. a. durch eine geringere Unsicherheit des Parameters Korndurchmesser  $d_{70}$  erreicht werden.

### 8.4.3 Einfluss der statistischen Abhängigkeit des Parameters hydraulische Durchlässigkeit des Deichuntergrundes

Im oben genannten Beispiel (siehe Abschnitt 8.4.2) wurden die stochastischen Kenngrößen für die direkte Angabe der Durchlässigkeit des Untergrundes an die resultierende Wahrscheinlichkeitsverteilung der Berechnung nach *Kozeny/Carman* angepasst. Im Folgenden wird untersucht, welche Auswirkungen sich aus der

unterschiedlichen Vorgehensweise zur Bestimmung der Durchlässigkeit auf das Deichversagen ergeben können.

In Bild 8.7 ist die Verteilung der Wahrscheinlichkeitsdichte für den Versagensmechanismus *Piping* aufgetragen. Das blaue Histogramm zeigt jeweils die Simulationsergebnisse von 200.000 Rechendurchläufen für die Variable  $Z$  der Grenzzustandsgleichung nach *Weijers & Sellmeijer* (Gleichung (7.7)). Die Ergebnisse für  $Z < 0$  (aufgetragen auf der Abszisse) bedeuten den Versagensfall für den Mechanismus *Piping*. Als rote Linie ist in den Diagrammen die an das Histogramm angepasste Funktion einer Normalverteilung eingetragen. Das linke Diagramm zeigt die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung, wenn die Durchlässigkeit nach *Kozeny/Carman* bestimmt wird, im rechten Diagramm ist die Verteilung mit *direkter Angabe* der Durchlässigkeit dargestellt.



**Bild 8.7:** Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung für die Variable  $Z$  des Versagensmechanismus *Piping* (Versagen für  $Z < 0$ ), Histogramm (blau): Simulationsergebnisse von 200.000 Rechendurchläufen, Linie (rot): Angepasste Funktion; Links: Bestimmung der Durchlässigkeit  $k_f$  nach *Kozeny/Carman* (Parameter statistisch abhängig), Rechts: Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  direkt angegeben (Parameter statistisch unabhängig)

Beim Vergleich der beiden Diagramme sind die folgenden Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede ersichtlich (Bild 8.7):

- Die jeweils angepasste Normalverteilung kann die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung für den Fall *Kozeny/Carman* im linken Diagramm treffend wiedergeben. Für den Fall der *direkten Angabe* der Durchlässigkeit im rechten Diagramm ist eine geringe Abweichung der angepassten Normalverteilung zum Histogramm ersichtlich, deren Ursache auch in der linksschiefen Verteilung der Daten begründet liegt.

- Der Mittelwert  $\mu$  der jeweils angepassten Funktionen stimmt in den beiden Diagrammen ungefähr überein (*Kozeny/Carman*:  $\mu = 0,0670$ ; *direkt*:  $\mu = 0,0695$ ).
- Die Verteilung im rechten Diagramm (*direkte Angabe* der Durchlässigkeit) weist eine deutlich breitere Streuung der Ergebnisse auf (*Kozeny/Carman*:  $c_v = 0,2578$ ; *direkt*:  $c_v = 0,3968$ ).
- Aufgrund der vergleichbaren Mittelwerte der beiden Verteilungen und der breiteren Streuung der Ergebnisse im rechten Diagramm resultiert eine größere Versagenswahrscheinlichkeit für den Fall der *direkten Angabe* der Durchlässigkeit.

Das unterschiedliche Ergebnis, das durch die Art der Vorgabe für den Parameter Durchlässigkeit beeinflusst wird, ist mit der statistischen Abhängigkeit der Parameter begründet: Für die Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit nach *Kozeny/Carman* wird die Angabe des hydraulisch wirksamen Korndurchmessers benötigt. Dieser Parameter wird vom Programm aus den Werten für die Ungleichförmigkeit der Korngrößenverteilung sowie aus dem Korndurchmesser  $d_{70}$  ermittelt. Der Parameter Korndurchmesser  $d_{70}$  wird auch für die Ermittlung der kritischen Wasserspiegellhöhe verwendet, genauer zur Bestimmung des Koeffizienten  $c$  in Gleichung (7.10) nach WEIJERS & SELLMELJER (1993). Zudem fließt in diese Gleichung der Parameter  $\kappa$  ein, der wiederum von der hydraulischen Durchlässigkeit  $k_f$  abhängig ist, die ggf. zuvor nach *Kozeny/Carman* ermittelt wurde.

Aufgrund dieser Beziehung sind die beiden Gleichungen nach *Kozeny/Carman* (Gleichung (8.1)) sowie nach *Weijers/Sellmeijer* (Gleichung (7.8)) in dem hier entwickelten Modell nicht als statistisch unabhängig zu betrachten. Bei Verwendung der *direkten Angabe* des Parameters für die Durchlässigkeit entfällt die mehrfache Verwendung des Parameters Korndurchmesser  $d_{70}$  innerhalb eines Versagensmechanismus, so dass hier für die Ermittlung der kritischen Wasserspiegellhöhe die Parameter als statistisch unabhängig gelten.

Überprüft werden konnte der Zusammenhang zur statistischen Abhängigkeit der Parameter, indem bei der Vorgehensweise nach *Kozeny/Carman* testweise ein zweiter Parametersatz für den Korndurchmesser  $d_{70}$  verwendet wurde, dessen statistische Verteilung mit denselben stochastischen Kenngrößen erzeugt wurde. Bei Verwendung dieser beiden statistisch unabhängigen Parameter – einerseits für die Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit sowie andererseits für die Bestimmung der kritischen Wasserspiegellhöhe nach *Weijers & Sellmeijer* – ergab sich das gleiche Ergebnis wie bei der Vorgehensweise mit *direkter Angabe* des Parameters Durchlässigkeit, bei der

die verwendeten Parameter statistisch unabhängig sind. Somit konnte der Einfluss der statistischen Abhängigkeit von Parametern nachgewiesen werden.

Die Auswirkungen bei Verwendung statistisch nicht unabhängiger Parameter sind bekannt, jedoch existieren nur sehr wenige Modelle und nur für ausgewählte Zusammenhänge von Parametern, die den Effekt der Abhängigkeit beschreiben können. Eine Zusammenstellung vorhandener Modellansätze findet sich bei KORTENHAUS & OUMERACI (2002) für die Beschreibung der Zusammenhänge hydrodynamischer Parameter wie Wasserstand, Wellenhöhe, Wellenperiode und Windgeschwindigkeit.

Die oben beschriebene Abhängigkeit von Parametern kann das Ergebnis des Versagensmechanismus Piping beeinflussen. Ein Vergleich der beiden Vorgehensweisen für die Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeiten und ihrer Auswirkungen findet sich in Tabelle 8.6.

**Tabelle 8.6:** Vergleich der Vorgehensweisen für die Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit und deren Auswirkungen auf den Versagensmechanismus *Piping*

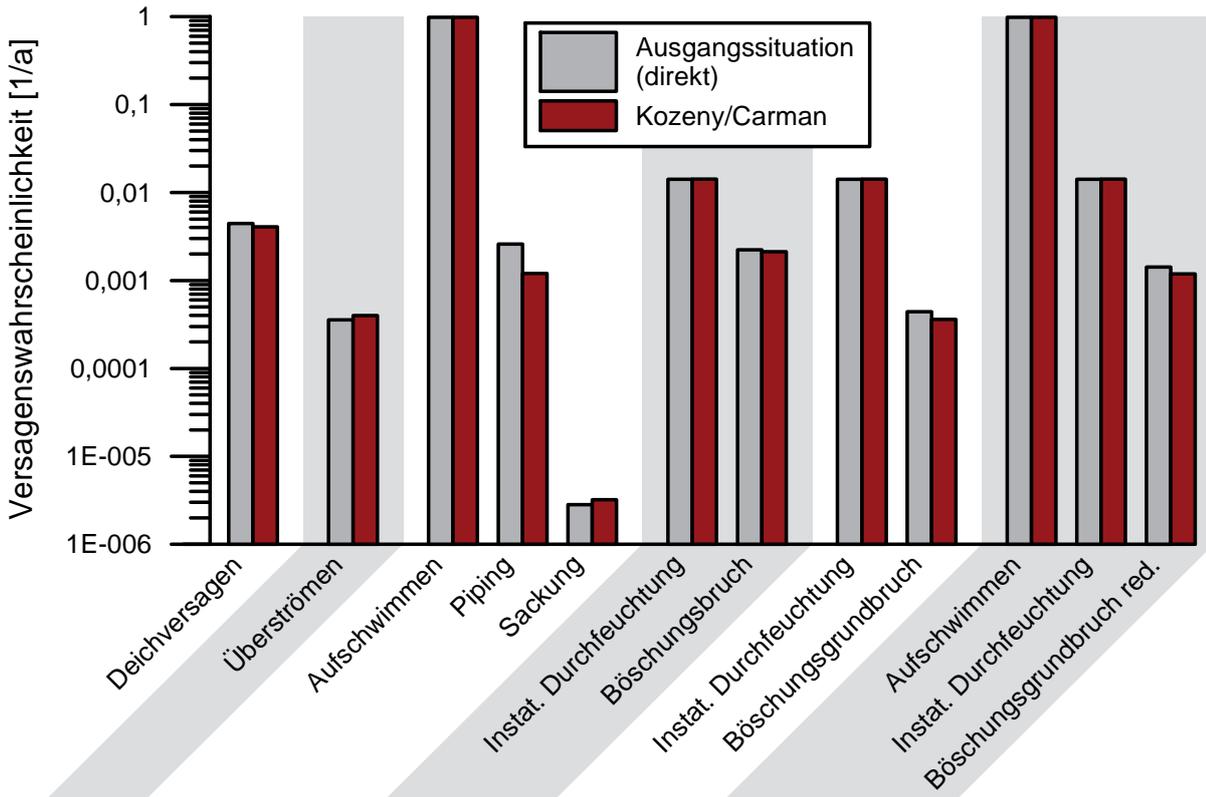
	<b>Bestimmung der Durchlässigkeit nach <i>Kozeny/Carman</i></b>	<b><i>Direkte Angabe des Parameters Durchlässigkeit</i></b>
<b>Parameter-Bestimmung</b>	Verschiedene Parameter aus der Korngrößenverteilung	Parameter wird direkt angegeben
<b>Laborversuch</b>	Korngrößenverteilung: Einfach durchzuführen, Standardversuch	Durchlässigkeitsbestimmung: Für Laborversuch möglichst wenig gestörte Probe erforderlich
<b>Modell</b>	Zusätzliches Modell (Bestimmung nach <i>Kozeny/Carman</i> )	Kein weiteres Modell notwendig
<b>Ergebnis für Versagensfall Piping</b>	Geringere Versagenswahrscheinlichkeit	Größere Versagenswahrscheinlichkeit

Die Vor- und Nachteile der beiden oben beschriebenen Vorgehensweisen zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit sind in Tabelle 8.6 gegenübergestellt.

Um die vergleichsweise aufwändige Probenahme zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit für ungestörte Proben zu umgehen, ist es zielführend und ausreichend, die Durchlässigkeit aus der Korngrößenverteilung zu ermitteln, wenn nicht bereits Informationen zur Durchlässigkeit vorliegen. In beiden Fällen empfiehlt es sich, die Versagenswahrscheinlichkeit im Rechenmodell nach Möglichkeit entsprechend der beiden Vorgehensweisen zu bestimmen, um den Einfluss der Abhängigkeit von Parametern auf das Ergebnis abschätzen bzw. quantifizieren zu können. Die Information aus der Korngrößenverteilung des Deichuntergrundes wird für den Mechanismus *Piping* bei der Vorgehensweise nach *Weijers & Sellmeijer* benötigt und kann hier als Vergleichswert herangezogen werden, wenn auch Informationen über die hydraulische Durchlässigkeit des Untergrundes aus Versuchen bereits vorliegen.

Aus dem entwickelten Modell können die statistischen Kennwerte (Verteilungstyp, Mittelwert und Standardabweichung) der Verteilung für die Durchlässigkeit nach der Ermittlung nach *Kozeny/Carman* ausgegeben werden, die dann in einem neuen Rechendurchlauf genutzt werden können, um die Durchlässigkeit *direkt* anzugeben. Aus dem Vergleich der beiden Ergebnisse für den Versagensmechanismus *Piping* geht der Einfluss aus der Abhängigkeit der Parameter hervor. Für weitergehende Abschätzungen der Versagenswahrscheinlichkeit können die beiden Werte als günstiger oder ungünstiger Grenzwert betrachtet werden.

Insgesamt hat das unterschiedliche Ergebnis für den Mechanismus *Piping* nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit. In Bild 8.8 sind die Versagenswahrscheinlichkeiten für die jeweiligen Mechanismen dargestellt, wie sie sich nach der Ausgangssituation mit direkter Angabe des Durchlässigkeitsbeiwertes ergibt (graue Balken), sowie mit der Ermittlung der Durchlässigkeit nach *Kozeny/Carman* (rote Balken). Lediglich für den Versagensmechanismus *Piping* lässt sich ein Unterschied erkennen (Versagensmechanismus *Piping*:  $P_{f,direkt} = 0,0026$ ;  $P_{f,KC} = 0,0012$ ), der jedoch vernachlässigbare Auswirkungen auf das Deichversagen hat (*direkte Angabe der Durchlässigkeit* (Ausgangssituation):  $P_{f,direkt} = 0,0044$ , Bestimmung nach *Kozeny/Carman*:  $P_{f,KC} = 0,0041$ ). Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die unterschiedlichen Vorgehensweisen zur Ermittlung der Durchlässigkeit im vorgestellten Beispiel geringen Einfluss auf das Deichversagen haben.



**Bild 8.8:** Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeiten mit unterschiedlichen Vorgehensweisen zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit: *direkte Angabe* oder Berechnung nach *Kozeny/Carman*; Darstellung im Balkendiagramm mit logarithmischem Maßstab

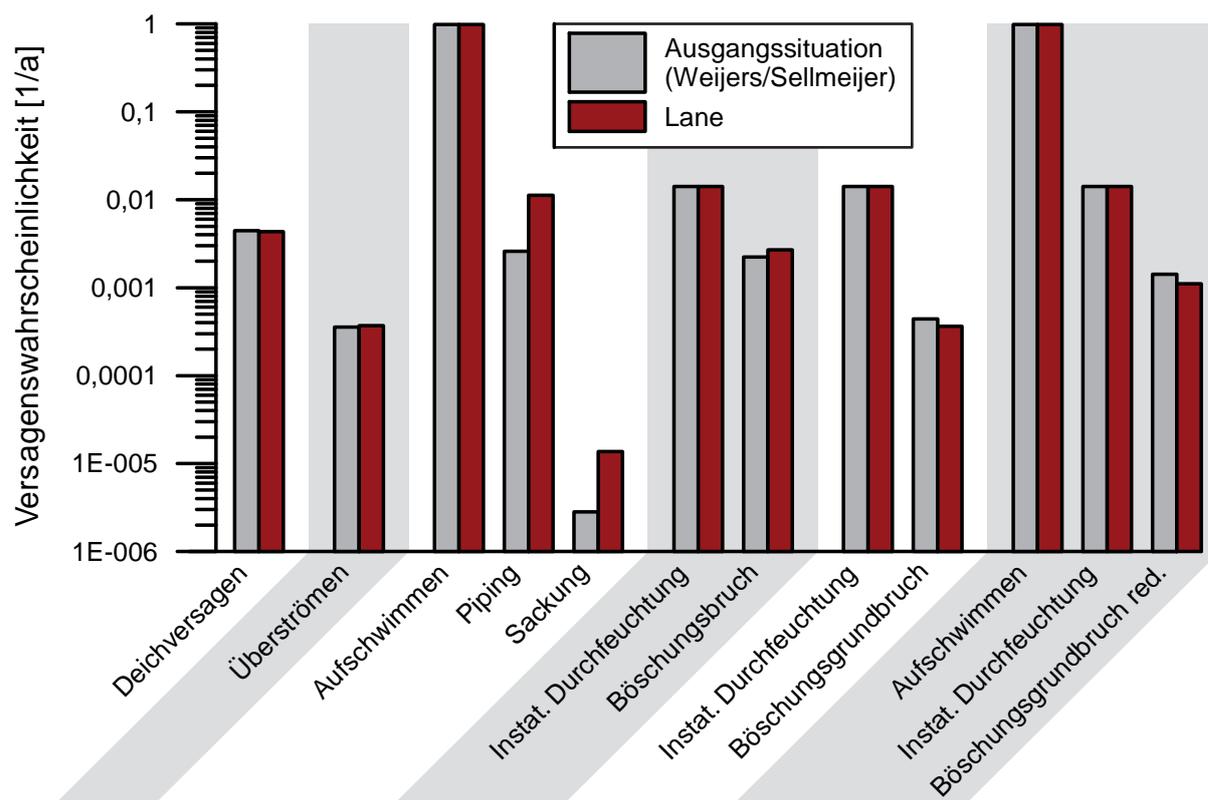
### 8.5 Einfluss der Berechnungsmethode für den Mechanismus Piping in Abhängigkeit der Datengrundlage

In Abschnitt 7.4 wurden unterschiedliche Methoden aufgezeigt, wie das mögliche Versagen durch Erosionsgrundbruch überprüft werden kann. Hierfür stehen im Berechnungsmodell in Abhängigkeit der verfügbaren Informationen über den Deichuntergrund das Verfahren nach *Lane* sowie das Verfahren nach *Weijers & Sellmeijer* zur Verfügung (siehe Abschnitt 7.4). Im Folgenden wird der Einfluss der beiden unterschiedlichen Berechnungsmethoden für den Mechanismus Piping auf das Berechnungsergebnis für Deichversagen untersucht.

Beim Nachweis nach *Lane* werden sämtliche für das Erosionsverhalten eines Bodens relevante Parameter in dem empirischen Faktor  $c_L$  zusammengefasst (siehe Bild 7.3). Zusätzlich wird die Richtung der Sickerströmung (horizontal oder vertikal) unterschieden. Hingegen werden beim Verfahren nach *Weijers & Sellmeijer* zahlreiche

Eigenschaften des erosionsgefährdeten Bodens berücksichtigt (siehe Abschnitt 7.4). Aufgrund dieser grundlegend unterschiedlichen Betrachtungsweise ist ein Vergleich der beiden Methoden lediglich in Form einer Abschätzung möglich.

In Bild 8.9 sind die Ergebnisse der Berechnungen nach *Weijers & Sellmeijer* mit dem gleichen Parametersatz wie in der Ausgangssituation in Abschnitt 8.1 (graue Balken) sowie nach *Lane* (rote Balken) dargestellt. Hierbei lässt sich ein deutlicher Unterschied in den Versagenswahrscheinlichkeiten für die Mechanismen *Piping* und *Sackung* erkennen: die Berechnungsmethode nach *Lane* ergibt deutlich höhere (im gewählten Beispiel mehr als vier Mal so große) Versagenswahrscheinlichkeiten gegenüber der Ausgangssituation (Versagensmechanismus *Piping*:  $P_{f,Weijers/Sellmeijer} = 0,0026$ ,  $P_{f,Lane} = 0,0112$ ). Die anderen Versagensmechanismen werden nicht beeinflusst. Die erkennbaren Unterschiede der Versagenswahrscheinlichkeiten insbesondere bei den *Böschungsbruch-Mechanismen* in Bild 8.9 sind auf die allgemeine Unsicherheit der Ergebnisse zurück zu führen und liegen im erwarteten Rahmen (siehe Abschnitt 3.4).



**Bild 8.9:** Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeiten aufgrund unterschiedlicher Berechnungsmethoden für den Mechanismus *Piping*, Darstellung im Balkendiagramm mit logarithmischem Maßstab

Trotz der erheblichen Auswirkungen auf die Mechanismen *Piping* und *Sackung* durch die unterschiedlichen Berechnungsmethoden ergibt sich für das *Deichversagen* keine

nennenswerte Differenz bezüglich der Versagenswahrscheinlichkeit (*Piping* nach *Weijers & Sellmeijer* (Ausgangssituation):  $P_{f,Weijers/Sellmeijer} = 0,0044$ , *Piping* nach *Lane*:  $P_{f,Lane} = 0,0043$ ). Die geringfügig kleinere Wahrscheinlichkeit für das *Deichversagen* bei der Berechnung nach *Lane* ist aufgrund der allgemeinen Unsicherheit nicht als signifikant zu betrachten. Mit Hilfe des Fehlerbaumes lässt sich erkennen, warum die Auswirkungen auf das *Deichversagen* vergleichsweise gering ausfallen: Die einzelnen Versagensäste sind durch eine *ODER*-Verknüpfung miteinander verbunden. Die Versagenswahrscheinlichkeit des Versagensastes *Aufschwimmen – Piping – Sackung* liegt hier mindestens eine Zehnerpotenz (*Lane*) bzw. mehr als zwei Zehnerpotenzen (*Weijers & Sellmeijer*) unter der Versagenswahrscheinlichkeit der übrigen Versagensäste (siehe Bild 8.9). Aufgrund dieser vergleichsweise großen Differenz übt der Unterschied der Berechnungsart bei der Bestimmung der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit keinen merklichen Einfluss aus. In einem anders gelagerten Fall, wenn die Versagenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Äste des Fehlerbaumes ungefähr auf gleichem Niveau lägen, würde sich der Unterschied der Berechnungsart (*Weijers & Sellmeijer* oder *Lane*) ebenfalls stärker bemerkbar machen. Um diesen Sachverhalt genauer zu untersuchen, soll im nächsten Schritt die Untersuchung des *Deichversagens* ohne die Berücksichtigung des Mechanismus *Sackung* erfolgen (siehe Abschnitt 8.6).

Ungeachtet des in diesem Fall geringen Einflusses auf die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Deiches sollte nicht der Schluss gezogen werden, dass beide Verfahren ebenbürtig sind und immer zum gleichen Ergebnis führen. Das Verfahren nach *Lane* fasst viele Einflüsse, die das Erosionsverhalten des Untergrundes charakterisieren, in einem empirischen Faktor zusammen. Gegenüber dem Verfahren nach *Weijers & Sellmeijer* besitzt es damit eine deutlich größere Modellunsicherheit. Falls ausreichende Informationen zum *Deichuntergrund* vorliegen oder beschaffbar sind, sollte daher in diesen Fällen die Methode von *Weijers & Sellmeijer* zur Anwendung kommen.

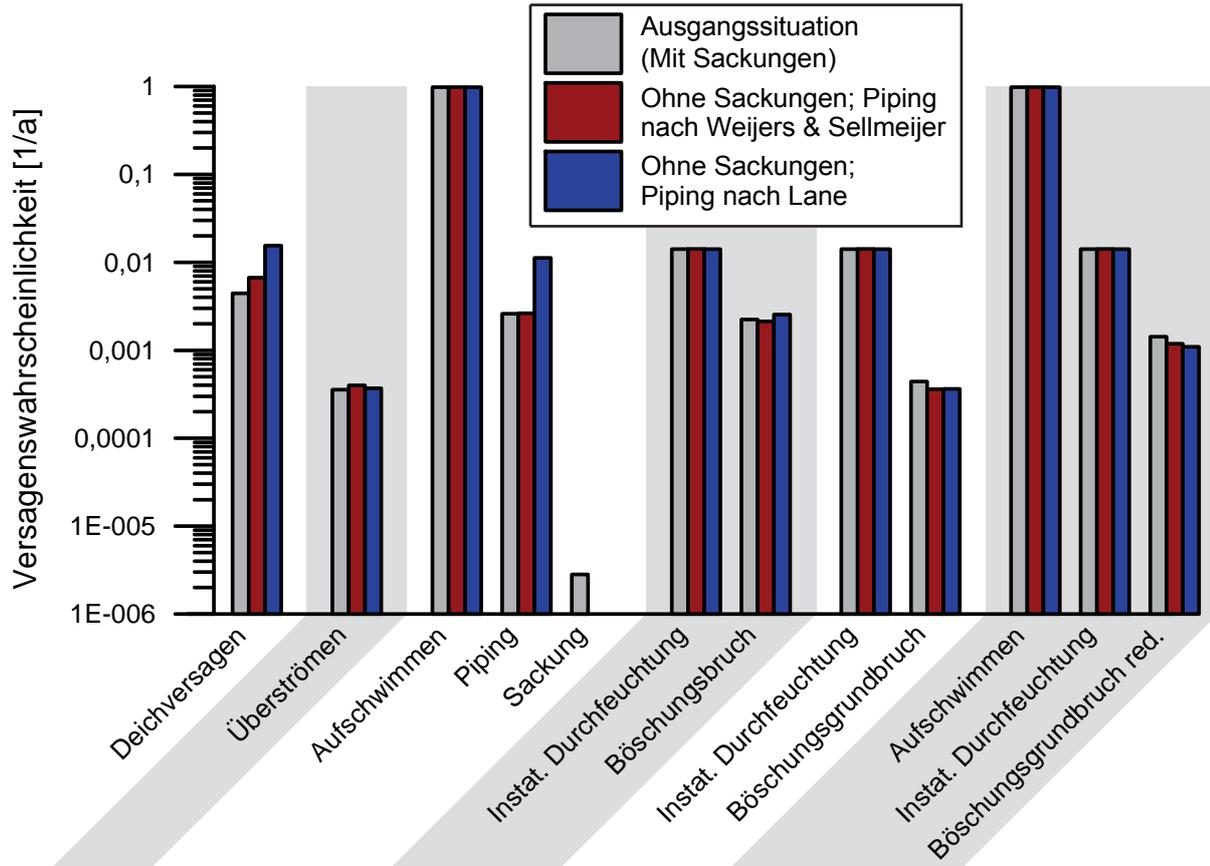
## 8.6 Einfluss des Mechanismus Sackungen im Deichkörper auf das Deichversagen

### 8.6.1 Ziel der Untersuchungen

Der Mechanismus *Sackungen im Deichkörper* wird in dem vorgestellten probabilistischen Rechenmodell neben den etablierten Versagensmechanismen *Aufschwimmen* sowie *Piping* erstmals eingeführt (siehe Abschnitt 7.5). Aufgrund der vorangegangenen Untersuchungen zum Einfluss der Berechnungsmethode für den Mechanismus *Piping* (siehe Abschnitt 8.4) soll nun diskutiert werden, wie sich der dem *Piping* nachgeschaltete Mechanismus *Sackung* auf das *Deichversagen* auswirkt. Ohne Berücksichtigung des Mechanismus *Sackung* wird davon ausgegangen, dass der Versagensmechanismus *Piping* zum Versagen des Deiches führt. Für die folgenden Untersuchungen werden die beiden Berechnungsmethoden wieder sowohl nach *Weijers & Sellmeijer* als auch nach *Lane* angewendet.

### 8.6.2 Beschreibung der untersuchten Szenarien

In Bild 8.10 sind in einem Balkendiagramm die Versagenswahrscheinlichkeiten der jeweiligen Versagensmechanismen aufgetragen. Hierbei stellen die grauen Balken die in Abschnitt 8.2 diskutierte Ausgangssituation dar. Die roten Balken entsprechen der Betrachtung ohne den Mechanismus *Sackung* unter ansonsten gleichen Bedingungen wie in der Ausgangssituation. Der Mechanismus *Piping* wurde hier mit dem Vorgehen nach *Weijers & Sellmeijer* betrachtet. Die blauen Balken geben die Ergebnisse der Berechnungen ohne den Mechanismus *Sackung* wieder und unter Verwendung der Methode nach *Lane* für den Mechanismus *Piping*.



**Bild 8.10:** Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeiten für die Betrachtung mit und ohne den Mechanismus *Sackungen im Deichkörper*, Darstellung im Balkendiagramm mit logarithmischem Maßstab

### 8.6.3 Betrachtung ohne den Mechanismus *Sackungen* im Deichkörper mit unterschiedlichen Berechnungsmethoden für *Piping*

Im nächsten Schritt wird der Einfluss der Berechnungsmethode für den Mechanismus *Piping* analysiert, wenn die nachfolgenden *Sackungen* nicht betrachtet werden. Im Bild 8.10 entspricht die Methode nach *Weijers & Sellmeijer* den roten Balken und die Methode nach *Lane* den blauen Balken; in beiden Fällen wird der Mechanismus *Sackung* nicht berücksichtigt. Deutlich ist der bereits in Abschnitt 8.4.3 diskutierte Unterschied für den Mechanismus *Piping* erkennbar: Mit der weniger genauen Methode nach *Lane* ergibt sich hierfür erwartungsgemäß eine höhere Versagenswahrscheinlichkeit und ohne die Berücksichtigung des Mechanismus *Sackung* ergibt sich hier auch für das Deichversagen eine deutlich höhere Versagenswahrscheinlichkeit (siehe hierzu auch die Hinweise in Abschnitt 8.4.3). Die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit für die Methode nach *Lane* beträgt in dem dargestellten Beispiel etwas mehr als das Doppelte der Methode nach *Weijers & Sellmeijer*, jeweils ohne den Mechanismus *Sackungen* ( $P_{f,Lane} = 0,0155$ ;  $P_{f,Weijers/Sellmeijer} = 0,0067$ ). Hiermit ist der

Einfluss der Berechnungsmethode deutlicher nachzuweisen und die Empfehlung aus Abschnitt 8.5 kann untermauert werden: Falls ausreichende Informationen zum Deichuntergrund vorliegen oder beschaffbar sind, sollte das präzisere Modell mit der geringeren resultierenden Unsicherheit verwendet werden, um realitätsnähere Versagenswahrscheinlichkeiten zu erhalten.

## 8.7 Einfluss des Mechanismus instationäre Durchfeuchtung

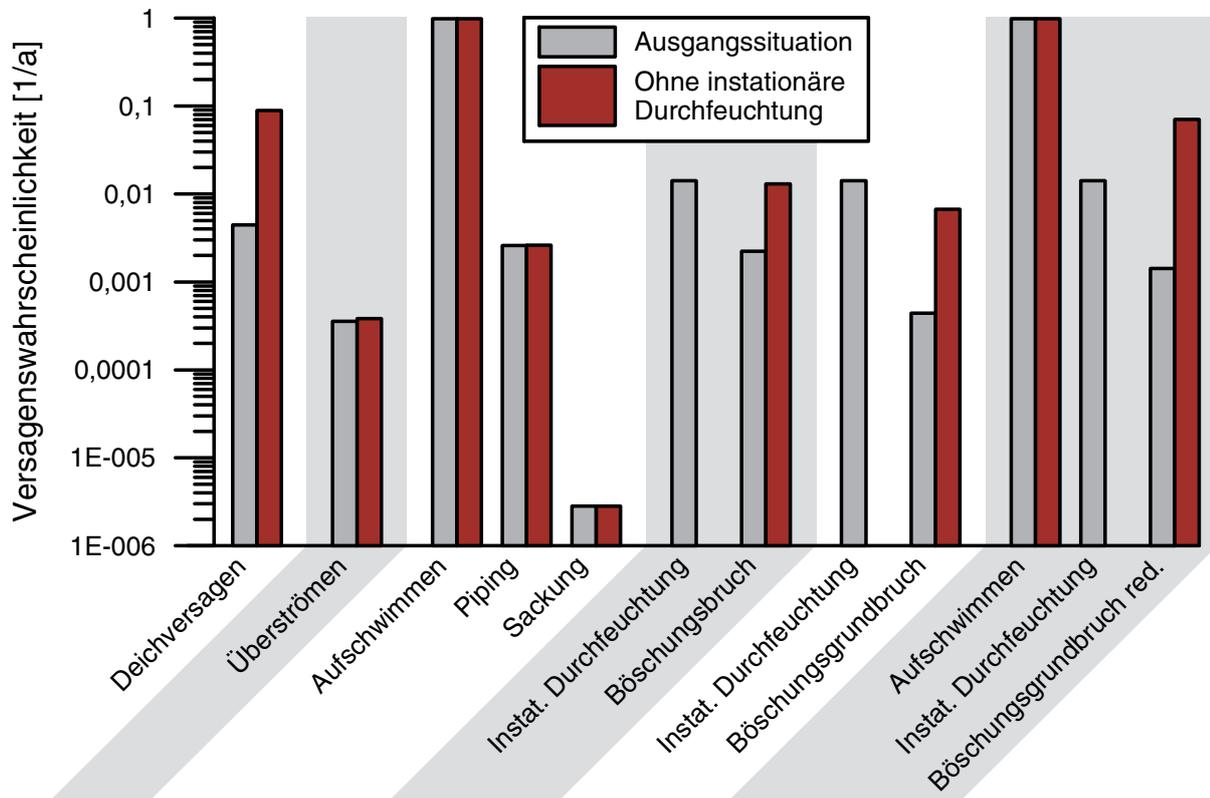
Wie in Abschnitt 7.6 aufgezeigt wurde, beinhaltet die Betrachtungsweise zum Deichversagen mit stationärem Durchströmungszustand unter Umständen große Sicherheiten. Um diese Sicherheiten qualifiziert zu bewerten, wurde der Versagensmechanismus *instationäre Durchfeuchtung* eingeführt. Hier wird geprüft, ob sich in Abhängigkeit der Hochwasserwelle ein stationärer Durchströmungszustand im Deichkörper einstellen kann, der die Standsicherheit der landseitigen Böschung beeinträchtigt. In den Fällen, in denen die Sickerlinie den landseitigen Böschungsfuß des Deiches erreicht, wird vom Erreichen eines stationären Durchströmungszustandes ausgegangen, und die nachfolgenden *Böschungsbruch*-Mechanismen werden untersucht (vgl. Darstellung für den Fehlerbaum in Bild 6.4 sowie Abschnitt 7.7).

In Bild 8.11 ist das Ergebnis der vergleichenden Untersuchung dargestellt. Die grauen Balken entsprechen der Ausgangssituation mit Berücksichtigung der *instationären Durchfeuchtung*. Die roten Balken geben die Versagenswahrscheinlichkeiten ohne Berücksichtigung der *instationären Durchfeuchtung* wieder. Dies entspricht der Annahme eines stationären Durchströmungszustandes in allen untersuchten Fällen für die *Böschungsbruch*-Mechanismen.

Es ist deutlich erkennbar, dass sich ohne die Berücksichtigung der *instationären Durchfeuchtung* eine erheblich höhere Versagenswahrscheinlichkeit der *Böschungsbruch*-Mechanismen ergibt. Dies spiegelt sich auch in der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit wider, diese ist im dargestellten Beispiel bei der Betrachtung mit stationärer Durchsickerung ungefähr um den Faktor 20 vergrößert ( $P_{f,Ausgangssituation} = 0,0044$ ;  $P_{f,ohne\ instat\ Durchfeucht} = 0,0890$ ). Der Versagensmechanismus *instationäre Durchfeuchtung* nimmt damit erwartungsgemäß erheblichen Einfluss auf die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit.

Hierbei muss darauf hingewiesen werden, dass der Mechanismus *instationäre Durchfeuchtung* einen zeitabhängigen Vorgang abbildet. Der zeitliche Verlauf der

Hochwasserwelle hat erheblichen Einfluss auf den Vorgang der instationären Durchfeuchtung und somit auf die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit. Aufgrund der teilweise lang zurückreichenden Pegelaufzeichnungen an Fließgewässern lässt sich i. d. R. die zeitliche Charakteristik der Hochwasserwelle gut eingrenzen.



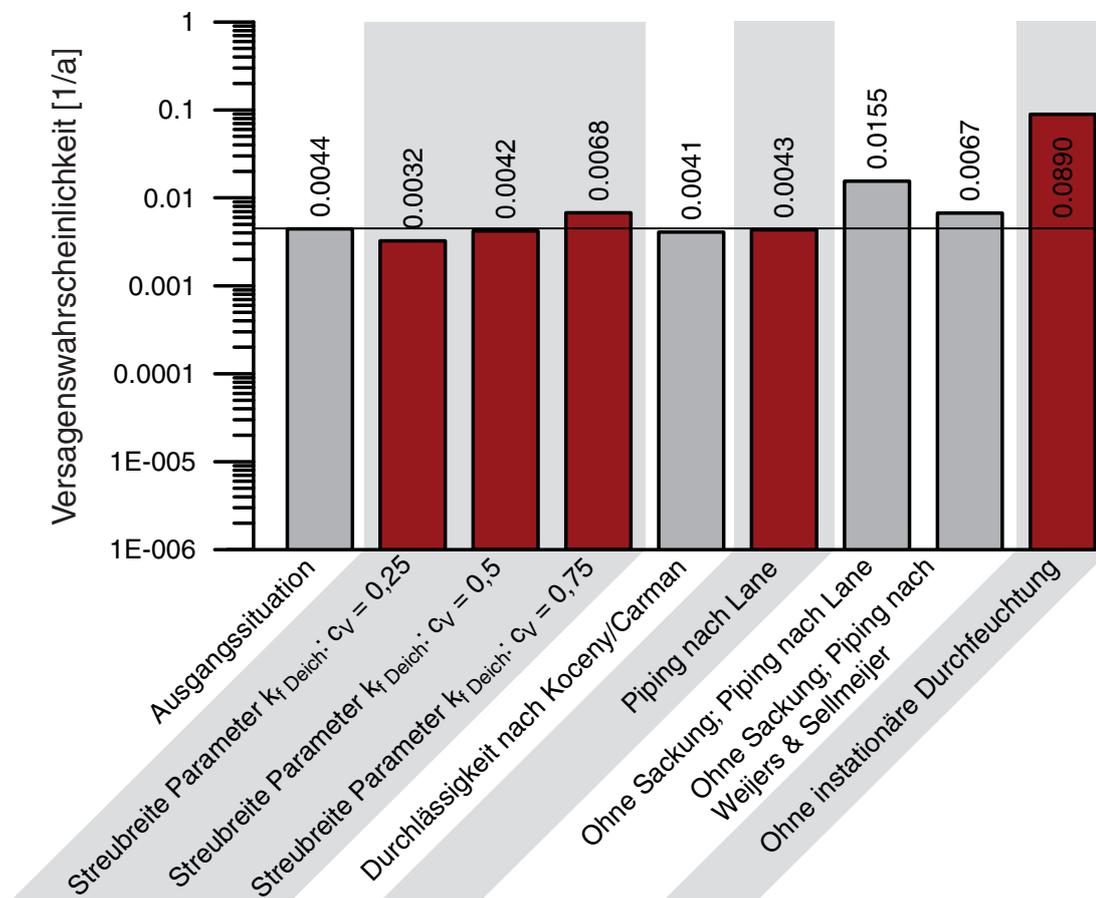
**Bild 8.11:** Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeiten für die Betrachtung mit und ohne den Mechanismus *instationäre Durchfeuchtung*, Darstellung im Balkendiagramm mit logarithmischem Maßstab

Die Berücksichtigung der instationären Durchfeuchtung als Voraussetzung für ein Versagen der landseitigen Böschung stellt einen wesentlichen Schritt auf dem Weg zu einer umfassenden Beschreibung des Deichversagens dar. Es ist nun möglich, durch die Berücksichtigung der *instationären Durchfeuchtung* die Versagensäste der *Böschungsbruch*-Mechanismen mit Vorbedingungen und dem Detaillierungsgrad der übrigen Versagensäste angepasst abzubilden. Hiermit wird eine zuverlässigere Bestimmung der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit möglich.

## 8.8 Ergebnis der Untersuchungen

In den vorangegangenen Abschnitten wurde jeweils die Auswirkung unterschiedlicher Variationen gegenüber der Ausgangssituation des Beispieldeiches untersucht. Die

zahlenmäßigen Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalysen für das Deichversagen sind in Bild 8.12 zusammenfassend dargestellt und in einem abschließenden Schritt zu beurteilen.



**Bild 8.12:** Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeiten für in den Abschnitten 8.2 bis 8.7 untersuchten Varianten, Darstellung im Balkendiagramm mit logarithmischem Maßstab

Die Versagenswahrscheinlichkeit der Ausgangssituation liegt bei  $P_f = 0,0044$  (siehe auch Abschnitt 8.2). Eine vergrößerte bzw. verringerte Streubreite der hydraulischen Durchlässigkeit des Deichkörpers führt auch zu vergrößerten bzw. verringerten Wahrscheinlichkeiten für das Versagen des Deiches. Die Streubreite wird durch den Wert des Variationskoeffizienten angegeben und wurde hier im Bereich von  $c_v = 0,25$  bis  $c_v = 0,75$  variiert. Die ausführliche Analyse hierzu findet sich in Abschnitt 8.3. Um die Durchlässigkeit des Deichuntergrundes in dem hier entwickelten Modell zu berücksichtigen stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Die direkte Angabe des Wertes, wenn beispielsweise Laborversuchsergebnisse vorliegen. Andernfalls kann die hydraulische Durchlässigkeit nach Kozeny/Carman abgeschätzt werden. In beiden Fällen liegt die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Flussdeiches auf vergleichbarem Niveau (siehe Abschnitt 8.4). Obwohl unterschiedliche Berechnungsmethoden zu erheblichen Unterschieden bei der Versagenswahrscheinlichkeit für den

Mechanismus Piping führen, bleibt die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit hiervon nahezu unbeeinflusst (siehe Abschnitt 8.5).

Die Ergebnisse der Berechnungen bis hierher wurden stets mit der Konfiguration der Ausgangssituation verglichen. Hierbei ist die wesentliche Entwicklung dieser Arbeit die Einbeziehung der geotechnischen Gegebenheiten. Insbesondere der Mechanismus der *Sackungen im Deichkörper* sowie der Einfluss der *instationären Durchfeuchtung* sind in die Ermittlung des Deichversagens eingeflossen. Die Berücksichtigung der *Sackungen im Deichkörper* führt zu einer deutlichen Reduzierung der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit in der Ausgangssituation. Werden die *Sackungen im Deichkörper* außer Acht gelassen, wirkt sich die unterschiedliche Berechnung des Versagens durch *Piping* deutlich auf das Deichversagen aus. (Weitergehende Analysen sowie Erklärungen hierzu finden sich in Abschnitt 8.6).

Der größte Einfluss ist in dem gewählten Beispiel auf die Berücksichtigung der *instationären Durchfeuchtung* zurück zu führen. Der Mechanismus der *instationären Durchfeuchtung* wird als Vorbedingung (*UND-Verknüpfung*) für die *Böschungsbruch-Mechanismen* eingeführt. Aus der hierdurch verringerten Anzahl an Rechendurchläufen für die *Böschungsbruch-Mechanismen* folgt eine geringere Versagenswahrscheinlichkeit der einzelnen *Böschungsbruch-Mechanismen* und im konkreten Fall auch eine um ein Vielfaches geringere Gesamtversagenswahrscheinlichkeit (siehe Abschnitt 8.7).

In einem abschließenden Schritt sind die zahlenmäßigen Ergebnisse der probabilistischen Bewertung zu beurteilen. Die ermittelten Versagenswahrscheinlichkeiten zeigen hierbei den Einfluss der jeweiligen oben beschriebenen Untersuchungen in Relation zueinander auf. Hieraus lassen sich Einschätzungen über den Zustand des Deiches und geeignete Maßnahmen zur Verringerung der Versagenswahrscheinlichkeit ableiten.

In dem vorgestellten Beispiel wird deutlich, dass ohne die Betrachtung der *instationären Durchfeuchtung* die Versagenswahrscheinlichkeit des Deiches um ein Vielfaches höher ausfällt. Dies bedeutet, dass der Vermeidung des stationären Durchströmungszustandes für diesen Deich hohe Priorität zukommt. In dem Modell wird der stationäre Durchströmungszustand anhand der hinterlegten Hochwasserwelle selten erreicht (siehe Abschnitt 8.2 sowie Abschnitt 8.7). Es wurde jedoch aufgezeigt, dass weitere Faktoren wie z. B. eine Vorsättigung des Deichkörpers infolge lang anhaltender Niederschlagsereignisse zu einer beschleunigten Durchfeuchtung führen

und somit das Eintreten des stationären Durchströmungszustandes begünstigen können.

Mit dem vorgestellten probabilistischen Modell kann der Einfluss von Maßnahmen aufgezeigt werden, wobei hierfür das Verhältnis der ermittelten Versagenswahrscheinlichkeiten (hier: mit/ohne *instationäre Durchfeuchtung*) zu bewerten ist. Hieraus sind geeignete Maßnahmen abzuleiten, deren Wirksamkeit anschließend in einem weiteren Schritt zu untersuchen ist. Beispielsweise kann in dem vorliegenden Fall eine landseitige Berme, die dränfähig und filterfest gegenüber Deich und Untergrund ausgeführt ist, die Versagenswahrscheinlichkeit für den stationären Durchströmungszustand entscheidend reduzieren. Der hierdurch veränderte Deichquerschnitt ist dann weitergehend nachzuweisen.

Für die umfassende Beurteilung eines (vorhandenen oder geplanten) Deiches sind neben der deterministischen Bemessung sowie den vergleichenden Ergebnissen der probabilistischen Bewertung weitere Einwirkungen zu berücksichtigen. Die folgende (noch unvollständige) Auflistung soll verdeutlichen, welche Einflussgrößen den quantifizierenden Betrachtungen nicht oder nicht vollständig zugeführt werden können (ein Ausblick für die Berücksichtigung solcher Einflussgrößen wird in Abschnitt 9.4.6 gegeben):

- Wettereinflüsse (Sturm, Frost, Verwitterungsprozesse)
- Treibeis und Treibgut, ggf. herrenloser Schiffsverkehr
- Oberflächenerosion (Bewuchs, Beweidung)
- Innere Erosion infolge biogener Einflüsse (Wühltiertätigkeit, organische Umsetzung)
- Wirkungen von Alterungsprozessen (Trocknung/ Schrumpfung, Frostwirkung, organische Zerfallsprozesse, Bildung von Makroporen durch Pflanzenwurzeln und Kleintiere)
- Lokale Anomalien im Untergrund z. B. infolge historischer Deichbruchereignisse (Woyenbildung, Kolmations- und Erosionsvorgänge) oder Auskiesungen, Auffüllungen etc.

Anhand dieser Aufzählung von Einflussgrößen, die die Gesamtzuverlässigkeit eines Deichsystems ebenfalls mitbestimmen, wird erkennbar, dass die ingenieurmäßige Gesamtbeurteilung den Einfluss rechnerisch nicht erfassbarer Phänomene und Wirkungen mit umfassen muss.

Prinzipiell konnte mit den ausgewählten Beispielen allerdings aufgezeigt werden, dass bei der Ermittlung von Versagenswahrscheinlichkeiten von Flussdeichen das gesamte System einschließlich der geotechnischen Gegebenheiten umfassender als mit herkömmlichen Mitteln erfasst werden kann. Mit einem umfassenderen Modell können realistischere Ergebnisse erzielt und so das Verständnis für die probabilistische Natur der Gesamtproblematik weiter verbessert werden. Hiermit einher geht ebenso die Akzeptanz solcher Untersuchungen, was die Risikokommunikation vereinfachen kann.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

### 9.1 Fazit

In der vorliegenden Arbeit wird die probabilistische Bewertung von Flussdeichen vorgestellt und der Fehlerbaum für Flussdeiche erläutert. Mit den dazu neu entwickelten Versagensmechanismen kann eine realitätsnähere Bewertung von Flussdeichen erfolgen. Der Mechanismus *Sackungen im Deichkörper* bewirkt eine detailliertere Modellierung im Versagensast mit den Mechanismen *Aufschwimmen* sowie *Piping*, da der Erosionsgrundbruch im Deichuntergrund nicht mehr mit dem sofortigen Versagen des Deiches gleichgesetzt wird. Mit dem Mechanismus der *instationären Durchfeuchtung* kann erstmals die zeitabhängige Durchfeuchtung des Deichkörpers im Hochwasserfall abgebildet werden und dient als Vorbedingung für die Untersuchung verschiedener *Böschungsbruch*-Mechanismen.

Die probabilistische Bewertung von Flussdeichen bietet sich einerseits an, um bei bestehenden Altdeichen mit weitgehend unbekanntem Aufbau und Untergrund eine Aussage über die Versagenswahrscheinlichkeit treffen zu können. Andererseits stellt die probabilistische Bewertung für neu zu errichtende Deiche ein Werkzeug zur Verfügung, um im Rahmen von Risikobetrachtungen bereits in der Planungsphase die Eigenschaften der Deichstrecke (z. B. Kosten, Verlauf, Schutzwirkung...) zu optimieren.

Die probabilistische Bewertung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Parameter nicht durch einen einzelnen Wert charakterisiert werden; vielmehr wird das Auftreten jedes Parameters in dem Bereich des Untersuchungsabschnittes durch stochastische Kenngrößen erfasst und im Rechenmodell berücksichtigt. Beispielsweise werden auf der Belastungsseite für den Hochwasserstand die Charakteristik der Abflussganglinie, die aussagt, welcher Hochwasserstand im Durchschnitt wie häufig überschritten wird, sowie die zugehörige Einstaudauer des Deiches abgebildet und fließen in die Berechnung zur Versagenswahrscheinlichkeit des Deiches ein.

Nach Abwägung zwischen unterschiedlichen Methoden zur probabilistischen Modellierung wurde das Rechenmodell für Flussdeiche in der vorliegenden Arbeit mit der Monte-Carlo-Simulation umgesetzt.

Zunächst wurde die deterministische Vorgehensweise für die Bemessung von Flussdeichen nach dem Stand der Technik erläutert. Hiervon wurden die Standsicherheitsnachweise aufgegriffen und in das probabilistische Bewertungskonzept überführt. Die Zusammenhänge der Versagensszenarien wurden in einem Fehlerbaum visualisiert. Der so entwickelte *Fehlerbaum für Flussdeiche* wurde anschließend erweitert, um einzelne Versagensabläufe in dem probabilistischen Modell realitätsnäher abzubilden.

Die Versagensmechanismen *Verlust der Sicherheit gegen Aufschwimmen* sowie die nachfolgende *Rückschreitende Erosion (Piping)* wurden um den Versagensmechanismus *Sackungen im Deichkörper* erweitert. Hieraus ergibt sich eine Reduzierung der Wahrscheinlichkeit für *Deichversagen*.

In diesem Zusammenhang wurde der Einfluss des Berechnungsmodells für den Versagensmechanismus *Piping* untersucht. Neben dem eher simplen Ansatz von *Lane*, bei dem die Eigenschaften des Bodens durch einen Beiwert zusammengefasst werden, kann die Versagenswahrscheinlichkeit nach der Methode von *Weijers & Sellmeijer* ermittelt werden. Hierfür werden jedoch weitergehende Informationen über den Untergrund benötigt. Es wurde aufgezeigt, dass bei Verwendung des verbesserten Rechenmodells zum einen die Modellunsicherheit verringert werden kann und sich darüber hinaus die den jeweiligen Mechanismus betreffende Versagenswahrscheinlichkeit reduziert.

Für drei *Böschungsbruch*-Versagensmechanismen wurde als Vorbedingung der Mechanismus der *instationären Durchfeuchtung des Deichkörpers* neu eingeführt. Hierfür wurde ein iteratives Verfahren entwickelt, mit dem geprüft wird, ob sich in Abhängigkeit der Charakteristik der Hochwasserwelle ein stationärer Durchströmungszustand im Deichkörper einstellen kann. Hierbei können der strukturelle Aufbau des Deichkörpers, seine Materialeigenschaften sowie eine mögliche Vorfeuchte im Deichkörper berücksichtigt werden. Lediglich für den Fall, dass die Sickerlinie noch während des Hochwasserereignisses (Einstau des Deiches) den landseitigen Böschungfußpunkt erreicht, ist der Ansatz der stationären Durchströmung für den darauf folgenden Böschungsbruch-Mechanismus gerechtfertigt. Die Berücksichtigung der Vorbedingung der instationären Durchfeuchtung für die Ermittlung von Versagenswahrscheinlichkeiten hat eine u. U. signifikante Reduzierung der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit zur Folge.

Über die Umsetzung der bisherigen deterministischen Bemessung in ein probabilistisches Bewertungskonzept hinaus konnte der zugrunde liegende Fehlerbaum an entscheidenden Stellen erweitert werden. Das Entwicklungspotenzial des Fehlerbaumes für Flussdeiche und der Einfluss von Verbesserungen auf das Deichversagen wurde umfassend und auf mehreren Ebenen dargestellt:

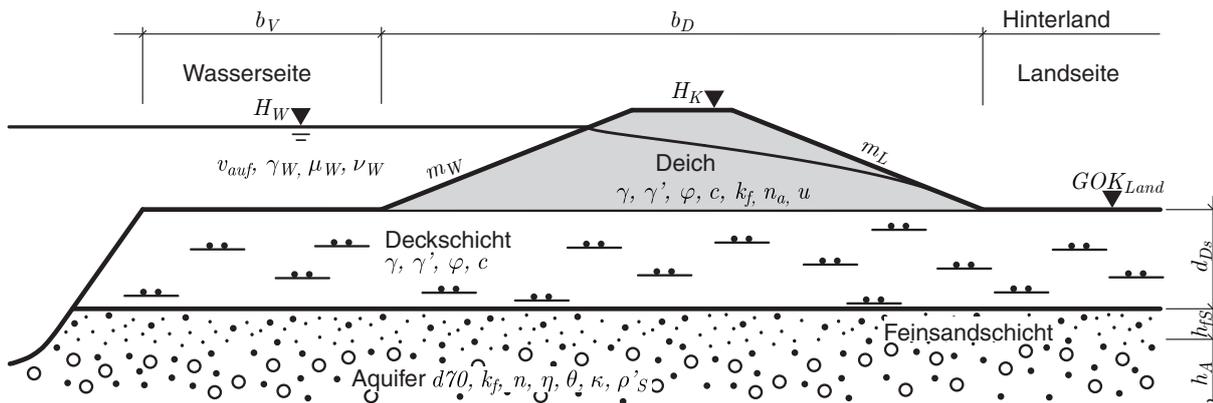
- Die Neuentwicklung und das Hinzufügen von Versagensmechanismen zur realistischeren Abbildung von Versagensprozessen: Versagensmechanismen *Sackungen im Deichkörper* sowie *Instationäre Durchfeuchtung des Deichkörpers*.
- Der Einfluss von weiterentwickelten Versagensmechanismen, die auf Grundlage genauerer Kenntnisse Versagensprozesse präziser abbilden können: Vergleich des Versagensmechanismus *Piping (nach Lane)* und des Versagensmechanismus *Piping (nach Weijers & Sellmeijer)*.
- Einfluss von verbesserten Informationen über einzelne Parameter. Die hieraus resultierende verringerte Unsicherheit, die einem Parameter zuzuordnen ist, wird durch einen verringerten Variationskoeffizienten abgebildet. Dessen Einfluss wurde beispielhaft für den Parameter der *hydraulischen Durchlässigkeit des Deichmaterials* aufgezeigt.

Die praktische Anwendung des vorgestellten Modells wurde an einem Beispieldeich, der an die Gegebenheiten von Flussdeichen im Niederrheingebiet angepasst ist, vorgeführt und diskutiert. Die hierbei ermittelten Versagenswahrscheinlichkeiten können als Basis zur Ermittlung von Schwachstellen herangezogen werden. Darüber hinaus können die Ergebnisse zum Vergleich von Szenarien in Bezug auf verschiedene Zeithorizonte oder unterschiedliche Sanierungsmaßnahmen dienen. Der Absolutwert der Berechnungsergebnisse gibt die Größenordnung für die jeweilige Versagenswahrscheinlichkeit wieder.

Mit dem probabilistischen Rechenmodell können für einen ausgewählten Deich unterschiedliche Szenarien untersucht werden, die sich durch Einflussnahme auf die Parameter bzw. Mechanismen wie oben beschrieben im Modell einstellen lassen. Andere Einflüsse lassen sich nicht ohne weitere Schritte berücksichtigen. So ist beispielsweise der Einfluss der Deichverteidigung, wie in Abschnitt 7.8 beschrieben, bisher nicht quantifizierbar. Durch den Einsatz geeigneter Deichverteidigungsmaßnahmen lässt sich die rechnerisch ermittelte Versagenswahrscheinlichkeit in situ faktisch noch reduzieren.

## 9.2 Hinweise für die Anwendung des Modells

Für die Anwendung des hier beschriebenen probabilistischen Modells ist die Kenntnis einer Vielzahl von Parametern einschließlich ihrer stochastischen Kenngrößen erforderlich (siehe Abschnitt 4). Einen Überblick über die im Modell verwendeten Parameter jeweils für das Wasser, den Deich, die Deckschicht sowie den Aquifer gibt die grafische Darstellung in Bild 9.1.



**Bild 9.1:** Prinzipdarstellung Deich und Untergrund mit den im Modell verwendeten Parametern

Aus Tabelle 9.1 geht die Zuordnung der Parameter zum jeweiligen Versagensmechanismus hervor. Hieraus wird ersichtlich, dass je nach Auswahl des Rechenverfahrens (z. B. beim Mechanismus *Rückschreitende Erosion*: Berechnung nach *Lane* oder nach *Weijers & Sellmeijer*) unterschiedliche Parameter erforderlich sind. Die Auswahl des Rechenverfahrens kann bzw. muss in Abhängigkeit der jeweils vorliegenden Parameter erfolgen. Über Wirkungen der Auswahl von alternativen Rechenverfahren wird beispielhaft in Abschnitt 8.4 sowie in Abschnitt 8.5 berichtet.

Fehlen für die Berechnung eines Versagensmechanismus ein oder mehrere erforderliche Parameter, bleibt der betroffene Versagensmechanismus im Modell unberücksichtigt. Dies kann erhebliche Auswirkungen auf die ermittelte Gesamtversagenswahrscheinlichkeit haben, wie in Abschnitt 8.6 am Beispiel der *Sackungen im Deichkörper* dargestellt wird.

**Tabelle 9.1:** Zuordnung der im Modell verwendeten Parameter zum jeweiligen Versagensmechanismus und in Abhängigkeit des Rechenverfahrens

Versagensmechanismus	Abschn.	Parameter*) je nach Rechenverfahren
Überströmen der Deichkrone	7.2	$H_K, H_W$
Verlust der Sicherheit gegen Aufschwimmen	7.3	$d_D, l_S, p_{red}, GOK_{Land}, H_W, \gamma_D, \gamma_W$
Rückschreitende Erosion (Piping)	7.4	Nach LANE: $c_L, l_S, H_L, H_W$
		Nach WEIJERS & SELLMELJER: $d_{70}, h_A, l_S, H_L, H_W, \eta, \vartheta, \nu_W, \rho_W, \rho'_S$
		Durchlässigkeit des Aquifers direkt angegeben: $k_f$ Bestimmung nach KOZENY/CARMAN: $d_w, n, C_K, \mu_W$
Sackungen im Deichkörper	7.5	$h_{fS}, H_K, H_W, \zeta$
Instationäre Durchfeuchtung des Deichkörpers	7.6	$b, k_f, n_a, m_L, m_W, v_{auf}, GOK_{Land}, H_K, H_W, \psi_m$
Böschungsbruch-Mechanismen	7.7	$b_D, c, d_D, m_L, m_W, u, G (\gamma, \gamma'), GOK_{Land}, H_K, H_W, \gamma_W, \varphi$

\*) Die Bedeutung der Parameter und ihre im Modell verwendete Einheit kann den Erläuterungen im jeweils genannten Abschnitt sowie dem Symbolverzeichnis entnommen werden.

### 9.3 Ausblick zum Rechenmodell

Das vorgestellte probabilistische Rechenmodell stellt den ersten Schritt dar, um über die deterministische Bemessung hinausgehend das Verhalten von Deichen bewerten zu können und ggf. geeignete Maßnahmen ableiten zu können. Hierbei wurden die deterministischen Standsicherheitsnachweise in das probabilistische Modell überführt sowie einzelne Mechanismen erweitert oder neu entwickelt.

Darüber hinaus bleibt noch Raum für Erweiterungen des Modells, wofür z. T. weitergehender Forschungsbedarf besteht. Daneben sollen im Folgenden Verbesserungsmöglichkeiten des Modells aufgezeigt werden, die z. B. den Rechenbedarf reduzieren

können oder die Präzision der Mechanismen erhöhen helfen. Mögliche Weiterentwicklungen der Versagensmechanismen werden darüber hinaus in Abschnitt 9.4 vorgestellt.

- Das Rechenmodell wurde für Flussdeiche mit einem (quasi) homogenen Aufbau entwickelt. Diese vereinfachende Annahme ist zum überwiegenden Teil gültig für Altdeiche, die ohne strukturierten Aufbau vorliegen. Darüber hinaus kann das Modell für die Abschätzung infolge einer außergewöhnlichen Einwirkung wie dem Ausfall des Dichtungselementes herangezogen werden.
- Das vorgestellte Rechenmodell geht von einem unbeschädigten und intakten Deichquerschnitt aus. Die neue DIN 19712:2013-01 greift als weiteren Zustand den Eintritt eines Hochwasserereignisses während einer Baumaßnahme am Deich auf, der mit dem sogenannten *bauzeitlichen Bemessungshochwasserstand* (BauHW) zu untersuchen ist. Solche Bauzustände sind für den Deichquerschnitt allenfalls rudimentär im Rechenmodell umzusetzen, die Berücksichtigung des BauHW erfordert weitergehende Informationen zur Charakterisierung der Parameter auf der Belastungsseite. Ebenso wie Bauzustände können auch andersartige Schäden (z. B. infolge Schiffsanpralls oder Windwurfes) bisher nur sehr allgemein in dem Rechenmodell abgebildet werden.
- Die Bemessung mit der Einwirkung Erdbeben ist für Flussdeiche im eingestauten Zustand nach den Regeln der Technik nicht erforderlich und daher im Rechenmodell nicht vorgesehen.
- Neben den Einwirkungen, die aus dem Hochwasserstand resultieren, werden keine weiteren Lasten, wie beispielsweise Verkehrslasten auf der Deichkrone oder auf Deichverteidigungswegen, in Ansatz gebracht.
- Der Einfluss des Windes auf die Wellenhöhe wird bisher im Modell nicht berücksichtigt. Die in Abschnitt 5.1 zitierte Literatur beschreibt den Einfluss des Windes üblicherweise mit der Raleigh-Verteilung, die in dem Rechenmodell nicht hinterlegt ist. Darüber hinaus werden zur Berücksichtigung des Windeinflusses auf die Wellenhöhe weitergehende Informationen zu Wasserstandstiefen im Deichvorland, Kennwerte der auftretenden Wellen wie Wellenhöhe, mittlere Wellenperiode, mittlere Wellenlänge sowie meteorologische Daten zur Windgeschwindigkeit, auftretende Windrichtung etc. benötigt. Untersuchungen zu den Abhängigkeiten der Parameter von Wasserstand und Windeinfluss sind z. B. in KORTENHAUS & OUMERACI (2002) zusammengestellt.
- Das Durchlaufen einer Monte-Carlo-Simulation nimmt verhältnismäßig wenig (Rechen-)Zeit in Anspruch. Um belastbare Ergebnisse für sehr kleine Versagens-

wahrscheinlichkeiten zu erhalten, wird eine große Anzahl von Rechendurchläufen benötigt (siehe Abschnitt 3.4). Insbesondere die iterative Vorgehensweise zur Bestimmung der Durchfeuchtungsdauer beansprucht einen Großteil der Rechenzeit eines Durchganges. Zur Reduzierung des Rechenaufwandes von Monte-Carlo-Simulationen sind verschiedene Möglichkeiten bekannt. Beispielsweise kann durch Einführung eines Abbruchkriteriums nach HAUGH (2004) der Rechendurchlauf abgebrochen werden, wenn vorgegebene Bedingungen zur Qualität des Ergebnisses erreicht werden. Ein anderer Ansatz wird bei Stratified-Sampling-Methoden verfolgt, bei denen der Wertebereich eines Parameters in Abschnitte mit gleichem kumulativem Wahrscheinlichkeitsanteil segmentiert wird, so dass für jeden Abschnitt jeweils nur ein repräsentativer Wert verwendet wird. Weitere Methoden zur Reduzierung des Rechenaufwandes mit ausführlichen Erläuterungen finden sich unter anderem bei BACHMANN ET AL. (2008) sowie HUBER (2008).

- Eine vollständige Risikobetrachtung setzt sich aus der Analyse der Versagenswahrscheinlichkeit sowie der Ermittlung des Schadenspotentials zusammen. Für die Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit von Flussdeichen wurde das vorliegende Rechenmodell entwickelt. Zusätzlich ist das Schadenspotential der Überflutungsfläche im Deichhinterland zu bestimmen. Hierzu gehört unter anderem die Ausbreitung der Flutwelle (Ausbreitungsgeschwindigkeit und Initialtiefe), die selbst von der Entwicklung der Bresche im Deich abhängig ist. Für die Weiterentwicklung zu einem umfassenden Instrument der Risikobetrachtung gehört demnach die Verknüpfung mit einem Modell zur Breschenbildung sowie zur hydraulischen Modellierung, um auf dieser Grundlage das Schadenspotential abschätzen zu können. Diese Verknüpfungen wurden z. B. in SILVA ET AL. (2006) umgesetzt, wo unterschiedliche Modelle jeweils aus den Aufgabenfeldern

- Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit der Deiche,
- Ermittlung von Überflutungsflächen,
- Schadenspotentialanalyse sowie
- Kosten-Nutzen-Analyse

miteinander verglichen und im Hinblick auf die Zusammenführung zu einem umfassenden Instrument des Risikomanagements ausgeführt wurden. Mit diesem Instrument konnten in SILVA ET AL. (2009) Risikoanalysen jeweils rechts und links des Rheins im deutsch-niederländischen Grenzgebiet beispielhaft durchgeführt werden.

## 9.4 Ausblick zu den Versagensmechanismen

### 9.4.1 Erweiterung der Mechanismen Überströmen und Sackung

Der Flussdeich kann in dem hier erläuterten Rechenmodell infolge zweier unterschiedlicher Versagensarten überströmt werden: Zum einen tritt Überströmen ein, sobald der Wasserstand im Fließgewässer höher als die Deichkrone steigt (Versagensmechanismus *Überströmen der Deichkrone*, siehe Abschnitt 7.2), zum anderen kann die Deichkrone nach Verstürzen einer Erosionsröhre im Untergrund bis unter das Niveau des Flusswasserstandes absacken (Versagensmechanismus *Sackungen im Deichkörper*, siehe Abschnitt 7.5). Die weitergehenden Zusammenhänge sind im *Fehlerbaum für Flussdeiche* in Bild 6.4 dargestellt. In beiden beschriebenen Fällen bedeutet das Überströmen der Deichkrone das Versagen des Deiches.

Bei dieser Annahme wird vernachlässigt, dass das über die Deichkrone und die landseitige Böschung strömende Wasser erst ab einer kritischen Wassermenge sowie einer kritischen Fließgeschwindigkeit eine ausreichend erosive Wirkung entfalten kann, um zu Erosion auf der landseitigen Böschung und im Bereich der Deichkrone zu führen. Zudem ist hierbei die Dauer der Überströmung relevant. Darüber hinaus liegt der obigen Betrachtungsweise die Annahme zugrunde, dass es sich um einen homogenen Deichaufbau handelt. Die in der Regel bewachsene Deichkrone und Böschung kann dem überströmenden Wasser jedoch einen gewissen und zu quantifizierenden Widerstand gegen Erosion entgegen setzen.

Erst nach erfolgter Erosion der Grasnarbe an der Oberfläche kann das Deichmaterial erodiert werden, was dann zu einer Breschenbildung und Überflutung des Hinterlandes führen kann. Als Erweiterung für den bestehenden Fehlerbaum könnte der Mechanismus Erosion der landseitigen Böschung mit anschließender Breschenbildung berücksichtigt werden. Wie in Abschnitt 7.2 angedeutet, behandeln derzeit existierende Modelle den Vorgang der Breschenbildung mit kohäsionslosem Material, was für das Material bestehender Deichkörper häufig nicht ausreichend zutreffend ist. Darüber hinaus sollte bei der Berücksichtigung des Erosionsvorganges die zeitliche Abhängigkeit in Bezug auf die Hochwasserganglinie einfließen.

Großversuche an Deichen in den Niederlanden haben gezeigt, dass sich Deiche insbesondere bei Wellenüberlauf wesentlich widerstandsfähiger verhalten können, als zuvor angenommen wurde [VAN DER MEER ET AL., 2007]. Als Ergebnis von Untersuchungen im Rahmen des IMPACT-Programms an fünf naturmaßstäblichen

Großversuchen sowie an 22 Versuchen im Modellmaßstab 1:10 geben MOHAMED ET AL. (2002) und MORRIS (2005) folgende Hinweise für die Modellierung der Breschenbildung:

- Während der Breschenentwicklung ergeben sich üblicherweise senkrechte Abbrüche an den Seiten und nicht trapezförmige Breschenseiten, wie es bisher in vielen Modellen vorgesehen ist.
- Die laterale Verbreiterung der Bresche dauert so lange an, wie die Bresche durchströmt wird.
- Bei Deichen aus kohäsivem Material wurde vorwiegend eine unstetige, stufenartige Erosion von der Deichkrone aus beobachtet, im Gegensatz zur häufig beschriebenen flächenhaften (böschungsp parallelen) Erosion.
- Die Geschwindigkeit der Breschenbildung wird – außer von der Bodenart – im Wesentlichen von Bodenparametern wie der Korngrößenverteilung, Verdichtungsgrad und Wassergehalt bestimmt.
- Darüber hinaus hat der Aufbau des Deiches Einfluss auf den Vorgang der Breschenbildung.

Aus den genannten Feststellungen wird ersichtlich, dass für die Implementierung eines Versagensmechanismus, der den Breschenbildungsprozess ausreichend realistisch, zuverlässig und umfassend abbilden kann, weitergehende Untersuchungen notwendig sind. Maßgeblich ist hierbei, dass dreidimensionale Bedingungen sowie hochgradig instationäre Vorgänge im Bereich des Grenzzustandes zu beschreiben sind, die die Fachgebiete Hydraulik, Sedimenttransport und Geotechnik umfassen.

#### **9.4.2 Entwicklungen zu den Böschungsbruch-Mechanismen**

Bei Deichen mit homogenem Querschnitt, die aus Material mit geringer Kohäsion aufgebaut sind, kann die lokale Standsicherheit maßgebend werden, insbesondere am Austrittspunkt der Sickerlinie aus der landseitigen Böschung [BAW 2011]. Ab dem Zeitpunkt, ab dem die Sickerlinie den landseitigen Böschungsfuß erreicht, ist zu überprüfen, ob die landseitige Deichböschung für den ungünstigen Fall mit horizontal anzunehmender Strömung eine ausreichende Standsicherheit besitzt.

Die im hier vorgestellten Rechenmodell verwendete Methode der Gleitkreise kann auch für homogene Deiche mit kohäsivem Material angewendet werden. Für die Suche des ungünstigsten Gleitkreises ist die Geometrie des Gleitkreises zu variieren, was einen erhöhten Rechenaufwand bedeutet. In dem hier behandelten Rechenmodell

wurde der Rechenaufwand reduziert, indem die Anzahl der untersuchten Gleitkreisgeometrien beschränkt wurde.

Eine Alternative, die nicht auf der mehr oder weniger iterativen Suche der ungünstigsten Gleitfuge basiert, stellt die numerische Stabilitätsanalyse dar, wie sie z. B. bei MÖLLMANN (2009) beschrieben ist. Der Vorteil hierbei ist, dass die Gleitfuge das Ergebnis der Berechnung ist und im Gegensatz zu den analytischen Methoden lediglich ein Berechnungsgang notwendig ist. Allerdings ist für die numerische Berechnung die Modellierung eines Netzes mit ausreichender Genauigkeit notwendig, was einen erheblichen Mehraufwand darstellt.

### 9.4.3 Möglichkeiten bei der Ermittlung der instationären Durchfeuchtung

In Abschnitt 7.6 wird eine analytische Berechnungsmethode beschrieben, mit der das Voranschreiten der Durchfeuchtungsfront im Deichkörper in Abhängigkeit einer zeitlich veränderlichen hydraulischen Belastung beschrieben werden kann. Änderungen in der Aufstaugeschwindigkeit können auf diese Weise quantitativ berücksichtigt werden. Das Modell wurde auf Basis einer numerischen Parameterstudie angepasst und verifiziert. Hierfür wurde ein Korrekturfaktor eingeführt, der den Unterschied zwischen der Aufstaugeschwindigkeit und der Poren­geschwindigkeit (Durchlässigkeit) im Deichmaterial berücksichtigt. Mit Hilfe des eingeführten Korrekturfaktors konnte eine gute Übereinstimmung zwischen Ergebnissen der analytischen Methode mit numerischen Nachrechnungen erzielt werden.

Mit dem analytischen Verfahren ist es möglich, den instationären Verlauf der Durchfeuchtung realitätsnah und den numerischen Berechnungsergebnissen entsprechend wiederzugeben. Allerdings verbleiben noch Schwächen der analytischen Vorgehensweise, die eine uneingeschränkte Anwendung ausschließen. Die Restriktionen rühren hauptsächlich von der eindimensionalen Betrachtung im analytischen Ansatz her. Lediglich die geometrischen Randbedingungen konnten hier durch den Ansatz der mittleren Fließstrecke  $x^*$  ausgeglichen werden (vgl. Abschnitt 7.6.3). Folgende Aspekte bleiben demnach unberücksichtigt:

- Strömungsrichtung

Das analytische Verfahren ist für eine horizontale Strömung im Deichkörper in Richtung der mittleren Fließstrecke  $x^*$  definiert. Zu Beginn des Aufstauvorganges, insbesondere bei raschem Aufstau oder bei größerer hydraulischer Durchlässigkeit, dringt das Wasser entlang der wasserseitigen Böschung in den Deichkörper ein, wodurch sich eine primär vertikal nach unten gerichtete Wasserbewegung

einstellt. Erst wenn im weiteren Verlauf der hydraulische Gradient abnimmt, ändert sich die Richtung der Strömung in eine vorwiegend horizontale Richtung. Diese Änderung der Strömungsrichtung wird im zweidimensionalen numerischen Modell physikalisch korrekt wiedergegeben. Im eindimensionalen analytischen Modell ist die Berücksichtigung der Richtungsänderung so nicht möglich. Für die Anpassung des Modells wurde daher der Vorgang der Durchfeuchtung in der Deichaufstandsstrecke erst ab einer Länge von 5 m berücksichtigt, für welche die Annahme einer horizontalen Durchströmung gültig ist. Für kürzere Durchströmungstrecken ist das vorgestellte Modell daher nicht geeignet. Dieses Maß ist in Abhängigkeit der geometrischen Eingangsgrößen, insbesondere der Deichhöhe sowie der wasserseitigen Böschungsneigung, ggf. anzupassen.

- Anfangsbedingungen

Der Anfangszustand der Feuchteverteilung im Deichkörper wird in numerischen Modellen üblicherweise mit Hilfe der Saugspannungsbeziehung definiert. Infolgedessen stellt sich eine Verteilung des Wassergehalts in Abhängigkeit des zugehörigen Matrixpotentials im numerischen Modell ein. Eine derartige Berücksichtigung von Anfangsverteilungen der Zustandsgrößen ist im analytischen Modell nicht möglich. Hier sind die Anfangsfeuchte sowie das zugehörige Matrixpotential mit einem Punkt auf der Saugspannungsbeziehung berücksichtigt. Gegenüber bestehenden Analyseverfahren ist dies bereits eine deutliche Verbesserung [SCHEUERMANN 2005]. Die Saugspannungsbeziehung kann mithilfe geeigneter Modelle parametrisiert werden, siehe u. a. VAN GENUCHTEN (1980) oder VAN GENUCHTEN & NIELSEN (1985). Für viele Böden können entsprechende Parameter aus experimentellen Studien mit Hilfe sogenannter Pedotransferfunktionen abgeschätzt werden [CARSEL & PARRISH 1988 und DVWK 1999B]. Der entsprechende luftgefüllte Porenanteil wird aus dem Wassergehalt, der als Anfangsbedingung angenommen wird, und dem Sättigungswassergehalt abgeleitet. Es ist somit auch mit dem analytischen Modell bereits möglich, meteorologische und hydrologische Szenarien abzubilden, indem die Anfangszustände in realistischen Grenzen variiert werden.

- Aufstaugeschwindigkeit

Das analytische Modell wurde für die Abbildung von zeitabhängigen Aufstauvorgängen hergeleitet. Neben den in Abschnitt 7.6 behandelten linearen Aufstauvorgängen gibt das Modell auch veränderliche Aufstaugeschwindigkeiten treffend wieder. Um die angesprochenen doppelten Hochwasserwellen abzubilden, müsste das Modell dahingehend erweitert werden, dass auch Abstauvorgänge berücksichtigt werden können, was letztlich eine teilweise Umkehr der Strömungsrichtung bedeutet.

#### 9.4.4 Verlust der Sicherheit gegen Hydraulischen Grundbruch

Bisher wurde im Rechenmodell der Verlust der *Sicherheit gegen Aufschwimmen* (siehe Abschnitt 7.3) behandelt. Voraussetzung für ein Versagen durch *Aufschwimmen* ist das Vorhandensein einer Deckschicht, die so gering durchlässig ist, dass sich darunter ein hydrostatischer Druck ohne nennenswerte Durchströmung der Deckschicht aufbauen kann. Für den Fall, dass die Deckschicht keine nennenswerte Kohäsion aufweist und eine größere hydraulische Durchlässigkeit besitzt, wird statt des Verlustes der Sicherheit gegen Aufschwimmen der *Verlust der Sicherheit gegen Hydraulischen Grundbruch* maßgebend.

Bei größerer hydraulischer Durchlässigkeit der Deckschicht wird sich bei entsprechendem hydraulischem Gradienten eine Durchströmung der Deckschicht einstellen. Im Grenzzustand heben sich die nach oben gerichteten Strömungskräfte und die Gewichtskraft des unter Auftrieb stehenden Bodenkörpers auf: der hydraulische Grundbruch tritt ein. Bei weiter vergrößerten Strömungskräften, werden die Bodenkörner vom strömenden Wasser mitgerissen. Die hierdurch bedingte Auflockerung des Bodens kann die Durchlässigkeit des Bodens lokal vergrößern. Im Folgenden kann sich in der Deckschicht eine Röhre mit frei durchströmendem Wasser entwickeln, die sich im Untergrund unter dem Deich fortsetzen kann, wie es für die *Rückschreitende Erosion* im Abschnitt 7.4 beschrieben ist.

Für den Nachweis der Sicherheit gegen Hydraulischen Grundbruch nach aktuellen Baugrund-Normen DIN 1054:2010-12 sowie DIN EN 1997-1: 2009-09 mit DIN EN 1997-1/NA:2010-12 wird eine aufwärts gerichtete Durchströmung des Bodens vorausgesetzt. Bei Flussdeichen ohne gering durchlässige Deckschicht im Deichuntergrund wird die Durchströmung des Deichuntergrundes eine überwiegend horizontale Richtung aufweisen. Daher ist fallweise zu prüfen, inwieweit die Randbedingungen für einen Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch erfüllt sind. Andernfalls kann der im Modell implementierte Mechanismus der Rückschreitenden Erosion (siehe Abschnitt 7.4) die horizontale Durchströmung des Deichuntergrundes ausreichend berücksichtigen.

In dem hier entwickelten Modell wird das Vorhandensein einer gering durchlässigen Deckschicht angenommen und der Mechanismus des Hydraulischen Grundbruches nicht untersucht. Für die Weiterentwicklung des hier beschriebenen Modells ist für den Fall des Fehlens einer gering durchlässigen Deckschicht im Deichhinterland der Mechanismus des hydraulischen Grundbruches einzuführen.

#### 9.4.5 Wellenüberschlag

Selbst wenn die Wasserspiegelhöhe noch unterhalb des Niveaus der Deichkrone ansteht, kann das infolge von Wellen überlaufende Wasser zu einem Versagen des Deiches beitragen. Voraussetzung hierfür ist der Einfluss des Windes und andere Randbedingungen (siehe auch Abschnitt 5.1), um die Entstehung entsprechender Wellen zu ermöglichen. Die derzeit einzigen bekannten und gängigen Formeln zur Berechnung der Wellenüberlaufrate wurden ursprünglich für Seedeiche aufgestellt. Die hydraulischen Bedingungen weisen für Seedeiche jedoch deutliche Unterschiede zu den Bedingungen für Flussdeiche auf [SILVA ET AL. 2009]. Um den Einfluss von Wind und Wellen auf das Versagen von Flussdeichen abzuschätzen, ist daher die Entwicklung bzw. Anpassung geeigneter Modelle notwendig, bevor diese in das vorliegende Modell implementiert werden können.

#### 9.4.6 Deichverteidigungsmaßnahmen und weitere Einflussgrößen

In Abschnitt 7.8 wurde am Beispiel von Deichverteidigungsmaßnahmen aufgezeigt, welche Schwierigkeiten bei der Berücksichtigung von Prozessen bestehen, die durch nicht quantifizierbare Einflüsse (im obigen Beispiel das Entscheiden und Handeln von Menschen) maßgeblich gesteuert werden. Darüber hinaus sind weitere Einflussgrößen vorstellbar, die solchen Einschränkungen unterliegen. Beispielsweise sind Vorschädigungen eines Deiches z. B. durch Wühltierbefall oder durch einen schlechten Zustand der Grasnarbe nur schwer zu quantifizieren.

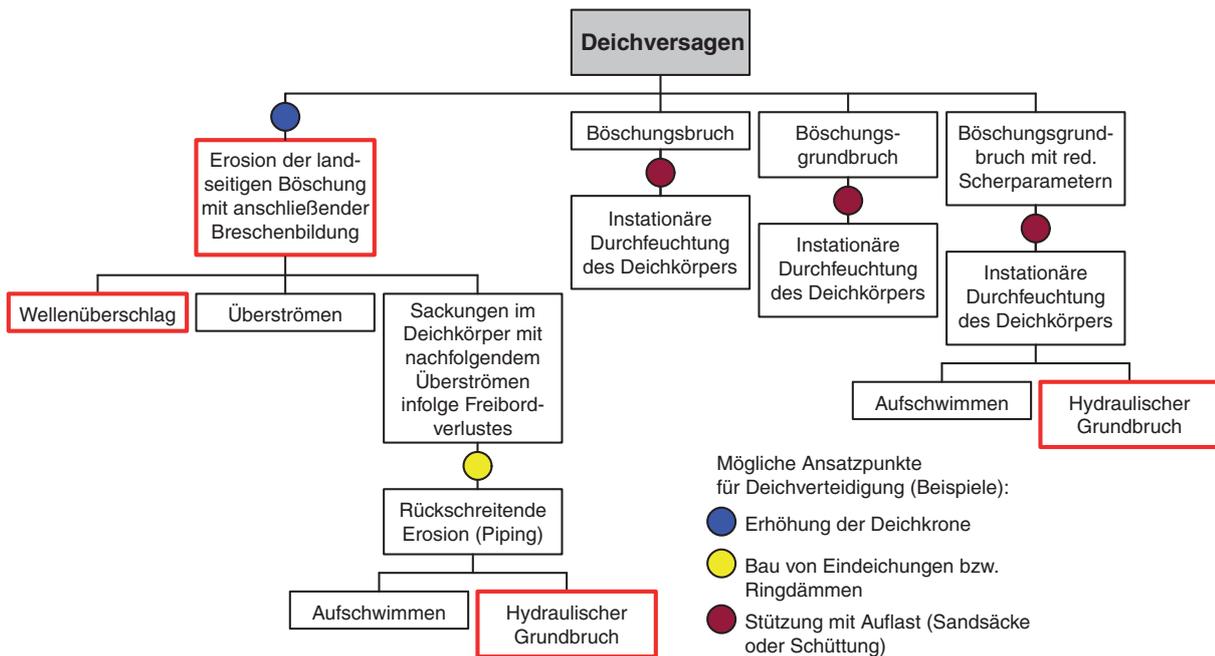
Das Problem der exakten Beschreibung solcher Einflussgrößen kann mit sogenannten Black-Box-Modellen umgangen werden, in denen die Eigenschaften, die Einwirkungen sowie die Reaktionen eines Systems berücksichtigt werden, jedoch nicht die einzelnen zu den Reaktionen führenden Prozesse. HEYER (2010) wendet beispielsweise das Verfahren der logistischen Regression für die Zuverlässigkeitsbewertung von Flussdeichen an. Hierbei werden Parametersätze für einzelne Deichabschnitte zusammengestellt und das Logit-Modell anhand der resultierenden Reaktion der Response-Variablen kalibriert. Die jeweiligen Parameter können als kardinale (quantitative) ebenso wie als kategoriale (qualitative) Einflussgrößen berücksichtigt werden. HEYER (2010) berücksichtigt in dem Modell unter anderem biologische Einflussgrößen auf das Deichversagen wie Wühltierbefall, Baumbewuchs oder den Zustand der Grasnarbe.

Als Ausblick soll die Idee genannt werden, das hier vorgestellte Modell mit einem Black-Box-Modell zu koppeln, um bestenfalls den Einfluss der bisher nicht berücksichtigten kategorialen Einflussgrößen benennen zu können.

**9.4.7 Ausblick auf einen erweiterten Fehlerbaum**

Die hier zusammengetragenen Erweiterungen sind als Vorschlag für weiteren Forschungsbedarf in einen *erweiterten Fehlerbaum für Flussdeiche* eingefügt (siehe Bild 9.2). Maßnahmen zur Deichverteidigung im Hochwasserfall sind im Fehlerbaum an entsprechender Stelle mit Punkten gekennzeichnet, erweiterte Versagensmechanismen sind im Fehlerbaum mit einer roten Umrandung markiert.

Mit der Erweiterung des Fehlerbaumes für Flussdeiche kann die Unsicherheit von Aussagen zur Versagenswahrscheinlichkeit zunehmend reduziert werden. Letztlich ist es hiermit möglich, die probabilistische Bewertung von Flussdeichen weiter zu etablieren und deren Akzeptanz zu verbessern.



**Bild 9.2:** Erweiterter Fehlerbaum mit möglichen Ansatzpunkten für Deichverteidigungsmaßnahmen (farbige Punkte) sowie zusätzlichen Versagensmechanismen (rot umrandet) (Ausblick)

## 10 Literaturverzeichnis

- ANG, A. H.-S. & TANG, W. H. (1975): Probability Concepts in Engineering Planning and Design. Vol. 1: Basic principles. Verlag John Wiley & Sons, Chichester.
- ANG, A. H.-S. & TANG, W. H. (1984): Probability Concepts in Engineering Planning and Design. Vol. 2: Decision, Risk and Reliability. Verlag John Wiley & Sons, Chichester.
- BACHMANN, D.; HUBER, N. P.; SCHÜTTRUMPF, H. (2008): Fragility Curve Calculation for Technical Flood Protection Measures by the Monte Carlo Analysis. In: Research and Practice; Proceedings of the European Conference on Flood Risk Management Research into Practice (Floodrisk 2008), Oxford.
- BAECHER, G. B. & CHRISTIAN, J. T. (2003): Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. Verlag John Wiley & Sons, Chichester.
- BAW (2011): Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
- BISHOP, A. W. (1954): The Use of the Slip Circle in the Analysis of Slopes. In: Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes. Vol. 1, Stockholm.
- BRAUNS, J. & BIEBERSTEIN, A. (2003): Über Nutz und Frommen von Folien als Notsicherung von Flussdeichen. Symposium *Notsicherung von Dämmen und Deichen*, Universität Siegen.
- BRAUNS, J. (1985): Erosionsverhalten geschichteten Bodens bei horizontaler Durchströmung. In: Wasserwirtschaft 75, Nr. 10.
- BRAUNS, J. (1999): Verhalten zeitweise eingestauter Dämme und Überwachung ihres Verhaltens. 6. Erfahrungsaustausch – Betrieb überörtlicher Hochwasserrückhaltebecken, Schwäbisch-Gmünd.

- BRAUNS, J.; BIEBERSTEIN, A.; SCHEUERMANN, A.; REITH, H. (2003): Folien als Notsicherung bei durchsickerten Deichen – nützlich oder vergeblich? In: Wasserwirtschaft 93, Nr. 3.
- BRETSCHNEIDER, C. L. (1954): Generation of Wind Waves over a shallow Bottom. Technical Memorandum, Beach Erosion Board. Corps of Engineers, US Army Corps of Engineers, No. 51.
- BÜCKER, M. (1998): Breschenbildung in Erddämmen – Auswertung historischer Dambrüche und Zusammenstellung wesentlicher Einflussparameter, Literaturstudie. Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe.
- BURY, K. V. & KREUZER, H. (1985): The Assessment of the Failure Probability for a Gravity Dam. Water Power and Dam Construction.
- BURY, K. V. & KREUZER, H. (1986): The Assessment of Risk for a Gravity Dam. Water Power and Dam Construction.
- CARMAN, P. C. (1938): The Determination of the specific Surface of Powders. In: Journal of the Indian Chemical Society, Vol. 57, London.
- CARMAN, P. C. (1956): Flow of Gases through porous Media. Butterworth Scientific Publications, London.
- CARRIER, W. D. (2003): Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. In: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 129, No.11.
- CARSEL, R. F.; PARRISCH, R. S. (1988): Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resources Research, Vol. 24, No. 5.
- CASAGRANDE, A. (1937): Seepage through Dams. Journal of the New England Water Works Association, Vol. 51 No. 2.
- CHINNARASRI, C.; TINGSANCHALI, T.; WEESAKUL, S.; WONGWISES, S. (2003): Flow Patterns and Damage of Dike Overtopping. International Journal of Sediment Research, Vol. 18, No. 4.
- CODDINGTON, P. D. (1994): analysis of Random Number Generators Using Monte Carlo Simulation. In: International Journal of Modern Physics/C, Vol. 5, No. 3.

- COLEMAN, S. E.; ANDREWS, D. P.; WEBBY, M. G. (2002): Overtopping Breaching of Noncohesive Homogeneous Embankments. In: ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, Vol 128, No. 9.
- CULLEN, A. C.; FREY, H. C. (1999): Probabilistic Techniques in Exposure assessment – A Handbook for Dealing with Variability and Uncertainty in Models and Inputs. Plenum Press, New York.
- CUR (1990): Probabilistic Design of Flood Defences. Stichting Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (CUR report 141, TAW), Gouda.
- CYGANIEWICZ, J. M. & SMART, J. D. (2000): U.S. Bureau of Reclamation's Use of Risk Analysis and Risk Assessment in Dam Safety Decision Making. In: International Commission on Large Dams (ICOLD), Proceedings of Twentieth Congress on Large Dams, Vol. 1 Question 76, Peking.
- DARBRE, G. R. (2000): Probabilistic Safety Assessment of Dams. In: International Commission on Large Dams (ICOLD), Proceedings of Twentieth Congress on Large Dams, Vol. 1 Question 76, Peking.
- DAVIDENKOFF, R. (1970): Unterläufigkeit von Stauwerken. Werner-Verlag, Düsseldorf.
- DE GROOT, M. B. (2001): Geotechnical Aspects. In: Oumeraci et al.: Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters. Verlag Balkema, Rotterdam.
- DE WIT, J. M.; SELLMELJER, J. B.; PENNING, A. (1981): Laboratory Testing on Piping. In: Proc. 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Engineering, Paper 3/29, Stockholm.
- DIN 1054:2005-01: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 1054:2010-12: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 1055-100:2001-03: Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln. Beuth-Verlag, Berlin.

- DIN 18130-1:1998-05: Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts, Teil 1: Laborversuche. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 18130-2:2011-07 (ENTWURF): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 2: Feldversuche. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 19700-10:2004-07: Stauanlagen – Teil 10: Gemeinsame Festlegungen. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 19712:1997-11: Flussdeiche. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 19712:2013-01: Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 25424-1:1981-09: Fehlerbaumanalyse: Methode und Bildzeichen. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 25424-2:1990-04: Fehlerbaumanalyse: Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 4020:2010-12: Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 4049-1:1992-12: Hydrologie: Grundbegriffe. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 4084:1981-07: Baugrund: Gelände- und Böschungsbruchberechnungen. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 4084:2009-01: Baugrund – Geländebruchberechnungen. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN 1997-1:2009-09: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1:2004. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN 1997-1/NA:2010-12: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln; Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN 1997-2:2010-10: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds; Deutsche Fassung EN 1997-2:2007+AC:2010. Beuth-Verlag, Berlin.

- DIN EN 61025:2007-08: Fehlzustandsbaumanalyse (IEC 61025:2006). Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 22475-1:2007-01: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen – Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung (ISO 22475-1:2006); Deutsche Fassung EN ISO 22475-1:2006. Beuth-Verlag, Berlin.
- DUNCAN, J. M. (1996): State of the Art: Limit Equilibrium and finite-Element Analysis of Slopes. In: Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No. 7.
- DVWK (1997): Merkblatt 246: Freibordbemessung an Stauanlagen. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V., Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- DVWK (1999A): Merkblatt 251: Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V., Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- DVWK (1999B): Regeln zur Wasserwirtschaft 136: Bodenkundliche Untersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten zur Standortcharakterisierung – Teil II: Ableitung zum Wasser- und Lufthaushalt von Böden. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V., Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- DWA (2011): Merkblatt DWA-M 507-1: Deiche an Fließgewässern, Teil 1: Planung, Bau und Betrieb. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.
- EAU (2004): Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“: Häfen und Wasserstraßen. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- ENDLICHER, W.; Gerstengarbe, F-W. (2007): Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke, Ausblicke. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e. V., Potsdam.
- ERB, C. (1972): Einflüsse der Sickerströmungen auf die Standsicherheit von Deichen und Dämmen. Beitrag zur Bodenmechanik und zum Grundbau. Sammelveröffentlichung aus Anlass des 75. Geburtstages von Prof. A. Streck. Eigenverlag V. Rizkallah, Hannover.

- FÄH, R. (1997): Numerische Simulation der Strömung in offenen Gerinnen mit beweglicher Sohle. Mitteilungen 153 der VAW Technische Hochschule Zürich.
- FENTON, G. A. & GRIFFITHS, D. V. (1993): Statistics of Block Conductivity Through a Simple bounded Stochastic Medium. In: Water Resources Research, Vol. 29, No. 6.
- FENTON, G. A. & VANMARCKE, E. H. (1991): Spatial Variation in Liquefaction Risk Assessment. In: Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Congress, Boulder, Colorado.
- FOSTER, M. A. & FELL, R. (1999): A Framework for Estimating the Probability of Failure of Embankment Dams by Internal Erosion and Piping Using Event Tree Methods. Report 377, The University of New South Wales, Sydney.
- FOSTER, M. A. & FELL, R. (2000): Use of Event Trees to Estimate the Probability of Failure of Embankment Dams by Internal Erosion and Piping. In: International Commission on Large Dams (ICOLD), Proceedings of Twentieth Congress on Large Dams, Vol. 1 Question 76, Peking.
- FREDLUND, D. G. & RAHARDJO, H. (1993): Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons Inc., New York.
- HACKING, I. (1975): The Emergence of Probability: A Philosophical Study of Early Ideas about Probability, Induction and Statistical Inference. Cambridge University Press, Cambridge.
- HALL, J.; DAWSON, R.; SAYERS, P.; ROSU, C.; CHATTERTON, J.; DEAKIN, R. (2003): A Methodology for National-Scale Flood Risk Assessment. In: Water & Maritime Engineering, Vol. 156, No. 3.
- HARTEVELD, C. (2008): A playful approach to flood defence. In: Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Flood Defence: Managing Flood Risk, Reliability and Vulnerability, Toronto.
- HARTEVELD, C., GUIMARÃES, R., MAYER, I. S., BIDARRA, R. (2010): Balancing Play, Meaning and Reality: The Design Philosophy of LEVEE PATROLLER. In: Simulating and Gaming, Vol. 41, No. 3.
- HARTFORD, D. & BAECHER, G. B. (2004): Risk and Uncertainty in Dam Safety. Thomas Telford Ltd., London.

- HASELSTEINER, R. (2007): Hochwasserschutzdeiche an Fließgewässern und ihre Durchsickerung. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft Bd. 111, Institut für Wasser und Umwelt, TU München.
- HAUGH, M. (2004): Monte Carlo Simulation. IEOR E4703.  
<http://www.columbia.edu/~mh2078/MCS04.html> (zum letzten Mal aufgerufen: April 2011).
- HAZEN, A. (1893): Some Physical Properties of Sands and Gravels with Special Reference to their Use in Filtration. 24<sup>th</sup> Annual Report, Massachusetts State Bureau of Health, Publ. Doc 34.
- HEINZ, J. (2001): Sedimentary Geology of Glacial and Periglacial Gravel Bodies (SW-Germany): Dynamic Stratigraphy and Aquifer-Sedimentology. Institut und Museum für Geologie und Paläontologie der Universität Tübingen.
- Heyer, T. (2010): Zuverlässigkeitsbewertung von Flussdeichen nach dem Verfahren der logistischen Regression. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Nr. 40, Dresden.
- HÖEG, K.; LØVOLL, A.; VASKINN, K. A. (2004): Stability and breaching of embankment dams: field tests on 6 meter high dams. In: The International Journal of Hydropower and Dams, Issue 5.
- HORLACHER, H.-B.; BIELAGK, U.; HEYER, T. (2005): Forschungsbericht 2005/09: Analyse der Deichbrüche an Elbe und Mulde während des Hochwassers 2002 im Bereich Sachsen. Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen, Dresden.
- HUBER, N. P. (2008): Probabilistische Modellierung von Versagensprozessen bei Staudämmen. Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen.
- IDEL, K.H. (1988): Sicherheitsuntersuchungen auf probabilistischer Grundlage für Staudämme: Abschlussbericht. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, Essen.
- IPCC (2007): Climate change 2007. The scientific basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Cambridge University Press, Cambridge.
- KÄRCHER, K. ET AL. (2001): Parameterstudie zur Größe der Wasserdrucke unter Deichen bei Hochwässern. In: Geotechnik 24, Nr. 3.

- KÄRCHER, K.; GOTTHEIL, K. M.; KLAIBER, D.; SANTO, J. (1997): Zur Standsicherheit, Auftriebssicherheit und Erosionsstabilität von Flussdeichen. In: *Geotechnik* 20, Nr. 4.
- KAST, K. & BIEBERSTEIN, A. (1997): Detection and assessment of dambreak-scenarios. *Dams and Safety Management at Downstream Valleys*, Balkema, Rotterdam.
- KOHNO, I.; NISHIGAKI, M.; TAKESHITA, Y. (1987): Levee failure caused by seepage and preventive measures. In: *Journal of Natural Disaster Science*, Vol. 9, No. 2, Kyoto.
- KORTENHAUS, A. & OUMERACI, H. (2002): Probabilistische Bemessungsmethoden für Seedeiche. Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Bericht Nr. 877. Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig
- KORTENHAUS, A. (2003): Probabilistische Methoden für Nordseedeiche. Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig.
- KOZENY, J. (1927): Über die kapillare Leitung des Wassers im Boden. Sitzungsbericht der Akademie der Wissenschaften 136, Abt. IIa, Wien.
- KOZENY, J. (1931): Grundwasserbewegung bei freiem Spiegel, Fluss und Kanalversickerung. In: *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, Nr. 3.
- KRÄNKL, G. & PASSIG, G. (1989): Donauhochwasser 1988 – Ein Jahr danach. In: *Bauintern* Nr. 3/1989.
- KREY, H. (1926): *Erddruck, Erdwiderstand und Tragfähigkeit des Baugrundes*. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- LFU (2005): *Flussdeiche: Überwachung und Verteidigung*. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Karlsruhe.
- LFW (2003): *Hinweise zur Deichverteidigung und Deichsicherung*. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München.
- LOUDON, A. G. (1952): The computation of permeability from simple soil tests. In: *Géotechnique*, Vol. 3.

- LUBW/LFU (2006): KLIWA Klimaveränderung und Wasserwirtschaft, Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft in Süddeutschland. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Karlsruhe und Augsburg.
- MARSAGLIA, G. & ZAMAN, A. (1991): A New Class of Random Number Generators. In: *Annals of Applied Probability*, Vol. 3.
- MERZ, B. (2006): Hochwasserrisiken: Grenzen und Möglichkeiten der Risikoabschätzung. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), Stuttgart.
- MOHAMED, M. A. A.; SAMUELS, P. G.; MORRIS, M. W.; GHATAORA, G. S. (2002): Improving the Accuracy of Prediction of Breach Formation through Embankment Dams and flood Embankments. In: *River Flow 2002, International Conference on Fluvial Hydraulics*.
- MÖLLMANN, A. F. D. (2009): Probabilistische Untersuchung von Hochwasserschutzdeichen mit analytischen Verfahren und der Finite-Elemente-Methode. Institut für Geotechnik, Band 64, Universität Stuttgart.
- MORGAN, M. G. & HENRION, M. (1990): *Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*. Cambridge University Press.
- MORRIS, M. W. (2005): *IMPACT – Investigation of Extreme Flood Processes and Uncertainty: Final Technical Report*. EVG1-CT-2001-00037.
- MORRIS, M. W. (2005): *IMPACT: Investigation of Extreme Flood Processes and Uncertainty. Final Technical Report*, Wallingford.
- MÜLLER-KIRCHENBAUER, H. (1978): Zum zeitlichen Verlauf der rückschreitenden Erosion in geschichtetem Untergrund unter Dämmen und Stauanlagen. Talsperrensymposium, München.
- NIEMEYER, M. (2007): Einfluss der Breschenbildung auf die Flutwellenausbreitung bei Damm- und Deichbrüchen. Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen.
- OUMERACI, H. ET AL. (2001): *Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters*. Verlag Balkema, Rotterdam.

- OMERACI, H.; SCHÜTTRUMPF, H.; BLECK, M. (1999): Untersuchungen zur Ermittlung der mittleren Wellenüberlauftrate ohne Freibord bei Stromdeichen. Berichte Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI), Technische Universität Braunschweig, Nr. 842, Braunschweig.
- PARR, N. M. & CULLEN, N. (1988): Risk Management and Reservoir Maintenance. In: Journal of the Institute of Water and Environmental Management (IWEM), London.
- PERZLMAIER, S. & HASELSTEINER, R. (2006): Die prozessorientierte Beurteilung der hydrodynamischen Bodendeformation. In: Geotechnik 29, Nr. 4.
- PHOON, K.-K. & KULHAWY, F. H. (1999): Characterization of Geotechnical Variability. In: Canadian Geotechnical Journal, Vol. 36, No. 4.
- PICKERT, G.; WEITBRECHT, V.; BIEBERSTEIN, A. (2011): Breaching of Overtopped River Embankments Controlled by Apparent Cohesion. Journal of Hydraulic Research, Vol. 49, No. 2.
- PLATE, E. J. & DUCKSTEIN, L. (1987): Reliability in Hydraulic Design. In: Duckstein, L. & Plate, E. J.: Engineering Reliability and Risk in Water Resources, NATO ASI Series E: Applied Sciences No. 124, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht.
- PLATE, E. J. (1986): Trends in Stochastic Hydraulics: Stochastic Design for Water Quality of a River. In: ALBERTSON, M. L. & PAPADAKIS, C. N.: Megatrends in Hydraulic Engineering, Colorado.
- PLATE, E. J. (1992): Stochastic Design in Hydraulics: Concepts for a Broader Application. In: KUO, J.-T. & LIN, G.-F.: Stochastic Hydraulics '92, Proceedings of Sixth IAHR International Symposium on Stochastic Hydraulics, Dept. Civil Engineering, National Taiwan University, Taipei.
- PLATE, E. J. (1993): Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- POHL, R. (2001): Neue Aspekte der Freibordbemessung an Stauanlagen. In: Wasser und Abfall, Heft 9.
- PRESS, H. W.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. (1992): Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing. 2<sup>nd</sup> edition. Verlag Cambridge University Press, Cambridge.

- RAUBER, R. M.; WALSCH, J. E.; CHARLEVOIX, D. J. (2005): Severe and Hazardous Weather. Kendall Hunt Publishing, Dubuque/Iowa.
- RICHTLINIE 2007/60/EG (2007): Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (EG-HWRM-RL). Amtsblatt der Europäischen Union L288/27.
- RIZA (2001): Room for the Rhine in The Netherlands. Summary of research results. RIZA report 2001.033, Arnhem.
- RP DARMSTADT (2010): Instruktion zur Deichverteidigung, Darmstadt.
- SAUCKE, U. (2004): Bewertung der Erosionsanfälligkeit strukturierter körniger Sedimente. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, 162.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg.
- SCHEUERMANN, A. (2005): Instationäre Durchfeuchtung quasi-homogener Erddeiche. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, 164.
- SCHMERTMANN, J. H. (2000): The No-Filter Factor of Safety Against Piping Through Sands. In: Judgment and Innovation: The Heritage and Future of the Geotechnical Engineering Profession, ASCE, Reston.
- SCHMIDT, L; SCHLICK, CH. M.; GROSCHE, J. (2008): Ergonomie und Mensch-Maschine-Systeme. Springer-Verlag, Berlin.
- SCHNEIDER, H.; SCHULER, U.; KAST, K.; BRAUNS, J. (1997): Bewertung der geotechnischen Sicherheit von Hochwasserschutzdeichen und Grundlagen zur Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen. Mitteilungen Abteilung Erddammbau und Deponiebau am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Heft 7, Universität Karlsruhe.
- SCHNEIDER, J. (1996): Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen. Teubner-Verlag, Stuttgart.
- SCHNITTER, G. & ZELLER, J. (1957): Sickerströmungen als Folge von Stauspiegelschwankungen in Erddämmen. Schweizerische Bauzeitung 75, Nr. 52.

- SCHÖNHARDT, M. (2005): Geostatistische Bearbeitung unsicherer Baugrunddaten zur Berücksichtigung in Sicherheitsnachweisen des Erd- und Grundbaus. Schriftenreihe Geotechnik, Heft 15, Bauhaus-Universität Weimar.
- SCHUPPENER, B. (2010): Das Normenhandbuch zu DIN EN 1997-1 und DIN 1054. In: Tagungshandbuch 7. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen TAE, Stuttgart.
- SELLMEIJER, J. B. (1988): On the Mechanism of Piping under Impervious Structures. LGM-Medelingen Delft Geotechnics, Delft.
- SILVA, W.; KUIJPER, B.; HUBER, N. P.; SCHÜTTRUMPF, H. (2009): Risikoanalyse für die grenzüberschreitenden Deichringe am Niederrhein. Phasen II und III: Hauptbericht. Deutsch Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser, Aachen und Lelystad.
- SILVA, W.; REUTER, C. ET AL. (2006): Risikoanalyse für die grenzüberschreitenden Deichringe am Niederrhein. Phase I: Entwicklung einer gemeinsamen Untersuchungsmethode. Deutsch Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser, Aachen und Arnhem.
- SZÉCHY, K. (1969): Tunnelbau. Springer-Verlag, Wien.
- TAW (1999): Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, TAW, Delft.
- TAW (2000): Technical Report on Water Retaining Structures. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), Den Haag.
- TINNEY, E. R. & HSU, H. Y. (1961): Mechanics of Washout of an Erodible Fuse Plug. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 87, No. 3.
- VAN DER MEER, J. W.; BERNARDINI, P.; STEENDAM, G. J.; AKKERMAN, G. J.; HOFFMANS, G. (2007): The Wave Overtopping Simulator in Action. In: FRANCO, L.; TOMASICCHIO, G. R.; LAMBERTI, A.: Coastal Structures 2007. Proceedings of the 5<sup>th</sup> Coastal Structures International Conference, CST07, Venedig.
- VAN GENUCHTEN, M. TH. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, No. 5, Madison.

- VAN GENUCHTEN, M. TH.; NIELSEN, D. R. (1985): On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Annales Geophysicae*, Vol. 3, No. 5.
- VAN LOON, L. (2001): Proven Strength for Piping. In: *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul*. Verlag Balkema, Rotterdam.
- VICK, S. G. & BROMWELL, L. F. (1989): Risk Analysis for Dam Design in Karst. In: *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 115, No. 6.
- VICK, S. G. & STEWART, R. A. (1996): Risk Analysis in Dam Safety Practice. In: *Uncertainty in the Geologic Environment: From Theory to Practice. Proceedings of Uncertainty '96 (ASCE)*, New York.
- VISSER, P. J. (1998): Breach Growth in Sand-Dikes. Report 98-1, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Hydraulic and Offshore Engineering Section, Delft.
- VOROGUSHYN, S. (2009): Analysis of flood hazard under consideration of dike breaches. Shaker Verlag, Aachen.
- VROUWENFELDER, A. C. W. M. & STEENBERGEN, H. M. G. M. (2003): Theoriehandleiding PC-Ring, Versie 3.0 – Deel B: Statistische modellen. Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO), Delft.
- VROUWENFELDER, A. C. W. M. & WUBS, A. J. (1985): Een probabilistisch dijkontwerp: Voorbeeldberekening. Technical Report, TNO, Delft.
- WASH-1400 (1975): Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U. S. Commercial Nuclear Power Plants. U. S. Nuclear Regulatory Commission NUREG 75/014.
- WEIJERS, J. B. A. & SELMEIJER, J. B. (1993): A New Model to Deal With the Piping Mechanism. In: BRAUNS, J.; SCHULER, U.; HEIBAUM, M.: *Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering. Proceedings of the First International Conference "Geo-Filters" Karlsruhe*, Verlag Balkema, Rotterdam.
- WITT, K. J. & BRAUNS, J. (1984): The Influence of Parameter Variation on the Reliability of Filters. In: *Proceedings of the International Conference on Safety of Dams, Coimbra*, Vol. 1. Verlag Balkema, Rotterdam.

- WITTMANN, L. (1981): Die analytische Ermittlung der Durchlässigkeit rolliger Erdstoffe unter besonderer Berücksichtigung des nicht-linearen Widerstandsgesetzes der Porenströmung. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, 87.
- ZESCH, R.; SAUCKE, U.; BIEBERSTEIN, A. (2007a): Probabilistische Bemessung von Flussdeichen. In: Hochwasserschutz und Katastrophenmanagement, Ernst und Sohn Special 6, Berlin.
- ZESCH, R.; SAUCKE, U.; KAST, K.; BIEBERSTEIN, A. (2007b): Versagenswahrscheinlichkeit von Flussdeichen unter Berücksichtigung geotechnischer Aspekte – Anwendung auf Deichstrecken mit Schwachstellen. In: KÖNGETER, J.: 37. Internationales Wasserbau-Symposium Aachen (IWASA). Sicherheit und Risiko wasserbaulicher Anlagen.
- ZESCH, R.; SAUCKE, U.; SCHEUERMANN, A.; BIEBERSTEIN, A. (2008): Instationäre Durchfeuchtung von Deichen – Analytische Berechnungsmethode für die operationelle Anwendung. In: Grundlagen und Anwendungen der Geomechanik, GKK 08 – Geomechanik Kolloquium Karlsruhe, Teil 2 – Bodenmechanik und Grundbau. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, 170.

## 11 Bildverzeichnis

	Seite
Bild 3.1: Zusammensetzung des Freibordes nach DIN 19712:2013-01 (ENTWURF) .....	12
Bild 4.1: Deichprofil mit vorab festgelegten Messpunkten (schwarz) und mit zusätzlichem Messpunkt (rot) bei Abweichung vom Soll-Profil .....	28
Bild 4.2: Informationen aus zwei Bodenaufschlüssen mit möglichem Schichtverlauf zwischen den Aufschlussstellen (schematisch) .....	29
Bild 5.1: Beispiel einer Gefährdungskurve für den Wasserstand mit parametrisierter Funktion (hier: zweiparametrische Exponentialverteilung); mit linearer Darstellung der Jährlichkeit (oben) sowie mit logarithmischer Darstellung (unten).....	35
Bild 5.2: Typischer „horizontaler Schichtaufbau“ fluviatiler Sedimente [HEINZ 2001] .....	37
Bild 6.1: Durchschnittsmenge zweier Ereignisse.....	47
Bild 6.2: Vereinigungsmenge zweier Ereignisse.....	47
Bild 6.3: Fehlerbaum für Flussdeiche nach DIN 25424-2, reduziert auf drei Ereignisebenen.....	50
Bild 6.4: Fehlerbaum für Flussdeiche .....	51
Bild 6.5: Programmablaufdiagramm zur Bestimmung von Versagenswahrscheinlichkeiten für den Fehlerbaum für Flussdeiche....	54
Bild 7.1: Definitionsskizze zur Versagensursache <i>Überströmen der Deichkrone</i> .....	58
Bild 7.2: Prinzipskizze zum <i>Verlust der Sicherheit gegen Aufschwimmen</i> .....	59
Bild 7.3: Nachweis zur Unterspülung nach den Vorgehensweisen von <i>Bligh</i> (linke Seite) sowie <i>Lane</i> (rechte Seite), Prinzipskizzen nach SAUCKE (2004) .....	62
Bild 7.4: Prinzipskizze zum Versagensmechanismus <i>Rückschreitende Erosion (Piping)</i> .....	65
Bild 7.5: Prinzipskizze zum Versagensmechanismus <i>Sackungen im Deichkörper</i> .....	67

Bild 7.6:	Einfluss der Form des Sackungstrichters auf den Sackungsfaktor bei flächentreuer Verformung im Schnitt (gelb markiert): a) senkrechte Bruchfugen, b) unter dem Erddruckwinkel geneigte Bruchfuge (schematisch) .....	69
Bild 7.7:	Abhängigkeit des Sackungsfaktors $\zeta$ von der Geometrie des Erosionshohlraumes sowie der Form des Sackungstrichters, dargestellt für Reibungswinkel des überlagernden Bodens von $\varphi = 25^\circ$ , $\varphi = 30^\circ$ und $\varphi = 35^\circ$ .....	70
Bild 7.8:	Modell für die instationäre Durchfeuchtung eines mit Erdstoff gefüllten Rohres nach SCHEUERMANN (2005) .....	75
Bild 7.9:	Prinzipskizze zum Lösungsansatz nach Brauns für die instationäre Durchfeuchtung nach BRAUNS (1999) .....	76
Bild 7.10:	Typische Wasserstandsganglinie eines Hochwasserereignisses mit Unterscheidung in Aufstau-, Einstau- und Abstauphase.....	78
Bild 7.11:	Zusammenhang zwischen Wasserstandsganglinie (oben links) und Ausbreitung der Durchfeuchtungsfront im homogenen Deichkörper (unten rechts); Darstellung der Ergebnisse von analytischen sowie numerischen Berechnungen .....	82
Bild 7.12:	Skizze zur Bestimmung des Porenwasserdruckes in der Gleitfuge nach DIN 4084 .....	85
Bild 7.13:	Prinzipskizze zum Böschungsbruch mit Gleitfuge durch den landseitigen Deichfußpunkt mit beispielhafter Darstellung einer möglichen Gleitfuge.....	87
Bild 7.14:	Prinzipskizze zum Böschungsbruch mit tiefliegender Gleitfuge (Böschungsgrundbruch) mit beispielhafter Darstellung einer möglichen Gleitfuge.....	88
Bild 7.15:	Prinzipskizze zum Böschungsgrundbruch mit reduzierten Scherparametern (in der eingefärbten Fläche der gering durchlässigen Deckschicht) mit beispielhafter Darstellung einer möglichen Gleitfuge.....	89
Bild 7.16:	Sicherung mittels Eindeichung um einen Wasseraustritt: Querschnitt (oben) und Draufsicht (unten), aus LFW (2003) .....	91
Bild 7.17:	Beispiele für Deichverteidigung durch eine Aufhöhung der Deichkrone mit Sandsäcken (oben) und Erdschüttung (unten), aus LFW (2003) .....	91
Bild 7.18:	Einflussfaktoren auf menschliches Handeln im Kontext der Deichverteidigung .....	94
Bild 7.19:	Fehlerbaum für Flussdeiche mit möglichen Ansatzpunkten für Deichverteidigungsmaßnahmen, in Anlehnung an ZESCH ET AL. (2007b) .....	95

Bild 8.1:	Geometrie und Untergrundaufbau des Beispieldeiches (nicht maßstäblich) .....	100
Bild 8.2:	<i>Fehlerbaum für Flussdeiche</i> mit Angabe Versagenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Mechanismen für die Ausgangssituation auf der Grundlage von 1 Mio. Rechendurchläufen.....	105
Bild 8.3:	Darstellung der Versagensmechanismen mit ihren Versagenswahrscheinlichkeiten für die Ausgangssituation des Beispieldeiches im Balkendiagramm mit logarithmischem Maßstab sowie der zugehörigen Äste im Fehlerbaum .....	106
Bild 8.4:	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für die Durchlässigkeit des Deichmaterials: Lognormalverteilung mit Mittelwert $\mu = 8,5e-5$ und unterschiedlichen Variationskoeffizienten $c_V$ .....	108
Bild 8.5:	Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeiten aufgrund unterschiedlicher Variationskoeffizienten für den Parameter Durchlässigkeit des Deichmaterials, Darstellung im Balkendiagramm mit logarithmischem Maßstab .....	109
Bild 8.6:	Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung für den Parameter Durchlässigkeit im Untergrund anhand vorgegebener Parameter (direkte Bestimmung der Durchlässigkeit): rote Kurve sowie nach Berechnung mit <i>Kozeny/Carman<sub>q</sub></i> (Bestimmung der Durchlässigkeit anhand der Korngrößenverteilung): blaues Histogramm .....	113
Bild 8.7:	Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung für die Variable $Z$ des Versagensmechanismus <i>Piping</i> (Versagen für $Z < 0$ ), Histogramm (blau): Simulationsergebnisse von 200.000 Rechendurchläufen, Linie (rot): Angepasste Funktion; Links: Bestimmung der Durchlässigkeit $k_f$ nach <i>Kozeny/Carman</i> (Parameter statistisch abhängig), Rechts: Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$ direkt angegeben (Parameter statistisch unabhängig) .....	114
Bild 8.8:	Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeiten mit unterschiedlichen Vorgehensweisen zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit: <i>direkte Angabe</i> oder Berechnung nach <i>Kozeny/Carman</i> ; Darstellung im Balkendiagramm mit logarithmischem Maßstab .....	118
Bild 8.9:	Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeiten aufgrund unterschiedlicher Berechnungsmethoden für den Mechanismus <i>Piping</i> , Darstellung im Balkendiagramm mit logarithmischem Maßstab.....	119
Bild 8.10:	Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeiten für die Betrachtung mit und ohne den Mechanismus <i>Sackungen im Deichkörper</i> , Darstellung im Balkendiagramm mit logarithmischem Maßstab .....	122

Bild 8.11:	Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeiten für die Betrachtung mit und ohne den Mechanismus <i>instationäre Durchfeuchtung</i> , Darstellung im Balkendiagramm mit logarithmischem Maßstab.....	124
Bild 8.12:	Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeiten für in den Abschnitten 8.2 bis 8.7 untersuchten Varianten, Darstellung im Balkendiagramm mit logarithmischem Maßstab .....	125
Bild 9.1:	Prinzipdarstellung Deich und Untergrund mit den im Modell verwendeten Parametern.....	132
Bild 9.2:	Erweiterter Fehlerbaum mit möglichen Ansatzpunkten für Deichverteidigungsmaßnahmen (farbige Punkte) sowie zusätzlichen Versagensmechanismen (rot umrandet) (Ausblick).....	142

## 12 Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 6.1: Rechenregeln für die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit nach KORTENHAUS (2003) .....	48
Tabelle 7.1: Zusammenstellung der im hier vorgestellten Modell nicht berücksichtigten Mechanismen .....	98
Tabelle 8.1: Geometrische Daten des Deiches .....	101
Tabelle 8.2: Materialeigenschaften des Deiches .....	102
Tabelle 8.3: Materialeigenschaften der gering durchlässigen Deckschicht .....	102
Tabelle 8.4: Materialeigenschaften des Aquifers .....	103
Tabelle 8.5: Zusätzliche allgemeine Parameter .....	103
Tabelle 8.6: Vergleich der Vorgehensweisen für die Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit und deren Auswirkungen auf den Versagensmechanismus <i>Piping</i> .....	116
Tabelle 9.1: Zuordnung der im Modell verwendeten Parameter zum jeweiligen Versagensmechanismus und in Abhängigkeit des Rechenverfahrens..	133